Vladimir Knapp
Petar Kulišić

NOVI IZVORI ENERGIJE

20590

0 000000 389174

ŠKOLSKA KNJIGA - ZAGREB

Urednica

BRANIMIRA VALIĆ

Recenzenti

dr HRVOJE POŽAR
dr JADRANKA VULETIN
dr DANILO FERETIĆ
dr MILOŠ ŠKORIĆ
dr IVAN PENZAR

Objavljivanje ovog sveučilišnog udžbenika odobrilo je Predsjedništvo Skupštine Sveučilišta u Zagrebu rješenjem broj 02-835/2-1982. od 21. studenog 1983.

Izdavačka radna organizacija ŠKOLSKA KNJIGA Zagreb, Masarykova 28 — Za izdavača dr JOSIP MALIĆ — Grafički urednik JOSIP JELIĆ — Crteže izradio DAVOR KLARIN — Lektor IVO MARTINČIĆ — Korekturu obavila Služba korekture „Školske knjige" — Tisak dovršen u siječnju 1985.

Nacionalna i sveučilišna biblioteka, Zagreb
Katalogizacija na izvoru:
620.93+621.039] (075.8)

KNAPP, Vladimir
Novi izvori energije / Vladimir Knapp, Petar Kulišić. — Zagreb : Školska knjiga, 1984. — XII, 344 str. : ilustr. , graf. prikazi ; 24 cm. — (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu = Manualia Universitatis studiorum Zagrabiensis)

Nakl. 2000 primj. — Bibliografija iza svakog poglavlja. — Predmetno kazalo.

Tisak BIROGRAFIKA, Subotica

Dr Vladimir Knapp
redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu
Dr Petar Kulišić
redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu

NOVI IZVORI ENERGIJE

Nuklearna energija fisije i fuzije i sunčana energija

KNJIŽNICA
ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA
ZAGREB - Unska 3

ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1985

K N J I Ž N I C A
FAKULTETA ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA - ZAGREB
Inv. br. 20590 Sign: 5129

20590

0000000389174

Sadržaj

Predgovor IX
Uvod 1

1. ENERGIJA I RAZVOJ 7

1.1. Procjene energetskih potreba 7

1.2. Veza potrošnje energije i dohotka 15

1.3. Energija u zemljama u razvoju 16

2. IZVORI ENERGIJE 21

2.1. Konvencionalni i nekonvencionalni izvori energije 21

2.2. Obnovljivi izvori energije 23

2.3. Rezerve ugljena, nafte i zemnog plina te potreba razvoja novih izvora 24

3. NOVI IZVORI ENERGIJE ZA BUDUĆNOST 29

3.1. Geotermička energija 29
3.1.1. Uvod 29
3.1.2. Geotermička energija podzemnih fluida 30
3.1.3. Geotermička energija suhih stijena 31

3.2. Sunčana energija 33

3.3. Nuklearna energija i njezin dugoročni potencijal 38
3.3.1. Reakcije fisije i fuzije kao izvori energije 38
3.3.2. Energija iz fisije i fuzije 40
3.3.3. Razvoj iskorištavanja nuklearne energije u SFRJ 42
Literatura 45

4. SUNČANA ENERGIJA 47

4.1. Sunčevo zračenje 48
4.1.1. Uvod 48
4.1.2. Sunce 50
4.1.3. Ekstraterestričko zračenje; solarna konstanta 51
4.1.4. Prizemno Sunčevo zračenje 56
4.1.5. Mjerenje Sunčeva zračenja 58
4.1.6. Proračun prizemnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu 62
4.1.7. Procjena raspršenog zračenja 66
4.1.8. Sunčevo zračenje na nagnutu plohu 68

4.2. Solarni kolektori ... 72
4.2.1. Uvod ... 72
4.2.2. Ravni kolektor ... 72
4.2.3. Selektivni apsorberi ... 77
4.2.4. Toplinski gubici ravnog kolektora ... 81
4.2.5. Efikasnost kolektora ... 83
4.2.6. Testiranje ravnog kolektora ... 89
4.2.7. Koncentrirajući kolektori ... 93

4.3. Uskladištenje sunčane energije ... 95
4.3.1. Uvod ... 95
4.3.2. Uskladištenje energije zagrijavanjem materijala ... 97
4.3.3. Uskladištenje energije korištenjem latentne topline ... 101
4.3.4. Ostale metode uskladištenja energije ... 102

4.4. Solarno grijanje i hlađenje ... 105
4.4.1. Uvod ... 105
4.4.2. Solarni sustavi za dobivanje tople vode ... 105
4.4.3. Solarni sustavi za zagrijavanje prostora ... 108
4.4.4. O proračunu solarnih sustava ... 111
4.4.5. O ekonomičnosti solarnih sustava ... 115
4.4.6. Pasivni solarni sustavi ... 117
4.4.7. O solarnom hlađenju ... 119

4.5. Dobivanje električne energije ... 122
4.5.1. Uvod ... 122
4.5.2. Fotonaponska konverzija ... 122
4.5.3. Sadašnje stanje i perspektive razvoja solarnih ćelija ... 129
4.5.4. Solarne elektrane ... 131

4.6. Biokonverzija ... 134
4.6.1. Uvod ... 134
4.6.2. Fotosinteza ... 135
4.6.3. Proizvodnja energije iz biomase ... 136
Literatura ... 139

5. NUKLEARNA FISIJA ... 145

5.1. Fizikalni aspekti iskorištavanja energije fisije ... 145
5.1.1. Cijepanje atomske jezgre; fisija ... 145
5.1.2. Samoodržanje fisije; lančana reakcija ... 149
5.1.3. Promjene u gorivu reaktora ... 150

5.2. Nuklearni reaktori; osnovna klasifikacija i tipovi reaktora ... 152
5.2.1. Termički reaktori ... 152
5.2.2. Konvertori i oplodni reaktori ... 156

5.3. Neke bitne tehničke karakteristike najvažnijih tipova nuklearnih reaktora ... 158
5.3.1. Reaktori u komercijalnoj eksploataciji ... 158
5.3.2. Reaktori hlađeni plinom ... 161
5.3.3. Lakovodni reaktori ... 162
5.3.4. Teškovodni reaktori ... 164
5.3.5. Visokotemperaturni reaktori ... 168
5.3.6. Termički oplodni reaktori ... 170
5.3.7. Brzi oplodni reaktori ... 173

5.4. Ciklus goriva 179
5.4.1. Faze ciklusa goriva 179
5.4.2. Faza ciklusa goriva prije ulaza goriva u reaktor 181
5.4.3. Obogaćenje urana 181
5.4.4. Proizvodnja teške vode 184
5.4.5. Izrada goriva 187
5.4.6. Gospodarenje gorivom 189
5.4.7. Spremanje istrošenog goriva 190
5.4.8. Prerada istrošenog goriva 190

5.5. Odlaganje radioaktivnog otpada 192
5.5.1. Aktivnost istrošenog goriva 193
5.5.2. Konačno odlaganje radioaktivnog otpada 196
5.5.3. Odlaganje radioaktivnog otpada u ležišta soli 197
5.5.4. Dugoročna sigurnost otpada odloženog u geološkim formacijama 199
5.5.5. Kvantitativne procjene rizika 200

5.6. Nuklearna energija i utjecaji na okoliš 203
5.6.1. Uvod 203
5.6.2. Razvoj javne rasprave o učincima na okoliš energije fisije 211
5.6.3. Učinci na okoliš pri normalnom pogonu nuklearne elektrane 212
5.6.4. Opasnost od plutonija 214
5.6.5. Reaktorski kvarovi i s njima povezani učinci na okoliš 215
5.6.6. Rasmussenov izvještaj; studija vjerojatnosti reaktorskih kvarova 217
5.6.7. Izvještaj studijske grupe Američkog fizikalnog društva o nuklearnoj sigurnosti .. 219
5.6.8. Revizija izvještaja WASH-1400 223
5.6.9. Druge studije nuklearne sigurnosti 223
5.6.10. Nesreća u elektrani *Otok tri milje* 229

5.7. Uran, potrebe i zalihe 234
5.7.1. Potrebne količine urana 234
5.7.2. Rezerve fisijskog goriva 236

5.8. Ekonomski aspekti fisijskih nuklearnih elektrana 241
5.8.1. Uvod 241
5.8.2. Cijena energije 243
5.8.3. Investicije 245
5.8.4. Troškovi za gorivo 246
5.8.5. Usporedba cijene energije u elektranama u pogonu 247
5.8.6. Ekonomičnost uvođenja oplodnih reaktora 250
5.8.7. Uvođenje termalnih oplodnih reaktora 255

5.9. Međunarodni i politički aspekti nuklearne energije 256
5.9.1. Razvoj međunarodnih ugovora i ograničenja iskorištavanja nuklearne energije .. 256
5.9.2. Međunarodna procjena ciklusa goriva, INFCE 1978—80 259
5.9.3. Prilike nakon Međunarodne procjene ciklusa goriva (INFCE) 261
Literatura 263

6. NUKLEARNA FUZIJA 265

6.1. Fizikalne osnove 265
6.1.1. Fuzijske reakcije i njihovi intenziteti 265
6.1.2. Samoodržanje fuzije 269

6.2. Magnetsko ograničenje plazme 271
6.2.1. Fizikalna razmatranja 271
6.2.2. Grijanje magnetski ograničene plazme 278
6.2.3. Fuzijski uređaji s magnetskim ograničenjem plazme i postizanje uvjeta za fuziju 279

6.3. Tokamak uređaji 281
6.3.1. Etape razvoja toroidalnih sustava 281
6.3.2. Karakteristike i problemi velikih tokamaka 284
6·3.3. Razvoj projektnih studija 287

6.4. Linearni sustavi 288
6.4.1. Nov razvoj linearnih sustava 288
6.4.2. Povećanje Q faktora i tandemski zrcalni sustav 289
6.4.3. Izvedbe i projekti linearnih sustava s povećanim Q faktorom 292
6.4.4. Tandemski zrcalni sustav s termičkom barijerom 293
6.4.5. Linearni sustav s promjenom smjera magnetskog polja 295

6.5. Inercijsko ograničenje plazme 297
6.5.1. Fizikalne osnove 297
6.5.2. Apsorpcija energije laserskog zračenja u gorivoj kuglici 299
6.5.3. Osnovni energetski odnosi u laserskoj fuziji 303
6.5.4. Generiranje i pojačavanje laserskog pulsa 304
6.5.5. Problemi postizanja velikih snaga laserskog pulsa 305
6.5.6. Laseri za fuzijske eksperimente i uređaje 306
6.5.7. Reaktorski tehnološki problemi 310
6.5.8. Projektna studija SOLASE 313

6.6. Fuzija elektronskim i ionskim snopovima 315
6.6.1. Fuzija elektronskim snopovima 315
6.6.2. Fuzija snopovima teških iona 317

6.7. Fuzijsko-fisijski hibridni sustavi 317

6.8. Utjecaj fuzijskog uređaja na okoliš 323
6.8.1. Čisti fuzijski uređaj 323
6.8.2. Hibridni sustavi 325

6.9. Ekonomičnost fuzijskih elektrana 327
6.9.1. Ekonomske procjene za tokamak uređaje 328
6.9.2. Ekonomske procjene za linearne sustave 331
6.9.3. Ekonomičnost i uvođenje fuzijsko-fisijskog hibrida 331

6.10. Perspektiva iskorištavanja fuzije u zemljama u razvoju 333

Literatura 337

Kazalo 339

Predgovor

Snalaženje u mnoštvu tekstova o energetici problem je za stručnjake a kamoli ne za one koji se tome posebno ne posvećuju. Istovremeno odluke o energetici koje se donose mimo nas a za nas i te kako pogađaju naše interese bez obzira na to da li o njima možemo suditi na osnovi informacija kojima raspolažemo.

Knjiga „Novi izvori energije" napisana je prvenstveno kao udžbenik za studente Elektrotehničkog fakulteta na kojem autori predaju taj predmet i srodne predmete. Međutim, nastojalo se da knjiga osim studentima i stručnjacima pruži i širokom krugu zainteresiranih čitalaca informacije o novim energetskim izvorima i problemima povezanim za njihov razvoj i primjenu, ali i elemente za samostalno kritičko rasuđivanje njihove tehničke i ekonomske perspektive.

U 1. i 2. poglavlju — na osnovi prikaza budućih energetskih potreba, kao i ocjene mogućnosti konvencionalnih izvora da ih podmire — obrazlaže se nužnost razvoja novih izvora i dobiva temelj za procjenu količina energije što bi ih novi izvori trebali dati. Time je stvorena racionalna baza za ograničenje i selekciju. U knjizi se ne obrađuju mnoge veoma zanimljive nove ideje u energetici, već samo oni izvori čiji bi doprinos u budućoj energetskoj proizvodnji mogao činiti znatan udio od desetak ili više posto. Takav oštar princip selekcije omogućio je da se u skromnom opsegu najveći dio prostora posveti onom što su autori ocijenili kao najbitnije.

U 3. poglavlju pokazuje se da u najuži izbor ulaze solarna i nuklearna energija u oba svoja oblika: fisiji i fuziji. Izvori kao što su vjetar ili valovi nisu po tom načelu selekcije razmatrani iako je, dakako u specifičnim uvjetima, svaki doprinos dobrodošao.

Opseg knjige nije dozvolio da se uđe u procjene kojima bi se ovakva kategorizacija potanje obrazložila.

Iznimno je to načinjeno u slučaju geotermičke energije suhih stijena s obzirom na još prisutno gledište prema kojem bi ovaj izvor mogao imati veoma važnu ulogu u budućnosti.

Pošto su solarna energija, fisija i fuzija izdvojeni kao novi izvori s potencijalom značajnog doprinosa u budućoj proizvodnji energije, u 4, 5. i 6. poglavlju podrobnije se razmatraju znanstveni i tehnološki problemi o čijem će rješavanju ovisiti ostvarenje njihovih potencijala.

U četvrtom poglavlju obrađena je solarna energija i načini njezina iskorištavanja. Nakon detaljnijeg prikaza Sunčeva zračenja, posebno u našem klimatskom području, izneseni su načini određivanja energije koju primi površina solarnog kolektora, kao osnovni parametar za procjenjivanje solarnog doprinosa pojedinog uređaja. Zatim su obrađeni solarni kolektori, posebno ravni, i njihova primjena u sistemima za grijanje vode i prostorija. Ostale primjene — dobivanje električne energije i biokonverzija — obrađeni su u nešto kraćem opsegu. Dan je osvrt i na načine uskladištenja energije.

U 5. i 6. poglavlju obrađena je nuklearna energija. Kod nuklearne energije, fisije, koja je već danas tehnički razvijen izvor, naglasak je na procjeni aspekata o kojima ovisi njezina dugoročna perspektiva, kao što su sigurnost, ekonomičnost i rezerve goriva. Kod fuzijske nuklearne energije, s obzirom na njenu manju razvijenost, akcent je pak na procjeni znanstvenih problema koji se postavljaju. Upozorava se, međutim, na nužnost razmatranja cjeline znanstvenih i tehnoloških problema, jer uspješno rješavanje samo znanstvenih problema nipošto ne garantira i uspješan razvoj do ekonomski privlačnih fuzijskih elektrana. Fisija i fuzija razmatraju se odvojeno u 5. i 6. poglavlju, ali se na kraju ističe da se simbiozom dviju tehnologija, fuzijske i fisijske, u hibridnim sistemima, otvara vjerojatno ekonomski najpovoljnija perspektiva za dugoročno iskorištavanje nuklearne energije.

Nuklearne izvore obradio je V. Knapp, a solarnu energiju P. Kulišić.

Autori su svjesni činjenice da je ovakva knjiga samo prvi pokušaj cjelovitog opisa novih izvora energije i da zbog toga nužno ima nedostataka, posebno u onim područjima koja su tek u razvoju i u kojima ima još mnogo neodređenosti i kontroverzije. Opisana područja su u stalnom znanstvenom i tehničkom razvoju, o nekim problemima još ne postoji jedinstveno gledište, a često su gledišta i informacije različite, posebno kada se radi o procjenama ekonomičnosti i o sigurnosti.

Sva poglavlja nisu obrađena jednako detaljno. Neki sadržaji obrađeni su potanko, a poneki šturo, bilo zbog subjektivnih sklonosti autora za pojedino područje, bilo zbog toga što već postoje dobri tekstovi na našem jeziku. Gdje je god bilo moguće autori su nastojali iznijeti probleme interesantne za primjenu novih izvora energije u nas.

U knjizi su se nastojali problemi obraditi tako da, bez obzira na njihovu eventualnu kompleksnost, njihov utjecaj na razvoj pojedinih energetskih izvora bude jasan, kako bi knjiga pružila informaciju širem krugu čitalaca. Želja je nadalje bila da se osnovni problemi istaknu cjelovito, u svim aspektima koji će biti odlučni za njihov razvoj, bez obzira na neodređenost i kontroverzije, odnosno upravo zato. Zbog toga nisu mogla biti izostavljena pitanja ekonomike, sigurnosti i međunarodnih odnosa.

Autori se nadaju da su koliko-toliko uspjeli u objektivnom prikazu područja što ga karakterizira s jedne strane stalan znanstveni i tehnološki razvoj, a s druge strane veoma širok raspon i gledišta i informacija.

U pripremi knjige autorima su mnogo koristili materijali simpozija i tečajeva iz posebnih područja energetike organiziranih u Međunarodnom centru za teorijsku fiziku u Trstu. Međutim, širina prikazivanog područja gotovo garantira neadekvatnosti pojedinih dijelova i nepotpunost literature. Za korekcije, primjedbe i sugestije bit ćemo zahvalni.

Zagreb, listopada 1981.

Autori

Uvod

U početnom razdoblju razvoja čovjek je trošio onoliko energije koliko je uzimao dnevnom prehranom, dakle oko 8 MJ (2 000 kcal). Danas u razvijenim zemljama troši dnevno oko 800 MJ (200 000 kcal), tj. 100 puta više. Tako velika potrošnja energije karakteristika je suvremene civilizacije, ali i njezin prijeko potreban temelj. Bakar, aluminij, željezo, raznovrsni drugi metali, plastika, staklo, sve ostale sirovine suvremene industrije nastaju od rasprostranjenih minerala upotrebom energije. Rudače treba iskopati, topiti, prerađivati. Problem iscrpljenja rezervi pojedinih minerala može se riješiti osiguranjem energije za iskorištavanje siromašnijih minerala i za ponovnu upotrebu industrijskog otpada. Trošeći mnogo energije čovjek se može kretati zrakom, vodom i kopnom mnogo brže i dalje nego bilo koja druga biološka vrsta. Radio, televizija, tisak i svi ostali oblici priopćavanja, također osobitosti modernog vremena, troše energiju neposredno, a energija je potrošena i pri izradi sredstava za prijenos informacija. Prinosi u modernoj poljoprivredi mnogo su veći nego u primitivnoj poljoprivredi zbog upotrebe strojeva i umjetnih gnojiva, a za njihovu proizvodnju troši se opet mnogo energije.

Ako se energija definira kao sposobnost obavljanja rada, jasno je koliko je ona važna za čovječanstvo. Raspolaganje energijom koju ne proizvodi vlastitim tijelom mnogostruko povećava radne sposobnosti čovjeka.

Razvijena civilizacija ne može bez dovoljno energije. Premalo energije pogađa civilizirano društvo na najosjetljiviji način. I relativno malen poremećaj u opskrbi energijom posljednjih godina, pokazao je kolika je ovisnost razvijenog društva o energiji. Teško je i zamisliti posljedice u životu višemilijunskog grada ako se ne bi opskrbljivao energijom tjedan ili dva. Sadašnji poremećaji u opskrbi energijom samo iz jednog primarnog oblika — nafte, trebali bi pokrenuti ozbiljno razmišljanje o opskrbi energijom u budućnosti. U početku 70-ih godina poremećaji su bili rezultat političkih odluka, a takva se kriza može prevladati. Za nekoliko desetaka godina iscrpst će se izvori i kriza će biti trajna. Ako nas sadašnje teškoće potaknu da promotrimo situaciju i spremnije dočekamo budućnost, čovječanstvo će biti zahvalno za pravodobno upozorenje.

Osiguranje energetskih potreba svjetski je problem i ni jedna zemlja, ma kako bogata, ne može se izdvojiti iz općih tokova i kretanja. Lokalna ležišta nafte troše se na cijelom planetu. Nafta je danas pokretna snaga svjetske industrije. Nuklearna energija razvijena je u malo zemalja. Njezina potrošnja postupno se širi u druga područja. Takvo je stanje i s ugljenom, a nalazišta ugljena također su neravnomjerno raspoređena. Iskorištavanje sunčane energije tek se u posljednje vrijeme intenzivnije razvija i taj će izvor u budućnosti biti vrlo važan.

Sirovine — nafta, ugljen ili uran — troše se na cijeloj Zemlji pa će i iscrpljenje zaliha bilo koje od tih sirovina utjecati na cijene i raspodjelu ostalih energetskih sirovina u cijelom svijetu. Sve države, a osobito one koje ne posjeduju dugoročne energetske zalihe, moraju pratiti razvoj energetike u svijetu i s njim uskladiti svoje vlastite planove i programe.

Da bismo bolje shvatili stanje i razvoj svjetske energetike, valja napraviti i promotriti naročito

— procjenu energetskih potreba,

— procjenu zaliha energetskih sirovina (fosilnih goriva, urana),

— procjenu razvoja novih izvora energije.

Sve tri procjene obavljaju se na temelju brojnih pretpostavki i nesigurnih uvjeta pa su i procjene samo toliko određene koliko su i polazne postavke ispravne.

Procjena energetskih potreba nije samo čin tehničkog planiranja, ni ekstrapolacija današnjeg stanja i razvoja, nego i pitanje osnovnih određenja o načinu života svakog

pojedinca i cijelog društva. Procjena rezervi energetskih sirovina nesigurna je jer je samo dio nalazišta istražen, a o znatno većim rezervama zaključuje se na temelju veće ili manje vjerojatnosti. Nove metode istaživanja, npr. satelitsko promatranje, doprinose da se u tome napreduje brže i sigurnije. Nove metode eksploatacije pomiču pak granice ekonomski iskoristivih kategorija rezervi i tako povećavaju ukupne rezerve. Na primjer podzemno uplinjavanje ugljena omogućilo bi iskorištenje i onih nalazišta koja nisu ekonomski iskoristiva standardnim rudničkim metodama. Današnjim metodama bušenja i vađenja nafte iskorištava se samo manji dio ležišta, a veći dio nafte ostaje pod zemljom.

Procjene rezervi energetskih sirovina sadrže neodređenost koja je odraz naše nemoći da predvidimo razvoj svih metoda istraživanja i iskorištavanja tih sirovina

Procjena novih energetskih izvora neposredno je povezana s procjenom zaliha energetskih sirovina. Ako poznajemo energetski sadržaj, odnosno energetsku vrijednost jedinice mase fosilnih goriva i tipičan stupanj iskorištenja, može se prema procjeni količine zaliha procijeniti i količina energije. Za procjenu energije fisije to nije dovoljno. Iz iste količine urana može se u jednom tipu reaktora proizvesti i 50 puta više energije nego u drugom. Očito je da za procjenu takvog tipa energetskih izvora, osobito za izvore fuzijske i sunčane energije, nije dovoljan samo podatak o količini polazne energetske sirovine, nego je potrebna i informacija o načinu iskorištavanja.

Dotok sunčane energije mnogo je veći od naših potreba, a rezerve goriva za fuziju neiscrpne su u dogledno vrijeme. Uz povoljno iskorištenje urana sličan potencijal ima i fisijska energija. Tako problem zaliha sirovina postaje nevažan. Stoga će se ovdje kao primarno promatrati perspektiva razvoja tehnički i ekonomski prihvatljivih uređaja za iskorištavanje fisijske, fuzijske i sunčane energije.

U ovoj knjizi nismo (zbog ograničenog opsega) opisali energiju vjetra, valova i slične koje su također u vezi sa sunčanom energijom. Uređaje za pretvaranje energije vjetra u mehaničku energiju (mlinovi, crpljenje vode iz bunara) upotrebljavao je čovjek odavno. Zatim je, upotrebljavajući nove, pogodnije energetske izvore, zanemario energiju vjetra. Sad se ponovno istražuje primjena energije vjetra, grade se eksperimentalni sustavi za njezino korištenje, osobito za pretvaranje u električnu energiju. Možemo očekivati da će se u budućnosti i taj oblik nekonvencionalnog energetskog izvora više koristiti.

Navedimo samo neke od mnogih primjera kako bi se racionalnim trošenjem i štednjom mogla smanjiti energetska potrošnja. U prometu se troši mnogo energije, a samo oko 25% pretvori se u koristan rad. Uštedjeti bi se moglo jačanjem javnog prijevoza i rjeđom upotrebom osobnih automobila u gradskom prijevozu.

Djelotvornost je termoelektrana samo oko 40%, a izgaranje ugljena i mazuta onečišćuje okolicu. Zato bi valjalo proizvoditi više električne energije u hidroelektranama i nuklearnim elektranama i povisiti iskorištenje goriva u termoelektranama. Na razne načine moglo bi se spriječiti rasipanje toplinske energije u domaćinstvima. Stanovi su zimi previše zagrijani, a ljeti se previše energije troši za klimatiziranje prostorija, iako bi čovjek uz neznatnu promjenu navika i odgovarajuće odijevanje mogao živjeti i u ambijentu većih temperaturnih razlika. Boljim izoliranjem zidova prostorija, vrata i prozora, kontroliranjem gubitka topline kroz prozore mogla bi se također dosta smanjiti potrošnja energije jer bi se tako moglo štedjeti u vrlo mnogo objekata. Potrebno je, naime, štedjeti sadašnje izvore energije sve dok novi izvori ne budu dostupni i ne zamijene današnje, koji su većinom gotovo iscrpljeni. U budućnosti će postati sve važniji alternativni izvori energije — sunčana energija, energija dobivena izgaranjem drva i biljnih otpadaka, energija bioplina i vjetra.

Nazivi i znakovi nekih fizikalnih veličina koje se upotrebljavaju u poglavlju „Sunčana energija"

Naziv fizikalne veličine	Znak fizikalne veličine	Znak mjerne jedinice
površina	A	m^2
površina kolektora	A_c	m^2
brzina svjetlosti	c	m/s
specifični toplinski kapacitet	c	J/ (kg K)
energija	E	J
Fermijeva energija	E_f	J
širina zabranjenog pojasa	E_g	J, eV
ekstraterestričko sunčano ozračenje (solarna iradijancija) plohe okomite na zračenje	E_o	W/m^2
solarna konstanta (sunčana konstanta)	$\overline{E_o}$	W/m^2
faktor punjenja	F	
geometrijski faktor kolektora	F'	
faktor efikasnosti prijenosa topline iz kolektora u fluid	F_R (F'_R)	
solarni doprinos	f	
ukupno sunčano ozračenje (globalna solarna iradijancija) horizontalne plohe	G	W/m^2
izravno sunčano ozračenje (direktna solarna iradijancija) horizontalne plohe	G_b	W/m^2
izravno sunčano ozračenje (direktna solarna iradijancija) plohe okomite na zračenje	G_{bn}	W/m^2
raspršeno sunčano ozračenje (difuzna solarna iradijancija) horizontalne plohe	G_d	W/m^2
ekstraterestričko sunčano ozračenje (solarna iradijancija) horizontalne plohe	G_o	W/m^2
odbijeno sunčano ozračenje (reflektirana solarna iradijancija)	G_r	W/m^2
ukupno sunčano ozračenje (globalna solarna iradijancija) nagnute plohe pod kutom β	G_β	W/m^2
ukupna ozračenost (globalna iradijacija) horizontalne plohe	H	J/m^2
mjesečni prosjek dnevne ukupne ozračenosti (globalne iradijacije) horizontalne plohe	$\overline{H}$	J/m^2
dnevna ekstraterestrička ozračenost (iradijacija) horizontalne ravnine	H_o	J/m^2
mjesečni prosjek dnevne ekstraterestričke ozračenosti (iradijacije) horizontalne plohe	$\overline{H_o}$	J/m^2
dnevna ekstraterestrička ozračenost (iradijacija) nagnute plohe	$H_{o\beta}$	J/m^2
ukupna ozračenost (globalna iradijacija) nagnute plohe	H_β	J/m^2
jakost struje	I	A
struja diode	I_d	A
struja kratkog spoja	I_{ks}	A
struja zasićenja (zaporna struja)	I_o	A
fotostruja solarne ćelije	I_s	A
faktor atenuacije (ekstinkcijski koeficijent)	k	
koeficijent toplinskih gubitaka	k	W/ (m^2 K)
efektivni koeficijent toplinskih gubitaka	$k_{ef} = kF_R$	W/ (m^2 K)
indeks prozračnosti	K_T	
kut loma	l	°, rad
specifična toplina faznog prijelaza	L	J/kg
masa	m	kg
„optička masa" zraka	m	
maseni protok fluida	$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$	kg/s
egzitancija	M	W/m^2
spektralna egzitancija	M_λ	W/m^3
redni broj dana u godini (brojen od 1. I)	n	
indeks loma	n	
tlak	p	Pa
snaga	P	W

Naziv fizikalne veličine	Znak fizikalne veličine	Znak mjerne jedinice
gustoća toplinskog toka	q	W/m^2
toplina; energija zračenja	Q	J
toplinski tok iz apsorbera u fluid	$\dot{Q}_k = dQ_k/dt$	W
kut refleksije	r	°, rad
električni otpor	R	Ω
omjer koncentriranja	R	
toplinski (termički) otpor	R	$K/(Wm^2)$
paralelni otpor	R_p	Ω
serijski otpor	R_s	Ω
omjer srednje dnevne izravne ozračenosti nagnute i horizonatalne plohe za pojedini mjesec	$\overline{R_b}$	
omjer srednje dnevne ukupne ozračenosti nagnute i horizontalne plohe za pojedini mjesec	$\overline{R}$	
trajanje sijanja Sunca (insolacija)	s	h
relativno trajanje sijanja Sunca	$S = s/Z$	
vrijeme	t	s
temperatura	T	°C
temperatura apsorbera	T_a	°C
temperatura kolektora	T_c	°C
srednja temperatura fluida u kolektoru	Tf	°C
temperatura fluida na izlazu iz kolektora	T_{iz}	°C
temperatura prozora kolektora	T_p	°C
temperatura materijala u spremniku	T_s	°C
temperatura fluida na ulazu u kolektor	T_u	°C
temperatura okolnog zraka	T_z	°C
kut upada	u	°, rad
brzina	v	m/s
brzina vjetra	v_v	m/s
trajanje Sunčeva dana	Z	h
apsorpcijski faktor (apsorptancija)	α	
spektralni faktor apsorpcije	α_λ	m^{-1}
kut između Sunčevih zraka i horizontalne plohe (visina Sunca)	α	°
omjer selektivnosti	α/ε	
kut visine Sunca u Sunčevo podne	α_p	°
nagib prema horizontali	β	°
kut deklinacije Sunca	δ	°
elektromotorna sila	ε	V
emisijski faktor (emitancija)	ε	
spektralni faktor emisije	ε_λ	m^{-1}
orbitalni ekscentritet gibanja Zemlje oko Sunca	$\varepsilon(n)$	
efikasnost kolektora	η	
efikasnost kolektora za $T = T_z$	η_o	
kut upada Sunčevih zraka na nagnutu plohu	ϑ	°
zenitni kut Sunca (zenitna udaljenost)	θ_z	°
toplinska vodljivost	λ	W/m K
valna duljina	λ	m
frekvencija	ν	Hz
gustoća	ρ	kg/m^3
refleksijski faktor (reflektancija)	ρ	
spektralni refleksijski faktor	ρ_λ	m^{-1}
transmisijski faktor (transmitancija)	τ	
Stefan-Boltzmannova konstanta	σ	$W/(m^2 K^4)$
zemljopisna širina	φ	°
tok (snaga) zračenja; toplinski tok	Φ	W
spektralni tok zračenja	Φ_λ	W/m
zemljopisna dužina (sjeverna, južna)	φ	°N, °S
umnožak transmisijskog i apsorpcijskog faktora pri okomitom upadu	$(\tau\alpha)_n$	
efektivni umnožak transmisijskog i apsorpcijskog faktora	$\overline{(\tau\alpha)}$	

Nazivi i znakovi nekih fizikalnih veličina iz područja nuklearne energetike

Veličina	Znak veličine	Znak jedinice
nukleonski broj, maseni broj; broj nukleona u atomskoj jezgri	A	
redni broj; broj protona u jezgri	Z	
energija vezanja atomske jezgre; energija koja se oslobađa pri sastavljanju jezgre iz slobodnih nukleona	B	MeV
nukleonska energija vezanja; energija koja se oslobađa pri dodavanju pojedinog nukleona jezgri atoma		MeV
fisijska energija; energija koja se oslobađa pri fisiji atomske jezgre	E_f	MeV
fuzijska energija; energija koja se oslobađa pri fuziji atomskih jezgara	E_f	MeV
Q vrijednost nuklearne reakcije; povećanje kinetičke energije reaktanata u nuklearnoj reakciji	Q	MeV
udarni presjek (mikroskopski); veličina koja karakterizira vjerojatnost nuklearne reakcije. Pod mikroskopskim udarnim presjekom podrazumijeva se vjerojatnost da se dogodi reakcija ako jedna upadna čestica pogađa jediničnu površinu na kojoj se nalazi jedna jezgra kao meta.	σ	m^2
makroskopski udarni presjek; podrazumijeva se vjerojatnost da se dogodi reakcija ako jedna upadna čestica pogađa jediničnu površinu sloja materijala jedinične debljine koji se sastoji od jezgara — meta	Σ	m^{-1}
fisijski udarni presjek; udarni presjek za reakciju fisije	σ_f	m^2
fuzijski udarni presjek; udarni presjek za reakciju fuzije	σ_f	m^2
apsorpcijski udarni presjek; udarni presjek za apsorpciju	σ_A	m^2
brzina reakcije; broj reakcija podijeljen s vremenskim intervalom i obujmom	R	$1/(sm^3)$
broj neutrona po fisiji; prosječan broj neutrona emitiranih neposredno nakon fisije ili sa zakašnjenjem, po jednoj fisiji	ν	
neutronski prinos; prosječan broj neutrona emitiranih neposredno nakon fisije ili sa zakašnjenjem po jednoj apsorpciji neutrona u fisibilnoj jezgri	η	
faktor multiplikacije; u reaktorskoj fizici pod faktorom multiplikacije podrazumijeva se omjer broja neutrona proizvedenih u određenom vremenskom intervalu, i broja neutrona apsorbiranih ili odbjeglih iz reaktora u istom vremenskom intervalu.	k	
faktor multiplikacije beskonačnog reaktora; faktor multiplikacije uz zanemarenje bijega neutrona iz reaktora u okoliš.	k_∞	
efektivni faktor multiplikacije; faktor multiplikacije u konačnoj jezgri, koji uvažava pojave na granici reaktor — okoliš.	k_{ef}	
reaktivnost; pod reaktivnošću podrazumijeva se kvocijent $\rho=\frac{k_{ef}-1}{k_{ef}}$	ρ	
neutronski tok; pod neutronskim tokom na nekom mjestu i u nekom času podrazumijeva se broj neutrona koji ulaze u neku sferu na tom mjestu u malom vremenskom intervalu, podijeljen sa površinom sfere i vremenskim intervalom	φ	$s^{-1}m^{-2}$
prosječni logaritamski dekrement; pod prosječnim logaritamskim dekrementom, odnosno smanjenjem, u procesu usporavanja neutrona podrazumijeva se prosječna vrijednost logaritma omjera neutronskih energija prije i nakon sudara sa jezgrama moderatora	ξ	
faktor konverzije; pod faktorom konverzije reaktora podrazumijeva se omjer (neto) brzine stvaranja fisibilnih nuklida i brzine trošenja fisibilnih nuklida u gorivu reaktora	C	
faktor oplodnje; ukoliko faktor konverzije prelazi jedinicu naziva se faktor oplodnje	C	
vrijeme ograničenja energije u plazmi; vrijeme kroz koje vruća plazma izgubi zračenjem i difuzijom glavni dio svoje energije	τ, τ_E	
faktor umnažanja energije; u nuklearnoj fuziji faktor umnažanja energije je omjer energije oslobođene u fuziji (uključivo omotač) i energije dovedene plazmi	Q	
efikasnost termalne konverzije; efikasnost u pretvaranju toplinske energije u električnu, dana kvocijentom proizvedene električne energije i toplinske energije dovedene u konvertor	η_T	
efikasnost direktne konverzije; omjer električne energije proizvedene u pretvaraču i kinetičke energije nabijenih čestica koje ulaze u uređaj za direktnu konverziju	η_D	
efikasnost lasera; omjer prosječne snage laserskog zračenja i snage potrebne za pogon lasera	η_L	

Veličina	Znak veličine	Znak jedinice
efikasnost grijanja plazme; omjer energije koja se iskoristi za zagrijavanje plazme i energije koja se utroši u uređaju za grijanje plazme	η_g	
aktivnost; veličina koja određuje intenzitet radioaktivnosti nekog radioaktivnog izvora, a dana je kvocijentom prosječnog broja raspada u kratkom vremenskom intervalu i tog intervala	A	Bq
vrijeme poluraspada; prosječno vrijeme $T_{1/2}$ u kojem se raspadne polovica jezgara makroskopske količine jezgara određenog nuklida	$T_{1/2}$	s
apsorbirana doza; energija koju ionizirajuće zračenje prolazeći kroz materijal predaje tijelu, podijeljena sa masom tog tijela	D_a	Gy
faktor biološke efikasnosti; faktor koji pokazuje povećanje biološkog efekta nekog ionizirajućeg zračenja u odnosu na referentno zračenje pri istim vrijednostima apsorbirane doze	FBE, Q	
efektivna doza; umnožak apsorbirane doze i faktora biološke efikasnosti	D_e, H	Sv
brzina doze; doza u određenom vremenskom intervalu podijeljena s tim intervalom	D_a	Gy/s

1. Energija i razvoj

1.1. Procjene energetskih potreba

Da bismo mogli prosuditi ima li ili nema dovoljno konvencionalnih energetskih izvora te kakve su mogućnosti i važnost novih izvora, valja najprije predočiti razvoj budućih energetskih potreba. O tome postoji vrlo mnogo procjena, prognoza, ali metode i polazne pretpostavke često nisu dovoljno određene, pa nije jasno u kojem kontekstu vrijede. Prognoze se često temelje na detaljnim i razvijenim metodama za određene zemlje ili šire područje, a druga su područja ispuštena ili zanemarena. Istina je, doduše, da se razvijene metode ne mogu primijeniti na mnoga područja jer nedostaju potrebni podaci. No, istina je i to da je problem energije čvrsto povezan sa sadašnjim i budućim stupnjem razvijenosti. To znači da problem često treba najhitnije rješavati upravo tamo gdje se razrađene metode ne mogu primijeniti. Prognoze za zemlje u razvoju najčešće govore samo o vjerojatnom razvoju, a ne o onomu prema kojem bi uistinu valjalo težiti i prema kojemu bi trebalo prosuđivati potrebe. Prognoza vjerojatnog energetskog razvoja nije i prognoza potreba, ako se energetske potrebe velikog dijela čovječanstva ne bi podmirile. Prognoze dobro definiranih potreba rijetke su, no, možemo bar naznačiti kako bi se mogle napraviti. Pođimo od današnje potrošnje energije po stanovniku. Budući da postoje različiti primarni izvori, ona se izražava u ekvivalentnim količinama ugljena kalorične odnosno energetske vrijednosti 29,3 MJ/kg, (7 000 kcal/kg) — vidi tablicu 1.1.

Tablica 1.1.a) Energetske vrijednosti primarnih izvora energije izražene ekvivalentnom količinom standardnog ugljena čija je energetska vrijednost 29,3 MJ/kg, (7 000 kcal/kg)

Izvor	Energetska vrijednost MJ/kg	Ekvivalentna količina standardnog ugljena/kg
standardni ugljen	29,3	1
antracit	32—33	
kameni ugljen	26—30	
lignit, stari	16—24	
lignit, mlađi	10—14	
drvo (suho)	10—11	
standardna nafta	43,95	1,5
benzin	51—52	
zemni plin	50	
butan	50	

Tablica 1.1.b) Veza nekih mješovitih jedinica za energiju koje se upotrebljavaju u energetici s nekim decimalnim jedinicama i s ekvivalentnom količinom standardnog ugljena

Mješovita jedinica	Energija	Ekvivalentna količina standardnog ugljena
kilovatsat	3,6 MJ	0,123 kg
megavatdan	86,4 GJ	2,95 t
megavatgodina	31,53 TJ	1076,2 t
teravatsat	3600 TJ	$0{,}123 \cdot 10^6$ t
gigavatgodina	31,530 TJ	$1{,}076 \cdot 10^6$ t
teravatgodina	31,53 EJ	$1{,}076 \cdot 10^9$ t
BTU (British Thermal Unit)	1 055 J	
$Q = 10^{18}$ BTU	1 055 EJ	$36{,}003 \cdot 10^9$ t

Pored jedinice Q u SAD koristi se i tisuću puta manja jedinica quad, 1 quad $= 10^{15}$ BTU

Godišnja potrošnja energije izražena količinama standardnog ugljena u nekim je zemljama i više od 10 tona po stanovniku. Velike razlike u razvijenosti pojedinih područja svijeta neposredno se odražavaju i u potrošnji energije. Svjetski je prosjek oko dvije tone ugljena po stanovniku.

Tablica 1.2. Specifična godišnja potrošnja energije po stanovniku izražena ekvivalentnom količinom standardnog ugljena i njezin razvoj u razdoblju 1970—79. u pojedinim zemljama

Zemlje	1970.	1975.	1979.		1970.	1975.	1979.
	Ekvivalentna količina standardnog ugljena/kg						
Svijet	1 781	1 879	2 019		1 781	1 879	2 019
Evropa							
Albanija	603	798	936	Egipat	260	358	473
Austrija	3 319	3 587	4 283	Etiopija	27	20	16
Belgija	5 608	5 580	6 229	Gabon	876	1 729	2 055
Bugarska	3 775	4 489	5 095	Gana	166	163	161
Čehoslovačka	5 402	5 933	6 489	Južnoafrička Republika	2 241	2 456	2 375
Danska	5 420	4 768	5 550	Kamerun	65	85	104
Finska	4 070	4 990	5 269	Kenija	104	151	148
Francuska	3 814	3 795	4 297	Kongo	220	511	190
Grčka	1 109	1 736	2 087	Libija	672	1 042	2 266
DR Njemačka	6 128	6 557	7 016	Maroko	184	255	283
SR Njemačka	5 124	5 275	5 992	Mozambik	136	122	118
Irska	2 628	2 723	3 269	Nigerija	49	79	78
Luksemburg	17 080	14 955	14 614	Senegal	116	236	252
Madžarska	2 809	3 194	3 801	Sudan	148	150	128
Nizozemska	4 595	5 841	6 501	Tanzanija	57	64	43
Poljska	4 226	4 923	5 688	Tunis	288	429	589
Portugal	712	966	1 131	Zair	68	67	66
Rumunjska	3 032	3 968	4 588	Zambija	464	469	443
Sovjetski Savez	4 084	4 988	5 558	Zimbabve	839	627	639
Španjolska	1 467	2 150	2 377				
Švedska	5 769	5 463	5 697				
Švicarska	3 222	3 315	3 595	*Azija*			
Velika Britanija	5 029	4 948	5 135				
Jugoslavija	1 409	1 766	2 111	Afganistan	46	58	78
				Bangladeš	—	33	38
Sjeverna Amerika				Burma	59	53	63
				Filipini	263	293	322
Kanada	8 779	10 005	10 785	Indija	142	166	178
Meksiko	1 055	1 228	1 492	Indonezija	116	172	213
SAD	10 870	10 693	11 361	Irak	603	683	644
				Iran	947	1 315	1 140
Južna i Srednja Amerika				Izrael	1 986	2 391	2 275
				Japan	3 098	3 177	3 723
Argentina	1 595	1 698	1 879	Jordan	266	372	529
Bolivija	227	333	400	Katar	13 126	19 241	12 186
Brazil	449	669	767	Kina	429	570	729
Čile	1 113	954	1 010	Koreja, Narodna Republika	2 050	2 613	2 648
Ekvador	282	400	588	Koreja, Republika	648	946	1 434
Gvatemala	194	249	220	Kuvajt	5 855	6 226	6 927
Kolumbija	589	653	781	Laos	92	43	66
Kuba	1 000	1 130	1 327	Libanon	680	982	815
Nikaragva	358	419	429	Mongolija	871	1 070	1 477
Panama	642	861	809	Pakistan	82	176	182
Salvador	182	232	250	Saudijska Arabija	608	1 425	2 105
Paragvaj	141	151	199	Singapur	1 261	2 933	5 549
Peru	596	660	604	Sirija	386	658	900
Trinidad i Tobago	4 907	3 693	5 043	Šri Lanka	121	99	107
Urugvaj	883	974	1 061	Tajland	183	270	337
Venezuela	2 362	2 717	2 994	Turska	472	630	704
				Ujedinjeni Emirati	2 537	4 504	5 434
Afrika				Vijetnam	300	195	140
Alžir	212	500	613	*Australija*			
Angola	159	174	163				
Centralna Afrička Republika	57	29	41	Australija	5 123	5 858	6 230
Čad	16	22	22	Novi Zeland	2 794	3 178	3 457

Prema statistici Ujedinjenih naroda [Year book of World Energy Statistics, UN 1981] u tablici 1.2. navedeni su podaci o godišnjoj potrošnji po stanovniku za godine 1970, 1975. i 1979. U tablicu nisu unijeti podaci o nekomercijalnim oblicima energije, npr. o grijanju sunčanom energijom, stočnim izmetom ili prikupljenim drvima. U zemljama s vrlo niskom potrošnjom energije udio potrošnje nekomercijalnih oblika energije može biti velik.

Danas živi oko 4,5 milijarde ljudi, a ukupna je potrošnja energije izražena ekvivalentnom količinom ugljena oko 9 milijardi tona godišnje. Kolika bi trebala biti potrošnja energije na kraju stoljeća?

Ako bi se željelo ukloniti siromaštvo i oskudicu u kojoj živi velik dio čovječanstva te da i taj dio svijeta uživa tekovine civilizacije koje razvijene zemlje uživaju već desetljećima, bilo bi prijeko potrebno i u tim područjima znatno povećati potrošnju energije. Ako bi tako svjetski prosjek 2000. godine bio oko 4 tone godišnje po stanovniku, tj. znatno manje nego što razvijene zemlje troše već danas, povećanje potrošnje energije bilo bi veoma veliko.

Prema srednjoj varijanti procjene Ujedinjenih naroda [UN 1968], na kraju stoljeća živjet će oko 6,5 milijardi, pa bi za pokriće takve buduće potrošnje trebalo godišnje primarne energije od 25 do 30 milijardi tona standardnog ugljena. Na žalost, tendencije posljednjih godina pokazuju da zemlje u razvoju ne uspijevaju smanjiti raskorak u energetskoj potrošnji s razvijenim dijelom svijeta. Takve su približne procjene. A što prognoziraju detaljnije procjene?

Najpoznatije iscrpne i razrađene prognoze izradilo je nekoliko međunarodnih skupina stručnjaka u sklopu Svjetske konferencije o energiji *(World Energy Conference*, WEC*)*, Ekonomske evropske zajednice *(Organisation for Economic Co-operation and Development*, OECD*)*, Međunarodne energetske agencije *(International Energy Agency*, IEA*)* te američka Studijska grupa za alternativne energetske strategije *(Workshop on Alternative Energy Strategies*, WAES). U detaljnoj analizi WAES pokušava se prognoza razvoja energetskih potreba izvesti iz planiranog razvoja ekonomije, porasta stanovništva, napretka tehnologije i drugih bitnih činilaca.

U tablici 1.3. sumarni rezultati studije prošireni su procjenama za SSSR i Istočnu Evropu, za zemlje u razvoju i NR Kinu [Be 1978]. Radi usporedbe navedena je i procjena IEA (International Energy Agency). Ona se dobro slaže sa studijom WAES za Sjevernu Ameriku, slabije za Evropu, a još slabije za Japan. Prognoza WAES polazi od stopa ekonomskog rasta u pojedinim zemljopisnim i političkim područjima i strukture privrednih aktivnosti. Veza između ekonomskog rasta i razvoja energetike izražena je energetskim koeficijentima za određena područja i određena vremenska razdoblja.

Tablica 1.3. Prognoze WAES i IEA energetskih potreba do 2000. godine

Područje	Godina	WAES (visoka stopa)	IEA
		standardni ugljen/10^6t	
Sjeverna Amerika	1972.	2 804	2 681
	1985.	3 597	3 713
	2000.	5 121	5 230
Zapadna Evropa	1972.	1 568	1 639
	1985.	2 256	2 399
	2000.	3 287	3 876
Japan	1972.	462	520
	1985.	917	979
	2000.	1 264	1 958
SSSR i Istočna Evropa*	1972.	1 799	
	1985.	3 013	
	2000.	4 851	
Kina*	1972.	500	
	1985.	1 066	
	2000.	2 205	
zemlje u razvoju*	1972.	1 010	
	1985.	2 348	
	2000.	4 786	
Svijet	1972.	8 467	
	1985.	13 524	
	2000.	22 491	

*Prema podacima iz [Be 1978].

Energetski koeficijent omjer je između stope porasta proizvodnje energije i stope ekonomskog rasta. S obzirom na porast cijene energije, odgovarajuće uštede, tehnički razvoj i prestrukturiranje u industriji, očekuje se smanjenje energetskih koeficijenata. U tablici 1.4. navedene su procijenjene stope ekonomskog rasta prema područjima, a u tablici 1.5. energetski koeficijenti za naznačena razdoblja.

Energetski koeficijenti rezultat su detaljnih evaluacija za pojedine zemlje i djelatnosti. Odražavaju stupanj tehničke i industrijske razvijenosti, te cijenu i raspoloživost energije.

Tablica 1.4. Godišnje stope ekonomskog rasta*

Područje	Razdoblje		
	1965–1973. %	1972–1985. %	1985–2000. %
Sjeverna Amerika	3,6	3,6	3,5
Zapadna Evropa	4,8	3,7	3,5
Japan	10,9	6,5	3,0
SSSR, Istočna Evropa	4,3	4,0	3,5
Kina	6,4	6,0	5,0
zemlje u razvoju	6,1	6,1	4,5
Svijet	5,0	4,5	3,7

*Podaci 1965–1973. iz World Bank Atlas, 1975.
Kina – procjena iz [Be 1978].
Ostali podaci – WAES.

Tablica 1.5. Energetski koeficijenti, omjeri između stope porasta proizvodnje energije i stope ekonomskog rasta

Područje	Razdoblje		
	1965–1973.	1972–1985.	1985–2000.
Sjeverna Amerika	1,2	0,5	0,7
Zapadna Evropa	1,0	0,8	0,7
Japan	1,0	0,8	0,6
SSSR, Istočna Evropa	1,1	1,0	0,9
Kina	0,8	1,0	1,0
zemlje u razvoju	1,1	1,1	1,0
Svijet	1,0	0,8	0,9

Tablica 1.6. Stope rasta energetike izvedene iz stopa ekonomskog rasta (tabl. 1.4) i energetskih koeficijenata (tabl. 1.5)

Područje	Razdoblje				
	1965—1973. %	1972—1985. %		1985—2000 %	
	*	a	b	a	b
Sjeverna Amerika	4,2	2	1,9	1,9	2,4
Zapadna Evropa	5,0	2,1	2,8	2,0	2,5
Japan	11,1	3,6	5,4	2,1	1,9
SSSR, Istočna Evropa	4,4	3,5	4,0	3,0	3,5
Kina	5,0	5,0	6,0	4,0	5,0
zemlje u razvoju	5,9	5,3	6,7	4,0	4,9
Svijet	5,0	3,1	3,7	2,7	3,4

Samo su prva tri područja analizirana prema jedinstvenoj metodi studije WAES. Stope rasta u druga tri područja procijenjene su prema [Be 1978].

*prema BPI 1976.
a — varijanta WAES studije D — D8.
b — varijanta WAES studije C — C4.

Prognozu prikazanu u tablicama 1.3—1.6. možemo usporediti s našom početnom procjenom potreba — oko 30 milijardi tona standardnog ugljena. Prema prognozi WAES bit će potrebno oko 22,5 milijardi tona standardnog ugljena 2000. godine. Što uzrokuje razliku u procjenama? U našoj procjeni predviđeno je znatno veće povećanje za zemlje u razvoju nego što je navedeno u tablicama 1.3—1.6. Kao što smo rekli tom procjenom je predviđena proizvodnja do koje bi te zemlje **trebale** doći.

Pri procjeni razvoja energetike u zemljama u razvoju nije se pazilo na to da je potrebno smanjiti razvojni raskorak pa poticati znatno brži porast.

Jedna od posljednjih globalnih prognoza razvoja energetike iz 1981. godine, rezultat je višegodišnjeg rada u Međunarodnom institutu za primijenjenu sistemsku analizu — MIPSA (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) u Laxenburgu u Austriji.

Zanimljivo je pogledati tablicu 1.7. koja pokazuje stope porasta narodnog dohotka po stanovniku za razdoblja 1975—2000. i 2000—2030. Dvije su varijante rasta — niža i viša stopa.

Podaci nisu izravno usporedivi sa studijom WAES budući da je raspodjela prema geopolitičkim područjima drukčija. Ipak, ako se ekonomski rast preračuna za jednog stanovnika (i tako uvaži nejednake stope porasta stanovništva) vidi se da je prognoza prilično drukčija od procjene u tablici 1.4. U analizi MIPSA zemlje u razvoju dijele se u skupine prema prirodnim bogatstvima i uvjetima za razvoj. Prema stopama porasta dohotka po stanovniku u najnerazvijenijim područjima koja obuhvaćaju najveći dio Afrike i Azije, zaostajanje do godine 2000. povećat će se prema obim varijantama. Ukupne energetske potrebe 2030.

Tablica 1.7. Stope rasta narodnog dohotka po stanovniku za razdoblja 1975—2000. i 2000—2030. u pojedinim područjima svijeta [MIPSA 1981]

Područje	Dohodak po stanovniku, američki dolari, 1975.	Godišnja stopa rasta po stanovniku u naznačenim razdobljima			
		visoka stopa, %		niska stopa, %	
		1975—2000.	2000—2030.	1975—2000.	2000—2030.
Sjeverna Amerika	7 046	2,9	1,8	1,7	0,7
Sovjetski Savez i Istočna Evropa	3 412	3,6	3,2	3,1	1,9
Zapadna Evropa, Japan, Australija, Novi Zeland, Južnoafrička Republika, Izrael	4 259	3,0	1,8	1,7	0,9
Latinska Amerika	1 066	3,0	2,4	1,6	1,9
srednja Afrika, južna i jugoistočna Azija	239	2,8	2,4	1,7	1,4
Srednji istok i sjeverna Afrika	1 429	3,8	2,8	2,4	1,2
Kina, Koreja, Vijetnam	352	2,8	2,4	1,6	1,4

godine bile bi 38,4 milijarde tona standardnog ugljena prema varijanti s višom stopom, a 24 milijarde tona prema varijanti s nižom stopom rasta.

Svjetska energetska konferencija (WEC) prezentirala je najnovije energetske statistike na kongresu u New Delhiju, septembra 1983. godine. Dok Međunarodni institut za primijenjenu sistemsku analizu sačinjava relativno uža grupa stručnjaka koji u svojim prognozama polaze od metodoloških principa razvijenih i definiranih u okviru te grupe, analize i prognoze koje priprema Svjetska energetska konferencija (WEC) baziraju se na dogovoru i radu više od 80 nacionalnih komiteta WEC. To naravno ne znači da su prognoze Svjetske energetske konferencije nužno metodološki bolje fundirane ili da im samim time treba pripisati veću vjerojatnost, ali znači da u svakom slučaju uživaju širok konsensus već po samoj prirodi pripreme prognoza (WE 83).

Uopće se razabire da se nakon energetske krize 70-tih godina analizama potrošnje i proizvodnje energije posvećuje sve više pažnje, pa izrada pregleda i prognoza postaje stalan oblik rada organizacija kao što su WEC, OECD, MAAE i drugih. Vrijednost je pregleda i prognoza WEC i u tome što su svjetske, a ne ograničuju se na određena područja, kao npr. OECD.

Grupiranje zemalja po geopolitičkim područjima nije bitno različito od onog koje koristi MIPSA, s nešto detaljnijom podjelom izvan visoko industrijaliziranih područja Evrope i Amerike. Podaci se daju za ukupno 10 regija; Sjeverna Amerika, SAM, Zapadna Evropa, ZEV, Pacifičko industrijalizirano područje, PIP, (Japan, Australija, Novi Zeland), Istočna Evropa, IEV, Sjeverna Afrika i Srednji istok, SAF, Afrika južno od Sahare, JAF (uključivo Južnoafrička republika), Južna Azija, JAZ, Jugoistočna Azija, JIAZ, Azijske zemlje sa planskim privredama, PAZ, (Kina, Kampućija, Laos, Mongolija, DR Koreja, Vijetnam) te Latinska Amerika, LAM.

Sumarni pregledi dani su u tablicama 1.8, 1.9. i 1.10.

Tablica 1.8. prikazuje demografske projekcije po područjima, kao i sumarne pokazatelje za zapadne industrijske zemlje

Tablica 1.8. Demografska stanja i prognoze WEC 1983 — Stanovništvo i porasti po područjima

Područje	Stanovništvo (10^6)				Godišnja stopa rasta, %		
	1960	1978	2000	2020	1960—1978	1978—2000	2000—2020
SAM	200,9	245,0	296	349	1,11	0,9	0,8
ZEV	357,1	417,2	463	489	0,87	0,5	0,3
PIP	107,5	132,3	149	152	1,16	0,6	0,1
IEV	313,9	372,4	420	462	0,95	0,6	0,5
SAF	111,4	183,8	320	465	2,82	2,5	1,9
JAF	219,5	347,8	681	1 152	2,59	3,1	2,7
JAZ	560,4	848,6	1 284	1 644	2,33	1,9	1,2
JIAZ	220,6	337,6	503	631	3,03	1,8	1,1
PAZ	714,5	1 032,0	1 359	1 576	2,06	1,3	0,7
LAM	209,6	344,5	564	802	2,80	2,2	1,8
ZIZ	681,8	822,2	959	1 071	1,05	0,7	0,6
IZ	995,7	1 194,6	1 379	1 533	1,02	0,65	0,5
ZR	2 019,7	3 066,6	4 660	6 189	2,35	1,9	1,4
ZR-PAZ	1 305,2	2 034,6	3 301	4 613	2,50	2,2	1,7
Svijet	3 015,4	4 261,6	6 039	7 722	1,94	1,6	1,2

Tablica 1.9. Stope ekonomskog rasta do 1978. godine i prognoze WEC 1983 do 2020. godine

Područje	Dohodak ($ 1978 g./stanovniku)						Godišnje stope rasta, %				
	1960	1978	2000		2020		1960—1978	1978—2000		2000—2020	
			I	II	I	II		I	II	I	II
SAM	5 786	9 584	13 661	12 274	17 391	14 158	2,8	1,6	1,1	1,2	0,7
ZEV	3 623	6 223	10 866	8 767	15 395	11 258	3,1	2,6	1,6	1,8	1,2
PIP	2 086	7 680	15 780	13 035	25 480	17 300	7,5	3,3	2,4	2,4	1,4
IEV*	1 500	3 668	(7 707)	(6 230)	(12 654)	(8 415)	5,1	(3,4)	(2,4)	(2,5)	(1,5)
SAF	544	1 588	3 275	2 434	6 073	3 391	6,1	3,3	2,0	3,1	1,7
JAF	356	478	642	578	755	618	1,7	1,3	0,9	0,8	0,3
JAZ	137	177	284	229	439	308	1,4	2,2	1,2	2,2	1,2
JIAZ	287	652	1 639	1 153	2 960	1 661	4,7	4,3	2,6	3,0	1,8
PAZ	136	239	411	244	772	335	3,2	2,5	0,1	3,2	1,6
LAM	857	1 402	2 988	2 167	5 091	3 036	2,8	3,5	2,0	2,7	1,7
ZIZ	3 957	7 303	12 047	10 162	16 522	12 380	3,5	2,3	1,5	1,6	1,0
IZ	3 183	6 170	10 725	8 964	15 356	11 185	3,75	2,55	1,7	1,8	1,1
ZR	266	494	1 030	750	1 831	1 069	3,5	3,4	1,9	2,9	1,8
ZR-PAZ	338	623	1 286	959	2 193	1 320	3,5	3,3	2,0	2,7	1,6
Svijet	1 229	2 085	3 244	2 626	4 516	3 078	3,0	2,0	1,05	1,7	0,8

*IEV: vjerojatnosti ekonomskih pokazatelja od grupe WEC na osnovi energetskih prognoza

(ZIZ), sve industrijske zemlje (IZ), zemlje u razvoju ZR i zemlje u razvoju bez područja PAZ (ZR-PAZ).

U tablici 1.9. za ista područja prikazan je dohodak po stanovniku izražen u konstantnim dolarima (1978), kao i stope porasta do godine 2020.

Projekcije predviđaju gornju i donju granicu. Gornja bi bila rezultat povoljnih međunarodnih političkih i ekonomskih odnosa, druga bi se trebala očekivati u svijetu političkih napetosti i nepovoljnih ekonomskih odnosa između industrijskih zemalja i zemalja u razvoju.

Tablica 1.10. prikazuje procjene razvoja potrošnje energije (suma komercijalne i nekomercijalne potrošnje) za godine 2000. i 2020, također za dvije varijante razvojnih uvjeta, već spomenutih uz tablicu 1.9

Potrošnja energije po stanovniku u ovoj tablici izražena je u tonama standardne nafte. Da bi se dobile vrijednosti u tonama standardnog ugljena vrijednosti iz tablice 1.10. treba množiti s faktorom 1,5.

Perspektiva zemalja u razvoju prema prognozama WEC posebno je nepovoljna, ali na nesreću i najvjerojatnija. U uvjetima koji vladaju, a to su uvjeti varijante II, do godine 2020. ne može se očekivati puno više od udvostručenja potrošnje energije po stanovniku u odnosu na 1960. godinu. Nivo potrošnje od oko 1,5 tone standardnog ugljena po stanovniku koji bi se dostigao 2020. godine znatno je ispod onoga što bi bilo potrebno da bi se u tim zemljama u prosjeku živjelo na nivou koji je u evropskim zemljama dostignut 1960. godine.

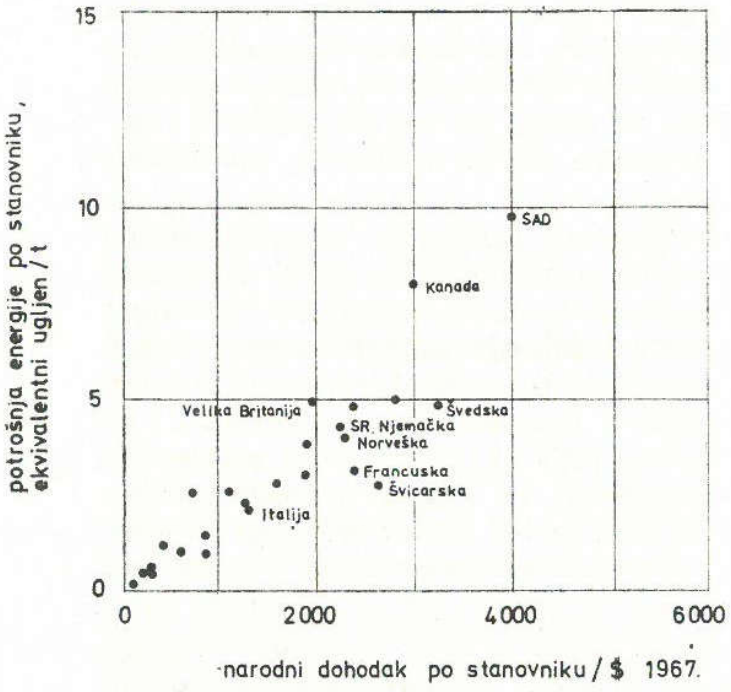
Tablica 1.10. Ukupna godišnja potrošnja energije po stanovniku, stanje do 1978. godine i prognoze WEC 1983 do 2020. godine

Područje	Potrošnja po stanovniku/tona standardne nafte*						Godišnje stope rasta/%				
	1960	1978	2000		2020		1960—1978	1978—2000		2000—2020	
			I	II	I	II		I	II	I	II
SAM	5,83	8,34	8,95	8,24	10,24	8,83	2,0	0,3	—0,1	0,7	0,3
ZEV	1,82	2,94	4,04	3,63	5,00	4,27	2,7	1,5	1,0	1,1	0,8
PIP	1,09	3,00	4,58	4,13	6,05	4,93	5,8	1,9	1,5	1,4	0,9
IEV	1,84	3,79	5,81	5,13	7,36	6,01	4,1	2,0	1,4	1,2	0,8
SAF	0,30	0,73	1,73	1,18	2,82	1,50	5,1	4,0	2,2	2,5	1,2
JAF	0,46	0,51	0,59	0,53	0,76	0,59	0,6	0,7	0,2	1,3	0,5
JAZ	0,21	0,25	0,36	0,30	0,48	0,35	1,0	1,7	0,8	1,4	0,8
JIAZ	0,40	0,65	1,16	0,87	1,64	1,01	2,7	2,7	1,3	1,7	0,7
PAZ	0,41	0,62	0,78	0,62	0,91	0,64	2,3	1,0	0	0,8	0,2
LAM	0,76	1,03	1,84	1,45	2,72	1,85	1,7	2,7	1,6	2,0	1,2
ZIZ	2,89	4,53	5,57	5,06	6,86	5,78	2,5	0,9	0,5	1,0	0,7
IZ	2,56	4,30	5,65	5,08	7,01	5,85	2,9	1,2	0,8	1,1	0,7
ZR	0,38	0,55	0,85	0,67	1,16	0,78	2,1	2,0	0,9	1,6	0,8
ZR-PAZ	0,36	0,51	0,88	0,69	1,25	0,82	2,0	2,5	1,4	1,8	0,9
Svijet	1,10	1,60	1,94	1,67	2,33	1,78	2,1	0,9	0,2	0,9	0,3

*1 tona standardne nafte = 1,5 tona standardnog ugljena

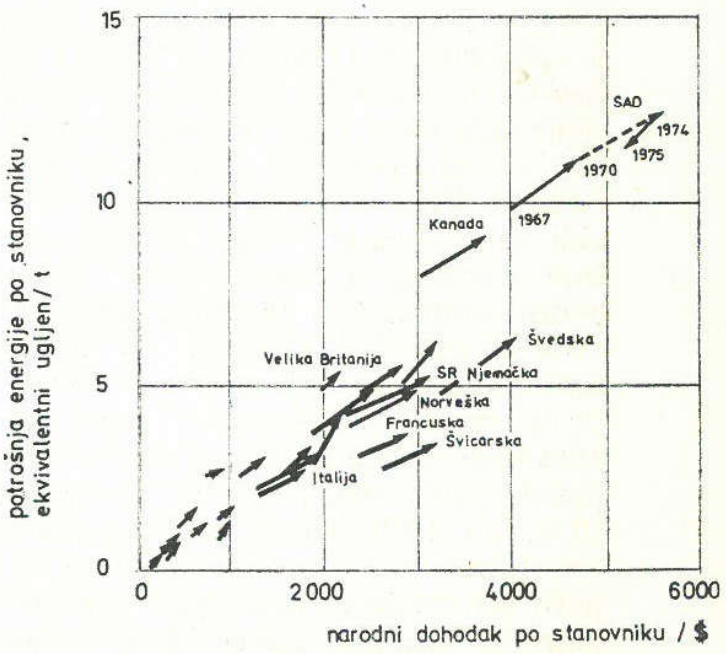
1.2. Veza potrošnje energije i dohotka

Iz mnogih prikaza može se vidjeti neposredna ovisnost narodnog dohotka i potrošnje energije. To ilustriraju i podaci za odabrane zemlje za godinu 1976. na slici 1.1. Na prvi pogled moglo bi se zaključiti da je ovisnost narodnog dohotka i godišnje potrošnje energije linearna. Ako bi veza između narodnog dohotka i potrošnje energije bila takva, bez obzira na različite faktore proporcionalnosti u različitim zemljama, onda bi i budući porast dohotka bio izravno povezan s porastom potrošnje energije. Međutim, tako se može zaključivati samo na temelju vrlo pojednostavnjenog promatranja.



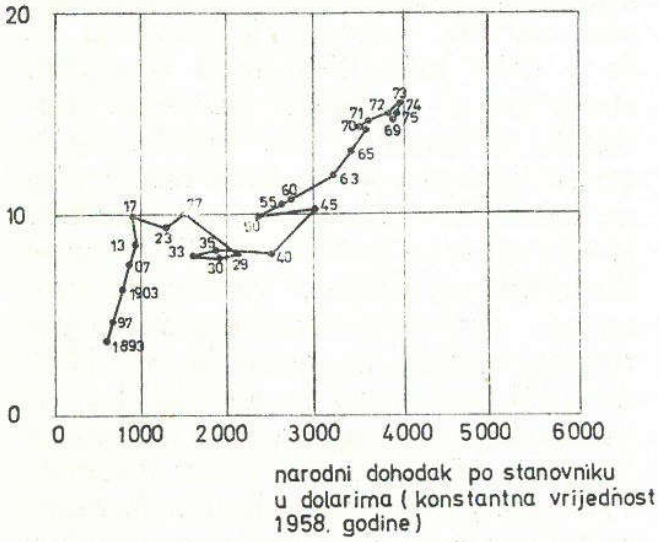
Slika 1.1. Međuzavisnost dohotka i godišnje potrošnje energije po stanovniku. Stanje 1967. godine, za odabrane zemlje.

Položaj u dijagramu ovisnosti narodnog dohotka prema potrošnji energije rezultat je dugogodišnjeg razvoja. Ekstrapolacija daljnjeg kretanja može se obaviti samo s velikim oprezom. Smjer razvoja nije određen samo položajem u dijagramu dohodak—potrošnja, odnosno postignutim razvojem i razinom dohotka, nego i mnogim ekonomskim, političkim i drugim činiteljima. Nedvojbeno je da su bogatstvo i raspoloživost energetskim i drugim sirovinama činitelji koji se ne mijenjaju u relativno kratko vrijeme. Ako su oni omogućili nekim zemljama određeni stupanj razvoja, prirodno je očekivati da će i dalje tako djelovati i omogućiti sličan razvoj u daljem razdoblju. Međutim, zaključivanje na temelju općih tendencija o razvoju u kraćim razdobljima ne mora biti valjano, odnosno potrebno je vrlo oprezno zaključivati. To možemo ilustrirati primjerima. Vremenska promjena ovisnosti dohotka i godišnje potrošnje energije za razdoblje od 1960. do 1974. prikazana je na slici 1.2. za osam odabranih zemalja: SAD, Kanadu, Švedsku, SR Njemačku, Veliku Britaniju, Francusku, Švicarsku i Italiju. Razabire se da promjene uglavnom dobro potvrđuju linearnu ovisnost dohotka i godišnje potrošnje, ali i da u američkom razvoju obrat nastupa 1973. godine (naftna kriza). Podaci za Švedsku nalaze se ispod pravca linearne ovisnosti koji prolazi ishodištem. Vidi se također da su nagibi pravaca podjednaki, što znači da je potrebno



Slika 1.2. Razvoj ovisnosti dohotka i godišnje potrošnje energije po stanovniku za odabrane zemlje (Me 1978)

približno jednako povećanje energije za jednako povećanje narodnog dohotka, odnosno energetski su koeficijenti slični.



Slika 1.3. Dohodak — godišnja potrošnja (D—P) dijagram za SAD. Razvoj u razdoblju 1893—1975. (Me 1978)

Da ne treba praviti ekstrapolacije prema promjenama u kratkom vremenskom razdoblju bez velikih ekonomskih perturbacija, razabire se naročito prema kretanju ovisnosti dohodak—godišnja potrošnja za SAD. Promjena obuhvaća razdoblje od 1893 do 1975, a narodni dohodak izražen je u dolarima iz 1958. godine [Me 1978]. Sasvim je jasno da dijagram dohodak-potrošnja osim veze između privredne razvijenosti i potrošnje energije odražava i mnoge druge činitelje. U dijagramu se vidi najprije oštar početni porast potrošnje energije, a nakon 1917. godine porast dohotka bez proporcionalnog porasta u potrošnji energije. Ta se dva razdoblja interpretiraju kao razdoblje uvođenja novih tehnologija i zatim kao razdoblje njihova tehničkog dozrijevanja, poboljšavanja djelotvornosti. Porast od 1950. do 1970. sporiji je: mogućnosti poboljšanja djelotvornosti iscrpljene su i novo povećanje dohotka traži povećanje potrošne energije. Kriza 1929. godine, rat 1940—45. i naftna kriza 1973. uzrokuju znatna odstupanja od pravilna rasta, pa i kretanja u suprotnom smjeru.

1.3. Energija u zemljama u razvoju

Razmotrimo sada nešto detaljnije položaj zemalja u razvoju u svjetskim energetskim kretanjima.

Prema stopama ekonomskog rasta u tablici 1.4. položaj zemalja u razvoju relativno bi se popravio. Omjer specifične potrošnje za Sjevernu Ameriku i zemlje u razvoju, koji je za 1970. godinu bio više od 20, smanjio bi se. Pretpostavlja se da će u razdoblju 1972—1985. potrošnja energije u Sjevernoj Americi rasti za 3,6%, a u zemljama u razvoju za 6,1%, te u razdoblju 1985—2000. za 3,5%, odnosno 4,5%. Koliko je takav porast potrošnje energije ostvariv, iako bi razvojni raskorak i dalje bio vrlo velik? Premda optimističke prognoze za nerazvijene, kao izraz dobrih želja, mogu djelovati umirujuće na savjest bogatih, one su štetne jer bez pravodobnog razumijevanja realnosti izostaju pravodobne akcije.

Izvjesnu indikaciju o realnosti tih pretpostavki možemo dobiti iz analiza načinjenih u Ujedinjenim narodima **prije izbijanja naftne krize** a objavljenih na Ženevskoj konferenciji o miroljubivoj upotrebi atomske energije 1971. godine [UN 1971]. Prognoza energetskih potreba za tri skupine zemalja prikazana je u tablici 1.11. i uključuje strukturu predviđene potrošnje i proizvodnje.

Za zemlje u razvoju predviđale su se dvije stope porasta narodnog dohotka. Manja stopa — 2,4% godišnje — bila bi omogućena porastom potrošnje energije po stanovniku za 3,8% (znatno veći energetski koeficijent nego u izvještaju WAES). Veću stopu — 3,5% — omogućio bi porast specifične potrošnje energije za 5,7%. Niža stopa jest ostvarena stopa rasta u razdoblju 1950—1968, a viša je bila postavljena kao cilj u planu UN za Drugu razvojnu dekadu zemalja u razvoju. Koliki bi bio rast prema toj stopi, postavljenoj tek kao cilj? Potrebno je 40 godina da se stopom rasta za 3,5% dohodak po stanovniku učetvorostruči.

Tablica 1.11. Potrošnja i razvoj potrošnje po stanovniku izražen ekvivalentnom količinom standardnog ugljena prema procjeni [UN 1971*]

Područje	Godine	Ukupna energija	Kruto gorivo	Tekuće gorivo	Zemni plin	Primarna električna energija
		Ekvivalentna količina standardnog ugljena/kg				
Svijet	1955.	1 201	677	354	148	22
	1968.	1 727	656	691	340	40
	2000.	5 615	651	3 108	1 670	186
razvijene zapadne zemlje	1955.	3 736	1 838	1 203	609	86
	1968.	5 436	1 571	2 484	1 234	147
	2000.	20 597	1 068	12 967	6 062	500
zemlje s planskim privredama	1955.	835	696	112	22	5
	1968.	1 550	961	336	234	19
	2000.	7 582	1 648	3 017	2 666	251
zemlje u razvoju (2,4 %)	1955.	183	58	110	11	4
	1968.	299	68	184	38	9
	2000.	986	97	686	125	78
zemlje u razvoju (3,5 %)	2000.	1 761	113	1 224	217	207

*World Energy Requirements
UN Resources and Transport Division 1971.

Dvije milijarde ljudi živi danas s godišnjim narodnim dohotkom manjim od 300 $ po osobi (v. tabl. 1.9.) Dakle, bilo bi potrebno 40 godina da stopom rasta 3,5% ostvare 1 200$ po stanovniku godišnje, a u Evropi i Sjevernoj Americi danas se ostvaruje 4 do 6 puta više. Tako promatrano viša stopa morala bi biti apsolutni minimum ako se doista želi ukloniti sve nečovječniji i neopravdaniji jaz između bogatih i siromašnih, razvijenih i nerazvijenih. Jaz nije opravdan jer ga se današnjom tehnikom i tehnologijom može uspješno svladati. Njegovu nehumanost možemo razabrati ako znamo da se na naoružanje 1981. potrošilo više od 500 milijardi dolara i da se i dalje troši sve više, a to bi bilo dovoljno da se udvostruči dohodak za gotovo dvije milijarde ljudi. Samo dio bi bio dovoljan da se ukloni oskudica u cijelom svijetu. Na žalost, i ta stopa rasta za 3,5% kojom bi se narodni dohodak udvostručio za 20 godina nije dostižna.

Energetski rast u tablici 1.11. temelji se ponajviše na nafti. Međutim, taj izvor energije sve viših cijena ne može biti temelj dugoročnom razvoju. Zemlje u razvoju ne mogu plaćati tako skupu energiju. U tablici 1.11. nisu prikazani nuklearna energija ni ostali novi izvori energije. Pokušajmo procijeniti koliko bi razvoj nuklearne fisijske energetike mogao nadomjestiti potrošnju tekućih goriva. Optimističku prognozu Međunarodne agencije za atomsku energiju (MAAE) iz 1974. godine prikazat ćemo ekvivalentnom godišnjom količinom standardnog ugljena po stanovniku za zemlje u razvoju i razvijene zemlje.

Podaci u tablici 1.12. pokazuju da bi nuklearna energija primjetnim dijelom zamijenila potrošnju tekućih goriva u razvijenim zemljama. O primjerenosti takvog programa za zemlje u razvoju moglo bi se raspravljati. Ako bi se, naime, upotreba tekućih goriva smanjila mnogo ispod 1 224 kg po stanovniku (tabl. 1.11, stopa 3,5%), onda 400 kg goriva (koliko bi bio ekvivalent doprinosa nuklearne energije), premda to nije malo, vrlo vjerojatno ne bi bilo dovoljno. Na žalost, nije svrhovito raspravljati o tome. Analiza pokazuje da se nuklearni razvoj

Tablica 1.12. Prognoza razvoja fisijske energetike u razvijenim zemljama (A) i u zemljama u razvoju (B) iskazana ekvivalentnom godišnjom količinom standardnog ugljena po stanovniku (Prognoza 1974 — MAAE)

	1980.		1990.		2000.	
	A	B	A	B	A	B
*Izgrađeno NE, snaga/GW(e)	290	25	1 660	240	4 550	750
**Ekvivalentna godišnja količina standardnog ugljena/ 10^6 t	750	64,5	4 280	620	11 700	1 930
***Broj stanovnika/10^6	1 210	3 246	1 336	4 101	1 453	5 040
Ekvivalentna godišnja količina standardnog ugljena po stanovniku/kg	620	20	3 200	150	8 050	380

*Projekcije nuklearnih kapaciteta: I.A. Lane and A.I. Polliart (IAEA), The possible role of nuclear power in the future energy supply of the world; 24thPugwash Conference on Science and World Affairs, Baden, 1974.
**Ako se pretpostavi 7 000 sati rada godišnje i koeficijent pri iskorištenju fosilnog goriva — 1/3.
***Procjene UN 1968 — srednja varijanta.

nakon 1974. godine usporava, često zbog akcija raznih protestnih skupina u razvijenim zemljama. No, najbolnije će posljedice osjetiti zemlje u razvoju bez nafte i ugljena jer je njima ta energija najpotrebnija. Kako se vidi iz tablice 1.13. novije prognoze predviđaju znatno usporeniji razvoj nuklearne energetike.

Tablica 1.13. Novije prognoze nuklearnog razvoja

Godina	Predviđena snaga nuklearnih elektrana GW (e)		
	W E C*	N E A**	W A E S
1985.	270	278 – 368	291 – 412
2000.	1 141	1 000 – 1 890	913 – 1 772

*W E C = World Energy Conference
**N E A = Nuclear Energy Agency/OECD

Za 2000. godinu predviđa se samo 1/3 ili i manje od iznosa u tablici 1.12. Dok se ne dobiju posebni podaci o smanjenju u zemljama u razvoju i razvijenim zemljama, pretpostavit ćemo optimistički da je stopa jednaka za obje skupine. To svakako znači da će u zemljama u razvoju biti jako smanjena mogućnost da nuklearna energija primjetnije zamijeni potrošnju tekućih goriva. Moramo zaključiti da će se takvim nuklearnim razvojem vrlo teško ostvariti ili se uopće neće moći ostvariti porast energetske potrošnje za 5,7% i na njemu zasnovan porast narodnog dohotka za 3,5%. Takve stope porasta temeljile su se na jeftinim tekućim gorivima, a danas su se uvjeti bitno promijenili. Nažalost, vjerojatniji je porast prema prognozi u tablici 1.10, a optimističke prognoze mogu poslužiti kao alibi za nepoduzimanje akcija kojima bi se opće tendencije mogle mijenjati u korist zemalja u razvoju.

Prema navedenim podacima postaje jasnije ono što se naziva krizom energije. Mnogi analitičari, osobito na Zapadu, smatraju da kriza energije ne postoji, da energije ima dovoljno, da će se uskoro riješiti problemi pri korištenju nuklearne i sunčane energije, zatim energije vjetra itd. Da se energije može proizvesti koliko je potrebno i na mnoge nove načine, ali po odgovarajuće višoj cijeni, nije sporno. Tko u tom smislu negira postojanje energetske krize, ne osjeća stvarne probleme. Svijet u razvoju ne može plaćati skupu energiju koja se, doista, u principu može proizvesti. Kriza energije ne postoji za bogate razvijene zemlje ni

danas, a neće postojati ni u budućnosti. Što da čine zemlje u razvoju? Tekuća su goriva preskupa da bi na njima mogle temeljiti svoj razvoj. Alternativna goriva koja mogu zadovoljiti velike energetske potrebe jesu ugljen, nuklearna i sunčana energija.

Ti su izvori doista alternative za zemlje u razvoju, ali samo ako cijena energije i tehnološki problemi novih izvora također ne prekoračuju mogućnosti tih zemalja. Cilj nam je, dakle, iscrpnije promotriti i ocijeniti potencijal novih energetskih izvora, a zatim vidjeti koliko i u kakvim oblicima ti izvori mogu ili bi mogli doprinijeti rješavanju stvarne energetske krize, odnosno osigurati energiju za zemlje u razvoju.

2. Izvori energije

Polazeći od procjena budućih energetskih potreba opisanih u prvom dijelu, promotrit ćemo u ovome koliko bi se te potrebe mogle podmiriti. Postoje različiti izvori, ali očito je da će izvori za buduće godišnje potrebe od nekoliko desetaka milijardi tona standardnog ugljena morati zadovoljiti niz kriterija.

Ponajprije, takvi izvori moraju imati značajan potencijal u odnosu prema budućim potrebama, moraju biti tehnički razvijeni i ekonomski prihvatljivi, a njihov utjecaj na čovjeka i okoliš mora biti unutar dopuštenih granica.

Prema tim općim kriterijima uobičajene su klasifikacije izvora energije.

Izvore koje danas koristimo obično nazivamo konvencionalnima. Budući da se upotrebljavaju, tehnički su razvijeni. Međutim, to ne znači da su ti izvori svakako ekonomični ili da ne utječu nepovoljno na okoliš. Ekonomičnost, odnosno relativna ekonomičnost nekog izvora ovisi o mnogo činitelja. Kriteriji o dopuštenim utjecajima na okoliš promjenljivi su kao i kriteriji o tehničkoj razvijenosti. Poopćene klasifikacije nisu korisne jer ograničuju motrenje područja u kojem se dešavaju trajne i važne promjene. Prema trošenju rezervi energetskih sirovina u prirodi izvori su obnovljivi, na primjer sunčana ili hidroenergija, ili nisu obnovljivi pa se iscrpljuju konačne rezerve, npr. ugljen, nafta ili nuklearna energija. No, u iscrpnom promatranju i ta klasifikacija nije osobito korisna; razvoj nekog obnovljivog izvora energije doduše ne ovisi o rezervama energetskih sirovina, ali može ovisiti o raspoloživim količinama materijala potrebnim za gradnju energetskih pogona. Količina energetske sirovine za dobivanje nuklearne energije može pak razvojem fuzije postati praktično neiscrpna, iako nije obnovljiva.

2.1. Konvencionalni i nekonvencionalni izvori energije

Budućim energetskim izvorima konvencionalnog tipa nazivamo ovdje fosilna goriva i hidroenergiju. Upotreba tih izvora ne zahtijeva novi znanstveni ili tehnički razvoj. Za njihovo korištenje odlučujuća je svrhovitost, raspoloživost, ekonomičnost i utjecaj na okoliš. Očito je da će u tome postojati velike razlike i da su tako definirani konvencionalni izvori energije vrlo velika skupina.

Nekonvencionalnim izvorima nazivat ćemo stoga one izvore koji se mogu koristiti za proizvodnju velikih količina energije tek nakon znanstvenog i tehničkog razvoja. Prema tom kriteriju nekonvencionalan je izvor i fisijska nuklearna energija jer se razabire da se bez znanstvenog i tehničkog razvoja ne bi mogle dugoročno proizvoditi velike količine takve energije. Zbog toga su za sada nekonvencionalni izvori i geotermička i sunčana energija, iako postoje razvijeni načini korištenja manjih količina te energije.

Nekonvencionalnim izvorima energije u popularnoj literaturi često se naziva svaka ideja o dobivanju energije koja nije suprotna zakonima fizike, bez obzira na ekonomske ili tehničke probleme i količinu energije koja bi se tako mogla dobiti. U ovom tekstu nećemo nabrajati takve prijedloge, iako oni mogu biti i vrlo zanimljivi. Prema našem kriteriju govorit ćemo samo o onim izvorima iz kojih će se moći proizvoditi mnogo energije; ili preciznije — novi izvor treba posjedovati potencijal podmirenja primjetnog dijela budućih energetskih potreba.

Prema istom kriteriju izvori energije, kao npr. drvo ili životinjski izmet, iako korišteni od davnina i u tom smislu konvencionalni, ne ubrajaju u tako definirane konvencionalne izvore. Njihov udio u budućoj proizvodnji energije

neće biti velik. Prema takvoj definiciji konvencionalni su izvori energije hidroenergija, a od fosilnih goriva ugljen, nafta i zemni plin. Uljni škriljci iz kojih se dobiva nafta mogli bi se svrstati u konvencionalne izvore. Međutim, prije opsežnog iskorištavanja potrebno je riješiti ozbiljne tehničke probleme. Takvom podjelom, dakako, ni u kom slučaju ne želimo reći da pri korištenju konvencionalnih izvora energije nema znanstvenih i tehničkih problema. No, takvim se razvojem bolje i racionalnije iskorištavaju primarni izvori, a razvoj nije nuždan preduvjet da bi izvor tek postao značajan.

Intenzivno se npr. proučavaju načini boljeg iskorištavanja ležišta ugljena. „In situ" uplinjavanje ugljena omogućuje iskorištenje onih slojeva koji se današnjim rudničkim metodama ne mogu koristiti.

U toku je znanstveni i tehnički razvoj kojim se omogućuje potpunije iskorištenje ležišta nafte. To su tzv. sekundarne i tercijarne metode pridobivanja nafte s pomoću kojih se količina nafte iz jedne bušotine može više nego udvostručiti.

Uspješan znanstveni i tehnički razvoj magneto-hidrodinamskih pretvarača energije omogućit će da se u termoelektranama na fosilna goriva iz iste količine goriva dobije oko 50% više električne energije.

To su samo neke ilustracije razvoja koji će unaprijediti korištenje konvencionalnih izvora energije.

Veoma važan problem jest racionalnije korištenje sekundarnih oblika energije u vrlo raznolikoj primjeni u industriji, prometu i individualnoj potrošnji. Racionalnija upotreba sekundarnih oblika energije, iako neovisna o razvoju iskorištavanja primarnih oblika, smanjit će ipak potrebe za primarnim izvorima. Mnogo energije može se uštedjeti u kemijskoj i teškoj industriji na primjer, no brzina uvođenja racionalnije upotrebe određena je često troškovima potrebnih rekonstrukcija.

Djelotvornija upotreba energije u novim instalacijama smanjuje energetske koeficijente. Dakako, štednja energije može se postignuti samo svjesnim nastojanjem, vlastitim razvojem i praćenjem veoma opsežnog razvoja u svijetu.

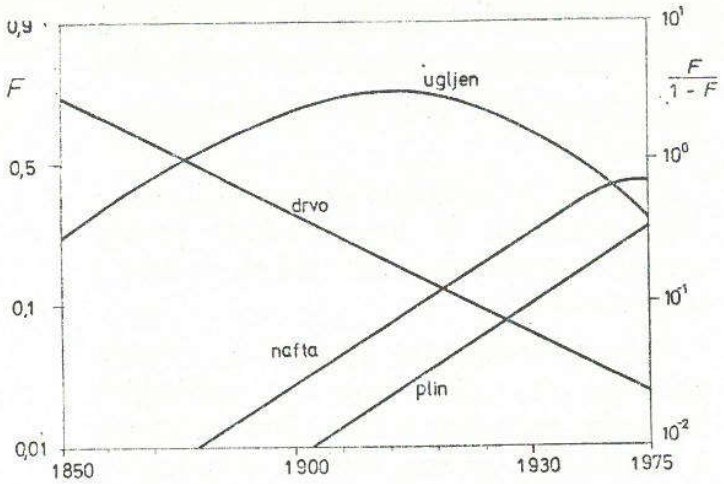
Popis budućih perspektivnih izvora energije, konvencionalnih i nekonvencionalnih, jako je smanjen zahtjevom da ti izvori imaju dugoročan potencijal podmirivanja energetskih potreba. Najprije se govori o rezervama konvencionalnih izvora od kojih fosilna goriva imaju dugoročan energetski potencijal.

Obzirom da postoje konvencionalni izvori koji mogu podmiriti znatni dio budućih potreba, može se pitati da li je potreban razvoj novih izvora energije. Promatraju se i činjenice i razlozi prema kojima je potreban razvoj novih izvora energije iako postoje veliki potencijali fosilnih goriva (ugljena).

Sunčana i nuklearna energija postat će nakon uspješnog znanstvenog i tehničkog razvoja izvori koji će se moći dugoročno iskorištavati u velikom opsegu. Detaljnije o potrebnom znanstvenom i tehničkom razvoju govorit će se u idućim poglavljima.

U uvodnom dijelu o nekonvencionalnim izvorima raspravlja se i o geotermičkoj energiji. Tom izvoru energije, točnije — jednom njegovom specifičnom obliku, pripisuje se veoma velik dugoročni energetski potencijal. Navedene su procjene prema kojima se razabire da je vjerojatnost za razvoj tog tipa energije manja nego za razvoj sunčane, fisijske i fuzijske energije, pa se o tom izvoru više ne raspravlja.

Prema današnjem stanju znanosti i tehnike ne treba dvojiti da su tehnički rješivi problemi proizvodnje sunčane i nuklearne energije u velikim razmjerima. Zato se najviše i očekuje od korištenja tih izvora. No, valja i uvažiti da razvoj znanosti sadrži i element nepredvidljivoga, pa se mogu očekivati i iznenađenja. Znači li to da neki izvor energije s kojim se danas ne računa može postati perspektivnim? Nije na primjer nemoguće da se pronađu rješenja za korištenje topline mora ili geotermičke energije u velikim razmjerima. Ako se to dogodi, bit će vremena da se promotri pozornije i te izvore.



Slika 2.1. Udio F određenog primarnog oblika energije u ukupnoj tržišnoj primarnoj energiji i omjer s udjelom ostalih oblika u razdoblju od 1850. do 1975.

Znanstveni ili tehnički razvoj koji bi proizveo nove i obilate izvore energije prema poznatim zakonima fizike nije na vidiku. U budućnosti, dakako, nisu isključena ni nova otkrića u fizici koja bi bila temelj za korištenje energetskih izvora. Međutim, u idućim desetljećima bit će dovoljno posla da se iskoriste energetski potencijali Sunca i atomske jezgre. Prema razvoju tih izvora vidimo da je potrebno mnogo desetljeća da se na temelju relativno jednostavnih fizikalnih principa razvije tehnički i tehnološki upotrebljiv i ekonomičan izvor energije. Nije realno očekivati da bi u idućem stoljeću neki novi, danas nepoznat fizikalni proces mogao bitno pridonijeti dobivanju korisne energije.

2.2. Obnovljivi izvori energije

Fosilna goriva stvarana su milijunima godina, a sad se mogu potpuno potrošiti u nekoliko desetljeća. Zato su obnovljivi izvori važni za budućnost čovjeka. Omogućuju mu da uspostavi ravnotežu s prirodom, umjesto da je narušava. Živjeti u harmoniji s prirodom ideal je dalekih istočnih naroda; nastao iz poštovanja nadmoćnih prirodnih sila, ali i iz nalaženja zadovoljstva i ljepote u takvoj harmoniji. Pobjeđivati i savladivati prirodu je dostignuće kod nadobudnih mladih zapadnih naroda na putu industrijalizacije. Pomaknuti planine, pregraditi rijeke i doline, promijeniti lice Zemlje, to je godilo njihovom pomalo sirovom samopouzdanju. Stvorena su dotad nezamisliva bogatstva. Život je postao lakši, svladane su mnoge bolesti i nedaće. Pokazalo se, međutim, da prekid vjekovnog suživljavanja s prirodom ima i niz negativnih učinaka na modernog čovjeka. Izdvojivši se iz prirodne cjeline, čovjek je počeo gubiti orijentaciju. No, povratka idili više nema. Poslije industrijske revolucije slijedila je eksplozija stanovništva. Najveći dio tekovina te revolucije sada je potreban da se prehrani 4,5 milijarde stanovnika Zemlje. Ocjenjuje se da gotovo jedna milijarda ljudi danas gladuje ili da se ne hrani prikladno. Potkraj stoljeća bit će oko 6 milijardi ljudi. Moći će se prehraniti, jedino ako se u poljoprivredi budu primjenjivale moderne agrotehničke mjere, ako se budu koristila umjetna gnojiva, pesticidi i mnogo energije. Novi energetski izvori moraju moći zadovoljiti potrebe 6 ili više milijardi stanovnika Zemlje. To vrijedi i za obnovljive izvore. Oni su mogli podmirivati potrebe čovječanstva kada je bilo pola do milijardu ljudi, a mogu li zadovoljiti potrebe 6 milijardi ljudi? Ako bi se toliko energije moglo dobiti iz obnovljivih izvora, čovjek bi mogao smanjiti svoje nepovratne utjecaje na prirodu. Čini se da višestruki porast broja stanovnika u nekoliko stoljeća unaprijed određuje nepovoljan odgovor. Međutim, tehnički napredak nudi i nove obnovljive izvore, odnosno njihovo mnogo bolje iskorištenje, osobito sunčanu energiju u raznim oblicima.

Postoje mnoge procjene o mogućnostima obnovljivih izvora energije. No, vrlo su velike razlike između teorijskih potencijala i onoga što je tehnički i ekonomski ostvarivo. U tablici 2.1. prikazani su rezultati analize iz studije MIPSA za neke najvažnije obnovljive izvore.

Tablica 2.1. Procjena ostvarivih potencijala obnovljivih izvora u studiji IIASA (*International Institute for Applied System Analysis* — Međunarodni institut za primijenjenu sistemsku analizu — MIPSA)

Izvor	Ostvariv godišnji potencijal izražen ekvivalentnom količinom standardnog ugljena
šume, uzgoj biljnog goriva	$5{,}1 \cdot 10^9$ t
sunčani kolektori, toplinske pumpe	$1 \cdot 10^9$ t
hidroenergija	$1{,}5 \cdot 10^9$ t
vjetar	$1 \cdot 10^9$ t
geotermička energija	$0{,}6 \cdot 10^9$ t
ostali izvori	$0{,}5 \cdot 10^9$ t
ukupno	$9{,}7 \cdot 10^9$ t

Pri analizi valja razlikovati tehnički, odnosno teorijski potencijal od ostvarivih količina zbog različitih ograničavajućih činitelja, ponajprije ekonomskih i tehnoloških. Upotrebu sunčane energije ograničuju npr. veliki investicijski troškovi, neriješen problem spremanja energije, vrlo velika količina materijala potrebnog za sunčane instalacije. Procjenjuje se da je potrebno barem 50 kg željeza za četvorni metar sabirne površine za prikupljanje sunčane energije, pa se razabire da je korištenje sunčane energije u velikim razmjerima ograničeno proizvodnjom željeza. Procjene ostvarivih doprinosa obnovljivih izvora vrlo su subjektivne. Gardel [Ga 1981] ocjenjuje da će doprinos tih izvora 2000. godine biti 50 EJ (manje nego što daje dvije milijarde tona standardnog ugljena), a udio bi sunčane energije u tom doprinosu bio vrlo malen. Očito je da je teorijski potencijal nekih obnovljivih izvora, npr. sunčane i geotermičke energije, mnogo veći od realno iskoristivih količina pa valja detaljnije promotriti probleme i ograničenja u korištenju.

2.3. Rezerve ugljena, nafte i zemnog plina te potreba razvoja novih izvora

Podatke o zalihama energetskih sirovina potrebno je kategorizirati prema stupnju poznavanja nalazišta i ekonomskoj iskoristivosti.

Poznatim zalihama, odnosno rezervama nazivaju se zalihe koje su rudarskim istražnim radovima i bušenjima utvrđene i količinski i prema mjestu nalazišta.

Iskoristive rezerve dio su poznatih rezervi koje su ekonomski iskoristive postojećim tehnologijama.

O mogućim rezervama odnosno zalihama zaključuje se na temelju geoloških podataka. Pri takvim procjenama vrlo je velik stupanj neodređenosti o količini, mjestu i ekonomskoj iskoristivosti.

Iz definicija je jasno da se iskoristive rezerve i moguće rezerve mijenjaju. Razvojem novih tehnologija dobivanja i ekstrakcije poznate rezerve postaju iskoristive, a procjene mogućih rezervi mijenjaju se na temelju geoloških i drugih istraživanja. Dobivanje nafte iz podmorskih bušotina ili uplinjavanje ugljena u ležištu primjeri su takvog razvoja.

U tablici 2.2. prikazane su rezerve ugljena prema analizi pripremljenoj u sklopu Svjetske konferencije o energiji 1974. godine.

Ukupne poznate količine izražene ekvivalentnom količinom standardnog ugljena iznose malo više od 1 400 milijardi tona, a ekonomski iskoristive oko 590 milijardi tona. Procjenjuje se da su moguće rezerve oko 10 000 milijardi tona. Oko 85% tih mogućih rezervi nalazi se na području Sovjetskog Saveza i Sjedinjenih Američkih Država, a 10% na području NR Kine. No, koji bi dio tih rezervi mogao biti ekonomski iskoristiv, zasad se ne može odrediti s većom sigurnošću.

U tablici 2.3. prema istoj analizi prikazane su proizvodnja i dokazane iskoristive rezerve nafte prema stanju 1972. godine.

Tablica 2.2. Poznate i moguće rezerve ugljena

Područje	Poznate rezerve/10^9 t		Moguće rezerve/10^9 t
	ekonomski iskoristive	ukupne poznate	
SSSR	136,6	273,2	5 714
Kina	80,0	300,0	1 000
Azija	17,5	40,5	108
SAD	181,8	363,6	2 925
Kanada	5,5	9,0	109
Južna Amerika	2,8	9,2	33
Evropa	126,8	319,8	607
Afrika	15,6	30,3	59
Oceanija	24,5	74,7	200
ukupno	591,2	1 420,3	10 547

Podaci: Svjetska energetska konferencija 1974. godine. Promjene na konferenciji 1977. neznatne. Procjene prema raznim izvorima znatno se razlikuju, no, da bi se spoznali opći odnosi točni podaci i nisu bitni.

Tablica 2.3. Proizvodnja i dokazane ekonomski iskoristive količine (rezerve) nafte

Područje	Dokazane iskoristive količine/10^9t	Godišnja proizvodnja/10^6t	Trajanje rezervi*/godina
Afrika	12,85	272,4	47
Azija	53,97	1 021	53
Evropa	1,4	35,43	39
SSSR	8,14	394	21
Kanada	1,08	69,41	15
SAD	5,57	436,15	13
Južna Amerika	7,6	218,3	35
Oceanija	0,23	15,4	15
ukupno	91,52	2 493	37

*uz proizvodnju kao 1972. godine.
Podaci: Svjetska energetska konferencija 1974. godine.

Ako bismo željeli procijeniti ukupne rezerve nafte, bez obzira na ekonomičnost iskorištavanja, trebalo bi, prema mišljenju većine stručnjaka, podatke o dokazanim iskoristivim rezervama pomnožiti faktorom 3—4. Tako bi se dobilo između 250 i 350 milijardi tona nafte, odnosno izraženo ekvivalentnom količinom ugljena 350 do 500 milijardi tona. Prema tako dobivenim podacima možemo se samo približno orijentirati jer istražni radovi trajno proširuju opseg dokazanih rezervi.

Novija detaljna studija razvoja energetike u svijetu — Energy in the Finite World — načinjena nakon više godina rada u Međunarodnom institutu za primijenjenu sistemsku analizu — MIPSA, predviđa da će 2030. godine biti potrebno energije od 23 do 36 milijardi tona standardnog ugljena godišnje. Kao temelj za promatranje dugoročne strategije razvoja u studiji se ocjenjuju mogućnosti iskorištenja rezervi ugljena, nafte i zemnog plina novim tehnologijama u budućnosti,

te se procjenjuju konačno iskoristive količine. Razvojem i primjenom novih tehnologija sve je više iskoristivih rezervi, ali i troškovi postaju sve veći. U studiji se iskoristive količine kategoriziraju prema cijeni dobivanja (u dolarima 1979. godine) — ugljen: I kategorija cijena 25$/t, II kategorija 25—50$/t; nafta i zemni plin: I kategorija 12$ za barel (159 litara), odnosno ekvivalentnu količinu plina, II kategorija 12—20$ i III kategorija 20—25 $ za barel.

Zbog stalnog porasta cijena nafte i inflacije korisnije je definirati ekonomske kategorije rezervi omjerima cijena: cijena ugljena druge kategorije može biti do dvostruko veća od cijene prve kategorije. Cijena nafte i plina u drugoj kategoriji viša je za 66%, a u trećoj do 100% od cijene prve kategorije.

U tablici 2.4. navode se podaci iz studije MIPSA o konačno iskoristivim rezervama političko-ekonomskih područja. Ukupno iskoristivih rezervi ima oko 3 000 milijardi tona, a u prvoj ekonomskoj kategoriji samo oko 1/3 te količine.

Ako bi se trošilo 30 milijardi tona godišnje, rezerve jeftinijih (no ne jeftinih) kategorija trajale bi tri do četiri desetljeća. Ako bi u ukupnoj potrošnji energije fosilna goriva sudjelovala s oko 50%, tj. s ekvivalentnom količinom standardnog ugljena oko 15 milijardi tona, jeftine rezerve trajale bi do 100 godina. To bi bilo prihvatljivije, no, to ujedno znači da bi trebalo razviti izvore energije koji bi godišnje mogli proizvoditi toliko energije kao oko 15 milijardi tona standardnog ugljena, tj. gotovo dva puta više od ukupne današnje proizvodnje energije.

Ipak to nije jedini razlog za razvijanje novih izvora energije. Od ukupnih rezervi fosilnih goriva kroz dulje razdoblje mogao bi se koristiti jedino ugljen. Pogled na tablicu 2.1. pokazuje da je ugljen vrlo neravnomjerno raspoređen, više od 80% mogućih rezervi ugljena nalazi se u dvije zemlje, u SAD i SSSR-u. Tako

Tablica 2.4. Konačno iskoristive rezerve fosilnih goriva prema studiji MIPSA razvrstane u ekonomske kategorije

Područje	Ugljen/10^9t		Nafta/10^9t			Plin/10^9t		
	Kategorije cijene*		Kategorije cijene**			Kategorije cijene**		
	I	II	I	II	III	I	II	III
Sjeverna Amerika	187	250	25	29	135	37	43	32
Sovjetski Savez i Istočna Evropa	146	482	40	49	74	71	55	34
Zapadna Evropa, Japan, Australija, Novi Zeland, Južnoafrička Republika, Izrael	100	162	19	3	23	21	5	15
Latinska Amerika	11	12	21	87	118	19	13	15
Afrika (bez Sjeverne Afrike i Južnoafričke Republike), južna i jugoistočna Azija	59	56	27	5	36	17	11	15
Srednji istok i Sjeverna Afrika	1	1	142	30	nema procjene	116	11	15
Kina i bliska područja, Koreja, Vijetnam	99	134	12	14	16	7	14	15
Svijet, ukupno	603	1 096	284	215	401	287	152	141

*ugljen: I kategorija — cijena do 25 $ po toni; II kategorija — cijena od 25 $ do 50 $ za tonu.
**nafta, plin: I kategorija 12 $; II kategorija 12—20 $, III kategorija 20—25 $ za barel (159 litara), odnosno ekvivalentnu količinu plina. Cijene u dolarima iz 1979. godine.
Sve rezerve izražene ekvivalentnom količinom standardnog ugljena

bi dugoročno i preveliko korištenje ugljena moglo mnoge zemlje dovesti u neželjenu ovisnost. Ako se i pretpostavi spremnost tih dviju zemalja da bez ograničenja opskrbljuju ostale države ugljenom, ostaje problem iskopa i prijevoza potrebnih ogromnih količina.

Razvoj novih izvora energije potreban je i zbog vrlo ozbiljnih utjecaja na okoliš koje bi mogla prouzročiti dugotrajna i vrlo opsežna upotreba fosilnih goriva.

Onečišćenje atmosfere česticama pepela i proizvodima izgaranja raznih primjesa koje se u ugljenu nalaze, ponajviše sumpora, veoma je ozbiljan problem, ali rješiv u duljem razdoblju. Sumpor se može odstraniti, iako to poskupljuje energiju. Ostaje, međutim, potencijalno vrlo ozbiljan, dugoročan problem — emisija ugljik-dioksida (CO_2). Količine su tolike da praktično rješenje zadržavanjem emisije nije zamislivo. Zadnjih deset godina svjetski klimatolozi [npr. Sc 1980] istražuju taj problem i upozoravaju da povećanje količine ugljik-dioksida u atmosferi može vrlo nepovoljno utjecati na klimu. U milijun volumnih dijelova atmosfere bilo je krajem prošlog stoljeća oko 295, a sada već ima oko 340 dijelova CO_2. Godišnje se koncentracija CO_2 poveća za 1—2 dijela, što može uzrokovati porast temperature troposfere i hlađenje stratosfere. U fizikalnim modelima koji trebaju odrediti temperaturne promjene ima još dosta neodređenosti [Fl 1980]. Većina modela predviđa povećanje površinske temperature za 2 do 3 °C u srednjim zemljopisnim širinama pri udvostručenju koncentracije CO_2 [Ga 1980].

Zbog međuovisnosti temperature, količine snijega i leda te površinskog albeda, u polarnim područjima porast bi bio 5 do 10 °C. Ako bi koncentracija CO_2 porasla do 750 dijelova u milijun dijelova atmosfere, temperatura bi, prema reprezentativnoj procjeni, porasla za 4 °C. Predviđa se da bi se tada potpuno otopio površinski arktički led, a možda i led u zapadnom Antarktiku, što bi podiglo razinu mora oko 5 metara.

Prema ocjeni vodećih klimatologa [Fl 1980] vjeruje se da u idućih 50—100 godina neće biti neposredne opasnosti, ali problem se mora ozbiljno proučavati. Emisija CO_2 uzrokuje poremećaj vrlo osjetljive prirodne ravnoteže. Kvantitativne procjene nisu još sigurne, ali zato ne bi valjalo potcjenjivati problem. Ne ispune li se optimistička predviđanja o učincima porasta CO_2 u atmosferi, a to je sve manje vjerojatno, morat će se bitno ograničiti korištenje fosilnih goriva, bez obzira na njihove rezerve. Ugljik-dioksid tako se kreće i akumulira u prirodi, da se nepovoljno djelovanje ne može zaustaviti još nekoliko desetljeća, nakon što se potpuno obustavi njegova emisija. Novi izvori energije treba da svijet učine manje ovisnim o ugljenu i zbog mogućeg, pa i sve vjerojatnijeg nepovoljnog djelovanja ugljik-dioksida.

3. Novi izvori energije za budućnost

3.1. Geotermička energija

3.1.1. Uvod

Da je unutrašnjost Zemlje toplija nego njezina površina, razabiremo na mnogo načina: pri bušenju ili rudarskim iskapanjima, prema toplim i vrućim izvorima voda iz dubljih slojeva. Najočiglednije to pokazuju vulkanske erupcije, kad iz unutrašnjosti Zemlje provaljuju užarene mase. Sve dublje u unutrašnjosti Zemljine kore temperatura je sve viša; svaki kilometar dublje može biti viša ponekad samo za 10 °C, ali može porasti i mnogo više od prosječnih 25—30 °C/km.

Temperaturne razlike, odnosno gradijenti pokazuju da postoji tok topline iz unutrašnjosti prema površini Zemlje. Prema današnjim shvaćanjima glavni dio topline posljedica je radioaktivnog raspada teških elemenata u Zemljinoj kori, a jedan dio topline dotiče iz vruće unutrašnjosti ispod kore.

Osim radioaktivnim raspadom toplina se u Zemljinoj kori stvara i na druge načine: egzoenergijskim kemijskim reakcijama, kristalizacijom i skrućivanjem rastopljenih stijena, trenjem pri kretanju tektonskih masa. Iako prosječni porast topline zbog takvih pojava nije osobito velik, ipak su one uzrok znatnih lokalnih promjena temperaturnih gradijenata. Visoki temperaturni gradijenti postoje u područjima jakih seizmičkih aktivnosti. Na površini Zemlje prosječni je tok geotermičke energije oko 0,06 W/m^2. Izvor je, dakle, vrlo difuzan, osim u vulkanskim područjima gdje su toplinski gradijenti i tokovi znatno iznad prosjeka.

Za mogućnost iskorištavanja geotermičke energije bitan je toplinski gradijent jer se toplinska energija može koristiti samo ako postoji temperaturna razlika; površina Zemlje bila bi zapravo hladni rezervoar.

Pri ocjeni mogućnosti iskorištavanja geotermičke energije i uspostavljanja temperaturnih razlika valja razlikovati dva osnovna tipa:

a) geotermičku energiju vulkanskih pojava, odnosno termičkih anomalija koje se manifestiraju u izvorima vruće vode i pare, odnosno u podzemnim rezervoarima vruće vode;

b) geotermičku energiju suhih stijena.

Prvi tip geotermičke energije poznat je od davnine. Korištenje toplih izvora potvrđeno je u najstarijim povijesnim dokumentima, a upotreba za proizvodnju električne energije započinje 1904. godine kad je izgrađen prvi eksperimentalni uređaj kod Larderella u Italiji. Već 1913. snaga uređaja bila je 250 kW, a danas je snaga uređaja kod Larderella 390 MW, dakle, elektrana srednje snage. Važna je također takva elektrana približno jednake snage na gejzirima u SAD i upola manja u Novom Zelandu. Ukupna je snaga elektrana koje iskorištavaju vruće izvore malo manje od 2 500 MW. Procjene za buduće korištenje vrlo su različite.

U dosta pažljivoj analizi P. E. White [Wh 73] procjenjuje kao vjerojatnu gornju granicu snage 30 000 MW. Iako je to za preko 10 puta više od današnje snage geotermičkih elektrana ipak je to vrlo malo prema ukupnim svjetskim potrebama električne energije koje će krajem stoljeća iznositi mnogo više od 1 000 000 MW. Osim toga taj je tip geotermičke energije iskoristiv samo u područjima s vulkanskim i srodnim pojavama. Možemo stoga zaključiti da će taj oblik geotermičke energije biti zanimljiv samo lokalno, a i način iskorišćivanja bitno će ovisiti o karakteristikama područja.

Tablica 3.1. Iskorištenje geotermičke energije za proizvodnju električne energije 1980. godine — procjena na temelju definitivnih planova [Wa 1977]

Zemlja	Instalirana snaga/MW
Italija	391
Novi Zeland	281
SAD	1 072
Meksiko	183
Japan	158
Island	63
SSSR	5,7
Ostale zemlje	170
ukupno	2 325

Drugi tip geotermičke energije jest toplinska energija suhih stijena Zemljine kore.

Procjenom količine toplinske energije u Zemljinoj kori od dubine 5 km do 10 km, neovisno o tome postoje li vodeni tokovi ili rezervoari preko kojih se ona može iskoristiti, dobivaju se ogromne brojke. Ako bi se npr. u 10 km debelom kontinentalnom sloju Zemljine kore temperatura spustila za 0,1 °C, oslobodilo bi se toplinske energije oko 10 000 teravatgodina. To je u nekih stručnjaka izazvalo vrlo veliko oduševljenje. Pri tome se obično zaboravlja da je potencijal tog oblika geotermičke energije ogroman tek ako se ne ograničuje na lokalitete s prirodnim vodenim rezervoarima ili tokovima. Da bi se značajnije mogla iskoristiti toplina Zemljine kore, mora se koristiti toplina suhih stijena. To je, razumljivo, vrlo teško jer nema prirodnog medija za prijenos toplinske energije stijena pa se takav medij mora umjetnim putem uvesti. Stoga ćemo razmotriti odvojeno dva osnovna izvora geotermičke energije.

3.1.2. Geotermička energija podzemnih fluida

Visoka temperatura u podzemlju i znatna količina pregrijane pare (200 °C i više) — što je temelj pretvaranja geotermičke energije u električnu — postoji samo u područjima gdje je postojala ili postoji vulkanska aktivnost.

Koliko je do danas poznato, u Jugoslaviji nema takvih vulkanskih područja ekstremno visokih temperatura. Posjedujemo geotermičke zalihe energije slične onima u Mađarskoj ili Francuskoj, što znači da se naš geotermički potencijal pretežno nalazi u područjima sedimentnih stijena tercijarne starosti s povišenim gradijentom.

Mađarska iskorištava više od 100 geotermičkih bušotina do oko 2 000 m dubine s temperaturama vode od 85 °C do 110 °C i prosječnim kapacitetom bušotine oko 80 m^3/h.

Procijenjeno je da sedimenti Panonskog bazena sadrže oko 3 000 km^3 vode, što uz iskoristivost od 10% odgovara količini topline oko $4{,}5 \cdot 10^{19}$ J. To je energija ekvivalentna energiji oko milijarde tona standardnog ugljena, odnosno oko 1 teravatgodina.

U Francuskoj se dosta intenzivno istražuju i procjenjuju geotermičke zalihe. Tokom 80-ih godina planira se uvesti grijanje geotermičkom vodom u više stotina tisuća stanova.

Način i opseg korištenja termičkih izvora u SFRJ određen je rasponom njihovih temperatura od 20 °C do 120 °C. Vode takvih temperatura mogu se koristiti za dobivanje slatke vode destilacijom, za sušenje organskih materija, za odmrzavanje i zaleđivanje, za grijanje prostorija, staklenika i tla, za uzgoj stoke i riba, za liječenje, rekreaciju i slične svrhe. Na oko 100 mjesta izvori toplih voda koriste se najčešće samo za liječenje i rekreaciju. Samo na nekoliko mjesta topla se voda koristi za zagrijavanje staklenika. Temperatura je naših prirodnih izvora od 20 °C do 80 °C, ali najviše je terma s 30 °C do 35 °C.

Geotermičke zalihe u našoj zemlji utvrđene su uglavnom prema podacima dobivenim na temelju bušotina (više tisuća) načinjenih pri traženju nafte. Iako takvim istraživanjima nisu dobiveni podaci za velik dio našeg područja, ipak se razabire da je Panonski bazen najinteresantnije područje. Temperaturni gradijent u drugim istraženim područjima znatno je niži npr.:

Područje	Temperaturni gradijent °C/km
Panonski bazen	50
Dinarsko područje	15
Jadran, obalno područje	25
Crna Gora	13

Prema tim vrijednostima može se zaključiti da se jedino u Panonskom bazenu može koristiti geotermički potencijal. U sjevernim dijelovima Panonskog bazena utvrđena je maksimalna temperatura viša od 150 °C na oko 3 000 m dubine.

Na temelju djelomičnih istraživanja valja zaključiti da u Panonskom bazenu postoje tople vode najčešće od 120 °C na dubinama od 2 000 do 2 500 m. Ne treba, dakle, očekivati da će se u tom području pronaći toplije od 200 °C, što znači da se neće moći koristiti za dobivanje električne energije.

Prema površini Panonskog bazena u našoj zemlji može se približno procijeniti količina podzemne tople vode u nas. Vjerojatno ima 1/3 do 1/2 od količina u Mađarskoj, tj. 1 000 km³ do 1 500 km³. Uz 10% iskorištenja to je 1,5 do $2 \cdot 10^{19}$ J, što odgovara energiji pola milijarde tona standardnog ugljena. Premda je to malo prema ostalim izvorima energije, ipak taj oblik geotermičke energije može za specifične primjene biti važan i koristan.

3.1.3. Geotermička energija suhih stijena

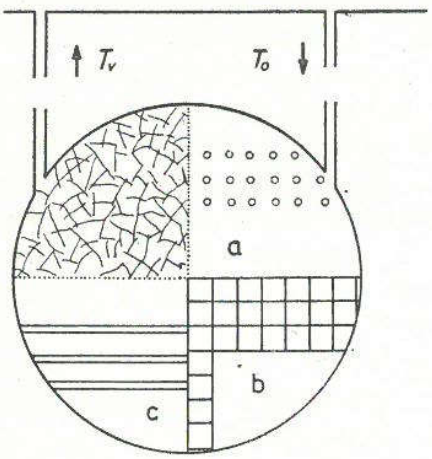
U raspravama o razvoju energetike geotermička energija suhih stijena opetovano se navodi kao obilat i prema učincima na okoliš privlačan izvor. Iznose se podaci o energiji sadržanoj u Zemljinoj kori i govori da taj ogroman rezervoar može zadovoljiti sve današnje i daleke buduće potrebe. Zatim se dalje zaključuje da zbog toga nije potrebno razvijati po sigurnosti neprivlačnu nuklearnu energiju. S obzirom na takvo shvaćanje potrebno je određenije i kvantitativno procijeniti iskoristiv potencijal tog energetskog izvora. Ovdje se prikazuju samo osnovne postavke i zaključci kvantitativne studije [Kn 77].

Da bi se mogla odvesti i iskoristiti toplina iz suhe stijene, mora se umjetno uvesti voda kao rashladna tekućina. Zbog niske toplinske vodljivosti stijena mogućnost iskorištenja kritično ovisi o stvaranju dovoljno velike površine dodira stijene i rashladne vode. Prijedlozi da se stijene razdrobe nuklearnim eksplozijama postoje još od 50-ih godina u američkom programu miroljubivog korištenja nuklearnih eksplozija, u tzv. Plowshare programu i u nešto kasnijem analognom sovjetskom programu. Raspucavanje stijena hidrostatskim tlakom ili konvencionalnim eksplozivima koristi se u rudarstvu i naftnoj industriji, no, ne toliko i na takvim dubinama da bi to bilo interesantno za eksploataciju geotermičke energije.

Iz analize s Cornell sveučilišta [Co 75] razabire se da podzemne nuklearne eksplozije snage 30—50 kt raspucavaju i lome stijene u relativno ograničenom području od nekoliko desetaka metara. U studiji se nastoji procijeniti snaga koju bi se moglo dobiti ovisno o različitim stupnjevima raspucanosti stijena. Procjene time definiraju zadatke eventualnog tehničkog razvoja u tome smjeru.

Pretpostavlja se da se stijena raspucava unutar nekog polumjera R, a izvan njega ostaje kompaktna. Time se područje iz kojeg se crpi energija dijeli u dva područja koja se bitno razlikuju prema vođenju topline.

U navedenom radu najprije je promotren dotok topline iz kompaktne stijene u okolišu kuglaste šupljine, a zatim je procijenjena mogućnost korištenja to-



Slika 3.1. Eksplozijom izazvana raspucanost unutrašnjosti kugle radijusa R simulirana s 3 prostorne konfiguracije; a) kuglastim šupljinama, b) cijepanjem u blokove i c) cilindričnim kanalima

pline iz raspucane unutrašnjosti kugle polumjera R.

Raspucanost unutrašnjosti kugle simulirana je sa tri matematska modela: a) mnoštvom malih kuglastih šupljina, b) raspucavanjem u kockaste blokove i c) sustavom cilindričnih šupljina. Na temelju tih modela može se predočiti stupanj raspucanosti potreban za odvođenje topline iz velike kuglaste šupljine ispunjene rashladnom vodom i razdrobljenim stijenama. Rezultati pokazuju da je dotok topline iz okoliša malen prema sadržaju energije u stijenama unutar šupljine. Ako je polumjer šupljine 1 km, prema optimističkoj pretpostavci o protoku i miješanju rashladne tekućine dobila bi se prosječna snaga od 20 MW kroz 30 do 40 godina. Ako bi se energija unutrašnjosti kugle uz $\Delta T=80$ °C (hlađenje s početne temperature 200 °C na 120 °C) iskoristila u 30 do 50 godina, dobiva se znatno veća prosječna snaga, oko 100 MW ili više.

U drugom dijelu studije, prema tri modela dodirne površine stijena-voda, procijenjena je mogućnost ekstrakcije topline iz unutrašnjosti kugle. Iz modela malih kuglastih šupljina odnosno cijepanja u blokove dobiva se predodžba o stupnju raspucanosti stijena potrebnom da se toplinska energija unutrašnjosti kugle pri pretpostavljenom hlađenju s početne temperature 200 °C na 120 °C iskoristi u 30 do 50 godina. Adekvatan je takav model sa šupljinama polumjera 1 m na razmaku 20 m. Model u kojem je unutrašnjost kugle polumjera 1 km rascjepana u kocke sa stranicama 140 m omogućuje prosječnu snagu od približno 90 MW kroz 50 godina. Prema optimističkoj pretpostavci o protoku vode oko kockastih blokova, moramo zaključiti da je potreban minimalno takav stupanj raspucanosti ako se želi dobiti iskoristiva snaga kojom bi se energija unutrašnjosti kugle mogla iscrpsti za 30 do 40 godina. O tome kakva bi zaista mogla biti struktura razdrobljenosti stijena teško je određenije govoriti. To ponajviše ovisi o metodi kojom bi se raspucavanje obavljalo. Promatraju se dvije metode: dobivanje pukotina eksplozijama i dobivanje pukotina hidrostatskim tlakom. Za obje metode postoje određena iskustva, no, ne u uvjetima karakterističnim za velike dubine i temperature. I jedna i druga metoda koriste se na bušotinama za povećanje iscrpka nafte i plina.

Za eksploziju se — prema dimenzijama unutar kojih se želi proizvesti razdrobljenost, tj. prema volumenu reda veličine kubnih kilometara — ne može primjenjivati klasičan kemijski eksploziv. Podaci o veličini šupljina dobivenih nuklearnim eksplozijama [Co 1975] i empirički utvrđena ovisnost promjera šupljine o trećem korijenu snage [Wi 1972] pokazuju da bi bile potrebne eksplozije snaga mnogo većih od kilotona. Nedvojbeno je da se zbog višestrukih razloga sigurnosti ta metoda vjerojatno neće primjenjivati. Zbog kontrole širenja nuklearnog oružja nije uopće poželjno koristiti nuklearni eksploziv. To je svakako najozbiljniji prigovor, no postoje i druge nepoznanice, poglavito o seizmičkim učincima i emisiji radioaktivnosti.

Metodi raspucavanja hidrostatskim tlakom ne mogu se kao nuklearnim eksplozijama uputiti zamjerke glede opće sigurnosti, iako se i tom metodom mogu izazivati seizmički poremećaji. Ta se metoda primjenjuje tako da se na željenoj dubini bušotina zatvori i zatim

se visokotlačnim pumpama razvije tlak do 100 MPa iznad hidrostatskog tlaka na tom mjestu. Proučava se i metoda hidrodinamičnih tlačnih udara. Već nastala pukotina širi se i pri manjem tlaku. Eksperimenti pokazuju da se pukotina razvija u obliku tankog okomito orijentiranog eliptičnog diska [Sm 1973].

Nije poznato kako bi se stijena cijepala na temperaturi 200 °C ili višoj. Pukotina u obliku eliptičnog diska slična je prvom modelu crpljenja topline iz beskonačnog medija. Takva pukotina polumjera 1 km omogućila bi crpljenje energije s iskoristivom snagom oko 10 MW kroz razdoblje radnog vijeka elektrane. Možda bi se dobilo i više energije ako bi hlađenje stijena proizvodilo nove pukotine. To, međutim, nije sigurno, čak je i sporno [Sm 1973].

O dobivanju pukotina tolikih površina bilo kojom metodom danas ne postoji nikakvo iskustvo. Ne raspravljajući o vjerojatnosti postizanja potrebne raspucanosti stijene, valja podsjetiti da su pretpostavke o cirkulaciji rashladne vode veoma optimističke. Ne zna se dovoljno o vjerojatnoj raspodjeli tokova, no sasvim je sigurno da će rashladna površina biti znatno smanjena. Tokovi vode mogli bi se izrazito kanalizirati odnosno grupirati zbog inicijalne neravnomjernosti koja bi erozijom bila i povećana. Kanaliziranje vodenih tokova bolje bi opisivao model cilindrične šupljine. Za polumjer cilindra 1 m prosječna je snaga (za 30 god.) samo oko 60 kW/km, što pokazuje da bi kanaliziranje protoka na mali broj tokova jako smanjilo razinu snage prema modelima s dobrom raspucanošću, odnosno velikom dodirnom površinom stijena—voda.

Ponovimo sažeto. Malena toplinska vodljivost stijena osnovno je fizikalno ograničenje za iskorištavanje toplinske energije suhih stijena. Raspucavanje stijena doduše u principu povećava dodirnu površinu stijena—voda i omogućuje odvođenje topline iz unutrašnjosti raspucanog dijela. No, razdrobljenost stijene potrebna i za elektrane osrednje snage nije ostvariva konvencionalnim metodama. Zato bi mogućnosti korištenja geotermičke energije suhih stijena vjerojatno bile vrlo malene ako bi se raspucavanje stijena obavljalo uobičajenim metodama. Tek uz optimističke pretpostavke o vjerojatnom kanaliziranju tokova rashladne vode i uz korištenje nuklearnih eksplozija znatne snage, moglo bi se očekivati veće vrijednosti iskoristive snage — do 100 MW kroz 30 godina. Nedvojbeno je, međutim, da bi sigurnosni i politički problemi takvog razvoja bili znatno veći od problema u proizvodnji nuklearne energije, pa iskorištavanje geotermičke energije suhih stijena ne može iz razloga sigurnosti imati prednost pred razvojem nuklearne energije. I ne promatrajući detaljnije geotermičke instalacije, možemo stoga zaključiti da zasad a svakako ne u idućih nekoliko decenija, nije osnovano predvidjeti iole ozbiljniji doprinos geotermičke energije suhih stijena ukupnoj proizvodnji energije.

3.2. Sunčana energija

Posljednjih se godina osobito pažljivo istražuju mogućnosti korištenja sunčane energije. Energetska kriza koja je počela prije desetak godina ubrzala je istraživanja novih (nekonvencionalnih) izvora energije.

Prednosti sunčane energije višestruke su. Njezina primjena obrazlaže se nizom razloga: Sunce je neiscrpni izvor energije, korištenje sunčane energije ne zagađuje (kemijski, radioaktivno ili toplinski) okolicu, upotrebom sunčanih sustava mogu se uštedjeti ostala goriva, pri primjeni nema potencijalnih opasnosti kao pri korištenju nekih drugih izvora. Sunčana energija perspektivna je i za razvijene zemlje i za zemlje u razvoju, osobito za one s mnogo sunca.

Međutim, pri uvođenju novih izvora energije pojavljuje se niz problema. Dinamika uvođenja tih izvora, osim o njihovom energetskom potencijalu, ovisi i o vremenu potrebnom za razvoj metoda korištenja. Od svih novih, nekonvencionalnih izvora energije danas je razvijena jedino tehnologija iskorištenja nuklearne

energije dobivene fisijom (cijepanjem) teških jezgri. Tehnologija nuklearne fuzije nije još toliko razvijena da bi se moglo kontrolirano proizvoditi energiju.

Poput fuzije ni sunčana energija neće još dugo postati dominantan energetski izvor. Međutim, za razliku od fuzije ona se već sad može koristiti u jednostavnijim primjenama (npr. za grijanje vode i prostorija). Tako se mogu štedjeti drugi izvori energije. Interes za korištenje sunčane energije u svijetu i u nas svakim je danom sve veći. O tome svjedoče i mnogi simpoziji i savjetovanja, znanstveni projekti i sve obimnija literatura iz raznih područja upotrebe sunčane energije.

Proučavanje uvođenja novih energetskih izvora u zadnjih stotinjak godina pokazalo je da je potrebno mnogo vremena da bi novi energetski izvor osvojio tržište. Procjenjuje se da je potrebno oko 30 godina da bi doprinos novog izvora energetskom sistemu dostigao 10% a oko stotinu godina da bi taj doprinos dostigao 50%. U skladu s tim značajniji udio sunčane energije u pokrivanju energetskih potreba mogao bi se očekivati tek u idućem stoljeću. Da bi sunčana energija zamijenila ostale izvore, potrebno je da bude jeftinija od njih. Zbog specifičnosti (promjenljivost, mala gustoća, nepouzdanost) taj je izvor skup, a često i nepraktičan, te jedino nedostatak drugih (konvencionalnih) izvora — nafte ili ugljena — odnosno problemi pri njihovom korištenju mogu uzrokovati da ih sunčana energija zamijeni.

Postoje razne procjene o korištenju sunčane energije u budućnosti (v. npr. Ru 75, Do 78, Ka 78, Br 79). Neke su pesimistične, druge, naprotiv, suviše optimistične. Svi se, međutim, slažu da će se povećati udio sunčane energije u budućoj potrošnji. Jedno je također sigurno: što se više novca i truda uloži u istraživanja, bit će brža i djelotvornija njezina primjena. Prije dvadesetak godina samo su rijetki pojedinci istraživali to područje. Danas većina zemalja ima program istraživanja primjene sunčane energije. Međutim, za ta istraživanja namijenjeno je mnogo manje sredstava nego za istraživanje drugih izvora energije (fuzije). Prije desetak godina u SAD nisu bila predviđena sredstva za istraživanje sunčane energije, 1978. za takva istraživanja bilo je namijenjeno 160 milijuna dolara, a 1980. oko 500 milijuna dolara. I u našoj zemlji počela su se zadnjih godina financirati istraživanja primjene sunčane energije, a postignuti su već i određeni rezultati.

Sunčani uređaji još su preskupi. Postat će jeftiniji ako proizvodnja i potrošnja bude masovna, a potrošnja će postati masovna tek kad budu jeftiniji. Za rješenje tog problema potrebne su intervencije društva, ulaganja u industriju sunčanih uređaja, povoljni krediti.

U tablici 3.2. [izrađenoj prema podacima iz Do 78] prikazana je jedna procjena udjela sunčane energije u energetskom sustavu SAD od 1985. do 2020. godine. Od skromnih 0,8% godine 1985. potrošnja sunčane energije mogla bi se povećati na 25% 2020. godine.

Tablica 3.2. Procjena udjela sunčane energije u energetskom sustavu SAD [prema Do 78]

Udio sunčane energije u:	1985. god.	2000. god.	2020. god.
termičkoj primjeni	0,2 EJ*	3 EJ	20 EJ
električnoj energiji	0,07 EJ	5 EJ	15 EJ
energiji biomase	0,5 EJ	3 EJ	10 EJ
ukupno	0,8 EJ	11 EJ	45 EJ
ukupne energetske potrebe SAD	100 EJ	150 EJ	180 EJ
udio sunčane energije	0,8 %	7 %	25 %

*1 EJ (eksadžul) = 10^{18} J

Neke druge, manje optimistične procjene predviđaju vrlo malen, gotovo zanemariv udio sunčane energije do kraja stoljeća (npr. 1%). Primjena sunčane energije dostigla bi znatan udio tek u drugoj polovici idućeg stoljeća. Prema nekim vrlo optimističkim procjenama sunčana bi energija krajem ovog stoljeća trebala pokriti oko 5% ukupnih energetskih potreba svijeta.

Posebna komisija CONAES (*Comittee on Nuclear and Alternative Energy Systems*) Akademije znanosti SAD napravila je opsežnu energetsku analizu i procjenu do 2010. godine [Br 79]. Razmatrano je nekoliko različitih scenarija proizvodnje i potrošnje energije u slijedećih tridesetak godina i za svaki od njih procijenjena ukupna godišnja potrošnja energije u godini 1990. i 2010. kao i doprinos različitih oblika energije. Prema toj procjeni doprinos sunčane energije bio bi dosta skroman i 2010. godine iznosio bi, ovisno o pretpostavljenom scenariju od 1% do 9%. Međutim, uz intervenciju države na energetskom tržištu (poreskom politikom, subvencijama i drugim mjerama u korist sunčane energije), doprinos sunčane energije bio bi, naravno, znatniji i mogao bi 2010. godine doseći i do 30%.

Da bi se ove procjene realizirale potrebna su još mnoga istraživanja. Sustavi sunčanih uređaja moraju, naime, postati ekonomski prihvatljivi i tehnički tako razrađeni da mogu proizvoditi mnogo energije i jeftinije od drugih izvora. Na temelju općih karakteristika energetskih sustava i današnje razvijenosti metoda korištenja sunčane energije većina se autora ipak slaže da bi u ukupnoj potrošnji sunčana energija mogla značajno sudjelovati tek poslije 2050. godine. Do tada sunčana energija može, manje ili više zamjenjujući ostale energetske izvore, samo pomoći u štednji tih izvora.

Naglasimo još jednom da se takve i slične procjene neće ostvariti ako se ne bude dovoljno ulagalo u primjenu sunčane energije. Kao ilustraciju navedimo da su pedesetih godina prognozirali da će 1975. biti u SAD nekoliko milijuna sunčanih kuća. Prognoza se, naravno, nije ispunila jer se nije dovoljno istraživalo, a ostali izvori energije bili su jeftini. I idućih dvadeset godina sunčana energija sigurno neće biti jeftina. Ako se ne bude dovoljno istraživalo, ponovno se prognoze neće ispuniti.

Da bismo lakše shvatili mogućnosti primjene sunčane energije i s tim povezane probleme, pogledajmo prednosti i mane tog energetskog izvora.

Od svih dostupnih izvora Sunce ima najveću zalihu energije. Snaga koju Sunce emitira u čitav prostor jest $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W. Od toga Zemlja primi oko $1{,}7 \cdot 10^{17}$ W. Oko 30% te energije reflektira se natrag u svemirski prostor, 47% pretvara se u toplinu i emitira kao infracrveno zračenje, 23% troši se na isparivanje vode i oborinski ciklus u troposferi, a samo mali dio troši se na fotosintezu, pretvara se u energiju vjetra i sl. Zemljina površina prima od Sunca godišnje energije oko $4 \cdot 10^{24}$ J, što je oko 15 000 puta više od današnje svjetske potrošnje energije svih primarnih izvora. Sunčeva je energija dostupna svim zemljama, pa njenim korištenjem zemlje u razvoju mogu smanjiti zavisnost od bogatih, razvijenih zemalja.

Velik dio Jugoslavije, osobito u južnom dijelu Jadranskog područja, ima povoljne uvjete za korištenje sunčane energije, mnogo sunčanih sati godišnje i jači intenzitet Sunčeve radijacije (1 200—1 500 kWh/m^2 godišnje). Na površinu Jugoslavije godišnje upadne sa Sunca oko $1{,}3 \cdot 10^{21}$ J ($3 \cdot 10^{14}$ kWh) energije. Današnje su godišnje energetske potrebe Jugoslavije oko $2 \cdot 10^{17}$ J, a procjenjuje se da će 2000. godine biti potrebno oko $5 \cdot 10^{18}$ J. Godišnja je ozračenost (iradijacija) u najsunčanijim dijelovima zemlje oko 1 600 kWh m^{-2}. Kad bi se sunčanu energiju uspjelo iskoristiti s djelotvornošću samo 10%, ukupne sadašnje energetske potrebe mogle bi se podmiriti sunčanim kolektorima koji bi prekrili samo 1,5% Jugoslavije. Sunce je, dakle, energetski izvor koji bi teorijski mogao zadovoljiti

energetske potrebe kroz vrlo dugo razdoblje.

Prema navedenim podacima moglo bi se pomisliti da bi se svi energetski problemi mogli ubrzo riješiti korištenjem Sunčeva zračenja kao primarnog izvora energije, napose da bi sunčana energija mogla biti glavni nacionalni energetski izvor Jugoslavije. Međutim, realno stanje nije tako jednostavno. Na žalost, zbog mnogo problema pri praktičnom korištenju Sunčeva zračenja sadašnje iskorištenje sunčane energije vrlo je skromno, uglavnom zanemarivo. Moraju se riješiti mnogi problemi da bi sunčana energija mogla postati bitan izvor energije.

Teškoće pri primjeni sunčane energije raznovrsne su. Neravnomjerno je raspoređena, u nekim je krajevima ima više drugdje manje. Njezina promjenljivost jako otežava primjenu. Oscilacija Sunčeva zračenja u različito doba dana, u različitim klimatskim prilikama, godišnjim dobima i sl. zahtijeva upotrebu energetskog spremnika i konvencionalnog izvora energije u većini sunčanih sustava. Zbog promjenljivosti Sunčeve energije, kao i činjenice da se ni dnevne ni sezonske oscilacije intenziteta zračenja ne poklapaju s potrebama korisnika (električna energija i toplina najpotrebnije su kada je Sunčeva zračenja malo ili ga nema), veće praktično iskorištavanje Sunčeva zračenja bit će moguće tek kad se riješi problem ekonomski opravdane konverzije i akumuliranja energije za duže razdoblje.

Mala gustoća energetskog toka također je problem pri korištenju sunčane energije. Srednja je vrijednost za Evropu oko 150 W/m² (prosjek za 24 sata dnevno), a za Jugoslaviju nešto više. Maksimalne su gustoće toka za vrijeme vedra dana i više od 1 kW/m². Taj prosjek za cijelu godinu, i za dan i za noć, može stvoriti utisak da je gustoća energije manja nego što zaista jest. Bolje je računati ukupnu energiju koja u toku dana upada na uređaj, odnosno sunčani doprinos takva uređaja u određenim uvjetima. Naime mnogo je jasnije ako kažemo da sunčani uređaj za grijanje vode u Splitu godišnje može osigurati 700 kWh/m², a u Zagrebu 400 kWh/m², nego ako kažemo da je godišnji prosjek za Split 0,18 kW/m², a za Zagreb 0,13 kW/m².

Postoje uglavnom tri načina korištenja sunčane energije: dobivanje toplinske energije, dobivanje električne energije i dobivanje energije iz biomase.

Toplinska se energija može dobiti iz sunčane s pomoću pasivnih i aktivnih sustava. Aktivni sustavi uglavnom se sastoje od kolektora, spremnika i crpke s pomoću koje radni fluid prisilno cirkulira kroz kolektor i skupljenu toplinu prenosi u spremnik ili neposredno u trošilo. Pri pasivnom korištenju sunčane energije za zagrijavanje prostorija nema posebnih kolektora, nego se dijelovi zgrade koriste za skupljanje sunčane energije. Toplina se kroz zgradu prenosi prirodnom konvekcijom, a ne s pomoću pumpa ili ventilatora kao u aktivnom sustavu. Sunčana kuća tako je projektirana i izrađena da je čitava zapravo djelotvoran kolektor i spremnik energije.

Najjednostavniji su sunčani sustavi za dobivanje tople vode za domaćinstva. Sastoje se od 4 m² do 6 m² kolektora, spremnika sa 200 L do 400 L vode. Godišnje mogu osigurati oko 3 000 kWh energije. Takvih uređaja ima vrlo mnogo, instalirani su širom svijeta, osobito u Japanu, Izraelu, SAD. Dobivanje tople vode s pomoću sunčane energije u mnogim je krajevima ekonomski opravdano.

Sunčano grijanje prostorija (toplom vodom ili toplim zrakom) manje je ekonomično jer su potrebe za grijanjem upravo najveće kad je sunca najmanje, a ljeti uređaj nije iskorišten. Ne smije se zaboraviti da uz sunčani uvijek treba izgraditi i konvencionalni sustav koji osigurava toplinu u razdobljima kada sunca nema ili se uređaj ne može koristiti.

Cijene sunčanih sustava za grijanje vode jesu oko 2 000 $, a za grijanje kuće 3—4 puta veće. Glavni je problem velika početna investicija i dugo razdoblje amortizacija. Iako je gorivo besplatno, početni troškovi mnogo su veći nego za konvencionalni sustav, što obeshrabruje

potencijalnog kupca. Često, osobito u gusto naseljenim mjestima, postoje i praktični problemi koji onemogućuju primjenu sunčanog uređaja. Čak kad bi sunčani sustav bio podjednake cijene kao i konvencionalni, problemi u izgradnji i korištenju ometali bi njegovu primjenu. Stalni rast cijena goriva mijenja situaciju u korist sunčane energije. Posebnim olakšicama (npr. povoljnim kreditima) mogao bi se povećati interes za proizvodnju i korištenje sunčane opreme. U nekim se zemljama već radi tako.

Sunčanom energijom mogao bi se dobiti i jedan dio procesne topline za industriju. Tako bi se npr. dobivanje tople vode za prehrambenu industriju, toplog zraka za sušenje žitarica, voća i sl. moglo barem djelomično osigurati upotrebom sunčane energije. Tipičan industrijski sustav za grijanje vode uštedio bi toliko energije kao nekoliko stotina sunčanih kuća. Međutim, ni takvi se sustavi, osim oglednih, još ne primjenjuju zbog visoke cijene, neekonomičnosti i duge amortizacije.

Postoji više načina dobivanja električne energije iz sunčane. Najjednostavniji je neposredna konverzija s pomoću sunčanih ćelija. Ta metoda ima najbolje mogućnosti tehnološkog razvoja i najperspektivnija je. Prednost je sunčanih ćelija jednostavnost upotrebe, a mana visoka cijena. Sadašnja cijena sunčanih modula (sunčanih ćelija instaliranih na odgovarajuće panele, zaštićenih od atmosferskih utjecaja i tako međusobno povezanih da čine kolektore pripremljene za montiranje) jest oko 10$ po vatu vršne snage. Cijena fotonaponskih sustava još je veća. Zbog tako visoke cijene sunčane se ćelije upotrebljavaju samo tamo gdje se ne mogu primijeniti drugi izvori, kao npr. na satelitima, gdje se silicijeve ćelije već dugo uspješno primjenjuju, zatim u komunikacijskim sustavima u usamljenim područjima gdje nema električne energije, na svjetionicima i sl. Navedimo da bi kolektori sunčanih ćelija površine 100 m^2 na krovu neke kuće koji bi mogli osigurati električnu energiju za potrebe te kuće bili vrlo skupi (100 000$ pa i više). Zbog toga je za sada iluzorno govoriti o ekonomičnoj i masovnoj primjeni sunčanih ćelija.

Očekuje se da će cijena sunčanih ćelija naglo opadati. Prema jednoj procjeni cijena modula sunčanih ćelija bit će 1986. godine oko 1 $/W. Također se očekuje da će krajem ovog stoljeća cijena elektriciteta iz ćelija postati konkurentna cijeni iz ostalih izvora (npr. nuklearne elektrane). Tada bi se sunčani generatori mogli masovnije instalirati. Kuća sa sunčanim ćelijama na krovu dobivala bi za vrijeme dana električnu energiju iz sunčane (eventualni višak prodavao bi se elektrodistribuciji), a kad nema sunca potrebe bi se podmirivale na klasičan način iz gradske mreže.

Prema optimističkim procjenama doprinos sunčane energije u obliku električne energije bio bi u SAD 2010. godine oko 12%, a prema pesimističkim procjenama taj doprinos ne bi bio veći od 0,1%.

Istraživanje novih materijala, izrada ćelija od polikristaliničnog i amorfnog silicija, CdS, Cd, Te i od drugih poluvodičkih materijala te upotreba koncentratora u sustavima sunčanih ćelija vjerojatno će smanjiti cijenu sunčanog elektriciteta i omogućiti njegovu masovnu primjenu. Teško je, međutim, precizno proreći kad će se to dogoditi.

Iz sunčane energije može se dobiti električna i posredno, tako da se iz sunčane dobije toplinska energija za pogon termoelektrana. Postoje dva tipa takvih sunčanih elektrana: sustav s raspoređenim kolektorima i sustav sa središnjim prijemnikom. U prvom sustavu s pomoću niza cilindrično paraboličnih zrcala (u fokusima kojih se nalaze apsorberske cijevi kroz koje teče radni fluid) dobiva se potrebna toplina za proizvodnju pare, odnosno pokretanje turbina i generatora. Takav sustav s raspoređenim kolektorima pogodan je za elektrane manje snage. Za veće elektrane pogodniji je sustav s većim brojem ravnih zrcala (heliostata) koji prate Sunce i Sunčevo zračenje

fokusiraju na prijemnik na vrhu visokog tornja.

U svijetu se izgrađuje više takvih oglednih sunčanih elektrana. Međutim, investicije su vrlo velike, održavanje složeno, a rad ovisi o klimatskim prilikama toga područja. Za razliku od klasičnih elektrana sunčana elektrana radi samo dio vremena (kad je sunčano) pa je vrijeme amortizacije vrlo dugo. Problem je i uskladištenje električne energije. Višak električne energije iz sunčane upotrebljavao bi se se npr. za pumpanje vode u akumulacijsko jezero hidroelektrane, a kad nema sunca energiju bi proizvodila hidroelektrana. Takav bi hibridni sustav mogao kontinuirano proizvoditi električnu energiju.

Na kraju ne smijemo zaboraviti ni biološku primjenu sunčane energije — fotosintezu kao važan način korištenja sunčane energije za dobivanje hrane i goriva. Istraživanja su usmjerena na povećanje djelotvornosti fotosinteze, proizvodnju biomase za dobivanje energije, korištenje organskih otpadaka, dobivanje bioplina i sl. Znatnije korištenje sunčane energije (npr. reda veličine teravatgodina) ovisit će o tehničkom i tehnološkom rješavanju dvaju osnovnih problema, spremanja energije i postizavanja ekonomičnosti sunčanih sustava, ali i o razvoju drugih izvora energije, dugoročno perspektivnih i prihvatljivih prema učincima na okoliš. Načini iskorištavanja sunčane energije toliko su raznovrsni da se uopćeno o rješavanju navedenih problema ne može govoriti. Da bi se mogla procijeniti perspektiva sunčane energije, valja detaljnije promotriti pojedine načine iskorištavanja te energije. Tek na temelju razvoja specifičnih načina konverzije odnosno iskorištavanja sunčane energije moglo bi se eventualno zaključiti o pravoj perspektivi i mogućnostima tog izvora energije.

3.3. Nuklearna energija i njezin dugoročni potencijal

3.3.1. Reakcije fisije i fuzije kao izvori energije

Energija fosilnih goriva oslobađa se pri promjeni rasporeda elektrona oko jezgara atoma, a jezgre se pri tome ne mijenjaju. Nuklearnom energijom nazivamo energiju koja se oslobađa u nuklearnim transformacijama, tj. pri promjeni strukture atomskih jezgara. Da se nuklearna energija oslobađa pri spontanim nuklearnim transformacijama, tj. radioaktivnom raspadu, bilo je poznato već vrlo brzo nakon otkrića radioaktivnosti (Becquerel, 1896). Radioaktivni raspad kao izvor energije može biti interesantan samo u specijalnim situacijama i za male snage. Posredno se energija radioaktivnog raspada koristi pri eksploataciji geotermičke energije. Za iskorištenje nuklearne energije najvažnije su nuklearne transformacije izazvane vanjskim djelovanjem na jezgru atoma. Vanjsko djelovanje moguće je naletom ili ulazom u atomsku jezgru neke čestice ili druge jezgre.

Transformacije jezgri izazvane vanjskim utjecajima nazivamo nuklearnim reakcijama. Prvu nuklearnu reakciju ostvario je E. Rutherford 1919. godine bombardirajući jezgre dušika α-česticama, a opaženi su protoni velikih energija. Odvijanje reakcije simbolički opisuje relacija

$$^4He + ^{14}N \rightarrow ^{17}O + ^1H \text{ ili } ^{14}N(\alpha, p)^{17}O$$

(početno je stanje na lijevoj, a konačno na desnoj strani). Općenito, nuklearnu reakciju možemo napisati u obliku

$$a + X \rightarrow b + Y \quad \text{ili} \quad X(a, b)Y$$

gdje znak a označuje česticu koja izaziva reakciju u jezgri X. Jezgra X reakcijom prelazi u jezgru Y uz emisiju čestice b. Zakon očuvanja energije u reakciji imat će oblik

$$m_a c^2 + M_x c^2 + E_{kp} = m_b c^2 + M_y c^2 + E_{kk} \quad (3.1)$$

gdje su M_x, M_y, m_a i m_b mase jezgara i čestica, E_{kp} i E_{kk} početna i konačna kinetička energija, c brzina svjetlosti. Razlika između konačne i početne kinetičke energije naziva se Q vrijednošću reakcije, tj. $Q = E_{kk} - E_{kp}$. Ako je ona pozitivna, reakcije su egzoergične, tj. u njima se oslobađa energija. Zakon očuvanja energije pokazuje da se dio mase pretvara u energiju

$$Q = (M_x + m_a)c^2 - (M_y + m_b)c^2 \quad (3.2)$$

Zakoni očuvanja u nuklearnim reakcijama

Osim zakona očuvanja poznatih u ostalim područjima fizike, npr. zakon očuvanja energije, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja momenta količine gibanja, postoje i specifični zakoni očuvanja u nuklearnim transformacijama. Ti se zakoni očuvanja ne manifestiraju u makroskopskim ili atomskim procesima u kojima se ne mijenjaju jezgre atoma.
U reakcijama u jezgrama dodatni zakoni očuvanja ovise o razini promjene u jezgri.

Ako se pri nuklearnim reakcijama ne zbivaju promjene osnovnih sastojaka jezgre, protona i neutrona, djeluju i

— zakon očuvanja električnog naboja,

— zakon očuvanja ukupnog broja nukleona.

Zbivaju li se promjene i samih konstituenata jezgre, procesima beta-raspada, kojima proton može prijeći u neutron ili neutron u proton, djeluje i

— zakon očuvanja lakih čestica, elektrona, pozitrona ili neutrina.

Posljedica je djelovanja tih dodatnih zakona da se odgovarajućim potroškom energije može proizvesti par elektron—pozitron, ali ne samo jedna od tih čestica. Pozitron je antičestica elektrona, pa stvaranjem para ni ukupan broj lakih čestica, niti ukupan naboj nije promijenjen.

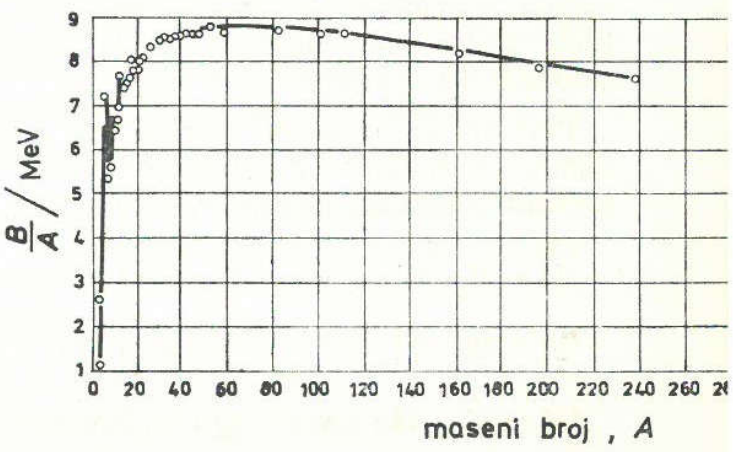
U reakcijama na vrlo visokim energijama u kojima nastaju i nove čestice srednje mase — mezoni, odnosno čestice mase jednake ili slične masi nukleona, djeluju i drugi zakoni očuvanja. Međutim, oni ne djeluju neposredno na niskoenergetske nuklearne reakcije važne u nuklearnoj energetici.

Egzoergične nuklearne reakcije osnovni su izvor energije Sunca i zvijezda. U nuklearnim procesima ekvivalencija mase i energije manifestira se mnogo više nego pri atomskim procesima u kojima se mijenja samo raspored elektrona oko jezgara. Mase atomskih jezgara manje su blizu jedan posto od zbroja masa protona i neutrona od kojih su sastavljene jer se u procesu spajanja nukleona u jezgru oslobađa energija. Ukupna oslobođena energija pri spajanju nukleona u jezgru s masenim brojem A koja sadrži Z protona mase m_p i $(A-Z)$ neutrona mase m_n može se pisati

$$B(Z, A) = [Z m_p + (A-Z) m_n - M(Z, A)]c^2 \quad (3.3)$$

gdje je $M(Z, A)$ masa složene jezgre.

Energija $B(Z, A)$ naziva se energijom vezanja jezgre, a odgovarajuće smanjenje mase određeno izrazom u uglatoj zagradi naziva se defektom mase. Vrlo važnu informaciju o jezgri daje energija vezanja po jednom nukleonu B/A (sl. 3.2).



Slika 3.2. Energija vezanja po nukleonu B/A kao funkcija masenog broja A

Energije su izražene jedinicom MeV, uobičajenom jedinicom u nuklearnoj fizici, $1\,\text{MeV}=1{,}602\cdot10^{-13}$ J.

Iako se može kazati da je energija vezanja po nukleonu B/A približno konstantna, odstupanja, iako ne jako velika, interesantna su i imaju važne posljedice. S maksimumom oko 8,5 MeV za jezgre masenog broja $A\simeq60$, energija vezanja opada i prema jezgrama manjeg i prema jezgrama većeg masenog broja. Ta činjenica je osnova za dobivanje energije u nuklearnim reakcijama. U sklopu semiempiričkog nuklearnog modela u kojem se jezgra uspoređuje s električki nabijenom kapljicom tekućine mogu se uspješno objasniti kvalitativne crte empiričke krivulje za B/A. Manje vrijednosti energije vezanja za lagane jezgre posljedica su slabijeg vezanja nukleona na površini, a takvih je relativno više u laganih jezgara. Manje vrijednosti za teške jezgre (veliki maseni broj A) posljedica su pak sve većeg odbijanja među protonima zbog električnih sila. Uočljivo je odstupanje od opće tendencije za jezgre helija — iako je ta jezgra vrlo malena, vrijednost energije vezanja B/A dosiže i 7,07 MeV. To je odraz svojstva istovrsnih nukleona da se slažu u parove i svojstva koje zovemo zasićenje nuklearnih sila. Svojstvo zasićenja sastoji se u tome da jedan nukleon djeluje intenzivno samo na ograničen broj nukleona u svom okolišu, bez obzira na to što se nalaze unutar dosega nuklearne sile. Spajanjem laganih jezgara odnosno cijepanjem teških nastaju nove jezgre s većom energijom vezanja po nukleonu, bliže maksimumu krivulje B/A; dakle oslobađa se energija.

Prvi slučaj nazivamo nuklearnom fuzijom. Najvažnije su fuzijske reakcije između najlakših jezgara ^{2}H, ^{3}H, ^{3}He:

$$^2\text{H}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^3\text{He}+\text{n};\qquad Q=3{,}27\ \text{MeV}$$

$$^2\text{H}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^3\text{H}+\text{p};\qquad Q=4{,}03\ \text{MeV}$$

$$^2\text{H}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^4\text{He}+\text{n};\qquad Q=16{,}7\ \text{MeV}$$

$$^2\text{H}+{}^3\text{H}\rightarrow{}^4\text{He}+\text{p};\qquad Q=18{,}3\ \text{MeV}$$

U drugom slučaju, u reakciji fisije, teška se jezgra cijepa u dva dijela, tj. $\text{X}\rightarrow\text{A}+\text{B}$. Nuklearna se fisija u nekih teških jezgara odvija spontano, kao oblik radioaktivnog raspada. Dovođenjem jezgre u pobuđeno stanje vjerojatnost sa fisije znatno povećava. To je stanje najlakše postignuti u neparnih jezgara ^{235}U, ^{233}U i ^{239}Pu gdje apsorpcija i sasvim sporog neutrona dovodi jezgru u pobuđenje dovoljno za fisiju.

Jezgre koje su podložne fisiji sporim neutronima nazivamo fisibilnim jezgrama. Osim jezgri ^{233}U i ^{235}U, te ^{239}Pu važna je i jezgra ^{241}Pu. Primjeri nekoliko reakcija fisije ^{235}U od velikog broja mogućih:

$$\begin{aligned}\text{n}+{}^{235}\text{U}\rightarrow{}^{236}\text{U}&\rightarrow{}^{140}\text{Ba}+{}^{94}\text{Kr}+2\text{n}\\&\rightarrow{}^{139}\text{Ba}+{}^{94}\text{Kr}+3\text{n}\\&\rightarrow{}^{137}\text{Cs}+{}^{96}\text{Rb}+3\text{n}.\end{aligned}$$

To su neki od mnogobrojnih načina diobe jezgre ^{236}U. Jezgre koje su nastale fisijama nazivaju se fisijski fragmenti ili fisijski proizvodi.

3.3.2. Energija iz fisije i fuzije

Približna kvantitativna procjena energije oslobođene u procesu fisije može se obaviti prema dijagramu specifičnih energija vezanja (sl. 3.2). Ako jednostavnosti radi pretpostavimo fisiju jezgre masenog broja A i rednog broja Z u dva jednaka dijela, u fisiji oslobođena energija E_f može se procijeniti iz relacije $E_f=2B(Z/2,\ A/2)-B(Z,\ A)$ koja izražava razliku energije vezanja fragmenata i početne jezgre. Izraz se može prikazati s pomoću specifičnih energija vezanja

$$E_f=A\left[\frac{B(Z/2,\ A/2)}{A/2}-\frac{B(Z,\ A)}{A}\right].$$

Za odabranu vrijednost A može se (v. sl. 3.2) očitati razlika u uglatoj zagradi. Pođemo li od masenog broja A oko 240, razlika u energiji vezanja po nukleonu je oko 1 MeV, a prema tome se može procijeniti da je ukupna energija fisije

približno 200 MeV. Energija fisije oslobađa se u raznim oblicima; dio koji se emitira kao energija neutrina izgubljen je zbog vrlo velike prodornosti tih čestica. Oko 5% energije odnose neutroni, ali se uhvatom fisijskih neutrona u reaktoru dobiva približno toliko energije u obliku gama-zračenja koje slijedi uhvat. Dio energije fisije oslobađa se sa zakašnjelim radioaktivnim raspadom fisijskih fragmenata. Ako je gorivo dovoljno dugo u reaktoru, a reaktor dovoljno velik, najveći dio energije pri uhvatu i radioaktivnom raspadu ostaje u reaktoru. U tablici 3.3. prikazana je raspodjela energije u fisiji urana-235 i plutonija-239.

Tablica 3.3. Raspodjela fisijske energije u fisiji U-235 i Pu-239

Udio	Fisijska energija/MEV	
	U-235	Pu-239
kinetička energija fragmenata	166,2	172,8
kinetička energija neutrona	4,8	5,9
energija gama-zračenja, emisija neposredno nakon fisije	8,0	7,7
energija naknadnog gama-zračenja	7,2	6,1
energija beta-čestica	7,0	6,1
energija neutrina	9,6	8,6
energija koja se dobiva uhvatom neutrona u jezgrama	8,8	11,5

Računajući da se oslobađa 200 MeV po jednoj fisiji, pri fisiji jednog kilograma urana-235 dobiva se energija $8{,}21 \cdot 10^{13}$ J, odnosno 951 megavatdan (MWd).

Ako se koristi uran-235 u prirodnom uranu, energija iz kilograma prirodnog urana manja je približno za faktor 140 zbog udjela urana-235 u prirodnom uranu, te iznosi $5{,}86 \cdot 10^{11}$ J ili 6,8 MWd. Ako se u istim jedinicama izrazi i sadržaj energije standardnog ugljena dobiva se $3{,}4 \cdot 10^{-4}$ MWd. Kilogram urana upotrebljen u reaktoru s tipičnim iskorištenjem od 6 megavatdana po kilogramu daje energiju kao i 17 600 kg standardnog ugljena. U konvencionalnoj termoelektrani snage 1 000 MW(e) s 80% raspoloživosti, godišnje će izgorjeti oko 2 500 000 t ugljena energetske vrijednosti 29,3 MJ/kg (7 000 kcal/kg), Fisijski reaktor iste snaga troši godišnje uz iste uvjete 120 do 160 tona prirodnog urana. Može li energija fisije u podmirenju budućih potreba sudjelovati godišnje s nekoliko teravatgodina? Prema proračunu uz isto iskorištenje urana za teravatgodinu energije potrebno je oko 200 000 tona urana. Danas se procjenjuje da su rezerve urana nekoliko milijuna tona, pa se čini da energija fisije nema ozbiljnije dugoročne perspektive. No, situacija nije tako jednostavna.

Podatak govori o potrošnji urana u današnjim nuklearnim reaktorima. No, moguće je znatno bolje iskorištenje urana, a takve mogućnosti upravo se istražuju. Za neke je opsežan razvoj u toku. Raspoložive količine urana bitno su ovisne o cijeni pak koju korisnici mogu platiti, a ta je cijena pak bitno ovisna o iskorištenju urana. Procjena dugoročne perspektive dobivanja energije iz nuklearne fisije moguća je stoga tek nakon detaljnijeg upoznavanja vjerojatnog i mogućeg razvoja nuklearnih reaktora, odnosno stupnja iskorištenja urana, te procjene uranskih rezervi.

Za energetski potencijal fuzije mogu se dati samo teorijske procjene jer fuzijskih uređaja u pogonu nema. Ako bi 1 kg D, T smjese (0,4 kg deuterija i 0,6 kg tricija) potpuno izgorio reakcijom fuzije, dobila bi se energija $34 \cdot 10^{13}$ J, odnosno 3 934MWd (megavatdan). Za istu količinu energije bilo bi potrebno 11 570 000 kg standardnog ugljena. Ogroman potencijal fuzije vidi se i iz realističnijih ocjena iskorištenja. Ako bi se iskoristilo samo oko 1% teorijske vrijednosti, energija jednog kilograma D, T smjese odgovarala bi energiji oko 100 tona ugljena. Budući da se potreban deuterij za 1 kg smjese nalazi u malo više od 4 tone vode, „fuzijska energetska vrijednost" obične vode bila bi dvadesetak puta veća od energetske vrijednosti ugljena. Energetski potencijal termonuklearne fuzije neiscrpan je za sve predvidive potrebe čovječanstva.

Tablica 3.4. Usporedba energetskog potencijala ugljena, fisije i fuzije

Izvor energije	Energetska vrijednost (teorijski) MJ/kg	Iskorištenje primarnog izvora	Iskorištena energija MJ/kg	Odnos iskorištene energije i energije iz ugljena	Količina početne sirovine u prirodi t	Ekvivalentna količina ugljena t
ugljen	29,3	100 %	29,3	1	$5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$
uran, fisija	$8{,}2 \cdot 10^{7}$	u termičkim reaktorima	$5{,}86 \cdot 10^{5}$	17 600		
deuterij, tricij (D,T) reakcija	$3{,}4 \cdot 10^{8}$	ocjena 1 %, u fuzijskim reaktorima	$3{,}4 \cdot 10^{6}$	100 000		
uranska rudača s 1 000 ppm urana	$8{,}2 \cdot 10^{4}$	u termičkim reaktorima	$5{,}86 \cdot 10^{2}$	17,6	10^{10}	$1{,}76 \cdot 10^{11}$
granit, koncentracija urana 50 ppm	$4{,}1 \cdot 10^{3}$	u oplodnim reaktorima ili hibridima	$3 \cdot 10^{3}$	100	10^{13}	10^{15}
voda (fuzija), udjel deuterija 1 u 7 000	$4{,}9 \cdot 10^{4}$	u fuzijskim reaktorima 1 %	$4{,}9 \cdot 10^{2}$	16	$>10^{18}$	$>10^{19}$

Međutim iako energetski potencijal fuzije (za razliku od fisije) nije sporan postavlja se pitanje ostvarivosti uvjeta za dobivanje fuzijske energije. Fisijski reaktori rade već desetljećima, a za izgradnju uređaja za dobivanje energije fuzije još se rješavaju znanstveni problemi. Perspektiva fuzije ne ovisi o rezervama energetske sirovine, nego o uspješnom rješavanju najprije znanstvenih, a zatim tehničkih i tehnoloških zadataka u izgradnji fuzijskog reaktora. Zato za ocjenu perspektive fuzije valja detaljnije upoznati te probleme.

3.3.3. Razvoj iskorištavanja nuklearne energije u SFRJ

Razvoj nuklearne energije u Jugoslaviji neobičan je i interesantan prema analognim planovima drugih zemalja na sličnom stupnju razvoja. Inicijativa je potekla iz male grupe znanstvenika, koji su, osim što su bili aktivni sudionici i poznavaoci zbivanja u znanosti na svjetskoj razini, uživali i punu podršku i povjerenje državnog rukovodstva. Razvoj je započeo ambiciozno, možda i previše ambiciozno za naše mogućnosti. Vrlo rano osnivani su, izgrađeni i opremljeni nuklearni instituti: 1947. godine u Vinči kod Beograda (od 1953. Institut *Boris Kidrič*), 1949. u Ljubljani (Institut *Jože Štefan*) i 1950. godine u Zagrebu (Institut *Ruđer Bošković*). Uz velika materijalna ulaganja stvara se i opsežan istraživački program za stvaranje znanstvenih osnova za razvoj nuklearne energetike. Nuklearni instituti uskladili su programe. U Zagrebačkom institutu trebalo se najviše baviti osnovnim istraživanjima, u Ljubljanskom i Beogradskom institutu reaktorskom fizikom i tehnikom. Programom je bila obuhvaćena i fizika plazme zbog budućeg razvoja fuzije. Uz fizička i kemijska istraživanja u kasnijim fazama bavilo se i drugim područjima važnim za primjenu nuklearne energije, npr. biologijom, elektronikom i tehnološkim disciplinama potrebnim za razvoj nuklearne opreme. Istodobno su se razvijala i istraživanja nuklearnih sirovina (Institut za istraživanja nuklearnih sirovina, Institut za tehnologiju mineralnih sirovina). Razvoj instituta pratilo je i intenzivno osposobljavanje znanstvenih kadrova. Zbog nedostatka znanstvene tradicije u mnogim područjima mladi istraživači odlazili su u razvijena svjetska znanstvena središta. Rad u nuklearnim institutima okupio je naše vodeće znanstvenike i dao snažan poticaj općem znanstvenom razvoju u zemlji. Mnoge su se znanstvene discipline

i utemeljile upravo u nuklearnom programu.

Glavna istraživačka oprema bili su nuklearni reaktori i akceleratori izgrađeni u nuklearnim institutima.

U Institutu *Boris Kidrič* izgrađen je vlastitim snagama mali istraživački reaktor nulte snage i pušten u pogon 1958. godine. U tom je reaktoru prvi put u našoj zemlji i na Balkanu ostvarena lančana fisijska reakcija. Na temelju ugovora o suradnji sa Sovjetskim Savezom, a uz znatno sudjelovanje naših poduzeća od 1956. do 1959. izgrađen je veliki istraživački reaktor snage 10 MW.

Institut *Jože Štefan* nabavio je u Švicarskoj 1952. godine betatron, akcelerator elektrona do energije 30 MeV. Vlastitim snagama izgradio je linearni akcelerator tipa Van de Graff energije 2 MeV. Godine 1966. u tom institutu stavljen je u pogon istraživački reaktor tipa „*Triga*", snage 250 kW, nabavljen u SAD.

Glavna instalacija u Institutu *Ruđer Bošković* bio je ciklotron za ubrzanje protona i deutrona do energije 8 MeV odnosno 16 MeV. Ciklotron je prema projektu stručnjaka instituta izgradila domaća industrija od 1952. do 1959. godine. Znatno je pospješio nuklearna istraživanja i neutronski generator tipa Cockroft-Walton, izgrađen vlastitim snagama.

Osnivanje i izgradnja nuklearnih instituta bila je popraćena i organizacijskim mjerama za njihovo usklađeno djelovanje. Najprije je 1948. godine osnovana Uprava za koordinaciju rada naučnih instituta. Godine 1952. Upravu zamjenjuje Komisija za pomoć u naučnim istraživanjima. Savezno izvršno vijeće 1955. godine osniva Saveznu komisiju za nuklearnu energiju (SKNE) koja treba pomagati, koordinirati i usmjeravati razvoj nuklearnih znanosti i zaštite od ionizirajućih zračenja. Radom Stručnog savjeta i stručnih komisija (za fiziku, kemiju, biologiju, energetiku, za primjenu u medicini, poljoprivredi, industriji) Savezna je komisija uspješno obavljala ovu zadaću. Temeljit pristup u opremanju i izgradnji nuklearnih instituta, te jedinstven i usklađen istraživački program koji je obuhvaćao i osnovna istraživanja i tehnološke discipline, potaknuli su izvanredan napredak mnogih znanstvenih disciplina, osobito na prijelazu iz pedesetih u šezdesete godine. Sredinom 60-ih godina u institutima je bilo više od 3 000 radnika, od toga više od 1 000 s visokom stručnom spremom.

Naša znanost, osobito u osnovnim istraživanjima naglo se bližila evropskoj razini, a mnogi su naši istraživači stekli međunarodni ugled. U drugoj polovici 60-ih godina tempo znanstvenog rasta jenjava. Razdoblje izvanrednog znanstvenog uspona trajalo je, na žalost, samo petnaestak godina. Od sredine 60-ih godina SKNE prestaje djelovati. Nuklearne institute počinju financirati republike. Postupno se gubi povezanost i koordinacija u istraživanjima. Smanjuju se ulaganja u opremu i kadrove. U istom razdoblju u svijetu se brzo razvijaju nuklearne elektrane snage više stotina MW. Takav razvoj tražio je promjenu zadataka nuklearnih instituta koji su se razvijali bez popratne nuklearne industrije.

U međurazdoblju traženja i prilagođivanja inicijativu i odlučnu ulogu u uvođenju nuklearne energetike preuzimaju elektroprivredne organizacije. Studije vjerojatnog razvoja našeg elektroenergetskog sustava i procjene energetskih potencijala pokazale su da su najpovoljniji uvjeti za ekonomično uvođenje nuklearnih elektrana u sjeverozapadnim područjima naše zemlje, siromašnima i fosilnim gorivima i hidroenergijom. SR Hrvatska i SR Slovenija 27. VII 1970. sklapaju sporazum o zajedničkoj izgradnji nuklearne elektrane kod mjesta Krško između Ljubljane i Zagreba. Nakon razmatranja ponuda nekoliko svjetskih proizvođača, sklopljen je ugovor za isporuku nuklearne elektrane s američkom tvrtkom *Westinghouse*. 1. XII 1974. predsjednik Tito polaže kamen temeljac za NE *Krško*, čime poslije složenih predradnji počinje gradnja prve nuklearne elektrane u našoj zemlji. 10. rujna 1981. odobreno je uspostavljanje

lančane reakcije u NE *Krško*, a uskoro zatim prvi kilovati nuklearne energije potekli su u mrežu.

I prije završetka izgradnje NE *Krško* obavljane su pripreme za gradnju novih nuklearnih elektrana. Budući da je za gradnju nuklearnih elektrana potrebno mnogo sredstava, valja osposobiti vlastitu industriju za gradnju nuklearne opreme.

Sigurno je da bi bilo neobično i neopravdano ako bi naša industrija proizvodila nuklearnu opremu za strane naručioce, a ne bi za naš vlastiti nuklearni program. Za sada stanje je upravo takvo. Vrlo je važno prethodno izabrati tip i snagu nuklearnog reaktora za seriju budućih nuklearnih elektrana jer bez jasne dugoročne perspektive ne mogu se opravdati velika ulaganja u potrebne industrijske kapacitete i usvajanje posebnih proizvodnih tehnologija.

To je preduvjet za uspješan razvoj nuklearne industrije. Pri izgradnji NE *Krško* snage 630 MW (e) stečena su dragocjena iskustva. Problemi razvoja nuklearne energetike shvaćaju se konkretnije i realnije, iako ne i potpuno jer smo samo djelomično sudjelovali u gradnji NE *Krško*. Postaje sve jasnije da su problemi usvajanja nuklearne tehnologije vrlo složeni, te da je potreban koordiniran i usklađen znanstveno-istraživački rad i razvoj u nuklearnoj energetici. Samo ujedinjenim snagama čitave zemlje zamislivo je uspješno usvajanje tako kompleksne tehnologije. Iako o tome postoje međurepublički dogovori, takva se koordinacija ne ostvaruje djelotvorno. Buduće dogovaranje mora svakako obuhvatiti danas nedovoljno usklađeno djelovanje pojedinih industrijskih organizacija koje se žele uključiti u proizvodnju nuklearne opreme.

Neobičnost našeg razvoja i neadekvatnost današnjeg stanja razabire se osobito pri poređenju s nizom manjih zemalja i zemalja u razvoju koje su nuklearni energetski razvoj počele mnogo kasnije, ali ravnomjernijim razvojem bez drastičnih preorijentacija dostigle su nas i prestigle. Mnoge takve zemlje danas imaju jedinstvene nuklearne programe, odgovarajuću organizacijsku strukturu, aktivne i opremljene razvojne institute, kao što je Jugoslavija imala oko sredine 60-ih godina i, što je najvažnije, imaju nuklearne elektrane. Pažljiviji pogled na tablice 5.4a i 5.4b (str. 159. i 160) pokazuje stupanj našeg nuklearno-energetskog zaostajanja.

Posljednjih godina aktivnost nuklearnih instituta neposrednije je povezana s gradnjom i pogonom NE *Krško* i s pripremama za gradnju novih nuklearnih elektrana. Te nove zadatke često određuje neposredna potreba pa nisu dovoljno ni dugoročno usklađeni sa znanstvenim programima instituta. Ipak sve se češće obrađuju konkretniji problemi, izrađuju se npr. različite sigurnosne studije i procjene potrebne za odobrenje pogona, studije odlaganja radioaktivnih otpada i sl. U pojedinim industrijskim organizacijama koje se pripremaju za gradnju nuklearne opreme problemi se detaljnije analiziraju.

Gradnja NE *Krško* pokazala je da nuklearna oprema mora biti veoma visokih standarda kvalitete — a to je značajan impuls u tehnološkom razvoju. Zbog objektivne potrebe spontano je postignuta određena koordinacija u istraživanju i razvoju između znanstvenih instituta i industrijskih organizacija. No, nema stimulacije koja bi taj proces mogla ubrzati. Osim toga, mnogi aspekti nuklearnog energetskog razvoja važniji su od pojedinačnih interesa i djelokruga elektroprivrednih i industrijskih organizacija. Nuklearna energetika u svezi je s politikom i općim društvenim interesima; stoga je potrebno s njima u skladu odrediti smjernice i pravce razvoja. Ta određenja mogu imati važne posljedice za međunarodni položaj naše zemlje. Očigledno nije dobro što nema djelotvornog tijela koje bi pripremalo prijedloge o nuklearnom energetskom razvoju i brinulo se za njihovo prevođenje nakon odobrenja u Saveznoj skupštini.

Literatura

[Be 78] Belbek, B.: *Worldwide Energy Demand*, Nuclear Energy and Alternatives, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1978.

[Co 75] *An Analysis of the Economic Feasibility, Technical Significances, and Time Scale for Application of Peaceful Nuclear Explosions in the U S, with Special Reference to the GURC Report Thereon*, Final Report to U S Arms Control and Disarmament Agency, The Program on Science, Technology and Society, Cornell University, Itaca, New York, 1975.

[En 79] *Energy, The Next Twenty Years*, Report by a study group sponsored by Ford Foundation, Ballinger Pub. Comp. Cambridge, Massachusetts, 1979.

[Fl 80] Flohn, N.: *Possible Climatic Consequences of a Man-Made Global Warming*, Energy Systems Analysis, Proc. of Int. Conference, Dublin 9—11 October 1979, D. Reidel Publishing Co, Dordrecht, Holland, 1980.

[Ga 80] Gates, W. L.: *Modeling the surface temperature changes due to increased atmospheric* CO_2, Interactions of Energy and Climate, D. Reidl Publishing Co, Dordrecht, Holland, 1980.

[II 81] *Energy in the Finite World*, Int. Institut for Applied System Analysis, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1981.

[Kn 77] Knapp, V., E., Coffou: *Zur Frage der Nutzung Geothermischer Energie Trockener Gesteinmassen*, Brennstoff — Wärme — Kraft, Band 29, No 5, (1977) 195—198

[Me 78] Meinel, M. P., A. B., Meinel: *Energy, You and the Future*, Nuclear Energy and Alternatives, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1978.

[Sc 80] Schneider, S. H., R. S., Chen: *Carbon dioxide warming and coastline flooding*, Annual Review of Energy, Vol. 5, (1980)

[Sm 73] Smith, M., R., Potter, D., Brown, R. L., Aamodt: *Induction and Growth of Fractures in Hot Rock*, Geothermal Energy, Ed. P. Kruger and C. Otte, Stanford University Press, Stanford, 1973.

[UN 71] *World Energy Requirements*, UN Resources and Transport Division, A/Conf. 49/P/420, United Nations, 1971.

[UN 68] *World Population Prospects* 1965—2000, UN Document ESP/P/WP, 37, United Nations, 1968.

[WA 77] *Workshop on Alternative Energy Studies*, Third Report: Energy Supply Demand Integrations to the Year 2000, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1977.

[Wa 77] Wahl., E. F.: *Geothermal Energy Utilisation*, John Wiley, London, 1977.

[WE 83] *Energy* 2000—2020*: Where are we going? World Prospects and Regional Stresses*, XII World Energy Conference, Conservation Commission, May 1983.

[Wh 73] White, D. E.: *Characteristics of Geothermal Resources*, Geothermal Energy, Ed. P. Kruger and C. Otte Stanford University Press, Stanford, 1973.

[Wi 72] Wilson, A. R. W.: *Current Status of Civil Engineering and Mineral Resources Development Applications of Peaceful Nuclear Explosions*, Proc. Fourth Int. Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva Sept. 1971. Vol. 7, UN and IAEA, 1972.

Opća literatura

Požar, H.: *Izvori energije*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1980.

Loftness, R. L.: *Energy Handbook*, Van Nostrand, New York, 1978.

Lapedes, D. N.: *Encyclopedia of Energy*, McGraw Hill, New York, 1976.

McMullan, J. T., R., Morgan, R. B., Murray: *Energy Resources Supply*, John Wiley, London, 1976.

Teller, E.: *Energy from Heaven and Earth*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1979.

Kadirogly, Perlmutler, Scott, Ed.: *Nuclear Energy and Alternatives*, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1978.

Kavanagh, R. Ed.: *Energy System Analysis*, D. Reidel Dordrecht, Publ. Co, Holland, 1980.

Gardel, A.: *Energy; Economy and Perspective*, Pergamon Press, Oxford, 1981.

UN 1979: *Yearbook of World Energy Statistics UN*, New York, 1981.

Energy in the Finite World, Int. Institut for Applied System Analysis, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1981.

Bischoff, G., W., Gocht, Hrsg: *Energietaschenbuch*, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1979.

4. Sunčana energija

Posljednjih je godina sve veći interes za alternativne energetske izvore, osobito za sunčanu (solarnu) energiju. Nakon energetske krize 1973. godine, ljudi su postali svjesni problema energije u budućnosti. Da bi se energetska kriza učinila podnošljivom, potrebno je razviti nove izvore energije, djelotvornije iskorištavati energiju, u skladu s tim mijenjati način života, štedjeti energiju ...

Od svih dostupnih izvora Sunce ima najveću zalihu energije. Snaga koju ono emitira u čitav prostor jest $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W; od toga Zemlja prima oko $1{,}7 \cdot 10^{17}$ W. Zemljina površina godišnje od Sunca primi energiju oko $4 \cdot 10^{24}$ J, što je oko 15 000 puta više od današnje svjetske potrošnje energije svih primarnih izvora. Pri upotrebi sunčane energije gorivo je besplatno. Ona je dostupna svim državama, a osobito je važna za zemlje u razvoju jer se njezinim korištenjem može smanjiti njihova zavisnost od bogatih, razvijenih zemalja.

Prema broju sunčanih sati godišnje i intenzitetu Sunčeva zračenja (1 200—1 500 kW h/m^2 godišnje) velik dio Jugoslavije, osobito južni dio Jadranskog područja, ima dobre perspektive za korištenje sunčane energije. Na površinu Jugoslavije u toku jedne godine upadne sa Sunca energije oko $1{,}3 \cdot 10^{21}$ J ($3 \cdot 10^{14}$ kWh) energije, Jugoslaviji je sada potrebno godišnje oko $2 \cdot 10^{17}$J, a procjenjuje se da će joj 2000. g. biti potrebno oko $5 \cdot 10^{18}$J. Godišnja ozračenost (iradijacija) u najsunčanijim dijelovima naše zemlje jest oko 1 600 kW h/m^2. Sunce je, dakle, energetski izvor koji bi mogao zadovoljiti dio energetskih potreba u budućnosti.

Međutim, pogrešno bi bilo zaključiti da bi se svi energetski problemi mogli ubrzo riješiti korištenjem Sunčeva zračenja kao primarnog izvora energije, napose da bi sunčana energija mogla biti glavni nacionalni energetski izvor Jugoslavije.

Mnogo je problema pri praktičnom korištenju Sunčeva zračenja pa se sada koristi gotovo zanemarivo malo sunčane energije. Ti problemi morali bi se riješiti da bi sunčana energija mogla postati bitan energetski izvor.

Osobiti su problemi u iskorištavanju sunčane energije: mala gustoća energetskog toka (srednja je vrijednost za ukupnu Zemljinu površinu oko 630 W/m^2, a oko 1 kW/m^2 za Jugoslaviju), oscilacija intenziteta Sunčeva zračenja u različito doba dana, u različitim klimatskim prilikama, godišnjim dobima i sl. Zbog intermitentnosti Sunčeve energije i činjenice da se ni dnevne ni sezonske oscilacije intenziteta zračenja ne poklapaju s oscilacijom potrošnje energije (električna energija i toplina najpotrebnije su kada je Sunčeva zračenja malo ili ga nema), Sunčevo zračenje moći će se znatnije praktično iskorišćivati tek kad se riješe problemi ekonomski opravdane konverzije i akumuliranja energije za dulja razdoblja. Ekonomičan solarni uređaj mora trajati dulje od vremena amortizacije. Sunčana energija postat će značajan energetski izvor tek kada postane ekonomski konkurentna drugim energetskim izvorima. Zbog stalnog porasta cijena konvencionalnih goriva uređaj za korištenje sunčane energije vjerojatno će postati ekonomičan.

Koje su metode konverzije Sunčeve energije? Koje se primjene sunčane energije mogu očekivati u skoroj budućnosti i koji su načini iskorištenja najperspektivniji? Kako rade jednostavni solarni (sunčani) sustavi? Koliki je mogući doprinos takvih sustava u našem području? Koji problemi još nisu riješeni?

Postoji niz takvih pitanja u vezi s korištenjem sunčane energije. Na neka od njih pokušat ćemo odgovoriti u ovom prikazu.

Postoje uglavnom tri načina korištenja Sunčeve energije: dobivanje toplinske ili električne energije iz sunčane energije i dobivanje energije iz biomase.

Toplinska se energija iz sunčane može dobiti s pomoću aktivnih i pasivnih sustava. U pasivnim se sustavima koristi prirodna cirkulacija, a aktivni sustavi imaju u sastavu posebno izrađene kolektore i pumpe koje omogućuju prisilnu cirkulaciju radnog fluida koji prenosi toplinu. Električna energija može se iz sunčane dobiti izravno s pomoću solarnih ćelija, i neizravno, tako da se toplinska energija dobivena iz Sunčeva zračenja koristi u termoelektranama za pogon turbina i generatora. Povećanjem djelotvornosti fotosinteze i uzgajanjem posebnih vrsti biljaka moglo bi se dobiti mnogo biomase koja bi se zatim koristila za dobivanje energije.

U ovom prikazu nastojali smo obraditi najvažnije metode konverzije sunčane energije, a osobito one koje bi se uskoro mogle primijeniti i u nas. U poglavlju o Sunčevu zračenju iznijeli smo osnove mjerenja i proračuna upadnog Sunčeva zračenja s nizom primjera za naše područje. U trećem poglavlju detaljno su obrađeni ravni kolektori, a o koncentrirajućim kolektorima iznesene su samo osnovne karakteristike. U četvrtom poglavlju obrađeni su toplinski spremnici (važni dijelovi sunčanih sustava) i razne metode uskladištenja toplinske i druge energije. Dobivanje električne energije iz sunčane prikazano je u poglavlju 4.5. Na kraju su iznesene osnove fotosinteze i načini dobivanja energije iz biomase.

4.1. Sunčevo zračenje

4.1.1. Uvod

Pri proračunu i projektiranju solarnih uređaja potrebno je poznavati energiju Sunčeva zračenja koje upada na plohu kolektora. Sunčevo zračenje različito je na različitim mjestima, ovisi o klimatskim uvjetima područja i mijenja se tokom dana, mjeseca i godine. U meteorologiji se mjeri zračenje na horizontalnu plohu i za mnoga mjesta postoje takvi podaci o ukupnom (globalnom) Sunčevu zranenju. Za mjesta, za koja takvi podaci čisu dobiveni mjerenjem mogu se proračunati iz ostalih klimatoloških podataka, trajanja sijanja Sunca (insolacije), vlažnosti zraka, oblačnosti i dr. Međutim, Sunčevo zračenje na kosu plohu nije mjereno te se pri proračunu rada kolektora takvi podaci moraju izračunati.

Na početku ovog poglavlja, nakon uvodnih napomena o fizikalnim veličinama za zračenje, izneseni su najvažniji podaci o Suncu i o sunčanoj energiji koja dolazi na našu Zemlju. Nakon osvrta o Sunčevu zračenju iznad atmosfere (ekstraterestričko zračenje) i solarnoj konstanti te osvrtu o prolazu zračenja kroz atmosferu, obrađeno je prizemno Sunčevo zračenje, njegove karakteristike, mjerenje i proračun. Na kraju je opisan proračun Sunčeva zračenja na plohu kolektora, okrenutu prema jugu i nagnutu prema horizontali.

U proučavanju sunčane energije sudjeluju stručnjaci raznih disciplina (fizičari, kemičari, inženjeri, građevinari itd.). Zato se često pojavljuju nejednoznačne definicije, znakovi i nazivlje. Nepostojanje standardizacije uzrokuje teškoće pri korištenju literature i uopće pri sporazumijevanju. Posebna je zbrka u terminologiji o zračenju pa ćemo se ovdje osvrnuti na nekoliko najvažnijih fizikalnih veličina u tom području i dogovoriti se o nazivima i znakovima koje ćemo upotrebljavati.

Direktno, izravno Sunčevo zračenje jest ono koje dopire do uređaja izravno iz prividnog smjera Sunca (fizikalne veličine takva zračenja označavat ćemo dodavanjem donjeg indeksa b).

Difuzno, raspršeno zračenje nastaje raspršenjem Sunčevih zraka u atmosferi i dolazi na uređaj iz svih smjerova neba (označeno je donjim indeksom d).

Nagnuta ploha (npr. kolektor) osim izravnog i raspršenog zračenja prima i zračenje reflektirano (odbijeno) od okolnih površina. Ukupno zračenje koje upada na uređaj sastoji se, dakle, od tri dijela: *izravnog*, *raspršenog* i *odbijenog* zračenja.

Upadno Sunčevo zračenje može se opisati s pomoću više fizikalnih veličina. U literaturi se često te različite veličine ne razlikuju, pa se piše npr. da je „globalno zračenje na horizontalnu površinu

$G=800\ \mathrm{W\ m^{-2}}$" ... „jačina Sunčeva zračenja $E=700\ \mathrm{W/m^2}$ ..." „mjesečna količina globalnog zračenja G" ... „direktna komponenta zračenja H_b" ... itd.

Energiju koja se zračenjem (fotonima) širi kroz prostor nazivat ćemo *energija zračenja*, označavat ćemo je s Q i izražavati jedinicom džul (J). Katkad ćemo upotrebljavati i jedinicu vatsat (W h) jer se udomaćila u praksi.

Tok zračenja (snaga zračenja) Φ definira se izrazom

$$\Phi=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \tag{4.1}$$

i izražava jedinicom vat.

U primjeni sunčane energije osobito je važna gustoća energetskog toka, tj. energetski tok koji upada na određenu površinu A

$$G=\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A}. \tag{4.2}$$

Za tu veličinu nailazimo na razne nazive: ozračenost [Cv 75], ozračenje [Te 82] i iradijancija (prema engl. irradiance) [Cv 75, Te 82]. U daljnjem tekstu upotrebljavat ćemo naziv *ozračenje* i izražavati ga jedinicom vat po četvornom metru ($\mathrm{W/m^2}$).

Ukupno ozračenje neke plohe na koju upada Sunčevo zračenje jest

$$G=G_b+G_d+G_r \tag{4.3}$$

gdje je G_b direktno — izravno, G_d difuzno — raspršeno i G_r reflektirano — — odbijeno ozračenje.

Integrira li se ozračenje po vremenu dobivaju se površinske gustoće energije zračenja koje u promatranom vremenu upadnu na jedinicu površine plohe. U literaturi se te veličine često nazivaju satne, dnevne, mjesečne odnosno godišnje sume zračenja. Označimo li tu veličinu s H, tada je

$$H=\int_{t_1}^{t_2} G\,\mathrm{d}t. \tag{4.4}$$

Engleski naziv za tu veličinu jest irradiation pa ćemo je zvati iradijacija ili *ozračenost*. Jedinica za ozračenost jest džul po četvornom metru ($\mathrm{J/m^2}$).

Budući da Sunčevo zračenje nije monokromatsko, potrebno je definirati i odgovarajuće spektralne veličine: spektralni tok zračenja

$$\Phi_\lambda=\frac{\mathrm{d}Q_\lambda}{\mathrm{d}t}, \tag{4.5}$$

spektralno ozračenje

$$G_\lambda=\frac{\mathrm{d}\Phi_\lambda}{\mathrm{d}A}. \tag{4.6}$$

Ukupni tok zračenja izražen s pomoću spektralnoga je

$$\Phi=\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \Phi_\lambda\,\mathrm{d}\lambda \quad \text{i} \quad G=\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} G\,\mathrm{d}\lambda. \tag{4.7}$$

Tok zračenja koji emitira jedinica površine naziva se *egzitancija* i označuje se znakom M

$$M=\frac{\mathrm{d}\Phi_e}{\mathrm{d}A} \tag{4.8}$$

gdje je Φ_e tok zračenja koji emitira površina A. Jedinica za egzitanciju jest vat po četvornom metru ($\mathrm{W/m^2}$).

Optička svojstva površine materijala s obzirom na prijenos energije zračenja mogu se opisati s pomoću četiri brojčane veličine: apsorpcijskog, refleksijskog, transmisijskog i emisijskog faktora.

Apsorpcijski faktor (apsorptancija) neke površine definira se omjerom

$$\alpha=\frac{\Phi_a}{\Phi_u} \tag{4.9}$$

gdje je Φ_u upadni tok na površinu, a Φ_a tok apsorbiran u površini.

Refleksijski faktor (reflektancija) omjer je između toka zračenja reflektiranog od

površine i ukupnog upadnog toka zračenja na tu površinu

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_u}. \qquad (4.10)$$

Refleksijski faktor ρ neke horizontalne površine s obzirom na upadno Sunčevo zračenje poznat je u meteorologiji pod nazivom *albedo*. Uzima se da je tipična vrijednost albeda predmeta na Zemljinoj površini 0,2. Međutim, konfiguracija okolice može jako utjecati na reflektirano zračenje. Albedo je osobito velik ($\rho=0,7$) kada je na tlu snježni pokrivač.

Transmisijski faktor (transmitancija) sredstva omjer je između toka zračenja koji prođe kroz sredstvo i ukupnog upadnog toka na površinu tog sredstva

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_u}. \qquad (4.11)$$

Emisijski faktor (emitancija) neke površine omjer je između egzitancije te površine na određenoj temperaturi i egzitancije idealnog crnog tijela na istoj temperaturi

$$\epsilon = \frac{M}{M_{ct}}. \qquad (4.12)$$

Crno je tijelo, naime, najbolji emiter od svih tijela promatranih na istoj temperaturi te se emisijski faktor neke površine definira s obzirom na crno tijelo.

Svi ovi faktori (α, ρ, τ i ϵ) obično ovise o valnoj duljini i smjeru elektromagnetskog zračenja te je pri proračunu sunčanih uređaja potrebno uzeti u obzir tu ovisnost.

Osim spektralnih često se promatraju integralni faktori preko određenog pojasa valnih duljina, npr. u intervalu valnih duljina koje se pojavljuju u Sunčevu spektru.

To su neke od najvažnijih fizikalnih veličina povezanih sa sunčanim zračenjem. Ostale ćemo definirati u tekstu. Znakovi, nazivi i jedinice fizikalnih veličina koje ćemo upotrebljavati navedeni su u Uvodu (str. 3—4).

4.1.2. Sunce

Naše je Sunce jedna od mnogobrojnih zvijezda u galaksiji „Mliječni put". Kroz Svemir se kreće brzinom 20 km/s i rotira oko svoje osi s periodom koji je na ekvatoru Sunca oko 27 dana, a u području njegovih polova oko 31 dan. Ostali podaci o Suncu:

polumjer $6,96 \cdot 10^8$ m,
masa $1,99 \cdot 10^{30}$ kg (oko $3,3 \cdot 10^5$ veća od mase Zemlje),
srednja gustoća 1 400 kg/m^3,
srednja udaljenost od Zemlje $1,49 \cdot 10^{11}$ m.

Procjenjuje se da je temperatura u unutrašnjosti Sunca reda veličine 10^7 K, tlak 10^{14} Pa i gustoća 10^5 kg/m^3. Pri takvim okolnostima zbiva se termonuklearna fuzija vodika u helij i pri tome oslobađa ogromna količina energije.

Fuzija vodika u helij kojom se razvija energija na Suncu može se prikazati ovim reakcijama (tzv. protonsko — protonski lanac).

$$p + p \rightarrow d + \beta^+ + \nu$$
$$p + d \rightarrow {}^3He^* \rightarrow {}^3He + \gamma$$
$${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2p$$

$$\sum \Delta Q = 26,21\,\text{MeV} = 4,2 \cdot 10^{-12}\,\text{J}$$

gdje $^3He^*$ označava jezgru izotopa helija u pobuđenom stanju, p proton, d deuteron, ν neutrino, β^+ pozitron i γ foton gama-zračenja. Kao rezultat te tri reakcije, od četiri protona (vodikove jezgre) dobiva se jezgra helija i energija 26,21 MeV.

Energija koja nastaje fuzijom unutar Sunca prenosi se prema površini, a odatle zrači u svemir.

Sunčeva površina sastoji se od slojeva: fotosfere, kromosfere i korone.

Fotosfera je površinski sloj Sunca sastavljen od ioniziranih plinova male gustoće i iz nje svjetlost sa Sunca odlazi u svemirski prostor.

Kromosfera, sloj debeo oko 10^7 m, nalazi se iznad fotosfere i može se vidjeti za vrijeme potpune pomrčine Sunca.

Korona — područje ioniziranih plinova male gustoće, ali visoke temperature — zadnji je sloj koji se postupno gubi u svemirskom prostoru.

Snaga zračenja koje Sunce emitira u čitav prostor ogromna je: $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W; od toga na Zemlju dođe oko $1{,}7 \cdot 10^{17}$ W.

Spektar Sunca približno odgovara spektru crnog tijela ugrijanog na temperaturu 5 760 K. Naravno, ne smijemo zaboraviti da se temperatura Sunca mijenja od unutrašnjosti (gdje je oko 10^7 K) prema površini, ali i u slojevima same površine. Temperaturu 5 760 K možemo odrediti kao efektivnu temperaturu Sunčeve površine s pomoću koje primjenom Stefan-Boltzmannova, Wienova i Planckova zakona možemo proračunati energetski spektar Sunčeva zračenja.

Od svih dostupnih izvora Sunce ima najveću zalihu energije. Energija koju Zemlja godišnje prima od Sunca jest oko $5{,}4 \cdot 10^{24}$J ($1{,}5 \cdot 10^{21}$ Wh). Međutim, od te upadne Sunčeve energije oko 30% reflektira se u svemirski prostor, 47% pretvara se u toplinu i emitira kao infracrveno zračenje, 23% troši se na isparivanje vode i oborinski ciklus u troposferi, a samo mali dio troši se na fotosintezu, pretvara se u energiju vjetra i sl.

4.1.3. Ekstraterestričko zračenje; solarna konstanta

Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu nazivamo ekstraterestričkim zračenjem. Ono je jedan od važnih parametara pri proračunu Sunčeva zračenja i zato ćemo ga detaljnije opisati. Budući da se udaljenost Zemlje od Sunca mijenja tokom godine, različito je također ekstraterestričko ozračenje (iradijancija), a mijenja se od najmanje vrijednosti 1 307 W/m² do najveće 1 399 W/m². Njegova srednja vrijednost naziva se solarna konstanta (sunčana konstanta) i iznosi.

$$\bar{E}_0 = (1\,353 \pm 21)\ \mathrm{W/m^2} \quad (4.13)$$

Solarna konstanta definira se kao tok Sunčeva zračenja kroz jediničnu površinu okomitu na smjer Sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca ($r = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m), ali izvan Zemljine atmosfere tako da nema slabljenja zbog apsorpcije i raspršenja u atmosferi.

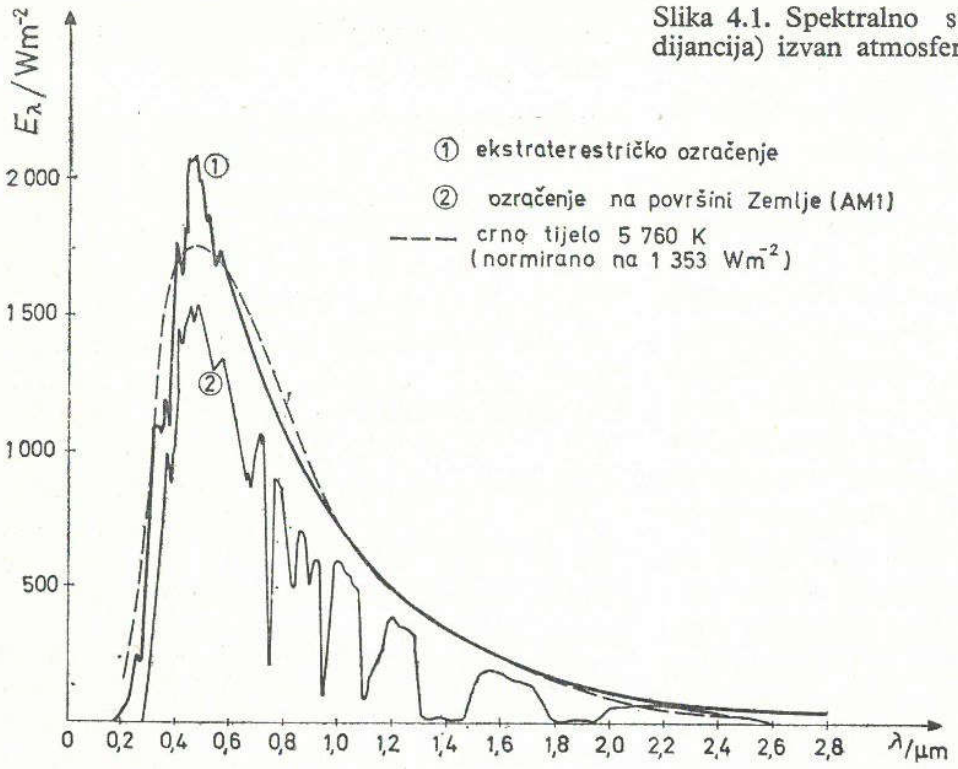
Navedena vrijednost solarne konstante (4.13) dobivena je mjerenjima s pomoću balona i satelita; predložili su je Thekaekara i Drummond 1971. godine [Th 73, Du 74] i prihvaćena je na kongresu ISES (1970. god.) te od NASA-e i nekih drugih organizacija kao standardna vrijednost. Prije toga (a ponegdje i poslije) upotrebljavale su se vrijednosti 1 381 W/m² i 1 395 W/m². Međutim, neka novija mjerenja pokazuju malo veću vrijednost, pa se ponegdje pojavljuje vrijednost $E_0 = 1\,370\ \mathrm{W\,m^{-2}}$ [Sa 81]*. Mi ćemo se služiti standardnom vrijednošću (13).

Na slici 4.1. prikazano je spektralno ozračenje (spektralna gustoća toka) ekstraterestričkog Sunčeva zračenja. Precizne vrijednosti za spektralno ekstraterestričko ozračenje E mogu se naći u literaturi [Th 73, Pe 73 Sa 77]. Spektar Sunčeva zračenja ne razlikuje se jako od spektra zračenja crnog tijela ugrijanog na temperaturu 5 762 K, koji je radi usporedbe također prikazan na slici 4.1.

Spektar Sunčeva zračenja, prije ulaska u atmosferu, proteže se od oko 0,12μm do više od 10 μm, s maksimumom na 0,48 μm i sastoji se od ultraljubičastog (0,12 μm—0,4 μm), vidljivog (0,4 μm—0,75 μm) i infracrvenog dijela ($\lambda > 0{,}75$ μm). Od ukupne energije ultraljubičasti je dio oko 9%, vidljivi oko 41,5% i infracrveni oko 49,5%. Spektar praktično završava pri 10 μm jer je energije valnih duljina većih od 10 μm samo 0,05%.

Pri prolazu kroz atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se djelomično raspršuje na molekulama plinova, česticama prašine i sl., a djelomično ga apsorbiraju plinovi (ozon, vodena para, ugljik-dioksid itd.). Zbog toga se nakon prolaza kroz atmosferu Sunčev spektar razlikuje od ekstraterestričkoga (sl. 4.1). U ukupnoj energiji zračenja pri površini Zemlje udio ultraljubičastog zračenja je mnogo manji (3%), vidljivog oko 42%, a infracrvenoga

* Nedavno je utvrđena vrijednost $\bar{E}_0 = (1\,367 \pm 7)$ W/m² (WMO 1982).



Slika 4.1. Spektralno solarno ozračenje (i radijancija) izvan atmosfere i na površini Z emlje

55%. Spektar zračenja se proteže od 0,3 μm do 2 μm.

Ekstraterestričko zračenje mijenja se tokom godine zbog promjena udaljenosti Zemlje od Sunca. Ozračenje okomite površine pri bilo kojem položaju Zemlje prema Suncu dobije se iz izraza

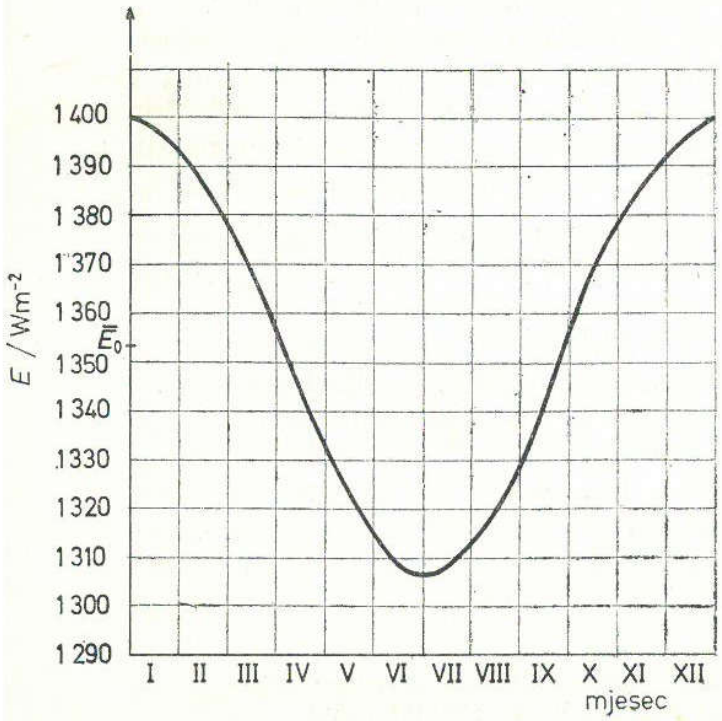
$$E_0 = \overline{E}_0 r/R^2$$

gdje je E_0 solarna konstanta, R stvarna a r srednja udaljenost Zemlje od Sunca. Udaljenost R mijenja se iz dana u dan. Budući da te promjene nisu velike, za pojedini dan možemo je smatrati konstantnom. Ekstraterestičko ozračenje površine okomite na smjer sunčanog zračenja može se približno prikazati izrazom [v. npr. Kr 78, Du 80]

$$E_0(n) = \epsilon(n)\,\overline{E}_0 = \left[1 + 0{,}034 \cos\frac{360°n}{365}\right]\overline{E}_0 \qquad (4.14)$$

gdje je n broj dana brojen od 1. siječnja, a $\epsilon(n)$ orbitalni ekscentricitet gibanja Zemlje oko Sunca.

Na slici 4.2. prikazan je godišnji hod ekstraterestričkog sunčanog ozračenja (iradijancije). Ono je u našem području najmanje ljeti (npr. 1 307 W/m² 1. VII) kada je Zemlja najdalje od Sunca, a najveće zimi (npr. 1 399 W/m² 1. I) jer je tada Zemlja najbliže Suncu.



Slika 4.2. Godišnji hod ekstraterestričkog solarnog ozračenja (iradijancije)

U proračunima Sunčeva zračenja često se računa dnevna ekstraterestrička ozračenost (iradijacija) i njezin prosjek za pojedini mjesec. Ona se dobiva integriranjem izraza (4.14) po vremenu. Da bismo integriranje mogli obaviti, potrebno je definirati neke veličine u vezi s prividnim gibanjem Sunca: deklinaciju, zenitnu udaljenost i visinu Sunca, Sunčevo vrijeme i satni kut Sunca.

Prividno gibanje Sunca. Iako nam je svima dobro poznato da se Zemlja giba oko Sunca i rotira oko svoje osi, često je praktičnije promatrati prividno gibanje Sunca i veličine povezane s tim gibanjem.

Mjerenja i proračune Sunčeva zračenja potrebno je obavljati prema pravom *Sunčevu vremenu.* Mjesno i pravo Sunčevo vrijeme mogu se dosta razlikovati, međutim, u našem geografskom području ta je razlika vrlo malena i često se može zanemariti (osim u periodu od kraja ožujka do rujna kad se satovi pomiču za jedan sat unaprijed). Stoga se katkad i podaci o Sunčevu zračenju objavljuju prema mjesnom vremenu [Pe 59, Pe 70]. Da bi se iz mjesnoga izračunalo Sunčevo vrijeme, potrebno je poznavati mjesnu zemljopisnu dužinu (ψ), vremensku zonu promatranog područja i tzv. jednadžbu vremena [v. npr. Kr 78, Du 80, Kr 81].

Razlika između Sunčeva i mjesnog vremena za Split ($\psi=16{,}45°$) prikazana je na slici 4.3. Slična krivulja može se proračunati i za druga mjesta. Najveća je razlika 15. II kad Sunčevo vrijeme u Splitu kasni za 9 min iza mjesnoga i 31. X kad Sunčevo vrijeme rani za 22 min ispred mjesnoga. Za Zagreb ($\psi=15{,}98°$) ta je razlika 11 min (15. II) i 20 min (31. X).

Ako poznajemo mjesno vrijeme izlaska i zalaska Sunca, Sunčevo podne možemo odrediti i tako da vremenu izlaska Sunca dodamo polovicu trajanja Sunčeva dana. Na primjer ako Sunce izlazi u 7h i 4 min i zalazi u 17 h i 16 min, trajanje je Sunčeva dana 10 sati i 12 min, a Sunčevo je podne u 12 h i 10 min.

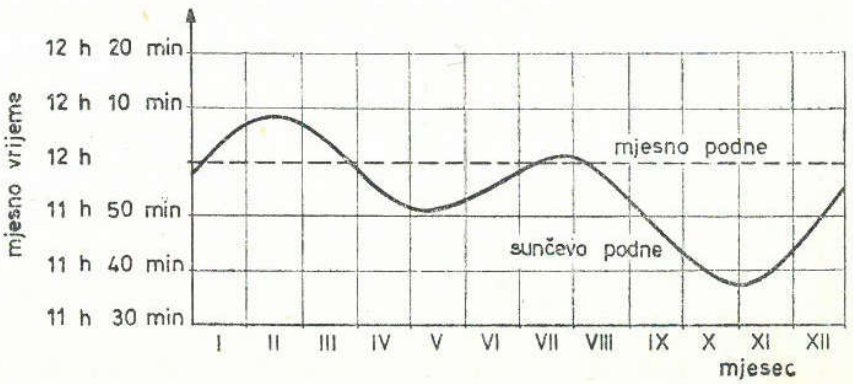
Deklinacija Sunca δ jest kut između spojnice središta Zemlje sa središtem Sunca i ravnine u kojoj leži ekvator. Deklinacija ovisi o danu u godini i mijenja se od $-23{,}45°$ (21. XII) do $+23{,}45°$ (21. VI). Vrijednosti deklinacije mogu se naći u tablicama ili izračunati s pomoću aproksimativne formule [npr. Co 69, Du 74]

$$\delta=23{,}45°\sin\left(360°\,\frac{284+n}{365}\right) \qquad (4.15)$$

gdje je n broj dana počevši od 1. siječnja.

U tablici 4.1. navedene su deklinacije, dobivene s pomoću izraza (4.15), za sredinu svakog mjeseca te srednja vrijednost deklinacije (tj. aritmetička sredina deklinacija za svaki dan tog mjeseca). Uočit ćemo da je srednja mjesečna deklinacija različita od deklinacije srednjega dana u mjesecu. Godišnji hod deklinacije Sunca prikazan je na slici 4.4.

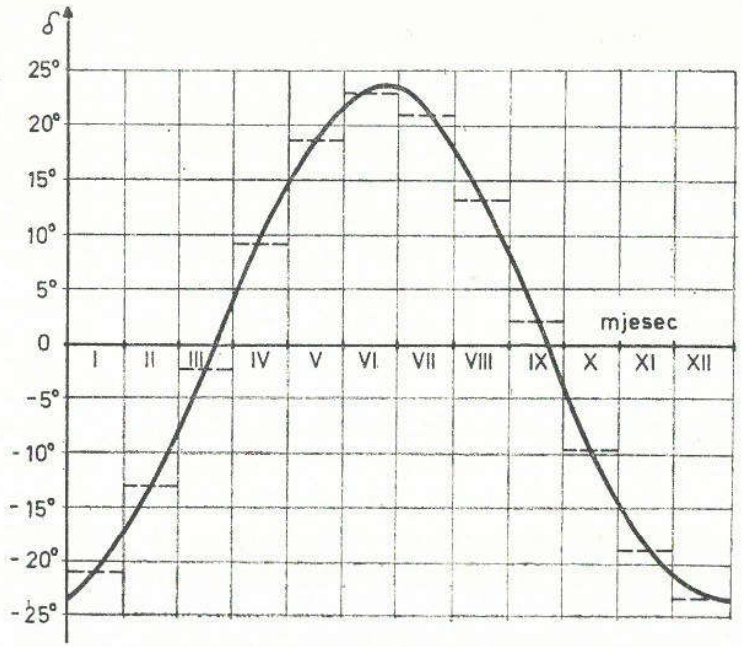
Satni kut Sunca ω vrijeme je izraženo s pomoću kuta i računa se počevši od Sunčeva podneva. Sunčevo podne doba je dana kada je Sunce u svom najvišem položaju i taj trenutak odgovara kutu $\omega=0°$. Satni se kut dobije tako da se odgovarajući vremenski interval od Sun-



Slika 4.3. Razlika između sunčevog i mjesnog vremena u Splitu (na slici nije uzeto u obzir ljetno pomicanje sata unaprijed)

Tablica 4.1. Deklinacija Sunca izračunata s pomoću izraza (4.15)

Dan		15. I	15. II	15. III	15. IV	15. V	15. VI	15. VII	15. VIII	15. IX	15. X	15. XI	15. XII
redni broj dana	n	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
deklinacija	δ	−21,3°	−13,3°	− 2,8°	9,4°	18,8°	23,3°	21,5°	13,8°	2,2°	−9,6°	−19,2°	−23,3°
srednja mjesečna deklinacija	$\bar{\delta}$	−20,9°	−13,1°	− 2,2°	9,4°	18,8°	23,1°	21,1°	13,3°	2,2°	−9,6°	−18,9°	−23,1°



Slika 4.4. Godišnji hod deklinacije Sunca i srednja vrijednost deklinacije za pojedini mjesec

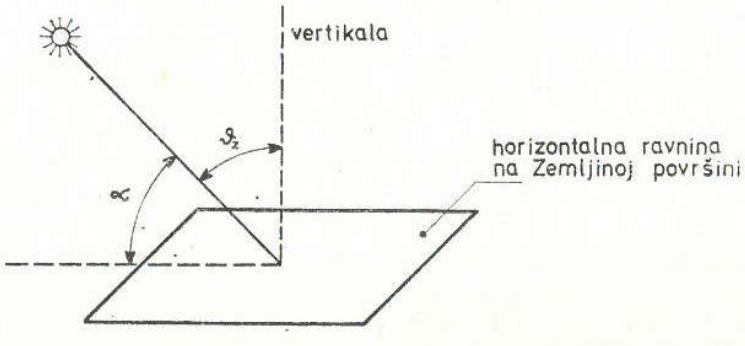
čeva podneva (izražen u satima) pomnoži s 15° i računa negativno za prijepodne, a pozitivno za poslijepodne. (U nekim knjigama navodi se i obratno: pozitivno za prijepodne, a negativno za poslijepodne.) Na primjer 10 h Sunčeva vremena odgovara satnom kutu $\omega=-30°$. 13 h 30 min odgovara satnom kutu Sunca $\omega=22{,}5°$ i sl.

Visina Sunca α, tj. kut između Sunčevih zraka i horizontalne plohe (sl. 4.5), može se izračunati iz zemljopisne širine φ, deklinacije Sunca δ i satnog kuta Sunca ω [v. npr. Du 74, Kr 78]

$$\sin\alpha=\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\cos\omega. \quad (4.16)$$

Komplementarni kut kutu α jest zenitna udaljenost (sl. 4.5)

$$\vartheta_z=90°-\alpha.$$



Slika 4.5. Visina Sunca i zenitna udaljenost

To je kut između Sunčevih zraka i zenita tj. vertikale na Zemljinu površinu. Visina Sunca u pravo Sunčevo podne ($\omega=0°$, $\cos\omega=1$) jest

$$\sin\alpha_p=\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta=\cos(\varphi-\delta)=\sin(90°-\varphi+\delta)=\cos\vartheta_{zp} \quad (4.16.a)$$

a iz toga slijedi da je

$$\alpha_p=90°-\varphi+\delta. \quad (4.16.b)$$

Kut izlaska (zalaska) Sunca (na horizontalnu ravninu) ω_s može se odrediti iz izraza (4.16) uvrštavajući $\alpha=0°$, odnosno $\alpha=180°$ [Du 74]. Tada je

$$\cos\omega_s=-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta \quad (4.17)$$

odnosno

$$\omega_s=\arccos(-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta). \quad (4.17.a)$$

Izraz (4.17) vrijedi za gornju granicu atmosfere. Za donju stranu atmosfere ω_s računa se malo složenijim izrazom od (4.17) (jer treba uzeti u obzir refrakciju svjetlosti pri prolazu kroz atmosferu) i dobiva se da Sunce izlazi oko 8 min prije i zalazi oko 8 min kasnije nego u vrhu atmosfere.

Satni kut izlaska Sunca negativan je, a zalaska Sunca pozitivan. Sunčevo vrijeme izlaska (zalaska) Sunca može se odrediti satima tako da se ω_s izražen u stupnjevima podijeli s 15. Trajanje Sunčeva dana od izlaska do zalaska Sunca jest

$$Z=\frac{2}{15}\arccos(-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta). \quad (4.18)$$

Primjer. Izračunajte visinu Sunca u Sunčevo podne za 15. dan u svakom mjesecu u Zagrebu ($\varphi=45{,}82°$), Splitu ($\varphi=43{,}68°$) i Beogradu ($\varphi=44{,}78°$).

Primjenom izraza (4.16.b) izračunamo visinu Sunca. Rezultati su prikazni u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Kutovi visine Sunca α_p u Sunčevo podne

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zagreb α_p	22,9°	30,9°	41,4°	53,6°	63°	67,5°	65,7°	58°	46,4°	34,6°	25°	21,1°
Split α_p	25,1°	33°	43,5°	55,7°	65,1°	69,6°	67,8°	60,1°	48,5°	36,7°	27,1°	23,2°
Beograd α_p	23,9°	31,9°	42,4°	54,6°	64°	68,5°	66,7°	59°	47,4°	35,6°	26°	22,1°

Primjer. Odredite sat izlaska i zalaska Sunca i trajanje Sunčeva dana 15. XI u Splitu ($\varphi=43{,}68°$), ne uvažavajući atmosfersku refrakciju.

Kut izlaska Sunca određujemo iz izraza (4. 17) $\omega_s=\arccos(-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta)=\arccos[-\operatorname{tg}(43{,}68°)\operatorname{tg}(-19{,}15°)]=70{,}63°$ što je 4,71 sata. Sunce, dakle izlazi u 12 h − 4,71 h=7,3 h, a zalazi u 16,71 h prema Sunčevu vremenu. Iz slike 4.3. možemo očitati da to odgovara izlasku u 6,96 h i zalasku u 16,38 h prema mjesnom vremenu.

Primjer. Izračunajte za svaki mjesec prosječno trajanje Sunčeva dana u Beogradu ($\varphi=44{,}78°$) Splitu ($\varphi=43{,}68°$) i Zagrebu ($\varphi=45{,}82°$) ne uvažavajući atmosfersku refrakciju.

Prosječno trajanje dana dobivamo s pomoću izraza (4.18)p, uvrštavajući zemljopisnu širinu i srednju vrijednost deklinacije za svaki mjesec (iz tablice 4.1). Rezultati računa prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Prosječno trajanje Sunčeva dana $\overline{Z}$ u Beogradu, Splitu i Zagrebu

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Beograd $\overline{Z}$	9,1	10,2	11,7	13,3	14,6	15,3	15,0	13,8	12,3	10,7	9,4	8,7
Split $\overline{Z}$	9,2	10,3	11,7	13,2	14,5	15,2	14,9	13,7	12,3	10,8	9,5	8,8
Zagreb $\overline{Z}$	8,9	10,2	11,7	13,3	14,7	15,5	15,1	13,9	12,3	10,7	9,3	8,5

Ekstraterestrička ozračenost horizontalne plohe. Da bi se izračunala dnevna, tjedna odnosno mjesečna ozračenost (iradijacija) neke plohe, potrebno je izraz (4.14) integrirati po vremenu. Izračunajmo ukupnu dnevnu količinu zračenja (energiju po jedinici površine) koja dolazi na horizontalnu plohu. Budući da je $E_0(n)=\epsilon(n)\bar{E}_0 \sin\alpha(n)$, gdje je α kut visine Sunca, dnevna je ozračenost

$$H_0=\int_{t_1}^{t_2}\epsilon(n)\,\bar{E}_0\sin\alpha(n)\,dt=$$
$$=\int_{-\omega_s}^{+\omega_s}\left[1+0{,}034\cos\frac{360°n}{365}\right]\bar{E}_0\cdot$$
$$\cdot\sin\alpha(n)\cdot\frac{86\,400}{2\pi}d\omega. \qquad (4.19)$$

Integriranjem po vremenu od izlaska do zalaska Sunca, dobivamo da je dnevna ekstraterestrička ozračenost horizontalne plohe za pojedini dan u godini [v. npr. Pe73a, Kr 78]

$$H_0=\frac{86\,400}{\pi}\bar{E}_0\left[1+0{,}034\cos\frac{360°n}{365}\right]\cdot$$
$$\cdot\left[\frac{2\pi}{360}\omega_s\sin\varphi\sin\delta+\sin\omega_s\cos\varphi\cos\delta\right] \qquad (4.20)$$

gdje je satni kut izlaska (zalaska) Sunca ω_s izražen u stupnjevima.

Da bi se dobila prosječna dnevna vrijednost $\bar{H}_0$ ekstraterestričkog zračenja na horizontalnu plohu potrebno je (s pomoću izraza 4.20) izračunati dnevnu ozračenost H_0 za svaki dan u mjesecu i naći aritmetičku sredinu. U literaturi se mogu naći tablice za $\bar{H}_0$ za razne zemljopisne širine [v. npr. Be 77, Kr 78, Kr 81]. I. Penzar izračunao je dnevne ekstraterestričke ozračenosti za svaki dan u godini i za svakih pola stupnja sjeverne zemljopisne širine u pojasu od 41° N do 47° N [Pe 73].

U tablici 4.4. prikazani su mjesečni prosjeci dnevne ekstraterestričke ozračenosti horizontalne plohe za svaki mjesec u godini, dobiveni na temelju standardne vrijednosti solarne konstante ($\bar{E}_0$=1 353 W/m²). Iz nje se interpolacijom mogu odrediti vrijednosti $\bar{H}_0$ za mjesta u Jugoslaviji.

Primjer. Izračunajte dnevnu ekstraterestričku ozračenost (iradijaciju) horizontalne plohe na zemljopisnoj širini od 45° N za dane 1. I, 15. I i 31. I. Odredite mjesečni prosjek dnevne ekstraterestričke ozračenosti za siječanj.

Primjenom izraza (4.15) i (4.17) izračunamo deklinaciju i satni kut izlaska Sunca za navedene dane:

1. I	$n=1$	$\delta=-23{,}01°$	$\omega_s=64{,}87°$
15. I	$n=15$	$\delta=-21{,}27°$	$\omega_s=67{,}1°$
31. I	$n=31$	$\delta=-17{,}78°$	$\omega_s=71{,}29°$

Zatim primjenom izraza (4.20) izračunamo dnevnu ekstraterestričku ozračenost za određeni dan:

1. I	$H_0=10{,}64$ MJ/m²
15. I	$H_0=11{,}8$ MJ/m²
31. I	$H_0=14{,}14$ MJ/m²

Da bismo mogli odrediti mjesečni prosjek dnevnih ozračenosti, potrebno je izračunati H_0 za svaki dan u siječnju i naći aritmetičku sredinu. Računanje (bez računala) trajalo bi dugo, zato ćemo odrediti H_0 za još nekoliko dana u siječnju, nacrtati dobivene rezultate i grafički odrediti prosjek. Rezultat je $\bar{H}_0=12{,}0$ MJ/m². Mjesečni prosjek možemo odrediti i tako da u izraz (4.20) uvrstimo mjesečni prosjek deklinacije (iz tablice 4.1) za siječanj, tj. $\delta=-20{,}9°$.

Tablica 4.4. Srednje dnevne vrijednosti ekstraterestričkog zračenja

Zemljopisna širina	Ozračenost po mjesecima, $\overline{H_0}$/(MJ/m²) I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
41°N	14,5	19,6	26,7	34,0	39,3	41,3	40,1	36,0	29,1	21,5	15,5	13,0
42°N	13,9	19,0	26,2	33,7	39,1	41,3	40,1	35,6	28,7	21,0	15,0	12,3
43°N	13,2	18,4	25,8	33,4	39,0	41,3	40,1	35,4	28,3	20,5	14,4	11,7
44°N	12,6	17,8	25,3	33,1	38,8	41,2	40,0	35,2	27,9	19,8	13,8	11,1
45°N	12,0	17,3	24,8	32,8	38,7	41,2	40,0	35,0	27,5	19,4	13,2	10,5
46°N	11,4	16,6	24,3	32,5	38,6	41,2	39,95	34,7	27,1	18,8	12,6	9,9
47°N	10,8	16,1	23,9	32,2	38,5	41,2	39,85	34,5	26,6	18,3	12,0	9,3
48°N	10,3	15,5	23,3	31,9	38,3	41,2	39,8	34,2	26,2	17,7	11,4	8,7

4.1.4. Prizemno Sunčevo zračenje

Na putu kroz Zemljinu atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se raspršuje na molekulama plinova (Rayleighovo raspršenje), na česticama prašine i dimu (aerosolu), apsorbira se zbog interakcije s molekulama (H_2O, CO_2, O_3 itd.), te apsorbira i raspršuje na oblacima. Pojedine valne duljine pri tome se više apsorbiraju nego druge te se i spektralni sastav (odnosno oblik spektra) mijenja. To se vidi na slici 4.1. gdje je prikazano spektralno ozračenje (iradijancija) iznad atmosfere (ekstraterestričko ozračenje) i na površini Zemlje za izravno Sunčevo zračenje pri potpuno vedru danu. Pri prolazu kroz atmosferu izgubi se oko 25% do 50% energije zbog raspršenja i apsorpcije. Ozon potpuno apsorbira kratko ultraljubičasto zračenje valne duljine manje od 0,3 μm, a ultraljubičasto zračenje između 0,3 μm i 0,4 μm gotovo se potpuno rasprši, pa je udio (%) tog zračenja u prizemnom spektru dosta malen u usporedbi s ekstraterestričkim spektrom. Vodena para apsorbira dio infracrvenog zračenja malih duljina do 2,5 μm, a ugljik-dioksid apsorbira zračenja valnih duljina većih od 2,5 μm. Čitav Sunčev spektar koji stiže do Zemljine površine proteže se od 0,3 μm do 2,5 μm.

Smanjenje energije izravnog zračenja pri prolazu kroz atmosferu može se u prvoj aproksimaciji prikazati s pomoću Bouguer-Lambertova zakona [v. npr. Pe 65]

$$G_{bn} = E_0 \, e^{-km}. \qquad (4.21)$$

G_{bn} je ozračenje izravnog Sunčeva zračenja koje na površini Zemlje upada na plohu okomitu na smjer Sunčevih zraka,

E_0 je ekstraterestričko ozračenje plohe okomite na smjer Sunčevih zraka (v. sl. 4.2),

k koeficijent atenuacije zračenja (tzv. ekstinkcijski koeficijent), a

m je omjer između duljine puta Sunčevih zraka kroz atmosferu i duljine tog puta kad je Sunce u zenitu, a naziva se i *optička masa zraka.*

Put Sunčevih zraka kroz atmosferu (sl. 4.6) opisuje se s pomoću optičke mase zraka koja se definira izrazom

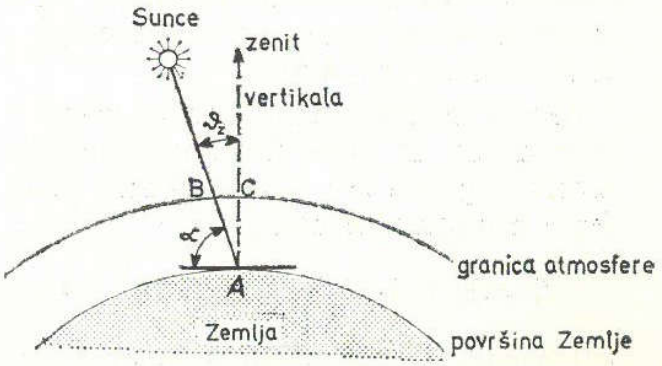
$$m = \frac{\overline{BA}}{\overline{CA}} = \frac{1}{\cos \vartheta_z} = \frac{1}{\sin \alpha} = \cos \sec \alpha \qquad (4.22)$$

$\overline{CA}$ je visina vertikalnog stupca zraka od površine Zemlje do ruba atmosfere,

$\overline{BA}$ je visina odgovarajućeg stupca zraka kroz koji prolaze Sunčeve zrake,

ϑ_z je kut upada Sunčevih zraka na horizontalnu plohu (zenitni kut Sunca),

α je visina Sunca.



Slika 4.6. Uz definiciju optičke mase zraka

Tako je npr. $m=1$ ako zrake dolaze na površinu Zemlje (nadmorska visina nula) okomito, $m=2$ ako je kut između Sunčevih zraka i horizonta $\alpha=30°$ i sl. Ekstraterestričkom zračenju odgovara $m=0$. Uobičajeno je da se ekstraterestričko zračenje naziva AM 0 (am nula — air mass zero), AM 1 jest zračenje koje dolazi do površine mora ako je $\alpha=90°$, AM 2 za $\alpha=30°$, AM 3 za $\alpha=20°$, AM 4 za $\alpha=14{,}5°$ i sl.

Smanjenje energije zračenja pri prolazu kroz atmosferu može se prikazati i izrazom

$$G_{bn}=f(\lambda)\,E_0 e^{-k(\lambda)m} \quad (4.23.a)$$

gdje $k(\lambda)$ uključuje atenuaciju zbog Rayleighova raspršenja, mutnoće atmosfere i apsorpcije u ozonu, a $f(\lambda)$ apsorpciju infracrvenog zračenja u vodenoj pari i ugljik-dioksidu [Ga 63, Th 77].

Ukupno zračenje koje upada na Zemljinu površinu sastoji se od izravnog (direktnog) Sunčeva zračenja koje paralelnim zrakama dolazi izravno sa Sunca i raspršenog (difuznog) zračenja iz svih smjerova koje je nastalo raspršenjem izravnog zračenja u atmosferi; ukupno Sunčevo zračenje G možemo dakle prikazati kao zbroj izravnog (direktnog) G_b i raspršenog (difuznog) G_d ozračenja

$$G=G_b+G_d. \quad (4.23)$$

Izraz (4.23) vrijedi općenito, a ako ga želimo primijeniti na horizontalnu plohu, potrebno je G_b i G_d proračunati. Za G_b tada imamo

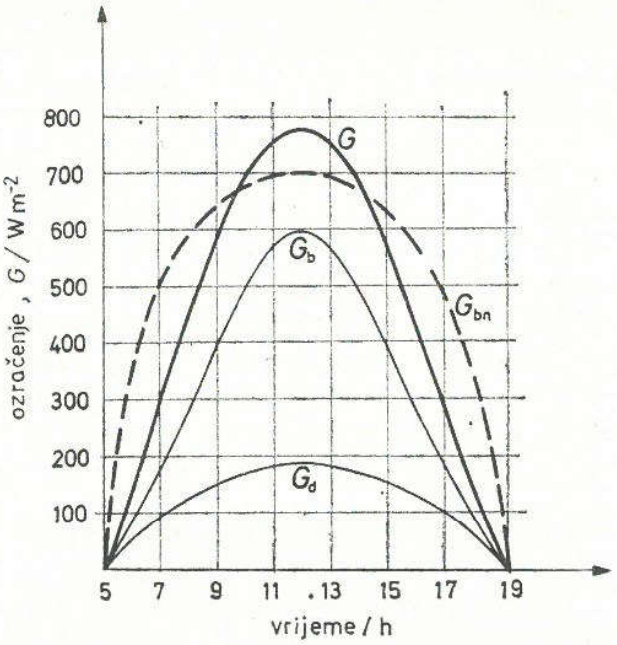
$$G_b=G_{bn}\cos\vartheta_z=G_{bn}\sin\alpha \quad (4.24)$$

gdje je G_{bn} izravno ozračenje plohe orijentirane okomito prema upadnim Sunčevim zrakama, ϑ_z zenitna udaljenost, a α visina Sunca (sl. 4.5).

Ako je G_d raspršeno Sunčevo zračenje koje dolazi iz svih smjerova neba (iz prostornog kuta 2π), tada je ukupno ozračenje horizontalne plohe

$$G=G_b+G_d=G_{bn}\sin\alpha+G_d. \quad (4.25)$$

Na slici 4.7. prikazan je dnevni hod izravnog ozračenja G_{bn} okomite plohe, izravnog ozračenja G_b horizontalne plohe, ukupnog G i raspršenog G_d ozračenja horizontalne plohe za vedra ljetnog dana u Zagrebu [Pe 65].



Slika 4.7. Dnevni hod direktnog ozračenja okomite G_{bn} i horizontalne plohe G_b, te ukupnog G i difuznog ozračenja G_d horizontalne plohe za vedar ljetni dan u Zagrebu (prema Pe 65)

4.1.5. Mjerenje Sunčeva zračenja

Podaci o Sunčevu zračenju dobivaju se mjerenjem i time se bavi posebna grana meteorologije, tzv. aktinometrija. Za primjenu sunčane energije osobito su važni ovi aktinometrijski podaci: trajanje insolacije (sijanja Sunca), ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu i difuzno zračenje na horizontalnu plohu.

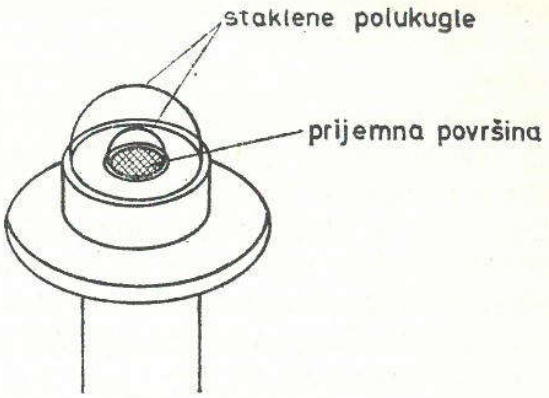
Trajanje insolacije, tj. vrijeme kad izravno Sunčevo zračenje dopire do površine Zemlje (odnosno horizontalne plohe uređaja) mjeri se s pomoću heliografa. Takvi se podaci bilježe na oko 130 mjesta u Jugoslaviji. Iako heliograf daje samo informaciju o tome da li ima izravnog zračenja ili ne, a ne daje nikakve podatke o energiji zračenja, ipak se, ako nema drugih podataka, i na temelju toga može procijeniti energija zračenja.

Postoje razne vrste heliografa: Jordanov, Campbell-Stokesov, Maurerov itd. Trajanje sijanja Sunca mjeri se u Zagrebu od 1889. godine, najprije fotokemijskim heliografom (Maurerovim, zatim Jordanovim), a kasnije i Campbell-Stokesovim heliografom [Pe 70]. Najpoznatiji je Campbell-Stokesov heliograf koji radi prema načelu toplinskog djelovanja Sunčeva zračenja. Sastoji se od prozirne staklene kugle koja fokusira Sunčeve zrake na papirnu vrpcu. Kad Sunce sja, na papirnoj vrpci ostaje trag zbog toga što fokusirane zrake spale papir. Naprotiv, kad Sunce zađe za oblake ili je njegov intenzitet premalen, ne ostaje trag na papiru.

Izravno Sunčevo zračenje mjeri se pirheliometrima [v. npr. Ga 79]. To je instrument koji mjeri ozračenje (iradijanciju) koja upada na njegovu površinu iz malog prostornog kuta. Postavi li se površina tog instrumenta okomito na pravac Sunčevih zraka, a dijafragmom otvora oko 5° obuhvati prostorni kut Sunčeva diska, pirheliometar će registrirati izravno sunčano ozračenje (direktnu solarnu iradijanciju). Pirheliometri moraju stalno pratiti Sunce i zbog toga se rijetko koriste za stalno mjerenje Sunčeva zračenja. Obično se mjeri ukupno i raspršeno zračenje, a izravno se računa kao njihova razlika.

Piranometri (sl. 4.8) instrumenti su koji mjere Sunčevo ozračenje koje upada na njihovu prijemnu (ravnu) površinu iz prostornog kuta 2π; upotrebljavaju se, dakle, za mjerenje ukupnog Sunčeva zračenja. Obično se postavljaju tako da im je prijemna površina horizontalna. Postoje dvije vrste piranometara. Jedni su toplinski detektori koji se pod utjecajem Sunčeva zračenja zagrijavaju te se pojavljuje termoelektrični efekt odnosno toplinska ekspanzija, pa se mjerenjem tih pojava može posredno mjeriti Sunčevo zračenje. Druga su vrsta poluvodički solarimetri u kojima upadno zračenje izaziva fotovoltaični efekt.

Spomenimo nekoliko tipova piranometara: Moll-Gorczynski, Eppley PSP, Schenk i bimetalni Robitzschev [Sa 81, Ta 81]. Ukupno Sunčevo zračenje mjerilo se npr. u Zagrebu (Grič) od 1948. do 1957. Robitzschevim aktinografom, a od 1958. dalje solarigrafom Moll-Gorczynski [Pe 70].



Slika 4.8. Shematski prikaz piranometra

Za precizna mjerenja bitno je da su piranometri točno kalibrirani i da se kalibracija periodički (npr. svake dvije godine) provjerava. Preciznost prvoklasnih instrumenata jest 1%. Oni moraju ispunjavati zahtjeve koje je za tu klasu instrumenata postavila Svjetska meteorološka organizacija (WMO) [v. npr. Te 81a]. Međutim, u praksi je većinom dovoljan i manje precizan (ali jeftiniji) instrument druge klase. Osobito su praktični prijenosni poluvodički solarimetri koji su, iako ne pripadaju u instrumente prve klase, dovoljno precizni za većinu mjerenja u solarnoj tehnici.

Ako se zasjeni Sunčev disk tako da do prijemne površine piranometra ne može doći izravno Sunčevo zračenje, piranometar će registrirati raspršeno zračenje. Tako se s pomoću piranometra s posebnim neprozirnim poluprstenom može mjeriti samo difuzno zračenje neba.

Kad je prijemna površina piranometra horizontalna, mjeri se izravno Sunčevo zračenje i raspršeno zračenje neba. Kad je površina nagnuta prema horizontali, piranometar će uz izravno zračenje i raspršeno zračenje neba registrirati i odbijeno raspršeno zračenje okolnih predmeta. Sva mjerenja na meteorološkim stanicama obavljaju se na horizontalnoj površini. Budući da su solarni kolektori nagnuti prema horizontali, potrebno je

Sunčevo zračenje koje na njih upada proračunati iz podataka za horizontalnu površinu.

Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu ravninu mjeri se na području naše zemlje u 18 stanica. Neke rade već mnogo godina pa se iz tih mjerenja mogu dobiti pouzdane srednje vrijednosti za ukupnu ozračenost (iradijaciju) horizontalne plohe u nekim mjestima (npr. Baru, Splitu, Beogradu, Zagrebu i dr.).

U nekim aktinometrijskim stanicama (npr. u Baru, Beogradu, Zagrebu) mjeri se osim ukupnog i raspršeno zračenje na horizontalnu ravninu. Budući da je pri proračunu sunčanih uređaja osim ukupnoga potrebno poznavati i raspršeno zračenje na horizontalnu plohu, i ta su mjerenja vrlo korisna za primjenu sunčane energije. Vjerojatno će se u budućnosti, mreža stanica za mjerenje raspršenog zračenja razgranati.

Podaci o Sunčevu zračenju dobiveni aktinometrijskim mjerenjima u Jugoslaviji objavljuju se u izdanjima Saveznog hidrometeorološkog zavoda, a djelomično se mogu naći i u drugim radovima [npr. u Pe 65, Pe 70, Pe 79, Gb 80].

Iz podataka o ukupnom ozračenju (iradijanciji) koje zapisuju piranografi dobivaju se satne ozračenosti (iradijacije) horizontalne plohe. (Satna ozračenost često se naziva satna suma zračenja.) Zbrajanjem satnih ozračenosti dobivaju se dnevne ozračenosti. Prema tako prikupljenim podacima računaju se prosjeci satne odnosno dnevne ozračenosti za svaki mjesec u godini. Budući da su takvi prosjeci načinjeni prema podacima za dulje vremensko razdoblje mogu dobro poslužiti pri projektiranju i proračunu rada solarnih sustava.

U tablicama 4.5, 4.6. i 4.7. navedene su srednje satne ozračenosti za Bar, Split i Zagreb, prema podacima iz literature [Pe 70, Pe 79 i Gb 80]. Vrijednosti su izražene mjernom jedinicom vatsat po četvornom metru (W h/m²).

Tablica 4.5. Srednji dnevni hod satne ozračenosti (iradijacije) u Baru za svaki mjesec u razdoblju 1964—1975.

Doba dana h	Ozračenost/(W h/m²)											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4—5					3	11	6					
5—6				16	58	92	81	33	6			
6—7			33	103	192	233	233	167	69	8		
7—8	14	50	153	239	339	381	394	331	217	114	25	11
8—9	94	152	283	369	478	525	547	483	364	250	128	78
9—10	192	265	389	483	594	636	683	617	486	361	225	172
10—11	261	322	478	556	676	731	778	714	572	488	300	244
11—12	297	369	522	583	728	781	822	756	622	503	320	275
12—13	297	383	527	592	748	792	825	764	623	500	327	272
13—14	272	355	486	579	707	758	783	757	580	467	291	231
14—15	208	272	400	503	618	678	725	619	494	378	225	161
15—16	122	178	292	394	494	590	561	492	375	258	128	83
16—17	33	75	164	261	350	403	408	336	233	122	39	31
17—18		11	47	125	200	253	242	175	86	19		
18—19				22	69	103	92	39	3			
19—20					3	14	6					
Zbroj	1 790	2 433	3 774	4 816	6 258	6 971	7 186	6 251	4 730	3 471	2 058	1 558

Tablica 4.6. Srednji dnevni hod satne ozračenosti (iradijacije) u Splitu u razdoblju 1964—1977.

Doba dana h	Ozračenost/ (W h/m²)											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4—5					6	15	11	1				
5—6			1	20	72	106	90	46	8			
6—7		5	37	112	200	243	231	171	85	20	1	
7—8	18	65	165	255	354	405	395	330	227	129	38	10
8—9	98	176	289	400	503	553	553	482	378	267	136	81
9—10	192	297	410	524	626	678	605	617	509	390	238	172
10—11	263	378	515	609	716	776	778	706	598	479	307	242
11—12	306	428	556	647	758	816	827	752	638	521	345	277
12—13	312	420	540	645	750	810	821	753	633	517	339	285
13—14	276	375	506	603	697	755	761	699	580	463	295	248
14—15	200	292	432	521	615	676	670	609	503	371	224	175
15—16	106	183	306	406	505	560	554	486	369	242	117	88
16—17	23	71	172	268	361	415	402	334	216	104	28	14
17—18		5	53	128	211	262	249	175	73	13	0	
18—19			2	26	81	111	100	50	5			
19—20					7	17	13	2				
Zbroj	1 798	2 717	3 984	5 165	6 462	7 198	7 059	6 214	4 821	3 517	2 066	1 592

Tablica 4.7. Srednji dnevni hod satne ozračenosti (iradijacije) u Zagrebu u razdoblju 1958—1967.

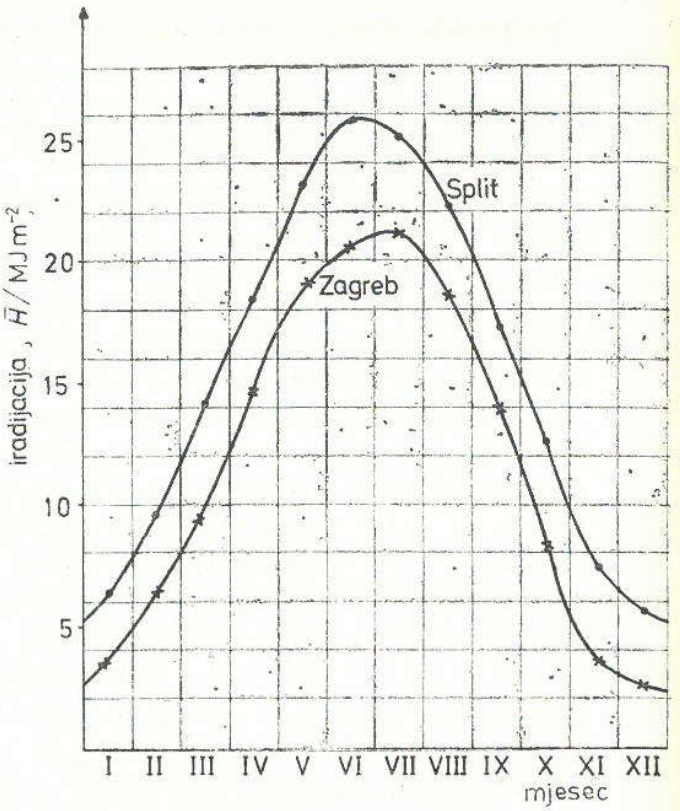
Doba dana h	Ozračenost /(W h/m²)											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4—5				0,5	11	19	14	2,5				
5—6			2	22	67	87	77	38	8	0,1		
6—7		4	27	92	167	186	185	128	61	13	0,6	
7—8	9	35	96	197	288	310	310	257	162	68	14	4
8—9	43	101	188	317	417	437	445	383	289	150	52	30
9—10	98	183	290	419	528	542	564	518	403	240	101	72
10—11	147	252	366	499	599	633	654	608	496	320	147	112
11—12	184	290	389	534	643	665	695	661	539	358	177	139
12—13	194	303	396	529	644	664	698	651	532	359	185	143
13—14	168	266	347	493	589	628	651	600	486	322	153	121
14—15	117	201	275	420	501	544	561	512	402	248	104	79
15—16	54	117	195	301	398	423	443	397	289	152	50	33
16—17	11	42	100	191	280	310	326	268	163	62	11	5
17—18		4	28	83	155	191	192	136	54	8	0,1	
18—19			1,5	18	55	83	79	36	6			
19—20				0,1	7	17	14	2				
Zbroj	1 025	1 810	2 700	4 109	5 354	5 726	5 905	5 200	3 890	2 303	996	738

Pri proračunu sunčanih uređaja potrebni su podaci o mjesečnom prosjeku dnevne ukupne ozračenosti (iradijacije). U tablici 4.8. prikazane su srednje dnevne ozračenosti horizontalne plohe u nekim našim gradovima dobivene aktinometrijskim mjerenjem u više godina. Podaci za Bar (1964—1975) Beograd (1967—1976) i Ljubljanu (1967—1976) navode se prema [Gb 80] za Split (1958—1967) prema (Pe 79] a za Zagreb (1958—1967) prema [Pe 70].

Tablica 4.8. Godišnji hod srednje dnevne sunčane ozračenosti (iradijacije) horizontalne plohe ($\bar{H}$)

Mjesec	ozračenost/ (MJ/m²)				
	Bar	Split	Beograd	Zagreb	Ljubljana
siječanj	6,5	6,5	5,2	3,7	2,7
veljača	8,8	9,8	7,8	6,5	5,5
ožujak	13,6	14,3	12,2	9,7	9,2
travanj	17,4	18,6	16,5	14,8	13,1
svibanj	22,6	23,3	21	19,3	17,6
lipanj	25,1	25,9	21,8	20,6	18,2
srpanj	25,9	25,4	22	21,3	19,1
kolovoz	22,5	22,4	19,7	18,7	15,6
rujan	17,1	17,4	14,9	14,0	11,5
listopad	12,5	12,7	10,2	8,3	7,2
studeni	7,3	7,4	8,1	3,6	3,4
prosinac	5,6	5,7	3,7	2,7	2,2
Godišnji srednjak/(MJ/m²)	15,4	15,8	13,6	11,9	10,4
ukupna godišnja ozračenost/(kWh/m²)	1560	1600	1380	1200	1050

Opaža se relativno velika razlika u dobivenoj energiji Sunčeva zračenja na Jadranu i u kontinentalnom dijelu naše zemlje. To posebno ilustrira i slika 4.9. gdje je prikazan godišnji hod srednjih dnevnih količina zračenja za Zagreb i Split.



Slika 4.9. Godišnji hod srednjih dnevnih ozračenosti (iradijacija) H na horizontalnu plohu u Zagrebu i Splitu

4.1.6. Proračun prizemnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu

Budući da je mreža stanica hidrometeorološke službe Jugoslavije u kojima se mjeri ukupna ozračenost ipak relativno rijetka, često je potrebno izračunati podatke o ukupnom Sunčevu zračenju.

Ako ne postoje podaci dobiveni mjerenjem, upadno Sunčevo zračenje može se izračunati upotrebom raznih empirijskih formula. Razrađene su različite metode za proračun mjesečnog prosjeka ukupne dnevne ozračenosti $\bar{H}$ iz ostalih klimatoloških podataka dobivenih mjerenjem, npr. trajanja insolacije (sijanja Sunca), vlažnosti, temperature zraka, oblačnosti, broja kišnih dana i slično [v. npr. Sa 81). Ovdje ćemo navesti kako se mjesečni prosjek ukupne ozračenosti horizontalne plohe može izračunati iz srednjeg mjesečnog trajanja sijanja Sunca.

Ako su npr. poznati podaci o relativnom sijanju Sunca, mjesečni se prosjek ukupne ozračenosti horizontalne plohe $\bar{H}$ može izračunati primjenom Angström-Pageove formule [An 56, Pa 66, Po 78]

$$\bar{H}=\bar{H}_0\,(a+b\bar{S}) \qquad (4.26)$$

$\overline{H_0}$ je srednja dnevna vrijednost ekstraterestričke ozračenosti za promatrani mjesec određena izrazom (4.20),

$\overline{S}$ je srednja dnevna vrijednost relativnog trajanja sijanja Sunca,

a i b su koeficijenti ovisni o promatranom mjestu.

Relativno trajanje sijanja Sunca S omjer je između stvarnog trajanja sijanja Sunca i mogućeg trajanja sijanja Sunca, tj trajanja Sunčeva dana. Trajanje sijanja Sunca mjere heliografi. Na području Jugoslavije mnogo ih je i rade već dugo. Ti su podaci naročito korisni za ona mjesta na kojima se ne obavljaju neposredna aktinometrijska mjerenja jer mogu poslužiti za izračunavanje ukupnog zračenja.

Koeficijenti a i b izračunati su s pomoću jednadžbe (4.26) za mjesta u Jugoslaviji za koja postoje podaci o ukupnoj ozračenosti i trajanju insolacije [Po 78] i oni se mogu koristiti pri proračunu ozračenosti u mjestima istog klimatskog područja za koja ne postoje podaci dobiveni mjerenjem ukupnog zračenja. U tablici su navedene vrijednosti koeficijenata a i b za neka područja [Lö, 66, Po 78, Pa 81, Ku 82].

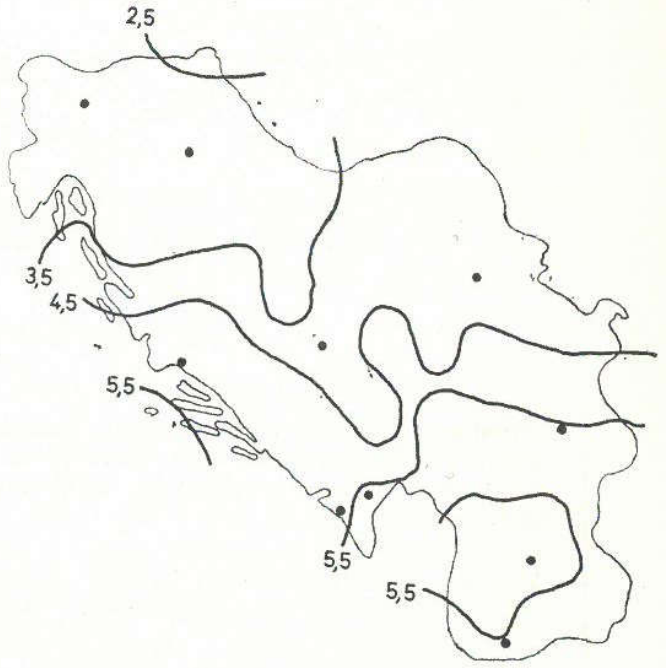
Tablica 4.9. Koeficijenti a i b za neka mjesta

Mjesto	a	b
Đakarta	0,25	0,32
Hamburg	0,22	0,57
Madison (SAD)	0,30	0,34
Miami (SAD)	0,42	0,22
Nice (Francuska)	0,17	0,63
Ljubljana	0,17	0,58
Zagreb	0,20	0,59
Split	0,24	0,51
Bar	0,20	0,60
Beograd	0,22	0,58

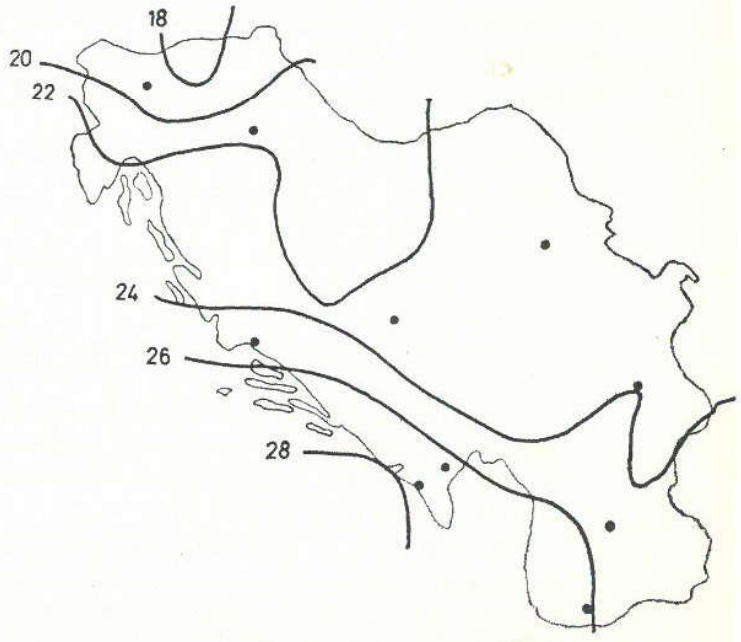
Postoje i druge empiričke formule za proračunavanje ozračenosti iz insolacije i drugih podataka [Sa 77].

Iz podataka o sijanju Sunca proračunate su srednje vrijednosti ukupne dnevne ozračenosti za mnoga mjesta u Jugoslaviji [Pe 59, Pe 60, Ga 70, Po 77, Po 78 i dr.].

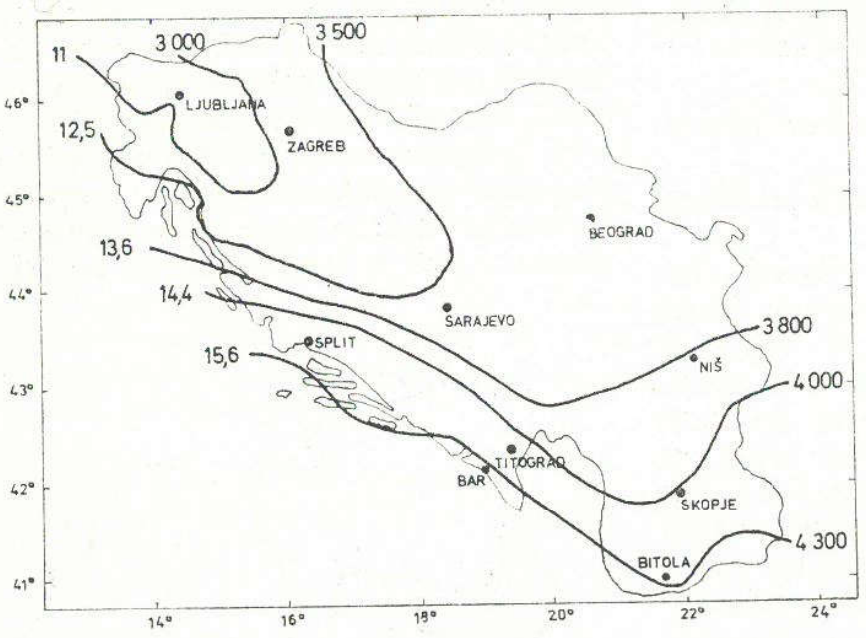
Na temelju tih proračuna izrađene su i odgovarajuće karte [Po 78] s raspodjelom srednjih dnevnih količina zračenja za svaki mjesec u godini. Na slici 4.10. i 4.11. prikazane su takve karte u pojednostavnjenom obliku za prosinac i srpanj. Detaljnije i točnije karte za svaki mjesec mogu se naći u literaturi [npr. u Po 78].



Slika 4.10. Srednje dnevne globalne ozračenosti (globalne iradijacije) u prosincu (izolinije, $[H]=\mathrm{MJ\ m^{-2}}$)



Slika 4.11. Srednje dnevne globalne ozračenosti (globalne iradijacije) horizontalne plohe u srpnju (izolinije, $[H]=\mathrm{MJ\ m^{-2}}$)



Slika 4.12. Srednje dnevne globalne ozračenosti (godišnji prosjek) horizontalne plohe (izolinije, $[\bar{H}]=\mathrm{MJ\ m^{-2}}$ odnosno $[\bar{H}]=\mathrm{Wh\ m^{-2}}$)

Na slici 4.12. prikazana je karta srednjih dnevnih količina zračenja na području Jugoslavije, prosjek za godinu.

Primjer: Podaci o trajanju sijanja Sunca u Zagrebu ($\varphi=45°\ 49'$) za razdoblje 1958—1967. [Pe 70], navedeni su u tablici 4.10. Koliki su koeficijenti a i b u Angström-Pageovoj formuli? Podaci za ukupnu ozračenost horizontalne plohe za isto razdoblje nalaze se u tablici 4.8.

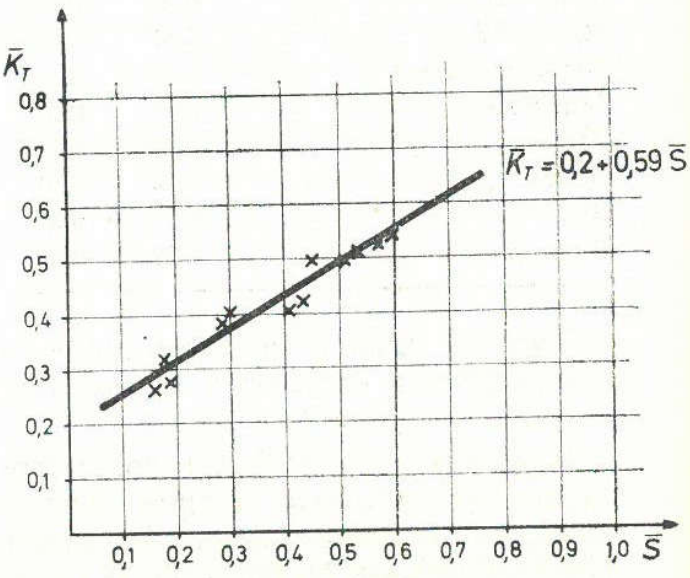
Tablica 4.10. Trajanje insolacije u Zagrebu

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Broj sunčanih sati	50,9	82,0	109,5	164,7	207,0	235,7	270,5	257,7	199,6	136,8	51,9	38,5

Označimo li indeks prozračnosti $\bar{K}_T=\bar{H}/\bar{H}_0$, Angström-Pageovu formulu (4.26) možemo tad pisati u obliku

$$\bar{K}_T=a+b\bar{S}. \qquad (4.26.a)$$

Slika 4.13. Uz izračunavanje koeficijenta a i b za Zagreb



Izračunamo li srednje moguće trajanje dana (od izlaska do zalaska Sunca) u pojedinom mjesecu $\bar{Z}$, te prosječno dnevno trajanje insolacije $\bar{s}$, služeći se navedenim podacima u tablici, možemo izračunati $\bar{S}=\bar{s}/\bar{Z}$. Rezultati su prikazani u tablici 4.11.

Na slici 4.13. je prikazana tako dobivena ovisnost indeksa prozračnosti $\bar{K}_T$ o relativnom trajanju sijanja Sunca. Provučemo li (metodom najmanjih kvadrata) kroz izračunate točke pravac $\bar{K}_T=a+b\bar{S}$, možemo odrediti koeficijente a i b. Dobiva se $a=0{,}2$ i $b=0{,}59$.

Tablica 4.11. Podaci za izračunavanje koeficijenata a i b za Zagreb

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Broj sunčanih sati mjesečno	50,9	82,0	109,5	164,7	207,0	235,7	270,5	257,7	199,6	136,8	51,9	38,5
$\bar{Z}$ mjesečni prosjek mogućeg trajanja insolacije/(sati na dan)	8,9	10,2	11,7	13,3	14,7	15,5	15,1	13,9	12,3	10,6	9,3	8,5
$\bar{s}$, mjesečni prosjek stvarnog trajanja insolacije/ (sati na dan)	1,6	2,9	3,5	5,5	6,7	7,9	8,7	8,3	6,7	4,4	1,7	1,2
$\bar{H}$/(MJ/m²)	3,7	6,5	9,7	14,8	19,3	20,6	21,3	18,7	14,0	8,3	3,6	2,7
$\bar{H}_0$/ (MJ/m²)	11,5	16,9	24,5	32,4	38,6	41,3	39,9	34,9	27,4	19,3	12,9	10,0
$\bar{K}_T$	0,320	0,385	0,396	0,457	0,500	0,499	0,534	0,536	0,511	0,430	0,279	0,270
$\bar{S}=\bar{s}/\bar{Z}$	0,184	0,289	0,302	0,412	0,453	0,508	0,577	0,599	0,54	0,415	0,187	0,145

Određivanje satnih ozračenosti iz dnevnih. Pri proračunu rada sunčanih sustava katkad je potrebno poznavati prosječni dnevni hod zračenja, tj. srednje satne ozračenosti za svaki mjesec u godini. Budući da su podaci o srednjoj dnevnoj ozračenosti dostupniji, satne ozračenosti potrebno je često izračunati. Satne vrijednosti ozračenosti $\bar{H}_s$ mogu se npr. približno izračunati iz dnevnih $\bar{H}_d$ upotrebom Collares-Pereirove i Rablove formule [Co 79]

$$\bar{H}_s=\bar{H}_d\frac{\pi}{24}(a+b\cos\omega)\frac{\cos\omega-\cos\omega_s}{\sin\omega_s-\frac{2\pi\omega_s}{360}\cos\omega_s} \qquad (4.27)$$

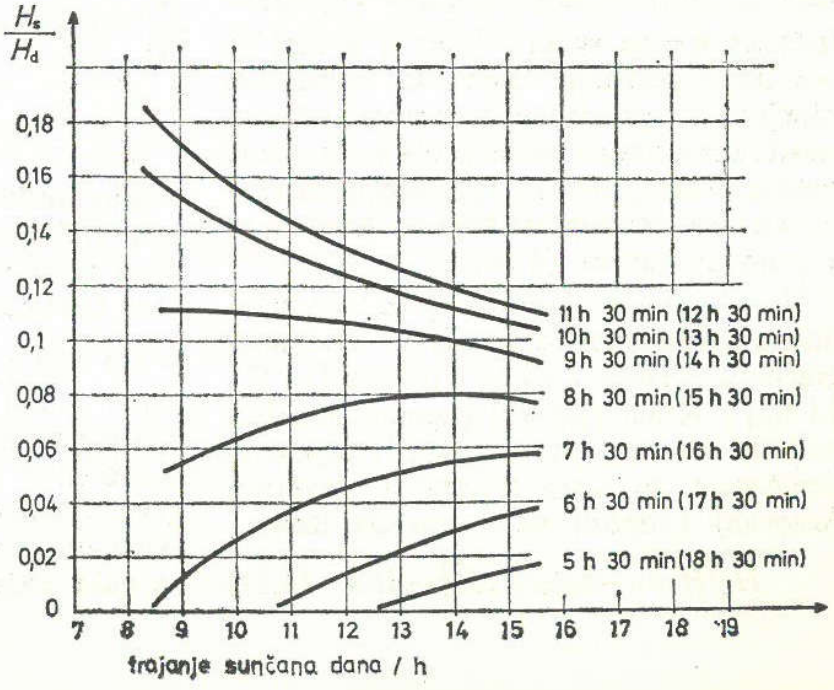
gdje su koeficijenti

$$a=0{,}409+0{,}5016\sin(\omega_s-60°)$$

$$b=0{,}6609-0{,}4767\sin(\omega_s-60°).$$

Tu je ω satni kut Sunca sredinom onog sata za koji računamo $\bar{H}_s$, ω_s kut izlaska (zalaska) Sunca (4.17) — prosječna vrijednost za taj mjesec. Pretpostavlja se da ta formula vrijedi bez obzira na klimatske uvjete područja.

Na slici 4.14. prikazan je $\bar{H}_s/\bar{H}_d$ u funkciji trajanja Sunčeva dana dobiven s pomoću podataka mjerenja za naše područje (Split i Zagreb). Ti se grafovi također mogu upotrijebiti za određivanje



Slika 4.14. Veza između satne i dnevne ozračenosti (iradijacije) horizontalne plohe

satnih vrijednosti ozračenosti u našem području, možda i točnije od empiričkih formula izvedenih za druga klimatska područja.

4.1.7. Procjena raspršenog zračenja

Da bi se proračunala ukupna energija Sunčeva zračenja koja dopire do plohe kolektora, potrebno je, osim podataka o ukupnom zračenju na plohu, poznavati i udio difuznog zračenja u ukupnom zračenju. Postotak raspršenog zračenja može se odrediti mjerenjem ili izračunati ako ne postoje podaci dobiveni mjerenjem.

Podaci mjerenja za srednje dnevno raspršeno zračenje $\bar{H}_d$ većinom ne postoje, te se $\bar{H}_d$ mora izračunati iz srednjeg dnevnog ukupnog zračenja $\bar{H}$.

Poznato je da je udio (%) raspršenog zračenja u ukupnom $\bar{H}_d/\bar{H}$ funkcija tzv. indeksa prozračnosti

$$\bar{K}_T=\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \qquad (4.28)$$

gdje je $\bar{H}$ srednja dnevna prizemna vrijednost ukupnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu, a $\bar{H}_0$ srednja dnevna ekstraterestrička vrijednost za horizontalnu plohu na istoj zemljopisnoj širini. Srednje vrijednosti dobivene su iz podataka za čitav mjesec. Srednja vrijednost indeksa $\bar{K}_T$ za svaki mjesec u godini za određeno područje može se izračunati dijeljenjem prosječne mjesečne ozračenosti horizontalne plohe (koja se dobije iz meteoroloških mjerenja) i prosječne ekstraterestričke ozračenosti koja se izračunava s pomoću izraza (4.20).

Vezu između indeksa prozračnosti i udjela raspršenog zračenja u ukupnom zračenju odredili su Liu i Jordan [Li 60, Li 62] i Klein [Kl 78] (upotrebljavajući podatke mjerenja za ukupnu i raspršenu ozračenost za neka mjesta u sjevernoj Americi) i dobili su empirički izraz

$$\bar{H}_d/\bar{H}=a-b\bar{K}_T+c\bar{K}_T^2-d\bar{K}_T^3 \qquad (4.29)$$

gdje je $a=1{,}39$, $b=4{,}03$, $c=5{,}53$ i $d=3{,}11$. (Pri proračunu korištena je stara vrijednost za solarnu konstantu — $\bar{E}_0'=1\,394$ W/m²; upotrijebi li se $\bar{E}_0=1\,353$ W/m², dobije se $a=1{,}39$, $b=3{,}9$, $c=5{,}21$ i $d=2{,}85$.)

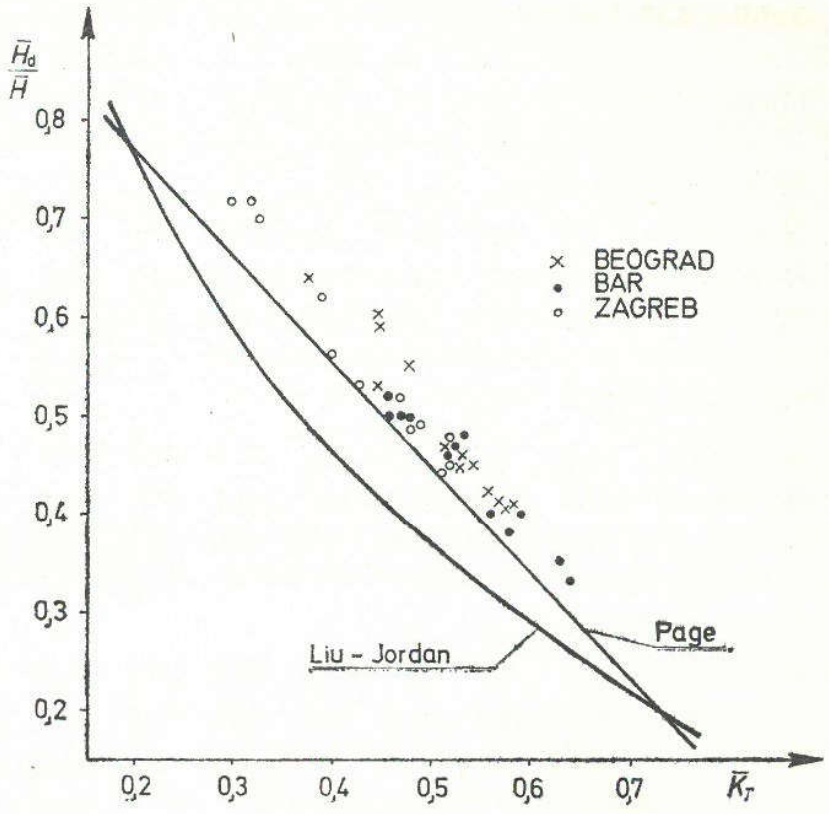
Uspoređujući omjer $\bar{H}_d/\bar{H}$ za naše područje gdje postoje rezultati mjerenja za ozračenost $\bar{H}_d$ i $\bar{H}$ s odgovarajućim (istim φ) sjevernoameričkim područjima [v. npr. Be 77], opaža se u nas veći udio difuznog zračenja u ukupnom. Zbog toga pri primjeni izraza (4.29) i sličnih empiričkih izraza dobivenih za drugo klimatsko područje treba biti oprezan i izraz prilagoditi uvjetima [Ku 80, Ku 82, De 83]. Tipični je udio raspršenog zračenja u američkom području od 25% do 40%, a u našem području od 30% do 60%; za klimu Jugoslavije karakterističan je upravo veliki udio (postotak) raspršenog zračenja u ukupnom zračenju.

Kada se podaci mjerenja za Bar, Beograd i Zagreb [Ga 77, Br 81] usporede s rezultatima dobivenim iz izraza (4.29), opaža se određeno neslaganje: izmjerene vrijednosti difuzne ozračenosti veće su od onih koje predviđa Liu-Jordanov izraz! Iz podataka mjerenja o raspršenom ukupnom zračenju za Bar, Beograd i Zagreb dobiva se za jugoslavensko područje izraz sličan izrazu (4.29), ali s drukčijim koeficijentima

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}=1{,}60-4{,}17\bar{K}_T+5{,}29\bar{K}_T^2-2{,}86\,\bar{K}_T^3. \qquad (4.29.a)$$

Liu-Jordanov izraz (4.29) potcjenjuje udio difuznog zračenja u ukupnom Sunčevu zračenju, izraz (4.29.a) bolje odgovara klimatskim prilikama u našoj zemlji.

Na slici 4.15. prikazana je veza između $\bar{K}_T$ i $\bar{H}_d/\bar{H}$ prema Liu-Jordanovu izrazu te eksperimentalne točke koje odgovaraju izmjerenim vrijednostima za Bar i Beograd. Iz slike je očito da se Liu-Jordanov izraz ne može bez korekcije primijeniti za naše područje.



Slika 4.15. Usporedba Liu-Jordanove i Pageove relacije s izmjerenim podacima za Bar, Beograd i Zagreb

Page [Pa 64] izveo je linearnu vezu između omjera difuzne i ukupne iradijacije i indeksa prozračnosti

$$\bar{H}_d/\bar{H}=A+B\bar{K}_T, \qquad (4.30)$$

i dobio srednju vrijednost za koeficijente $A=1{,}00$ i $B=1{,}096$, uzimajući podatke mjerenja za niz mjesta u raznim dijelovima svijeta. Koeficijenti A i B ovise o pojedinom klimatskom području i potrebno je prije upotrebe empiričkih izraza (4.29) i (4.30) provjeriti njihovu valjanost za područje za koje se žele primijeniti. Odredimo li iznose koeficijenata iz podataka mjerenja za Bar, Beograd i Zagreb (sl. 4.12), dobivamo $A=1{,}05$ i $B=1{,}125$ [Ku 81]. Na slici 4.15. uz Liu-Jordanov nacrtan je i Pageov izraz (4.30). Taj se crtež može koristiti umjesto izraza (4.29) i (4.30) za određivanje omjera raspršenog zračenja u našem klimatskom području (v. idući primjer).

Primjer. Kolika je srednja vrijednost indeksa prozračnosti za svaki mjesec u godini za Bar ($\varphi=42{,}1°$), Split ($\varphi=43{,}52°$) i Zagreb ($\varphi=45{,}82°$)? Koliki je prosječni omjer između raspršenog i ukupnog zračenja za svaki mjesec u Zagrebu i Splitu?

Indeks prozračnosti jest

$$\bar{K}_T=\bar{H}/\bar{H}_0.$$

Srednju dnevnu vrijednost ukupnog zračenja možemo očitati iz tablice 4.8, a ekstraterestričku ozračenost H_0 možemo odrediti koristeći tablicu 4.4. Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.12.

Koristeći tablicu 4.12. i sliku 4.15. možemo procijeniti omjer H_d/H za Split i Zagreb, a iz toga naći H_d. Rezultati su prikazani u tablici 4.13. U istoj su tablici, radi usporedbe, navedeni i podaci za raspršeno zračenje u Zagrebu [Br 81] dobiveni mjerenjem.

Tablica 4.12. Indeks prozračnosti

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XI	X	XI	XII
Split (φ=43,52°, N)												
$\overline{H}$, MJ m^{-2}	6,5	9,8	14,3	18,6	23,3	25,9	25,4	22,4	17,4	12,7	7,4	5,7
$\overline{H_0}$, MJ m^{-2}	12,9	18,1	25,5	33,2	38,5	41,3	40,1	35,3	28,1	20,2	14,1	11,4
$\overline{K}_T$	0,51	0,54	0,55	0,56	0,60	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	0,52	0,50
Bar (φ=42,1°, N)												
$\overline{H}$, MJ m^{-2}	6,5	8,8	13,6	17,4	22,6	25,1	25,9	22,5	17,1	12,5	7,3	5,6
$\overline{H_0}$, MJ m^{-2}	13,8	19,0	26,2	33,7	39,1	41,3	40,1	35,6	28,7	21,0	14,9	12,3
$\overline{K}_T$	0,47	0,46	0,52	0,52	0,58	0,61	0,64	0,63	0,60	0,60	0,49	0,46
Zagreb (φ=45,82°, N)												
$\overline{H}$, MJ m^{-2}	3,7	6,5	9,7	14,8	19,3	20,6	21,3	18,7	14	8,3	3,6	2,7
$\overline{H_0}$, MJ m^{-2}	11,6	16,8	24,4	32,6	38,6	41,2	40,0	34,8	27,1	18,9	12,7	10,0
$\overline{K}_T$	0,32	0,39	0,40	0,45	0,50	0,50	0,53	0,54	0,52	0,44	0,28	0,27

Tablica 4.13. Udio raspršenog zračenja $\overline{H_d}/\overline{H}$ u Splitu i Zagrebu dobiven proračunom i uspoređens izmjerenim vrijednostima za Zagreb

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Split	48%	44%	43%	42%	38%	35%	35%	35%	36%	36%	47%	48%
Zagreb	70%	63%	60%	52%	49%	46%	45%	44%	47%	56%	70%	75%
Zagreb*	70%	62%	53%	52%	49%	48%	45%	44%	47%	59%	69%	72%

*podaci mjerenja (1974—1980)

4.1.8. Sunčevo zračenje na nagnutu plohu

Pri proračunu efikasnosti rada sunčanog uređaja potrebno je poznavati ukupno Sunčevo zračenje koje upada na nagnutu plohu kolektora. Ako nema podataka mjerenja, potrebno je zračenje proračunati iz aktinometrijskih podataka za to područje.

Prema metodi koju su razvili Liu, Jordan i Klein [Li 62, Kl 77, Be 77] može se iz podataka o Sunčevu zračenju na horizontalnu plohu (koje mjeri meteorološka služba) izračunati srednja dnevna ozračenost (prosjek za čitav mjesec) kose plohe za određeni mjesec. Opisat ćemo ukratko taj proračun.

Ukupna energija Sunčeva zračenja koja dopire do nagnute plohe G_β sastoji se od tri komponente: prva je od izravnog Sunčeva zračenja koje upada na plohu, druga je od raspršenog zračenja dijela neba koji se nalazi iznad plohe i treća je od zračenja odbijenog od tla i okolnih predmeta

$$G_\beta = G_{b\beta} + G_{d\beta} + G_{r\beta}. \qquad (4.31)$$

Direktno sunčano ozračenje (iradijancija) nagnute plohe $G_{b\beta}$ povezano je s direktnim sunčanim ozračenjem horizontalne plohe [v. npr. Du 74] izrazom

$$G_{b\beta}=G_b\frac{\cos\vartheta_\beta}{\cos\vartheta_z}=G_b\frac{\cos\vartheta_\beta}{\sin\alpha}=G_bR_b' \quad (4.32)$$

gdje je ϑ_β kut upada Sunčevih zraka na nagnutu plohu (između zrake i okomice na plohu), α visina Sunca, ϑ_z kut upada Sunčevih zraka na hrizontalnu plohu, a G_b izravno zračenje na plohu okomitu na upadne zrake.

Ako je nagnuta ploha okrenuta prema jugu, faktor R_b' može se izračunati s pomoću izraza [Ho 42, Du 74 i dr.]

$$R_b'=\frac{\cos\vartheta_\beta}{\sin\alpha}=$$

$$=\frac{\cos(\varphi-\beta)\cos\delta\cos\omega+\sin(\varphi-\beta)\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta\cos\omega+\sin\varphi\sin\delta} \quad (4.33)$$

gdje je φ zemljopisna širina, δ deklinacija Sunca, ω satni kut Sunca i β kut plohe prema horizontali.

Integriranjem i izračunavanjem prosjeka dobivamo srednju vrijednost dnevne izravne ozračenosti nagnute plohe

$$\bar{H}_{b\beta}=\bar{R}_b\bar{H}_b \quad (4.34)$$

gdje je $\bar{R}_b$ omjer između srednjeg dnevnog izravnog zračenja na nagnutu plohu i na horizontalnu plohu za pojedini mjesec.

Dnevna vrijednost faktora R_b za plohe okrenute prema jugu može se izračunati s pomoću izraza [v. npr. Be 77]

$$R_b=$$

$$=\frac{\cos(\varphi-\beta)\cos\delta\sin\omega_s'+\frac{\pi}{180}\omega_s'\sin(\varphi-\beta)\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s+\frac{\pi}{180}\omega_s\sin\varphi\sin\delta} \quad (4.35)$$

gdje je $\omega_s=\arccos(-\mathrm{tg}\varphi\mathrm{tg}\delta)$ vremenski kut izlaska (zalaska) Sunca za horizontalnu plohu, $\omega_s'=\min\{\omega_s, \arccos[-\mathrm{tg}(\varphi-\beta)\,\mathrm{tg}\,\delta]\}$ vremenski kut zalaska Sunca za nagnutu plohu, δ deklinacija Sunca i β nagib površine (kolektora). Srednja vrijednost dobiva se kao aritmetička sredina faktora R_b izračunatog s pomoću izraza (4.35) za svaki dan u mjesecu ili uvrštavanjem mjesečnog prosjeka za δ u izraz (4.35).

Raspršena ozračenost nagnute plohe $H_{d\beta}$ razlikuje se od raspršene ozračenosti horizontalne plohe $\bar{H}_d$ jer nagnuta ploha ne dobiva zračenje iz hemisfere iznad tla nego samo jednog njezinog dijela. Ako pretpostavimo da je difuzno zračenje neba izotropno, taj je dio proporcionalan prostornom kutu pod kojim se vidi nebo s nagnute plohe, te je [Du 74]

$$\bar{H}_{d\beta}=\bar{H}_d\frac{1+\cos\beta}{2} \quad (4.36)$$

gdje je β kut koji ploha zatvara s horizontalom.

Na kosu plohu također dolazi i zračenje odbijeno s tla i okolnih predmeta. Ako je ρ refleksijski faktor tla, tada je ozračenost kose plohe reflektiranim zračenjem

$$H_{r\beta}=\rho\bar{H}\frac{1-\cos\beta}{2} \quad (4.37)$$

gdje je $\bar{H}$ ukupno ozračenje na horizontalnu plohu ili ravno tlo, tj. zbroj $(\bar{H}_b+\bar{H}_d)$ izravnog i raspršenog zračenja na horizontalnu plohu.

Prema tome ukupna ozračenost nagnute plohe jest

$$\bar{H}_\beta=\bar{H}_{b\beta}+\bar{H}_{d\beta}+\bar{H}_{r\beta}=(\bar{H}-\bar{H}_d)\bar{R}_b+$$
$$+\bar{H}_d\frac{1+\cos\beta}{2}+\rho\bar{H}\frac{1-\cos\beta}{2}=$$
$$=\left[\left(1-\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right)\bar{R}_b+\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\frac{1+\cos\beta}{2}+\right.$$
$$\left.+\rho\frac{1-\cos\beta}{2}\right]\cdot\bar{H}=\bar{R}\bar{H}. \quad (4.39)$$

Izraz u uglatoj zagradi označen s $\bar{R}$ znači omjer srednje dnevne ozračenosti nagnute plohe i srednje dnevne ozračenosti horizontalne plohe za pojedini mjesec.

Primjer 1. Kolika je srednja vrijednost faktora $\overline{R}_b$ u Splitu za svaki mjesec? Kolektor je nagnut $\beta=\varphi=43{,}5°$ prema horizontali.

Faktor R_b možemo izračunati s pomoću izraza (4.35). Izračunat ćemo R_b za nekoliko dana (najbolje bi bilo za sve dane) u mjesecu, recimo za 1, 8, 15, 23. i 31. siječnja i naći srednju vrijednost. Još lakše možemo srednju vrijednost naći uvrštavajući u izraz (4.35) srednju vrijednost za $\overline{\delta}$ iz tablice 4.1. Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.14.

Tablica 4.14. Srednja vrijednost faktora $\overline{R}_b$ za Split

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\overline{R}_b$	2,6	1,9	1,39	1,1	0,89	0,80	0,84	1,0	1,31	1,8	2,42	2,84

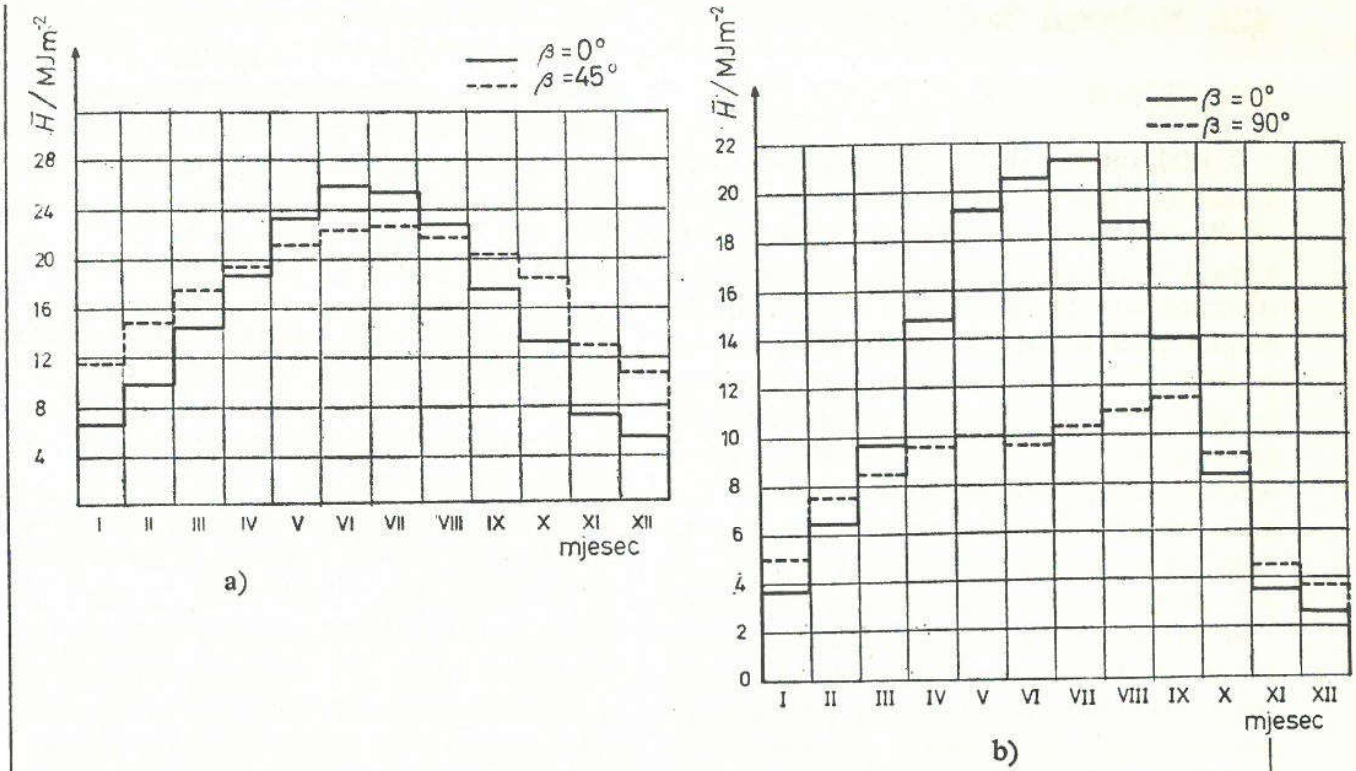
Primjer 2. Koliki je mjesečni prosjek dnevne ozračenosti kolektora nagnutog $\beta=\varphi=43°$ 31′ N u Splitu? Refleksijski faktor (albedo) tla jest $\rho=0{,}2$.

Srednje dnevno ukupno zračenje na horizontalnu plohu očitamo iz tablice 4.8. Da bismo iz tih podataka dobili srednju dnevnu ozračenost plohe kolektora, poslužit ćemo se izrazom (4.39) i za svaki mjesec izračunati odgovarajuću vrijednost $\overline{H}_\beta$. Budući da nemamo podataka o difuznoj komponenti, izračunat ćemo je služeći se Liu-Jordanovom metodom, a za indekse prozračnosti uzet ćemo podatke iz tablice 4.12. S pomoću njih možemo izračunati srednju dnevnu difuznu komponentu ozračenosti (sl. 4.15) a odatle i ukupnu ozračenost plohe kolektora. Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.15.

Tablica 4.15. Ozračenost kolektora u Splitu

Mjesec	$\overline{H}$ / MJ m^{-2}	$\overline{H}_d$ / MJ m^{-2}	$\overline{R}_b$	$\overline{H}_\beta$ / MJ m^{-2}
I	6,5	3,1	2,6	11,6
II	9,8	4,4	1,9	14,4
III	14,3	6,1	1,39	17,1
IV	18,6	7,6	1,1	19,2
V	23,3	8,9	0,89	21,2
VI	25,9	8,6	0,8	22,0
VII	25,4	8,6	0,84	22,1
VIII	22,4	7,8	1,0	21,9
IX	17,4	6,3	1,31	20,5
X	12,7	4,8	1,8	18,8
XI	7,4	3,3	2,4	12,9
XII	5,7	2,2	2,84	10,9

Na slici 4.16. prikazane su srednje dnevne ozračenosti ukupnog Sunčeva zračenja u Splitu na južnu kosu plohu nagnutu pod kutom 0^0 i 45° prema horizontali, a na sl. 4.16. b srednje dnevne ozračenosti horizontalne i vertikalne južne plohe u Zagrebu.



Slika 4.16. a) Srednja dnevna ozračenost horizontalne i kose plohe nagnute pod kutom 45° prema jugu u Splitu b) Srednja dnevna ozračenost horizontalne i vertikalne južne plohe u Zagrebu.

Slično se mogu izračunati ozračenosti kolektora i u drugim područjima. Rezultat takvih proračuna za Bar, Beograd i Zagreb prikazani su u tablici 4.16. Pretpostavljeno je da je kolektor okrenut prema jugu i nagnut pod kutom $\varphi=\beta$ odnosno 90° prema horizontali. Ako se umjesto srednje dnevne ozračenosti izračunaju godišnje ozračenosti, dobiva se da je ukupna energija koja godišnje upadne na plohu kolektora 6 300 MJ/m² u Baru, 5 700 MJ/m² u Splitu, 5 400 MJ/m² u Beogradu i 4 500 MJ/m² u Zagrebu.

Slični proračuni objavljeni su u [De80] i [Vl81]. U [Vl81] izrađene su karte Jugoslavije za srednje dnevne vrijednosti globalnog zračenja na nagnutu južnu plohu ($\beta=45°$) za svaki mjesec.

Tablica 4.16a. Ozračenost kolektora nagnutog za $\beta=\varphi$ u području Bara, Beograda i Zagreba

Mjesec	Ozračenost H_β/(MJ m^{-2} d^{-1}) Bar	Beograd	Zagreb
I	10,9	8,8	5,8
II	12,1	11	8,8
III	16,2	14,9	12,4
IV	17,4	16,5	15,5
V	20,6	18,8	16,7
VI	21,3	18,7	17,3
VII	22,0	18,9	18,1
VIII	22,1	19,1	17,7
IX	19,7	17,1	15,8
X	17,5	14,3	10,3
XI	11,8	13,3	5,7
XII	9,3	6,0	4,9

Tablica 4.16b. Ozračenost H/(MJ m^{-2}d^{-1}) horizontalnog i vertikalnog kolektora u Zagrebu

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
H_0/(MJ m^{-2})	3,7	6,5	9,7	14,8	19,3	20,6	21,3	18,7	14,0	8,3	3,6	2,7
H_{90}/(MJ m^{-2})	5,0	7,6	8,8	9,7	10,0	9,7	10,3	11	11,4	9	4,6	3,8

4.2. Solarni kolektori

4.2.1. Uvod

Kolektor je uređaj koji skuplja sunčanu energiju i pretvara je u druge oblike energije; toplinski kolektori pretvaraju sunčanu energiju u toplinsku, a kolektori sa solarnim, sunčanim ćelijama pretvaraju je u električnu energiju. Ovdje ćemo govoriti o toplinskim kolektorima, osobito o ravnim kolektorima koji su najbolje istraženi i već se komercijalno proizvode. S pomoću njih se mogu postignuti temperature do oko 100 °C, a ako su selektivni i do 150 °C. Za postizavanje temperatura većih od 150 °C potrebno je upotrijebiti koncentrirajuće kolektore koji prate Sunce i fokusiraju izravno Sunčevo zračenje na apsorber koji se nalazi u žarištu kolektora.

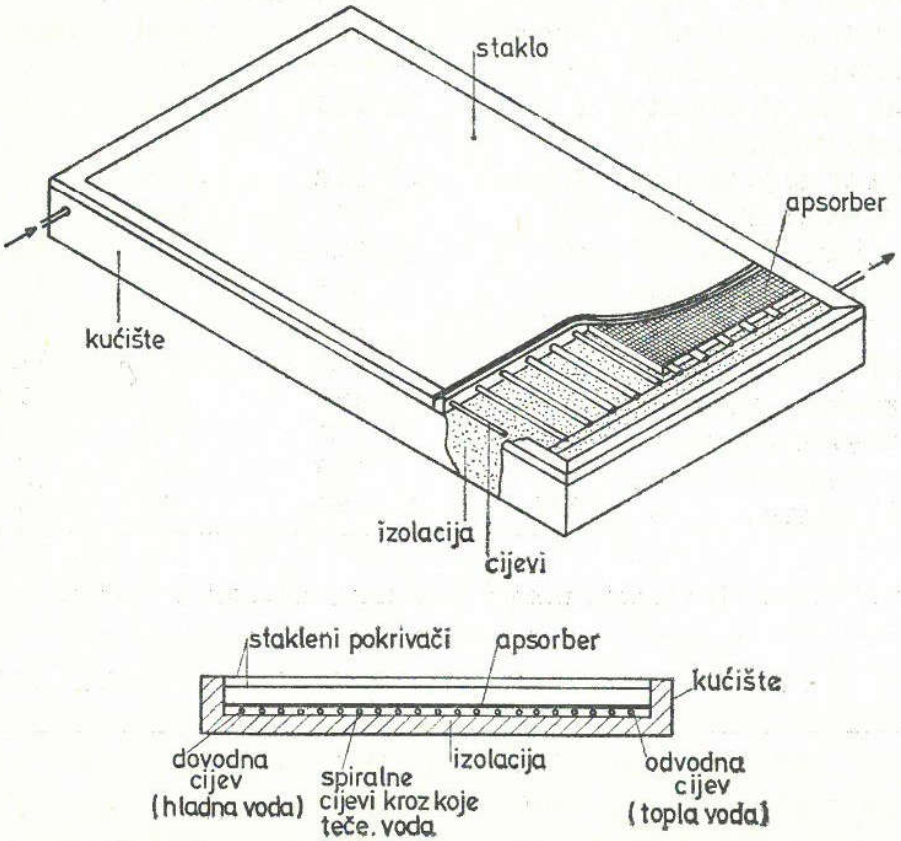
U ovom poglavlju opisat ćemo detaljnije ravne kolektore, a samo ukratko druge vrste. Iznijet ćemo glavne razlike između zračnih kolektora i kolektora s tekućinom. Posebno ćemo opisati izradu apsorbera i njihova selektivna svojstva. Nakon toga obradit ćemo toplinske gubitke ravnog kolektora i njegovu efikasnost, te metode za standardno testiranje kolektora. Sustave s ravnim kolektorima opisat ćemo u četvrtom poglavlju.

4.2.2. Ravni kolektor

Najjednostavniji uređaj za pretvaranje Sunčane energije u toplinsku jest ravni kolektor, najvažniji dio sustava za sunčano grijanje vode i prostorija. Tehnologija izrade ravnih kolektora već je potpuno usvojena, upotrebljavaju se širom svijeta i mnoge ih tvornice već komercijalno proizvode i prodaju.

Na slici 4.17. prikazana je skica ravnog kolektora. Sunčevo zračenje koje upada u kolektor prolazi kroz jednu ili dvije prozirne (obično staklene) ploče i apsorbira se u apsorberu.

Apsorber je metalna površina na koju je nanesen crni sloj tvari visokog faktora apsorpcije za upadno Sunčevo zračenje. Apsorbirana sunčana energija pretvara se u unutrašnju (toplinsku) energiju i tako se apsorberska ploča zagrijava na



Slika 4.17. Skica ravnog kolektora

50 °C—100 °C. Kroz sustav cijevi, koji je spojen (npr. zavaren) s apsorberskom pločom, protječe radni fluid (npr. voda). Apsorbirana energija prelazi kao toplina iz apsorbera u radni fluid. Međutim, jedan dio topline gubi se u okolinu pa je takve gubitke potrebno što više smanjiti pogodnom izvedbom kolektora.

Prozor i apsorber sa sustavom cijevi smješteni su u metalno kućište u kojem se sa stražnje strane i s bočnih strana nalazi deblji sloj izolacije (npr. obično 5 cm do 10 cm staklene ili mineralne vune, poliuretanske pjene, polistirena i sl.) da bi se što više smanjili toplinski gubici. Kolektor treba što bolje apsorbirati upadnu Sunčevu energiju, treba imati što manje toplinske gubitke i što bolji prijenos topline iz apsorbera u radni fluid.

Dvije su vrste ravnih kolektora: kolektor s tekućinom (vodom ili otopinom antifriza) i zračni kolektor. Zračni kolektor drukčije je izvedbe nego kolektor s tekućinom iako je princip rada isti. Bitna je razlika u izvedbi sustava za strujanje radnog fluida kroz kolektor oko ugrijane ploče apsorbera. Skica zračnog kolektora prikazana je na slici 4.18.

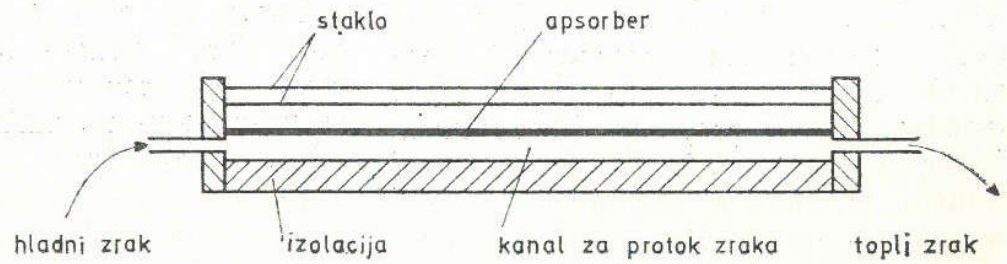
Zbog slabih termičkih karakteristika zraka najveći problem zračnih kolektora jest prijenos topline s apsorberske ploče na zrak koji struji ispod nje. Zato umjesto kroz cijevi (kao u kolektoru s tekućinom) u zračnom kolektoru zrak struji oko što veće površine apsorbera, obično preko njegove cijele zadnje površine, u prostoru između apsorberske ploče i izolacijskog sloja. Tako se hladni zrak koji ulazi u kolektor grije i kao topli izlazi iz njega.

Promatrat ćemo uglavnom ravne kolektore s tekućinom, međutim slično bismo mogli promatrati i zračne kolektore. Obično se u sustavima za grijanje vode (o toj primjeni najviše ćemo govoriti) upotrebljavaju kolektori kroz koje struji voda (ili antifriz u područjima gdje se temperatura može sniziti ispod 0 °C). U sustavima za grijanje prostorija pogodno je upotrebljavati i zračne kolektore, te prostorije grijati toplim zrakom. Uz mane (lošiji prijenos topline, složeniji izmjenjivači topline i sl.), zračni kolektori imaju i neke prednosti pred kolektorima s tekućinom: nije potreban antifriz u zimskim uvjetima, manja je korozija itd.

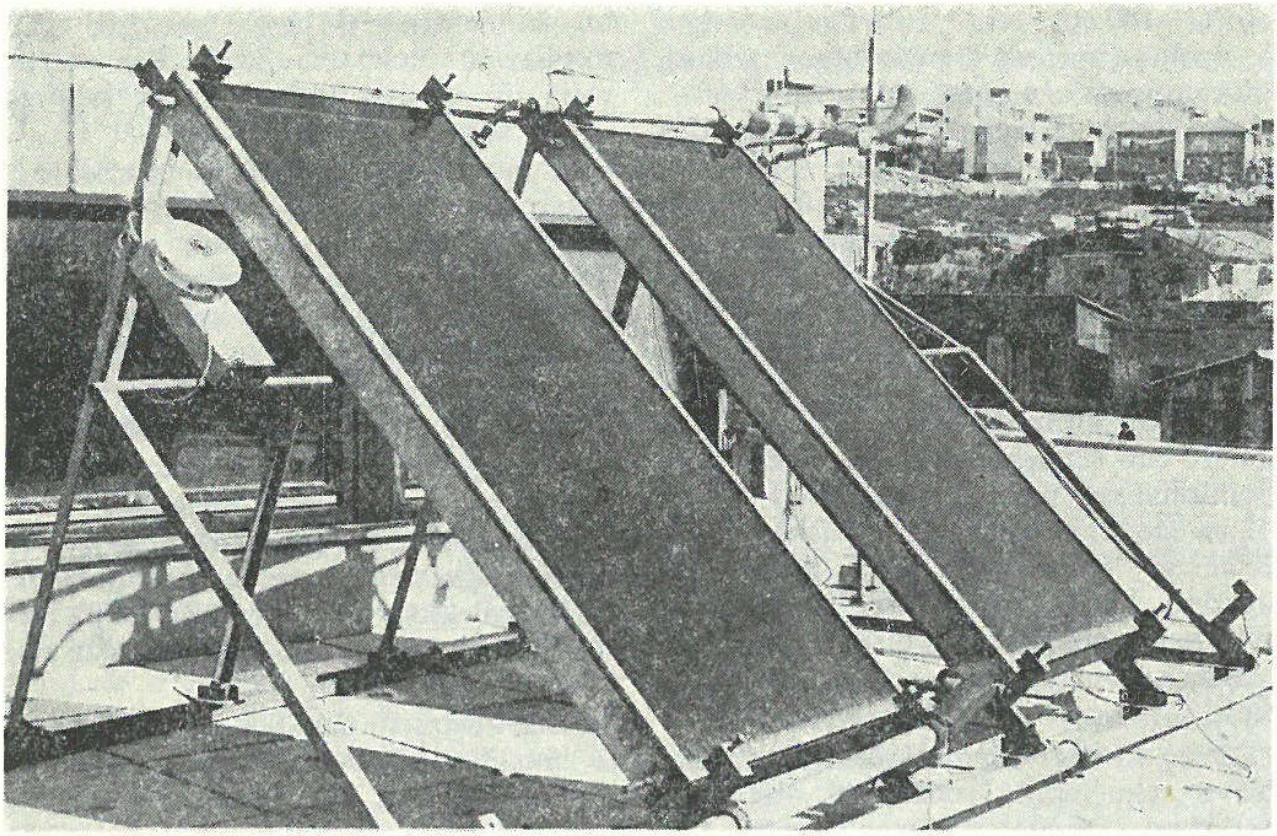
U posljednjih nekoliko godina u našoj zemlji dvadesetak radnih organizacija obavlja istraživanja i pripreme za proizvodnju sunčane (solarne) opreme, osobito sunčanih kolektora [v. npr. Gr 80]. Nekoliko tipova kolektora već se može nabaviti i na tržištu.

Radi ilustracije na slici 4.19. prikazana je fotografija eksperimentalnog kolektora izrađenog u RO „Termofriz" (Split) koji je instaliran na krovu Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Izrađuju se uglavnom kolektori s jednim ili dva prozirna (obično staklena) pokrova. Razmak između apsorbera i prvog pokrova obično je 2 cm do 5 cm, a razmak je između prvog i drugog pokrova nešto manji (oko 1 cm). Dvostruki pokrov, sa slojem zraka između, bitno smanjuje toplinske gubitke prema naprijed i tako se povećava efikasnost kolektora. Zbog toplinskih gubitaka bolje je upotrijebiti dvostruki prozor; međutim, dvostruki su prozori skuplji, a i slabije propuštaju Sunčevo zračenje pa se tako smanjuje količina sunčane energije koja dolazi do apsorbera. Zato je za konkretne uvjete potrebno pronaći najbolji kompromis. Obično se izrađuju kolektori s jednim pokrovom i selektivnim apsorberom, a ako apsorber nema selektivna svojstva,



Slika 4.18. Zračni kolektor



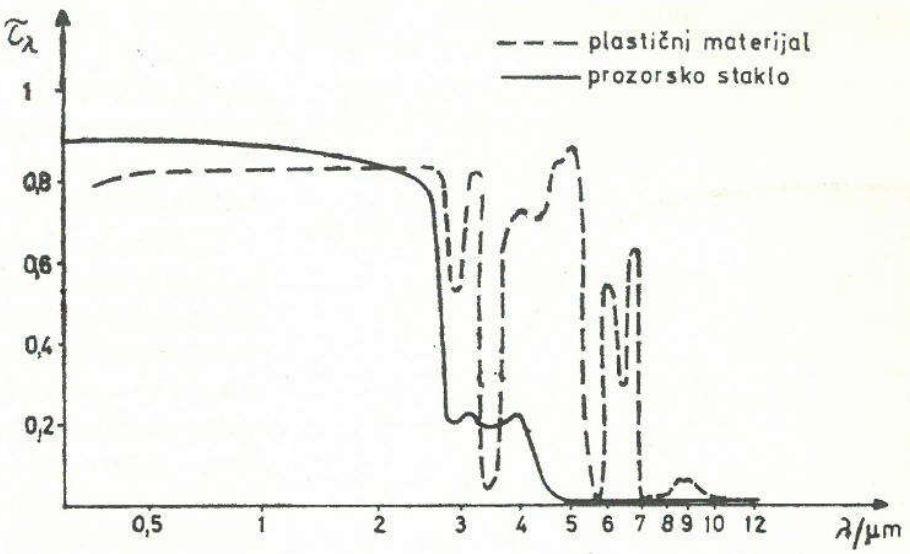
Slika 4.19. Eksperimentalni solarni kolektor na Fakultetu za elektrotehniku, strojarstvo i brodogradnju, Split

upotrebljavaju se kolektori s dvostrukim prozorom.

Najprikladniji materijal za prozore jest staklo, a mogu se upotrijebiti i neke vrste plastičnih materijala. Većina kolektora koji se izrađuju u našoj zemlji ima stakleni pokrov, najčešće debljine 3 mm do 5 mm. Obično prozorsko staklo debljine 3 mm očito je najjednostavnije rješenje, međutim, radi smanjenja apsorpcije (koja je u prozorskom staklu relativno velika), bolje je upotrijebiti posebne vrste stakla. Radi osiguranja dovoljne mehaničke čvrstoće katkad je potrebno uzeti i malo deblje staklo (npr. 4 cm do 5 cm). Ono, međutim, smanjuje transmisiju.

Prozirni materijal za prozore treba imati što veći transmisijski faktor za područje Sunčeva spektra ($0{,}3\ \mu m < \lambda < 2\ \mu m$), a što manji za toplinsko zračenje koje emitira apsorber (λ veće od oko $2\ \mu m$). Staklo ima upravo takva svojstva: ono je propusno (transmisijski faktor $\tau(\lambda)$ oko 0,9) za gotovo cijeli Sunčev spektar, a nepropusno ($\tau \doteq 0$) za infracrveno zračenje. Zbog toga Sunčevo zračenje na putu do apsorbera lako prođe kroz staklenі prozor, a infracrveno zračenje koje emitira ugrijani apsorber ne može izići iz kolektora nego se apsorbira i reflektira na staklenom prozoru. To se vidi na slici 4.20. na kojoj je prikazan spektralni transmisijski faktor (pri normalnom upadanju zraka) stakla i plastične folije. Transmisijski faktor stakla u području Sunčeva spektra ($0{,}3\ \mu m < \lambda < 2\ \mu m$) uglavnom je konstantan, oko 0,8—0,9 (ovisno o vrsti i debljini stakla). U infracrvenom području ($\lambda > 3\ \mu m$) transmisijski faktor vrlo je malen pa je staklo nepropusno za infracrveno zračenje što povećava efikasnost kolektora sa staklenim prozorom. Za razliku od stakla, plastična folija (spektralni transmisijski faktor za jednu takvu foliju također je prikazan na slici 4.20), obično nema tako dobra optička svojstva i njezin infracrveni transmisijski faktor mijenja se ovisno o valnoj duljini. Slična svojstva imaju i neki drugi plastični materijali.

Budući da je transmisijski faktor $\tau = 1 - \rho - \alpha$, materijal za prozore treba imati



Slika 4.20. Ovisnost faktora transmisije (transmitancije) o valnoj duljini za staklo i plastičnu foliju

što manji refleksijski faktor ρ i što manji apsorpcijski faktor α. Refleksijski faktor ovisi o indeksu loma i on je manji što je indeks loma manji. Refleksijski i transmisijski faktori pri upadu elektromagnetskog vala na graničnu plohu između dva sredstva mogu se odrediti i pomoću Fresnelovih jednadžbi. Za val koji upada okomito, račun i rezultat dosta su jednostavni. Za kosi upad izrazi za te faktore malo su složeniji.

Ako elektromagnetski val upada okomito, a jedno je od sredstava zrak, refleksijski je faktor

$$\rho=\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2. \qquad (4.40)$$

Ako val upada pod nekim kosim kutom u, različito se reflektiraju i lome valovi u kojih električni vektor titra paralelno s ravninom upadanja od onih u kojih titra okomito na nju, tj. refleksijski i transmisijski faktor ovise o polarizaciji upadnog vala. Razlikujemo refleksijski faktor $\rho_\parallel$ za valove u kojih električni vektor titra paralelno i $\rho_\perp$ za valove u kojih električni vektor titra okomito na ravninu upadanja

$$\rho_\parallel=\frac{\mathrm{tg}^2(u-l)}{\mathrm{tg}^2(u+l)}. \qquad (4.41)$$

$$\rho_\perp=\frac{\sin^2(u-l)}{\sin^2(u+l)}. \qquad (4.42)$$

gdje je u kut upada, l kut loma upadne zrake, a povezani su Snellovim zakonom $\sin u/\sin l=n$.

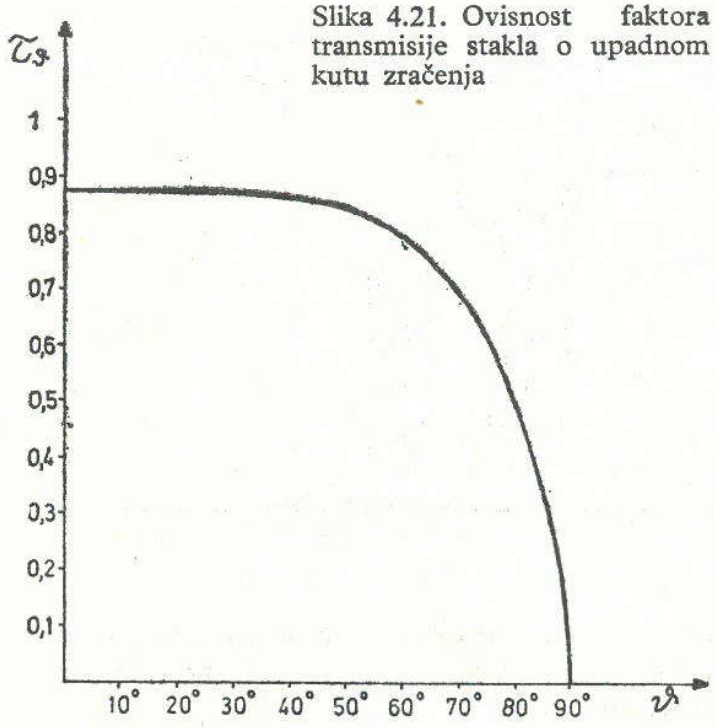
Ako je val nepolariziran (kao npr. Sunčevo zračenje), refleksijski je faktor

$$\rho=\frac{1}{2}\rho_\parallel+\frac{1}{2}\rho_\perp=\frac{\mathrm{tg}^2(u-l)}{2\mathrm{tg}^2(u+l)}+\frac{\sin^2(u-l)}{2\sin^2(u+l)}. \qquad (4.43)$$

Ako je npr. $n=1{,}5$ (vrijednost za obično staklo), a kut upada malen (tj. približno okomit upad), refleksijski je faktor $\rho=0{,}04$ odnosno za gornju i donju plohu prozora $\rho=0{,}08$. Ako je kut upada Sunčevih zraka velik, refleksijski je faktor još veći.

Refleksija se može smanjiti nanošenjem antirefleksivnog sloja na jednu ili obje površine staklene ploče. Tako se može povećati transmisija i do dva puta. Međutim, antirefleksijski slojevi povećavaju cijenu prozora i zasad ih čine preskupim.

Apsorpcija u staklu ovisi o vrsti (sastavu) stakla i o duljini puta Sunčeve zrake kroz staklo. Pri tome je naročito važan sadržaj željezo (III)-oksida (Fe_2O_3) u staklu. Obično (prozorsko) staklo (2 mm) ima koeficijent apsorpcije oko 3%, a 5% ako je debelo 3 mm. Staklo s vrlo malim postotkom željeza ima vrlo malu apsorpciju pa transmisija gotovo ne ovisi o debljini. Ukupni transmisijski faktor



Slika 4.21. Ovisnost faktora transmisije stakla o upadnom kutu zračenja

dvostrukog prozora umnožak je transmisijskih faktora za svaki prozor.

Na slici 4.21. prikazana je ovisnost integralnog transmisijskog faktora za staklo debljine 4 mm o kutu upada Sunčevih zraka. Smanjenje sunčanog ozračenja (iradijancije) mjerilo se tako da se iznad solarimetra stavila staklena ploča i mijenjao njezin nagib prema zrakama Sunca.

Za prozore se mogu upotrijebiti i plastični materijali ako imaju potrebna svojstva: veliku transmisiju za Sunčevo, malenu za infracrveno zračenje, također dovoljnu čvrstoću i trajnost. Plastični materijali obično su osjetljivi na ultraljubičasto zračenje i na više temperature pa vrlo malo takvih materijala može uspješno nadomjestiti staklo. Mogu se napraviti plastični materijali s odgovarajućim optičkim i drugim svojstvima, ali im je tada cijena previsoka.

Apsorber je najlakše napraviti tako da se metalna ploča (npr. željezna, bakrena ili aluminijska premaže odgovarajućom crnom bojom. S druge strane ploče nalaze se bakrene cijevi kroz koje struji voda i prenosi toplinu iz kolektora; toplinski kontakt između cijevi i ploče treba biti što bolji da bi se prijenos topline ostvario što lakše i brže. Postoji nekoliko rješenja za izradu apsorberske ploče i detalji o tome mogu se naći u literaturi [v. npr. Sa 78, Lö 81]. Crni lak za premaz ploče apsorbera mora biti otporan na više temperature i dugog trajanja. Na tržištu se mogu nabaviti različiti lakovi za apsorbere.

Efikasnost kolektora može se povećati upotrebom selektivnih apsorbera koji dobro apsorbiraju kraće valne duljine (tj. one koje prevladavaju u Sunčevom zračenju), a slabo emitiraju dulje (infracrvene) valne duljine koje emitira zagrijani apsorber. Tako se jednakom ozračenošću postiže jače zagrijavanje nego u neselektivnih apsorbera. (Detaljnije o selektivnim apsorberima govorit ćemo u poglavlju 4.2.3).

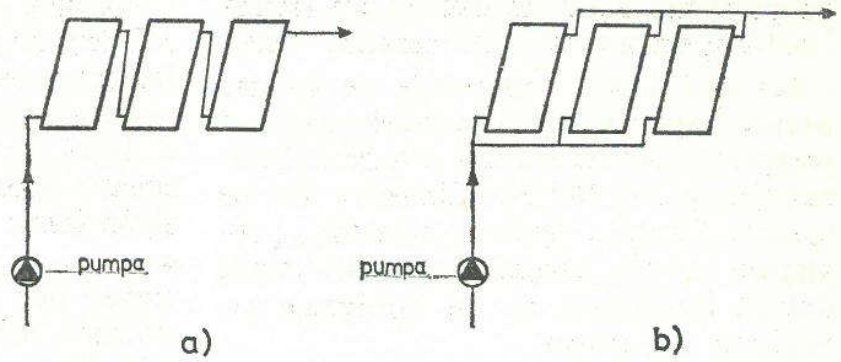
Prijenos topline iz apsorbera ovisi o izradi kolektora, vrsti i brzini strujanja radnog fluida. Tipična je brzina strujanja u kolektorima s tekućinom 0,01—0,03 L/s, a u zračnim kolektorima 10—20 L/s po četvornom metru kolektora.

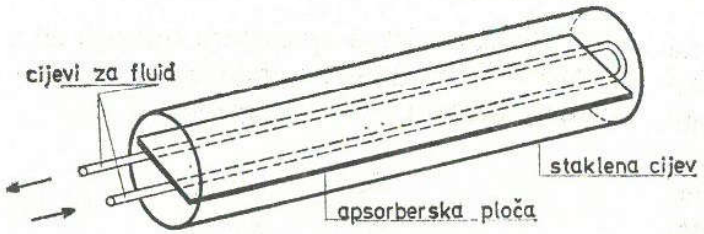
Glavni problemi pri upotrebi vodenih kolektora jesu korozija, kondenzacija vodene pare, skupljanje vode u kolektoru i mogućnost smrzavanja vode pri niskim temperaturama. Korozija se može smanjiti dodavanjem antikorozivnih dodataka, a dobrom izradom kolektora može se spriječiti prodor vode u njegovu unutrašnjost. U hladnijim klimatskim područjima umjesto vode radni fluid može biti otopina antifriza. Smrzavanje vode može se spriječiti i tako da se voda ispušta iz kolektorskog sustava u razdobljima kada kolektor ne skuplja Sunčevu energiju, a postoji opasnost da se temperatura vode u njemu snizi ispod 0 °C.

Izrada kolektora i izbor materijala moraju omogućiti da kolektor pouzdano i dobro radi, da se lako održava i da mu vijek trajanja bude što dulji (15 do 20 godina). Tako npr. apsorber mora izdržati visoke temperature ako se kolektor jako zagrije zbog prestanka protoka fluida, mora biti otporan na korozijsko djelovanje, u unutrašnjost kolektora ne smije ulaziti vlaga, prašina i sl.

Obično se kolektori izrađuju u jedinicama površine oko 2 m² (npr. dimenzije su kolektora na sl. 4.19. 2 m × 0,93 m ×

Slika 4.22. Spajanje kolektora a) serijski, b) paralelno





Slika 4.23. Vakuumski cijevni kolektor

$\times 0{,}115$ m, a efektivna apsorberska površina 1,55 m^2). Da bi se dobile veće površine, kolektori se spajaju serijski ili paralelno (sl. 4.22) ili kombinacijom oba načina.

Ravnim kolektorom mogu se postići temperature do oko 100 °C. Za više temperature izrađuju se vakuumski kolektori obično sa selektivnim slojevima [v. npr. Lö 81, Fa 81]. Uklanjanjem zraka između stakla i apsorbera isključuju se toplinski gubici zbog konvekcije i tako postižu radne temperature i do 150 °C.

Na sl. 4.23. skica je jednog takvog vakuumskog kolektora. U vakuumskoj staklenoj cijevi nalazi se apsorberska ploča (obično selektivni apsorber) s cijevima za protok fluida koji odvodi toplinu iz kolektora.

Ravni kolektori uglavnom se upotrebljavaju u sustavima za zagrijavanje vode za domaćinstvo, grijanje stanova i klimatizaciju. Obično se instaliraju na krov zgrade okrenuti prema jugu i nagnuti prema horizontali. Ravni kolektori, apsorbiraju osim izravnoga i raspršeno zračenje te je za njihov rad bitno ukupno zračenje koje upada na njihovu površinu. Kut nagiba kolektora prema horizontali potrebno je izabrati tako da kolektor bude najefikasniji u onom dijelu godine kad je najpotrebnija energija koju kolektor daje. Obično se u našim zemljopisnim širinama odabire nagib kolektora 40° do 45° i tako čini kompromis kojim se postiže da od proljeća do jeseni kolektor prima Sunčevo svjetlo prosječno 7 do 8 sati dnevno. Želimo li da kolektor bude najefikasniji zimi, a manje ljeti, trebamo ga postaviti strmije. Čak i okomito postavljen kolektor (npr. na južni zid zgrade) može zimi dobro djelovati. Ipak je najbolje prema zadanim uvjetima proračunati optimalan nagib kolektora.

Pri izboru vrste kolektora ne smije se zaboraviti ekonomičnost pa je potrebno naći kompromis između efikasnosti i cijene kolektora. Najefikasniji kolektor nije onaj koji za određenu površinu daje najviše topline, nego onaj koji daje najjeftiniju energiju (gorivo je besplatno). Pri tome je potrebno promatrati ne samo cijenu kolektora nego i cijenu čitavog sunčanog (solarnog) sustava.

4.2.3. Selektivni apsorberi

Gotovo sva energija Sunca koja dolazi na Zemljinu površinu nalazi se u intervalu valnih duljina od 0,3 μm do 2,5 μm, s maksimumom intenziteta zračenja u vidljivom području (λ=0,48 μm). Predmeti na Zemljinoj površini apsorbiraju tu energiju i reemitiraju je u infracrvenom području, tj. u području valnih duljina

od približno 2 μm do oko 30 μm (širina i oblik spektra ovisi o temperaturi tijela).

Na slici 4.24.a uspoređuje se spektar Sunca i spektar zračenja kolektora (pod pretpostavkom da emitira kao crno tijelo) zagrijanog na 400 K. Činjenica da se spektar Sunca i spektar kolektora preklapaju u vrlo uskom području valnih duljina iskorištava se za dobivanje selektivnih absorbera.

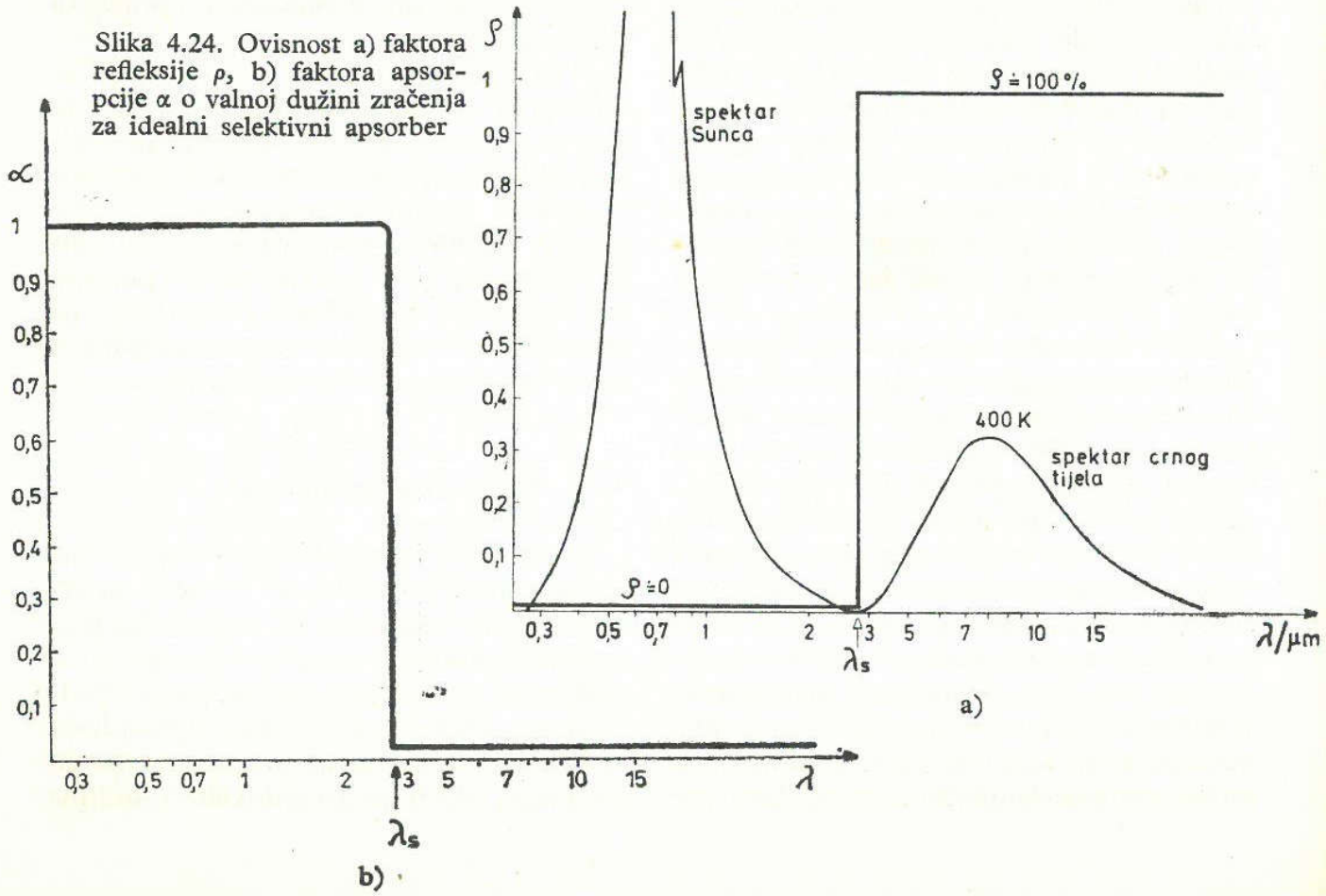
Optička svojstva apsorbera (koja se izražavaju s pomoću apsorpcijskog i transmisijskog faktora) jako utječu na rad i efikasnost kolektora. Idealni selektivni apsorber trebao bi gotovo potpuno apsorbirati upadno Sunčevo zračenje, a minimalno emitirati toplinsko (infracrveno) zračenje. Poželjno je, dakle, proizvesti što bolje selektivne apsorbere koji bi jako apsorbirali kraće valne duljine (tj. one u Sunčevu spektru), a bili bi slabi emiteri (dobri reflektori) duljih (infracrvenih) valnih duljina. Kolektori s takvim apsorberima dobro bi apsorbirali veći dio Sunčeva spektra, a vrlo bi malo gubili energiju zračenjem; tako bi se smanjili toplinski gubici i postigle više temperature i efikasnija konverzija.

Na slici 4.24.a prikazana je ovisnost refleksijskog a na sl. 4.24.b apsorpcijskog faktora idealnog selektivnog apsorbera o valnoj duljini. Od $\lambda=0{,}3$ μm do točke u kojoj se Sunčev spektar i toplinski spektar apsorbera presijecaju (λ_s), refleksijski faktor $\rho=0$ a apsorpcijski je faktor $\alpha=1$, a za $\lambda>\lambda_s$ apsorpcijski bi faktor trebao biti nula. Naravno, karakteristike stvarnih selektivnih apsorbera samo se, više ili manje, približavaju toj idealnoj karakteristici.

Optička svojstva apsorbera opisuju se s pomoću apsorpcijskog faktora α i emisijskog faktora ϵ (v. poglavlje 4.1.1)

$$\alpha=\frac{\Phi_a}{\Phi_u};\ \epsilon=\frac{M}{M_{ct}}. \qquad (4.44)$$

Ti su faktori općenito funkcije valne duljine λ i smjera elektromagnetskog zračenja (koji možemo definirati npr. polarnim koordinatama φ i ϑ) i za određeni smjer označuju se s $\alpha_\lambda(\varphi,\vartheta_\lambda)$ i $\varepsilon_\lambda(\varphi,\vartheta)$. Integralni apsorpcijski i emisijski faktori dobivaju se integriranjem spektralnh faktora po valnim duljinama. Hemisferni faktori dobivaju se integriranjem preko



Slika 4.24. Ovisnost a) faktora refleksije ρ, b) faktora apsorpcije α o valnoj dužini zračenja za idealni selektivni apsorber

polarnih koordinata u poluprostoru od 2π steradijana.

Pri promatranju selektivnosti apsorbera potrebno je poznavati integralni apsorpcijski faktor preko čitavog područja Sunčeva spektra zračenja i integralni emisijski faktor u području valnih duljina infracrvenog spektra koje emitira apsorber.

Integralne vrijednosti tih faktora dobiju se s pomoću izraza

$$\alpha_s = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda \Phi_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_\lambda \, d\lambda} \qquad (4.45)$$

$$\epsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \epsilon_\lambda M_\lambda(T) \, d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda \, d\lambda} \qquad (4.46)$$

gdje je Φ_λ spektralni tok Sunčeva zračenja na plohu apsorbera, a $M_\lambda(T)$ spektralna egzitancija crnog tijela na temperaturi T, tj.

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \qquad (4.47)$$

Ako ti faktori ovise i o smjeru zračenja treba integrirati i po čitavom poluprostoru da bismo uključili sve smjerove i dobili hemisfernu vrijednost.

Apsorpcijski i emisijski faktor neke površine, ako drukčije ne istaknemo, bit će hemisferni integralni faktori definirani jednadžbom (4.45) i (4.46). Faktor α_s označavat će hemisferni apsorpcijski faktor Sunčeva zračenja (solarnu apsorptanciju) kao težinsku aritmetičku sredinu hemisfernih spektralnih apsorpcijskih faktora u intervalu valnih duljina Sunčeva spektra, a hemisferna toplinska emitancija ϵ bit će težinska aritmetička sredina emisijskog faktora preko spektra crnog tijela odgovarajuće temperature.

Solarni apsorpcijski faktor α i toplinski emisijski faktor ϵ neke površine može se odrediti ili izravnim mjerenjem ili posrednom metodom [Me 76]. Izravnim se mjerenjem kalorimetrijskim uređajem određuje integralni hemisferni apsorpcijski faktor odnosno emisijski faktor, a posrednom se metodom mjeri spektralni refleksijski faktor s pomoću spektrofotometra, a iz njega se izračunava apsorpcijski faktor α i emisijski faktor ϵ.

Koristeći, naime, vezu između apsorpcijskog i refleksijskog faktora za neprozirna tijela

$$\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda \qquad (4.48)$$

i Kirchhoffov zakon

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda \, , \qquad (4.49)$$

može se iz poznatog refleksijskog faktora izračunati apsorpcijski faktor α_λ i emisijski faktor ϵ_λ, a zatim integriranjem dobiti hemisferne integralne vrijednosti tih faktora.

Pri posrednom određivanju emisijskog faktora površine moraju biti polirane (a ne hrapave) da bi odbijale upadne zrake svjetlosti kao ravno ogledalo (za kalorimetrijsku metodu takva ograničenja nisu potrebna). Spektrofotometrom se mjere faktori refleksije pri približno okomitom upadu zraka i na to valja paziti ako se koriste rezultati dobiveni tom metodom. Iako izravno mjerenje daje točnije rezultate, spektrofotometrijska metoda jednostavna je i brza i, premda je samo aproksimativna većinom se koristi za određivanje apsorpcijskog, emisijskog i transmisijskog faktora.

Često se selektivnost nekog uzorka izražava tzv. omjerom selektivnoti α/ϵ. Taj je omjer za neselektivni apsorber jednak jedinici, a za dobre je selektivne površine oko 10.

Pokazalo se da omjer selektivnosti nije jedino mjerilo kvalitete selektivnog apsorbera pri niskotemperaturnim primjenama u ravnim kolektorima; pokatkad je apsorber s većim omjerom α/ϵ lošiji od apsorbera s manjim omjerom zbog manjeg apsorpcijskog faktora ili prozora slabije propusnosti. Međutim, omjer selektivnosti bitan je za visokotemperaturne primjene u koncentrirajućim kolektorima. Za pravilan izbor apsorbera potrebno je proračunati konkretni solarni doprinos

i tada izabrati najbolje i najekonomičnije rješenje.

Većina metala prikladnih za apsorbere vrlo je slabe spektralne selektivnosti. Selektivnost se može poboljšati nanošenjem tankih filmova ili poluvodičkih slojeva na površinu metala ili obradom apsorpcijske površine [v. npr. Se 81]. Odabiranjem vrste i debljine filma te mikrostrukture njegove površine može se povećati apsorpcijski faktor u području Sunčeva spektra, a smanjiti faktor emisije u infracrvenom području. Složeniji poluvodički slojevi imaju vrlo dobru selektivnost (omjer selektivnosti oko 20), ali nisu mehanički stabilni, također nisu ekonomični i teže ih je izraditi na većim površinama. Jednoslojni filmovi naneseni premazivanjem, naparivanjem i elektrolitičkim procesima pogodniji su za proizvodnju i primjenu.

Naročito su pogodni za postizanje selektivnih svojstava slojevi crnog kroma i nikla. Apsorpcijske površine od crnog nikla dobivene elektrolizom na podlozi od galvaniziranog željeza već se godinama primjenjuju u komercijalnim grijačima vode. Crni krom, koji se proizvodi tako da se na podlogu (bakar, željezo) elektrolitski nanese sloj nikla i na njega sloj krom-oksida, također se upotrebljava u komercijalno izrađenim sunčanim kolektorima. Crni bakar (bakar-oksid na bakru) također je dobra selektivna površina, a lakše se proizvodi nego crni nikal odnosno krom. Dobiva se tako da se očišćena bakrena ploča uroni u zagrijanu vodenu otopinu NaOH i $K_2S_2O_8$ i drži u otopini dovoljno dugo da se na njoj stvori sloj crnog bakar-oksida s potrebnim selektivnim svojstvima.

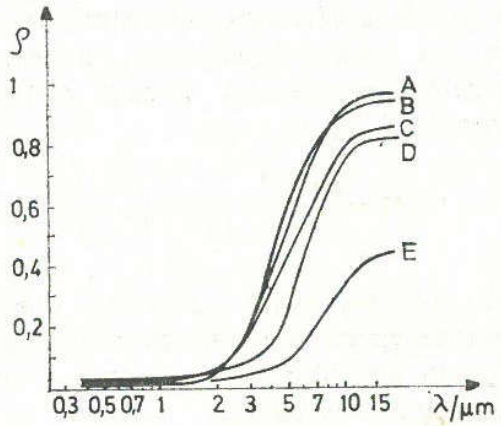
Tipični apsorpcijski i emisijski faktori te omjer selektivnosti za neke površine prikazani su u tablici 4.17.

Na slici 4.25. prikazan je spektralni refleksijski fator za uzorke „crnog kroma" koji su dobiveni pri raznim uvjetima elektrolize na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu [Vu 81]. Vrlo male promjene u procesu proizvodnje mogu bitno utjecati na selektivnost uzorka što otežava proizvodnju takvih apsorbera.

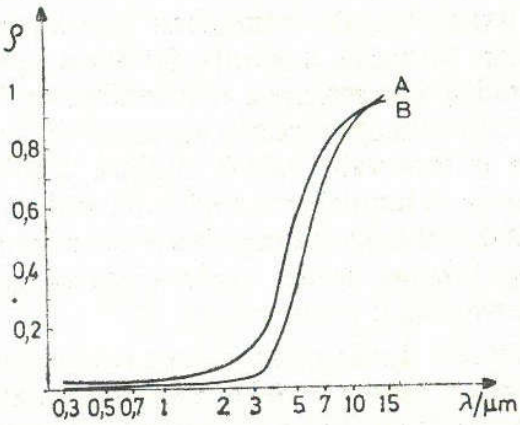
Tablica 4.17. Svojstva nekih apsorpcijskih površina

Površina	apsorpcijski faktor α	emisijski faktor ϵ	omjer selektivnosti α/ϵ
neselektivna crna boja	0,9	0,9	1
čađa	0,95	0,95	1
crni nikal	0,9	0,12	7,5
crni krom	0,95	0,15	6,3
crni bakar	0,89	0,1	8,9
željezo-oksid	0,8	0,1	8

Na slici 4.26. prikazan je spektralni refleksijski faktor za uzorke crnog bakra koji su dobiveni na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu [Vu 81].



Slika 4.25. Ovisnost faktora refleksije „crnog kroma" o valnoj dužini zračenja



Slika 4.26. Ovisnost faktora refleksije „crnog bakra" o valnoj dužini zračenja

4.2.4. Toplinski gubici ravnog kolektora

Toplinski gubici apsorberske ploče kolektora u okolinu nastaju vođenjem, konvekcijom i zračenjem. Kroz stražnju stranu i bočne strane toplina iz kolektora izlazi vođenjem kroz sloj izolacije i zatim konvekcijom u okolinu, a na prednjoj strani gubici nastaju zračenjem i konvekcijom.

Ukupni toplinski tok Φ odnosno ukupnu gustoću toplinskog toka q iz apsorbera u okolinu možemo prikazati relacijom

$$\Phi = A_c k (T_a - T_z) \qquad (4.50)$$

$$q = k (T_a - T_z).$$

A_c je površina apsorbera,

k je koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka kolektora,

T_a je temperatura apsorberske ploče,

T_z je temperatura okolnog zraka.

Koeficijent toplinskih gubitaka jedan je od najvažnijih parametara kolektora. Tipične su vrijednosti tog koeficijenta, oko 20 W(m²K) za nepokriveni kolektor, oko 8 W/m²K za neselektivni kolektor s jednim staklom, oko 4,5 W/m²K za selektivni s jednostrukim odnosno neselektivni s dvostrukim prozorom i oko 2 W/m²K za vakuumske cijevne kolektore.

Koeficijent toplinskih gubitaka ovisi o razlici temperature apsorbera i okolnog zraka $\Delta T = T_a - T_z$. Na slici 4.27. prikazana je ta ovisnost (dobivena proračunom) za selektivni i neselektivni apsorber. Često se, međutim, ta ovisnost ne uzima u obzir i računa se sa srednjom vrijednossću koeficijenta.

Ukupni koeficijent toplinskih gubitaka može se odrediti mjerenjem ili proračunom. O eksperimentalnom određivanju koeficijenta k govorit će se u poglavlju 4.2.6, a ovdje o njegovu proračunu.

Pri proračunu prijenosa topline obično se, analogno prema električnoj struji, koristi pojam toplinskog otpora kao omjer između razlike temperature ΔT i toplinskog toka Φ

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{\Delta T}{q A_c} = \frac{1}{k A_c}. \qquad (4.51)$$

Toplinski otpori, analogno kao i električni, zbrajaju se ako su spojeni serijski, a ako su spojeni paralelno zbrajaju se njihove recipročne vrijednosti.

Na slici 4.28. prikazan je spoj toplinskih otpora za ravni kolektor s jednostrukim prozorom.

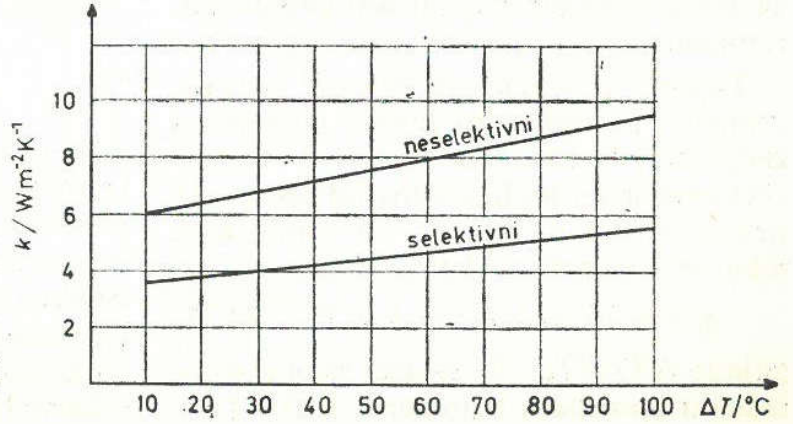
Gubici prema stražnjoj strani kolektora mogu se opisati toplinskim otporom R_1. Oni uglavnom nastaju zbog vođenja topline kroz izolacijski sloj kolektora, a toplinski otpor za konvekciju iz kućišta kolektora u okolni zrak možemo zanemariti.

Gustoća toplinskog toka kroz stražnju stranu kolektora može se izraziti

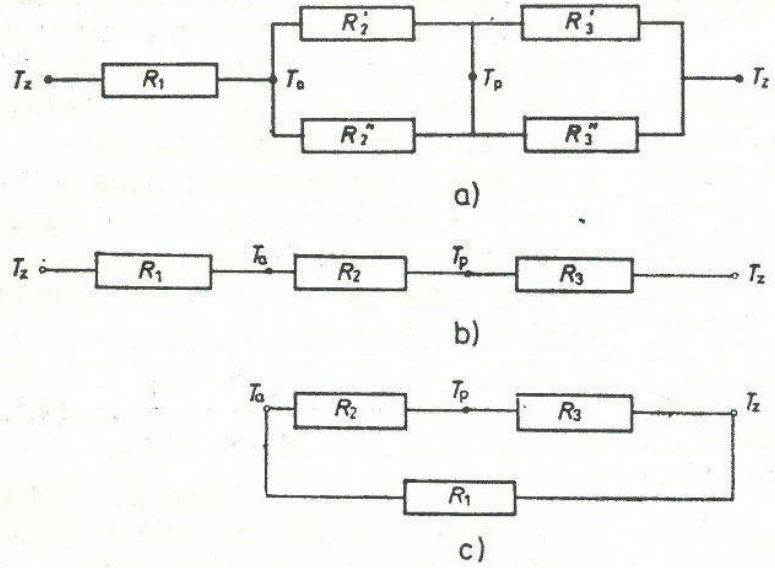
$$q_1 = \frac{\lambda}{d_1} \Delta T = k_1 \Delta T = \frac{\Delta T}{A_c R_1}. \qquad (4.52)$$

λ je toplinska vodljivost izolacije,

d_1 debljina izolacijskog sloja, $\Delta T = T_a - T_z$ razlika temperature apsorbera i temperature zadnje strane kolektora (pretpostavimo da je jednaka temperaturi okolnog zraka),



Slika 4.27. Ovisnost koeficijenta toplinskih gubitaka kolektora o razlici temperature apsorbera i okoline



Slika 4.28. Termička shema ravnog kolektora

k_1 koeficijent toplinskih gubitaka vođenjem,

A_c površina kolektora i

$$R_1=\frac{d_1}{A_c\,\lambda}=\frac{1}{k_1 A_c}$$ toplinski otpor

stražnje strane kolektora.

Za dobro izolirani kolektor ti su gubici maleni, oko 10% — 15% od ukupnih toplinskih gubitaka. Tako npr. za izolacijski sloj debljine 10 cm staklene vune (λ=0,035 W/mK), koeficijent toplinskih gubitaka $k_1 \doteq 0{,}4$ W/m²K. Gubici kroz bočne strane kolektora obično su za red veličine manji (osobito za kvalitetne kolektore većih površina s dobrom bočnom izolacijom) i mogu se zanemariti.

Toplinske gubitke prednje strane kolektora koji nastaju konvekcijom i zračenjem teško je izračunati. Detalji proračuna, koji se mogu naći u literaturi (npr. Du 74, Du 80], preopširni su za ovaj prikaz, navest ćemo konačne izraze za ravni kolektor nagnut 45° prema horizontali.

Toplina iz apsorbera prenosi se zračenjem i konvekcijom prema prozoru, a zatim iz prozora u okolni zrak. U toplinskoj ravnoteži, toplinski tok od apsorbera prema prozoru jednak je toplinskom toku iz prozora u okolni zrak

$$q_2=k_2\Delta T_2=k_3\Delta T_3=k_p\Delta T \qquad (4.53)$$

gdje je $\Delta T_2=T_a-T_p$ razlika temperature između apsorbera i prozora, $\Delta T_3=T_p-T_z$ razlika temperature između prozora i okolnog zraka, k_2 koeficijent toplinskih gubitaka (konvekcijom i zračenjem) iz apsorbera u prozor, k_3 iz prozora u okolni zrak, a k_p koeficijent toplinskih gubitaka prednje strane kolektora. Budući da je $T_a-T_z=\Delta T=\Delta T_2+\Delta T_3$, to je

$$\frac{q_2}{k_p}=\frac{q_2}{k_2}+\frac{q_2}{k_3} \qquad (4.54)$$

odnosno

$$R_p=R_2+R_3. \qquad (4.55)$$

Toplinski otpor za prijenos topline od apsorbera do prozora R_2 paralelan je spoj otpora zbog konvekcije R_2' i zračenja R_2'' te je

$$\frac{1}{R_2}=\frac{1}{R_2'}+\frac{1}{R_2''}. \qquad (4.56)$$

Odgovarajući koeficijent prijenosa topline k_2 jednak je

$$k_2=k_2'+k_2''=k_2'+\frac{\sigma\,(T_a^2+T_p^2)\,(T_a+T_p)}{\frac{1}{\epsilon_a}+\frac{1}{\epsilon_p}-1} \qquad (4.57)$$

gdje je k_2' koeficijent konvekcije u zraku između apsorbera i stakla, k_2'' koeficijent prijenosa topline zračenjem iz apsorbera prema prozoru $\sigma=5{,}67\cdot10^{-8}$W/(m²K) Stefan-Boltzmannova konstanta, T_a temperatura apsorbera, T_p temperatura prozora, a ϵ_a i ϵ_p emisijski faktori apsorbera odnosno prozora.

Koeficijent toplinskih gubitaka konvekcijom između apsorbera i prozora k_2' ovisi o razlici temperature apsorbera i prozora i o njihovom razmaku d te se može izračunati s pomoću empiričkih izraza koji se mogu naći u literaturi [npr. u Du 74, Kr 78]

$$\frac{k_2'}{\mathrm{W/(m^2K)}}=\left[1-0{,}0018\left(\frac{T_a+T_p}{2}-283\right)\right]\frac{0{,}826\,(T_a-T_p)^{0{,}31}}{d^{0{,}07}} \quad (4.58)$$

gdje su temperature T_a i T_p izražene jedinicom kelvin, a razmak d jedinicom metar.

Iz prozora toplina se gubi također zračenjem i konvekcijom. Za te gubitke bitna je brzina vjetra jer vjetar povećava konvekciju. Toplinski otpor R_3 paralelan je spoj toplinskog otpora konvekcije R_3' i zračenja R_3'' ($1/R_3=1/R_3'+1/R_3''$), odnosno koeficijent prijenosa topline jest

$$k_3=k_3'+k_3''=k_3'+\sigma\epsilon_p\,(T_p^2+T_z^2)\,(T_p+T_z). \quad (4.59)$$

Koeficijent konvekcije k_3' može se također izračunati iz brzine vjetra v_v s pomoću empiričke relacije [v. npr. Du 74]

$$\frac{k_3'}{\mathrm{Wm^{-2}\,K^{-1}}}=5{,}7+3{,}8\,\frac{v_v}{\mathrm{ms^{-1}}}. \quad (4.60)$$

Dakle, ukupni toplinski otpor kolektora R prema okolini jest

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2+R_3} \quad (4.61)$$

a ukupni koeficijent toplinskih gubitaka

$$k=k_1+\frac{1}{\frac{1}{k_2}+\frac{1}{k_3}}=k_1+\frac{k_2\,k_3}{k_2+k_3}. \quad (4.62)$$

Slično se mogu izračunati i toplinski gubici kolektora s dvostrukim prozorom.

Gore navedeni proračuni daju za kolektor bez pokrova pri brzini vjetra 5 m/s koeficijent toplinskih gubitaka konvekcijom $k_2'=25$ W/(m²K).

Ako je koeficijent toplinskih gubitaka zbog zračenja $k_2''=6$W/(m²K), ukupni je koeficijent $k_2=31$ W/(m²K).

Prekrijemo li apsorber staklenim prozorom, tipične su vrijednosti
$k_2'=3$ W/(m² K),
$k_2''=7$ W/(m²K),
$k_3'=25$ W/(m²K) i
$k_3''=6$ W/(m²K)
te je ukupni koeficijent gubitaka za prednju stranu
$k_p=7{,}6$ W/(m²K).
Pretpostavimo li da je sa stražnje strane $k_1=0{,}4$ W/(m²K), ukupni je koeficijent toplinskih gubitaka za takav (neselektivni) kolektor $k=k_1+k_p=8$ W/(m²K); to je tipična vrijednost za neselektivni kolektor s jednostrukim prozorom.

Za kolektor s dvostrukim prozorom ukupni je koeficijent toplinskih gubitaka $k=4{,}7$ W/(m²K).

Za selektivni kolektor zbog malenog faktora emisije koeficijent toplinskih gubitaka zračenjem iz apsorbera mnogo je manji ($k_2''=3$ W/m²K) te je i ukupna vrijednost k manja, od 4 do 5 W/m²K. Još se više mogu smanjiti toplinski gubici uklanjanjem zraka iz kolektora ($k_2'=0$). Koeficijent toplinskih gubitaka vakuumskih cijevnih kolektora jeste oko 2 W/m²K. (Pri proračunima toplinskih gubitaka korišteni su podaci: $\epsilon_p=0{,}88$, $\epsilon_a=0{,}95$ za neselektivni i $\epsilon_a=0{,}2$ za selektivni, $d=0{,}025$ m, $v_v=5$ m/s, $\lambda_1=0{,}04$ W/mK i $d_1=0{,}05$ m).

4.2.5. Efikasnost kolektora

Ravni kolektor skuplja ukupno (tj. izravno, raspršeno i odbijeno) Sunčevo zračenje i apsorbiranu energiju djelomično pretvara u toplinu. Toplinska energija koju ravni kolektor predaje radnom fluidu, koji kroz njega protječe, jednaka je razlici između apsorbirane sunčane energije i toplinskih gubitaka. Bilanca snaga ravnog kolektora može se prikazati jednadžbom

$$\frac{\mathrm{d}\,Q_k}{\mathrm{d}\,t}=\frac{\mathrm{d}\,Q_a}{\mathrm{d}\,t}-\frac{\mathrm{d}\,Q_g}{\mathrm{d}\,t}. \quad (4.63)$$

Q_k je korisna energija (toplina) dobivena iz kolektora (energija predana radnom fluidu),

Q_a apsorbirana energija, a

Q_g energija koja se izgubi u okolicu.

Tu smo zanemarili energiju potrebnu za promjenu unutrašnje energije kolektora (npr. za jutarnje zagrijavanje kolektora ohlađenog tokom noći), tj. pretpostavili smo da je toplinski kapacitet kolektora jednak nuli.

Snaga koju apsorbira kolektor jednaka je

$$\frac{\mathrm{d}Q_a}{\mathrm{d}t}=\tau\alpha\, G A_c. \qquad (4.64)$$

α je sunčani apsorpcijski faktor apsorberske ploče,

τ sunčani transmisijski faktor prozora kolektora,

G ukupno sunčano ozračenje (W/m^2) plohe kolektora, a

A_c površina apsorbera kolektora (m^2).

Toplinski gubici (toplinski tok) kolektora mogu se prikazati jednadžbom

$$\frac{\mathrm{d}Q_g}{\mathrm{d}t}=k A_c (T_a-T_z). \qquad (4.65)$$

T_a je srednja temperatura apsorbera (°C),

T_z je temperatura okolnog zraka (°C) i

k koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka (W/m^2K). Uvrštavajući izraze (4.64) i (4.65) u izraz (4.63) dobivamo osnovnu jednadžbu ravnog kolektora (Hottel-Whillierova jednadžba)

$$\frac{\mathrm{d}Q_k}{\mathrm{d}t}=A_c\,[\tau\alpha G-k(T_a-T_z)]. \qquad (4.66)$$

Tu jednadžbu možemo pisati i s pomoću gustoće toplinskog toka (gustoće snage) q

$$q=(\tau\alpha)G-k(T_a-T_z). \qquad (4.67)$$

Temperaturu apsorbera T_a teško je mjeriti pa se jednadžba (4.67) obično upotrebljava u malo drukčijem obliku. Koristi se ili temperatura fluida na ulazu u kolektor T_u ili srednja temperatura fluida u kolektoru $\bar{T}_f=(T_u+T_{iz})/2$, pa jednadžba ravnog kolektora glasi [v. npr. Du 74, Lu 80]

$$q=F_R\,[\tau\alpha G-k(T_u-T_z)] \qquad (4.68)$$

odnosno

$$q=F'_R\,[\tau\alpha G-k(\bar{T}_f-T_z)] \qquad (4.69)$$

F_R odnosno F'_R su faktori prijenosa topline iz kolektora u fluid. Ti faktori ovise o vrsti fluida koji protječe kroz kolektor, o brzini protoka fluida i o izradi kolektora. Posebno je važna ovisnost o brzini protoka u zračnim kolektorima jer je u njih promjena s brzinom veća nego u vodenih kolektora. Mi ćemo uglavnom govoriti o kolektorima s tekućinom, upotrebljavati jednadžbu (4.68) te koristiti faktor F_R.

Faktor prijenosa topline iz apsorbera u fluid F_R može se izračunati s pomoću izraza [Du 74]

$$F_R=\frac{\dot{m}c}{k A_c}\left[1-\mathrm{e}^{-\frac{k F' A_c}{\dot{m}c}}\right] \qquad (4.70)$$

gdje je $\dot{m}=\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$ protok fluida (kg/s), c specifični toplinski kapacitet (J/kg K), A_c površina kolektora (m^2), k koeficijent toplinskih gubitaka (W/m^2K), a F' geometrijski faktor ovisan o izradi kolektora.

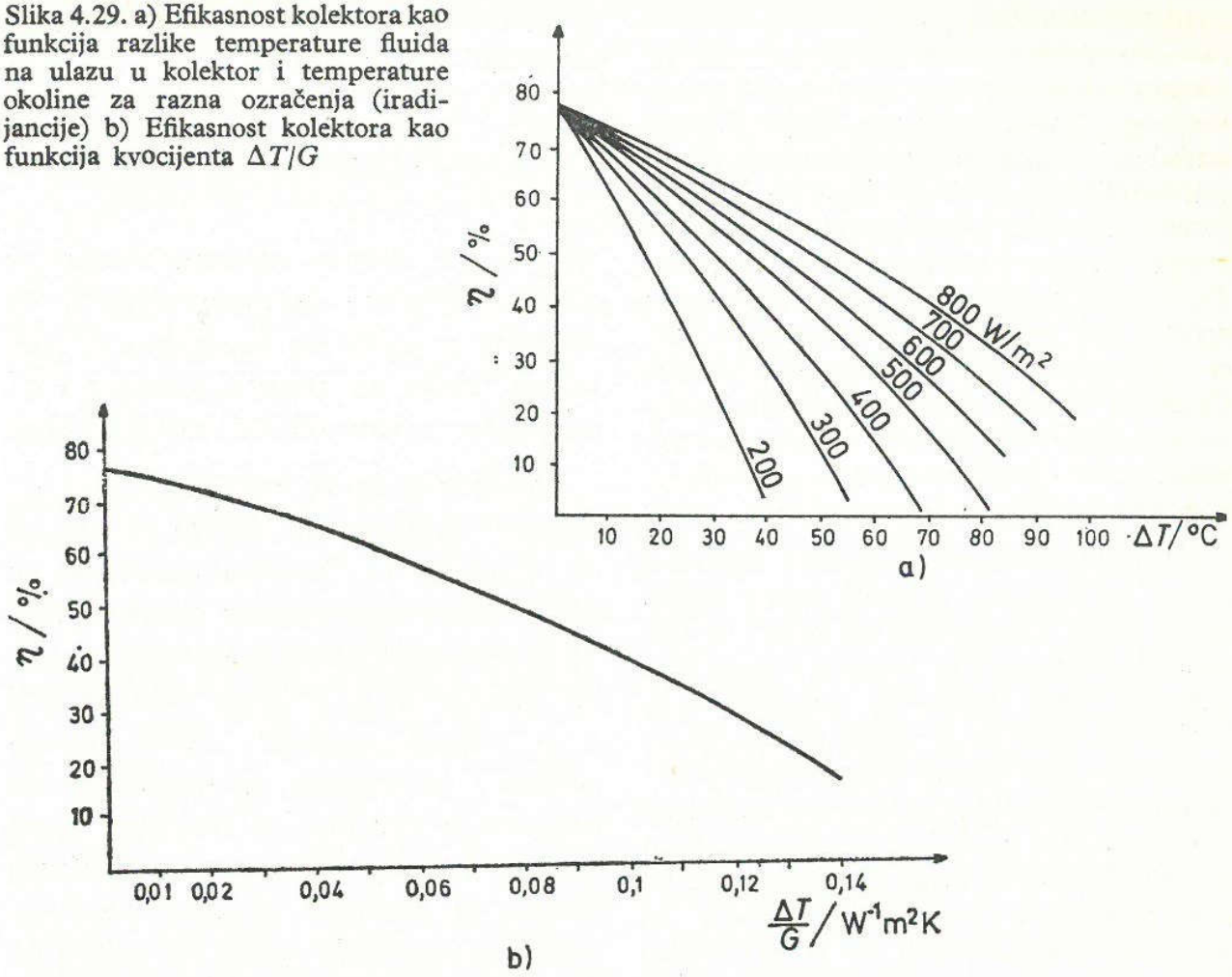
Faktor F_R uvijek je manji od jedan; bio bi jednak jedan ako bi T_u bilo jednako T_a, što se tehnički ne može postignuti. Obično je T_a veće od T_u i ta razlika sve je veća što je protok fluida sporiji. Tipične vrijednosti tog faktora za kolektor s vodom jesu oko 0,8—0,9 te za zračni kolektor oko 0,7. Ako u sistemu postoji izmjenjivač topline između kolektora i spremnika, F_R je malo manji nego ako nema izmjenjivača.

Efikasnost kolektora definira se omjerom između gustoće korisnog toplinskog toka (4.68) i upadnog sunčanog ozračenja

$$\eta=\frac{q}{G}=F_R\left[\tau\alpha-k\frac{T_a-T_z}{G}\right]. \qquad (4.71)$$

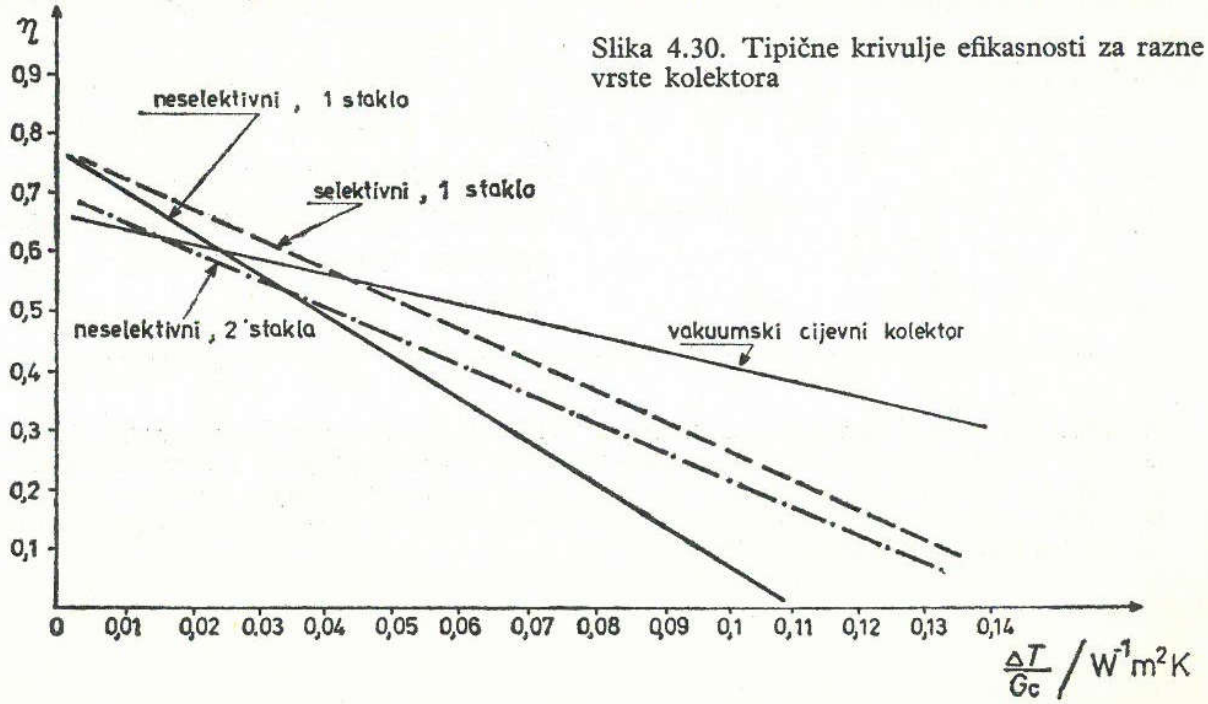
Na slici 4.29.a prikazane su krivulje efikasnosti neselektivnog kolektora s jed-

Slika 4.29. a) Efikasnost kolektora kao funkcija razlike temperature fluida na ulazu u kolektor i temperature okoline za razna ozračenja (iradijancije) b) Efikasnost kolektora kao funkcija kvocijenta $\Delta T/G$



nostrukim prozorom kao funkcija razlike temperature $\Delta T = T_u - T_z$ za razna sunčana ozračenja (iradijancije). Da bi se efikasnost umjesto skupom krivulja prikazala jednom krivuljom, prikazuje se η kao funkcija $\Delta T/G$ (sl. 4.29.b). Ako je koeficijent ukupnih gubitaka konstantan, ta je krivulja pravac kojemu odrezak na ordinati daje $F_R(\tau\alpha)$, a nagib mu je $-F_R k$. Za kolektor kojemu je efikasnost prikazana na slici 4.29. $F_R\tau\alpha = 0{,}76$ i $F_R k = 0{,}64\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-1}}$.

Na slici 4.30. prikazane su tipične efikasnosti neselektivnog kolektora s jedno-



Slika 4.30. Tipične krivulje efikasnosti za razne vrste kolektora

strukim prozorom, neselektivnog kolektora s dvostrukim prozorom, selektivnog kolektora s jednostrukim prozorom i vakuumskog cijevnog kolektora. Nagib pravaca određen je efektivnim koeficijentom ukupnih toplinskih gubitaka $k_{ef}=F_R\,k$, a odrezak na ordinati daje drugi važan parametar ravnog kolektora, tj. produkt $F_R\,(\tau\alpha)$. Iz crteža se vidi kako efikasnost opada ako temperatura apsorbera raste odnosno ako ozračenje opada. Opaža se također prednost upotrebe selektivnog apsorbera, osobito pri većim temperaturnim razlikama ΔT, i kada je sunčano ozračenje maleno, npr. zimi.

Krivulje efikasnosti kolektora načinjene su za stacionarne uvjete i prema njima se ne može izravno vidjeti koliki će biti solarni doprinos tog kolektora u nekom sustavu. One služe za procjenjivanje kvalitete kolektora, za dobivanje podataka o najvažnijim parametrima određenim izradom kolektora te za uspoređivanje kolektora. Rad sunčanog sustava potrebno je proračunati za svaki konkretni slučaj, a te proračune opisat ćemo u poglavlju 4.4. Zasad spomenimo da je pri našim kontinentalnim uvjetima (npr. u Zagrebu) u sustavu za dobivanje tople vode od 6 m² kolektora, efikasnost selektivnog kolektora oko 30% zimi, do 45% ljeti, a neselektivnoga za oko 25% manja (od 20% do 35%).

Izraz (4.71) daje trenutnu efikasnost kolektora. Međutim, efikasnost se češće računa za dulje vrijeme, npr. za jedan sat ili dan. Tada je

$$\eta=\frac{\int_0^t q\,\mathrm{d}t}{\int_0^t G\,\mathrm{d}t} \qquad (4.72)$$

Integriramo li izraz (4.72) u vremenskom intervalu Δt, dobivamo

$$\eta=F_R\left(\overline{\tau\alpha}-\frac{k(\bar{T}_u-\bar{T}_z)}{H}\right), \qquad (4.73)$$

gdje je H ukupna sunčana ozračenost (iradijacija) plohe kolektora (J/m²), $\overline{\tau\alpha}$ efektivni produkt $\tau\alpha$, $\bar{T}_u$ srednja temperatura fluida na ulazu u kolektor i $\bar{T}_z$ srednja temperatura zraka u tom razdoblju.

Efektivni produkt transmisijskog i apsorberskog faktora $\overline{\tau\alpha}$ dobiva se tako da se produkt $\tau\alpha$ korigira uzimajući u obzir višestruke refleksije Sunčeva zračenja u prostoru između apsorbera i prozora, apsorpciju u prozoru, ovisnost τ i α o smjeru upadnih zraka, utjecaj prašine i zasjenjenja. Izračunavanje $\overline{\tau\alpha}$ opisano je detaljno u literaturi [npr. Du 74, Lu 80]. Pri testiranju kolektora obično se određuje produkt $(\tau\alpha)_n$ pri približno okomitom upadu (za kutove do oko 30°). Efektivni produkt transmisijskog i apsorpcijskog faktora može se odrediti tako da se produkt $(\tau\alpha)_n$ određen pri okomitom upadu pomnoži bezdimenzionalnim faktorom

$$\overline{\tau\alpha}=K_\vartheta\,(\tau\alpha)_n \qquad (4.74)$$

Pri proračunu srednje mjesečne efikasnosti kolektora s jednostrukim prozorom okrenutim prema jugu i nagnutim oko 45° (u našem području) može se približno uzeti $K_\vartheta=0{,}92$.

Primjer 1. Kolika je satna i dnevna efikasnost kolektora površine 6 m² instaliranog u Zagrebu za jedan dan u prosincu? Srednja sunčana ozračenja kolektorske ploče i temperature zraka za svaki sat navedene su u tablici 4.18. Koeficijent toplinskih gubitaka kolektora jest $k=5$ W/(m² K), efektivni produkt $\overline{\tau\alpha}=0{,}86$, faktor prijenosa topline $F_R=0{,}86$. Temperatura vode na ulazu u kolektor jest stalno 30 °C.

Tablica 4.18. Temperature zraka i ozračenja kolektora

Vrijeme/h	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16
$\overline{G}_c$/ (W/m²)	48	135	210	245	255	220	145	55
T_z/°C	0	1	1,5	2	2,5	3	3	2,5

Dobivenu toplinu za svaki sat možemo izračunati s pomoću izraza

$$Q_k = A_c F_R [\overline{\tau\alpha}\overline{G}_c - k(T_u - T_z)] \cdot \Delta t$$

a efikasnost s pomoću

$$\eta = \frac{Q_k}{A_c \overline{G} \Delta t}$$

gdje je $\Delta t = 3\,600$ s.

Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.19.

Tablica 4.19. Rezultati proračuna efikasnosti za primjer 1.

Vrijeme	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16
Q_k/MJ	–	–	0,71	1,3	1,52	1,01	–	–
η_s	–	–	0,16	0,25	0,28	0,21	–	–

Dnevna efikasnost jest

$$\eta = \frac{Q_k}{A_c \Sigma G_i \Delta t_i} = \frac{4{,}54 \cdot 10^6 \text{ J}}{6 \cdot 1\,313 \cdot 3\,600 \text{ J}} = \frac{4{,}54 \text{ MJ}}{28{,}4 \text{ MJ}} = 16\%.$$

Primjer 2. Kolika je 15. siječnja dobivena toplina i dnevna efikasnost ravnog kolektora površine 4 m²? Kolektor je okrenut prema jugu, nagnut 45° prema horizontali i nalazi se u području Splita ($\varphi = 43{,}52°$). U tablici 4.20. prikazane su satne ozračenosti horizontalne plohe i temperature zraka za taj dan. Efektivni produkt $\overline{\tau\alpha}$ jednak je 0,85 od 10h do 14h, inače je 0,83, a koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka $k = 4{,}9$ W/(m²K). U kolektor stalno ulazi voda temperature 45 °C, a faktor je prijenosa topline iz kolektora u fluid $F_R = 0{,}82$. Pretpostavite da je udio raspršenog zračenja u ukupnom 45%, i da je difuzni refleksijski faktor okoline (albedo) 0,2.

Tablica 4.20. Temperature zraka i ozračenosti horizontalne plohe

Sat	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17
H/(MJ m^{-2})	–	0,25	0,68	1,01	1,13	1,24	1,04	0,72	0,4	–
t/°C	5,5	6	6,5	7	8,3	9,4	9,8	9,4	8,6	8,5

Dobivena toplina jest

$$Q = A F_R [(\overline{\tau\alpha}) H_c - k(T_u - T_z)] \tag{4.75}$$

a efikasnost je kolektora

$$\eta=\frac{Q}{A_c H_c}=F_R(\overline{\tau\alpha})-F_R k \frac{T_u-T_z}{H_c} \tag{4.76}$$

Da bismo izračunali te veličine, potrebno je najprije izračunati ozračenost (iradijaciju) H_c kolektorske plohe iz zadane ozračenosti H horizontalne plohe.

Ukupna ozračenost kolektora zbroj je izravne, raspršene i odbijene ozračenosti

$$H_\beta=H_{\beta b}+H_{\beta d}+H_{\beta r}.$$

Izravna satna ozračenost kolektora može se izračunati iz izravne horizontalne iradijacije (vidi poglavlje 4.1.8) s pomoću izraza

$$H_{\beta b}=H_b\cdot R_b=$$

$$=H_b\frac{\sin(\varphi-\beta)\sin\delta+\cos(\varphi-\beta)\cos\delta\cos\omega}{\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\cos\omega}.$$

φ je zemljopisna širina (43,52°),

β nagib kolektora (45°)

$\delta=23{,}45°\ \sin\left(\frac{284+15}{365}\right)=21{,}27°$ deklinacija Sunca u Splitu 15. I,

ω sati kut Sunca 7,5°, 22,5°, 37,5° i 52,5°.

Budući da je raspršena ozračenost kolektora jednaka

$$H_{\beta d}=\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)H_d,$$

a odbijena komponenta

$$H_{\beta r}=\frac{1-\cos\beta}{2}H,$$

ukupna je ozračenost kolektora

$$H_\beta=H_b R_b+H_d\frac{1+\cos\beta}{2}+H\rho\frac{1-\cos\beta}{2}.$$

Uvrštavajući zadane podatke u izraze (4,75), (4,76) i (4,77) možemo za svaki sat izračunati dobivenu toplinu i efikasnost kolektora.

Tablica 4.21. Rezultati za primjer 2.

Sat	T_z °C	H MJ/m²	R_b	H_β MJ/m²	$(\tau\alpha)_{et}H_\beta$ MJ/m²	$k(T_u-T_z)$ MJ/m²	Q/A MJ/m²	Q MJ	η
8–9	6	0,25	3,57	0,6	0,5	0,69	—	—	—
9–10	6,5	0,68	2,6	1,26	1,05	0,68	0,3	1,2	0,28
10–11	7	1,01	2,32	1,71	1,45	0,67	0,64	2,56	0,37
11–12	8,2	1,13	2,07	1,76	1,5	0,65	0,7	2,8	0,40
12–13	9,4	1,24	2,07	1,93	1,64	0,63	0,83	3,3	0,43
13–14	9,8	1,04	2,32	1,76	1,5	0,62	0,72	2,88	0,41
14–15	9,4	0,72	2,6	1,33	1,1	0,63	0,38	1,52	0,28
15–16	8,6	0,4	3,57	0,94	0,78	0,64	0,11	0,44	0,12

Rezultati su prikazani u tablici 4.21.

Ukupna dnevna ozračenost jest 11,3 MJ/m², ukupna dobivena toplina 14,7 MJ, pa je dnevna efikasnost kolektora

$$\eta_d=\frac{14{,}7\ \text{MJ}}{4\text{m}^2\cdot 11{,}3\ \text{MJ m}^{-2}}=33\%.$$

4.2.6. Testiranje ravnog kolektora

Da bi se mogli uspoređivati različiti kolektori, potrebno je odrediti, ako je moguće na međunarodnoj razini, metodu odnosno standardni postupak za testiranje kolektora, tj. određivanje njihovih svojstava. U literaturi je opisano više takvih metoda, one se već primjenjuju i karakteristike komercijalnih kolektora određuju se prema nekoj od tih metoda.

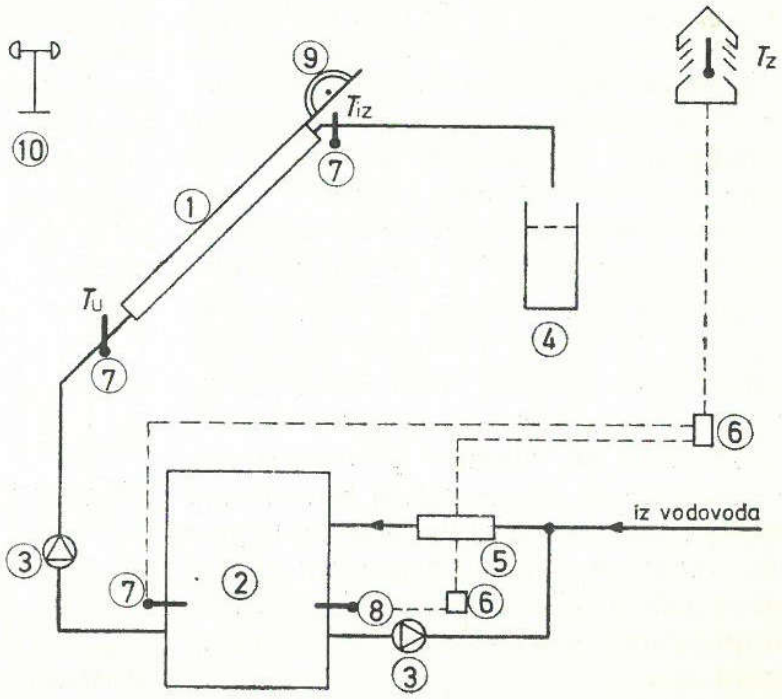
Na našem tržištu pojavljuje se sve više komercijalnih kolektora te je potrebno odabrati standardne postupke za testiranje kolektora ne samo zbog dobivanja službenog atesta nego i zbog detaljnijeg upoznavanja termičko-optičkih svojstava kolektora, što bi koristilo proizvođačima sunčane (solarne) opreme.

Postoji više metoda za testiranje kolektora. U SAD razvijena je metoda ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating und Air Conditioning Engineers) [As 77], u Zapadnoj Evropi BSE metoda (Bundesverband Solar Energie) [Ta 79], a predlažu se još neke metode koje su zapravo modifikacije tih dviju metoda. U nekoliko laboratorija u našoj zemlji razvija se metoda testiranja kolektora i osposobljuju se laboratoriji za davanje atesta kolektorima [No 78, Bo 82]. Međutim, bez obzira na postupak, principi su testiranja isti. Ovdje ćemo kratko opisati te principe, a detalji o mjerenjima u pojedinoj metodi mogu se naći u literaturi.

Testiranje se može obavljati vani — koristeći Sunčevo zračenje, kombinacijom mjerenja vani i mjerenja toplinskih gubitaka u laboratoriju ili samo u laboratoriju — koristeći sunčani (solarni) simulator. Opis solarnog simulatora vidi npr. u [Ya 73]. Metodom ASHRAE obavlja se testiranje kolektora u prirodnim uvjetima. Metodom BSE toplinska se svojstva kolektora određuju u laboratoriju, a optička efikasnost kolektora uz prirodno Sunčevo zračenje.

Pri testiranju kolektora određuju se razne karakteristike: trenutna efikasnost, ukupni toplinski gubici, toplinski kapacitet, pad tlaka fluida između izlaza i ulaza, apsorpcijski faktor i emisijski faktor apsorbera itd. Pri tom je najvažniji podatak, koji se primarno određuje, trenutna efikasnost kolektora iz koje se mogu utvrditi toplinska svojstva i rad kolektora.

Na slici 4.31. prikazana je pojednostavnjena shema uređaja za testiranje ravnog kolektora s tekućinom [Te 79, Bo 82]. Princip mjerenja vidi se iz sheme, a detaljniji opis uređaja može se naći u literaturi.



Slika 4.31. Shema uređaja za testiranje kolektora; 1. sunčani kolektor, 2. spremnik, 3. pumpa, 4. mjerna posuda, 5. protočni električni grijač, 6. uređaji automatske regulacije 7. otpornički termometar, 8. kontaktni termometar, 9. solarimetar i 10. anemometar

Trenutna efikasnost kolektora (v. poglavlje 4.2.5) definirana je izrazom

$$\eta=\frac{\dot{Q}_k}{A_c\,G_c} \qquad (4.78)$$

gdje je $\dot{Q}_k=\frac{d\,Q_k}{d\,t}$ toplinski tok koji iz kolektora (apsorbera) pređe u radni fluid, A_c površina kolektora (apsorbera) i G_c ukupno sunčano ozračenje plohe kolektora.

Toplinski tok računamo s pomoću izraza

$$\dot{Q}=\frac{d\,m}{d\,t}\,c_p\,(T_{iz}-T_u) \qquad (4.79)$$

tako da mjerimo brzinu protoka fluida, $d\,m/d\,t$ i temperaturu fluida T_u na ulazu i T_{iz} na izlazu kolektora. (c_p specifični je toplinski kapacitet radnog fluida, npr. za vodu $c_p=4\,187$ J/(kgK).)

Mjerenje efikasnosti treba obavljati u stacionarnim uvjetima, tj. pri konstantnim uvjetima rada (G_c=konst., T_u= =konst., $\frac{d\,m}{d\,t}$=konst., kut upada Sunčevih zraka do oko 30°). Budući da mjerenje efikasnosti traje oko 10 do 20 min, teško je postignuti sasvim stacionarne uvjete u cijelom tom intervalu jer će se neki od parametara, uz sva naša nastojanja, barem malo mijenjati; zato kažemo da se kolektori testiraju u kvazistacionarnim uvjetima i dobivenu efikasnost nazivamo „trenutnom" označujući je navodnim znakovima. Određivanje „trenutne" efikasnosti obavlja se tako da za određeni G_c i T_u (odnosno $\Delta T=T_u-T_z$) mjerimo $\dot{Q}$ odnosno izračunavamo η, zatim mijenjamo ili G_c ili ΔT i tako dobivamo efikasnost za dovoljan broj (petnaestak) radnih točaka. Ukupno ozračenje kolektorske plohe G_c mjerimo piranometrom, temperature se mogu mjeriti baždarenim otpornim termometrima. Mjerenje protoka može se odrediti vaganjem. Osim navedenih veličina potrebno je mjeriti temperaturu okolnog zraka (T_z) i brzinu vjetra v_v.

Koristeći Hottel-Whillerovu jednadžbu (4.68), trenutna efikasnost može se prikazati u obliku

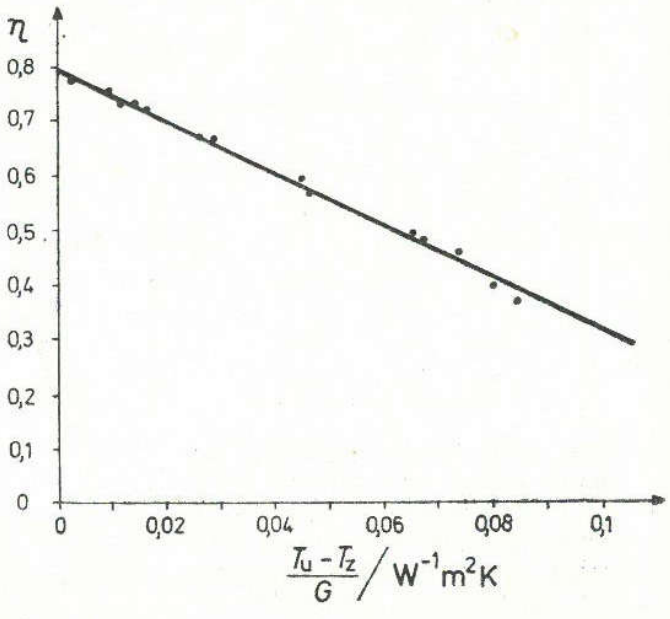
$$\eta=F_R\,(\tau\alpha)-F_R\,k\,\frac{\overline{T}_u-T_z}{G_c} \qquad (4.80)$$

ili uvođenjem tzv. srednje temperature fluida $\left(\overline{T}_f=\frac{T_u+T_{iz}}{2}\right)$

$$\eta=F'_R\,(\tau\alpha)-F'\,k\,\frac{\overline{T}_f-T_z}{G_c} \qquad (4.81)$$

gdje su F_R i F'_R faktori prijenosa topline iz kolektora u fluid, $(\tau\alpha)$ efektivni produkt transmisijskog i apsorpcijskog faktora, k ukupni koeficijent toplinskih gubitaka, T_z temperatura okolnog zraka.

Obično se rezultati mjerenja „trenutne" efikasnosti prikazuju grafički dijagramom kojemu je os ordinata trenutna efikasnost η, a os apscisa $\frac{\Delta T}{G}$, gdje je ΔT ili T_u-T_z ili $\overline{T}_f-T_z$, što je potrebno eksplicite naglasiti. Jedna takva krivulja efikasnosti prikazana je na slici 4.32. Za ravni kolektor efikasnost je približno linearna i može se aproksimirati pravcem koji se



Slika 4.32. Tipični rezultati testiranja ravnog kolektora

metodom najmanjih kvadrata provuče kroz eksperimentalne točke. Jednadžba tog pravca može se npr. pisati u obliku

$$\eta=\eta_0-k_{ef}\frac{T_u-T_z}{G_c} \qquad (4.82)$$

gdje je η_0 tzv. optička efikasnost za $T_u=T_z$, a k_{ef} efektivni koeficijent toplinskih gubitaka. Testiranjem se, dakle, dobivaju dva važna parametra kolektora

$$\eta_0=F_r(\alpha\tau)_n \quad \text{i} \quad k_{ef}=F_R k. \qquad (4.83)$$

Ukupni koeficijent toplinskih gubitaka k, za koji smo pretpostavili da je konstantan, zapravo je funkcija ΔT, te efikasnost uistinu nije linearna nego kvadratična funkcija, tako da se katkad umjesto pravca kroz točke na slici 4.32. metodom najmanjih kvadrata provlači parabola

$$\eta=\eta_0-a_1\frac{\Delta T}{G_c}-a_2\left(\frac{\Delta T}{G_c}\right)^2 \qquad (4.84)$$

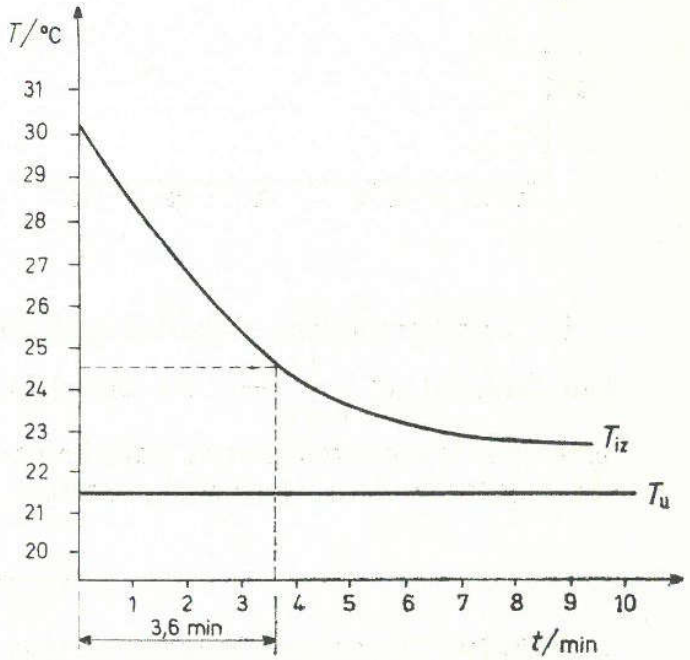
pa se efikasnost kolektora umjesto s pomoću dva određuje s pomoću tri parametra η_0, a_1 i a_2.

Kad se prikazuju rezultati mjerenja trenutne efikasnosti kolektora, potrebno je uz dijagram navesti upotrebljenu metodu i uvjete testiranja $\left(\frac{dm}{dt}, T_z, G_c,\right.$ brzinu vjetra i sl.$\left.\right)$ te dati jednadžbu efikasnosti u linearnom ili paraboličnom obliku.

Da bi se moglo promatrati ponašanje kolektora u nestacioniranim uvjetima, potrebno je poznavati njegovu vremensku konstantu koja pokazuje kako brzo kolektor reagira na naglu promjenu zračenja ili temperature ulaznog fluida.

Vremenska konstanta definira se kao vrijeme potrebno da temperatura fluida na izlazu kolektora opadne za određeni iznos ako se zračenje naglo smanji na nulu (npr. tako da se zakloni kolektor). Temperatura ulaznog fluida pri tome se drži konstantnom i približno jednakom temperaturi okolice. Ako je temperatura na ulazu kolektora T_u, a na izlazu kolektora T_{i1}, u trenutku kad zaklonimo kolektor, tada se vremenska konstanta definira kao vrijeme potrebno da temperatura na izlazu kolektora padne na vrijednost T_{i2} određenu jednadžbom

$$\frac{T_{i2}-T_u}{T_{i1}-T_u}=\frac{1}{e}=0{,}368. \qquad (4.85)$$



Slika 4.33. Vremenska konstanta kolektora

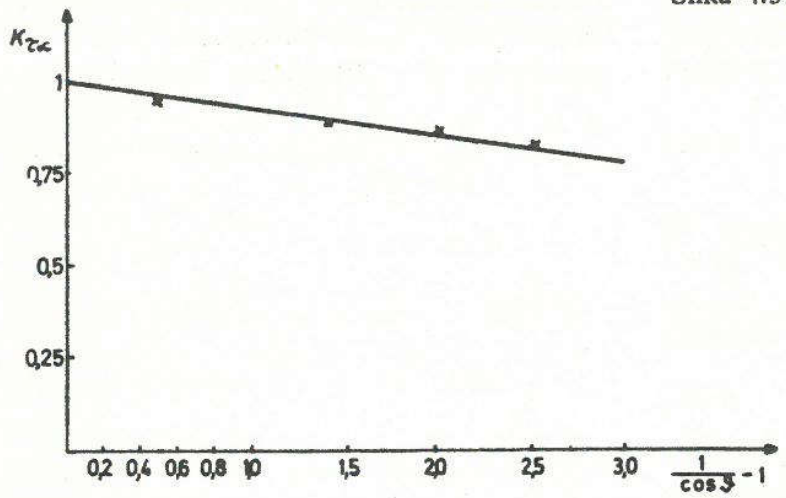
Na slici 4.33. prikazani su rezultati mjerenja vremenske konstante jednog vodenog kolektora. Tipične vrijednosti vremenske konstante jesu nekoliko minuta za kolektore s tekućinom, odnosno 10 do 15 minuta za zračne kolektore.

Faktor upadnog kuta definira ovisnost „trenutne" efikasnosti η o upadnom kutu ϑ Sunčevih zraka. Faktor upadnog kuta eksperimentalno se može odrediti mjerenjem „trenutne" efikasnosti pri različitim upadnim kutovima Sunčevih zraka [As 77]. Ako je u toku mjerenja temperatura ulaznog fluida T_u jednaka temperaturi zraka T_z, „trenutna" efikasnost bit će

$$\eta=K_{\tau\alpha}F_R(\tau\alpha)=K_{\tau\alpha}\eta_0 \qquad (4.86)$$

Mjerenjem „trenutne" efikasnosti pri različitim upadnim kutovima uz prethodno određenu optičku efikasnost kolektora određuje se ovisnost faktora upadnog kuta $K_{\tau\alpha}$ o upadnom kutu Sunčevih zraka ϑ.

Slika 4.34. Faktor upadnog kuta



Taj se faktor obično prikazuje grafički kao funkciju od $\frac{1}{\cos\vartheta}-1$. Na slici 4.34. prikazana je takva ovisnost za jedan kolektor s jednostrukim staklenim prozorom. Za okomiti upad ($\vartheta=0$) faktor upadnog kuta $K_{\tau\alpha}=1$ i s porastom ϑ opada kao linearna funkcija od $\frac{1}{\cos\vartheta}-1$.

Primjer. Pri testiranju kolektora površine $A_c=1{,}55$ m² dobiveni su rezultati prikazani u tablici 4.22. Mjerenja su obavljena pri približno okomitom upadu Sunčevih zraka. Kako glasi jednadžba efikasnosti kolektora? Koliki je $F_R\,(\tau\alpha)_n$? Ako se jednadžba aproksimira pravcem, kako glasi jednadžba tog pravca? Koliki je tada $F_R\,(\tau\alpha)_n$ i $F_R\,k$?

Tablica 4.22. Rezultati testiranja kolektora

T_z/°C	20	19,2	18,4	20,1	19,7	21,2	23,0	21,5	22,3	19,0	23,3	24,0
T_u/°C	22,3	28,7	24,8	28,1	42,4	42,3	42,9	63,3	68,6	69,1	85	87,5
T_{iz}/°C	31,8	38,4	32,9	36,4	49	49,4	50,8	67,5	73,8	73,7	88	89,7
$\dot{m}$/ (kg/s)	0,029	0,025	0,028	0,029	0,036	0,034	0,029	0,035	0,030	0,030	0,030	0,035
G_c/(W/m²)	974	923	842	881	983	981	974	853	946	923	909	918

Trenutna efikasnost kolektora računa se s pomoću izraza

$$\eta=\frac{\dot{Q}_k}{A_c\,G_c}=\frac{\dot{m}\,c_p\,(T_{iz}-T_u)}{A_c\,G_c}.$$

Uvrštavanjem podataka iz tablice 4.22. može se izračunati η za svaku od dvanaest točaka mjerenja, a rezultati su prikazani u tablici 4.23.

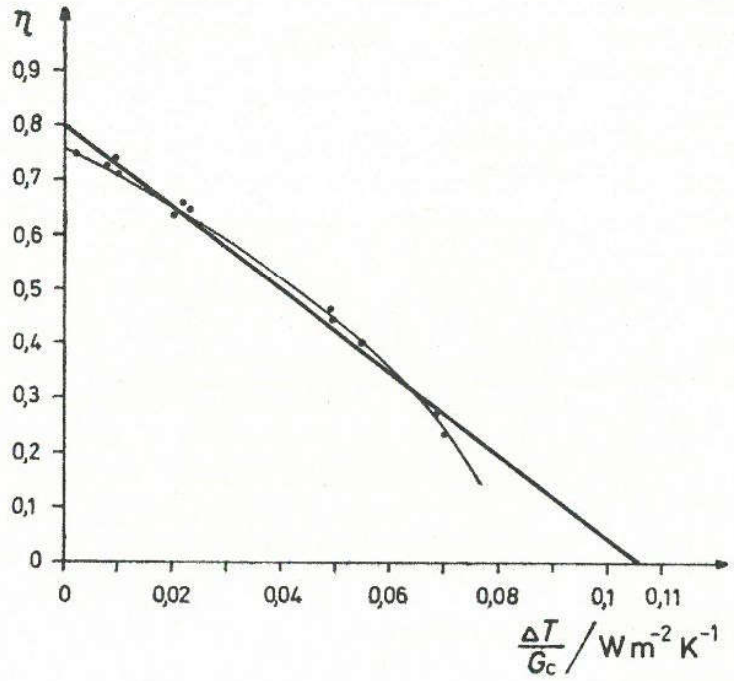
Tablica 4.23. Proračun efikasnosti kolektora iz rezultata testiranja

η	0,75	0,71	0,73	0,74	0,65	0,66	0,64	0,47	0,45	0,40	0,27	0,23
$\frac{\Delta T/G_c}{W^{-1}m^2K}$	0,0024	0,010	0,008	0,009	0,023	0,022	0,020	0,049	0,049	0,054	0,068	0,069

Obično se efikasnost prikazuje kao funkcija $\frac{\Delta T}{G_c}=\frac{T_{iz}-T_u}{G_c}$ u obliku

$$\eta=\eta_0-a_1\frac{\Delta T}{G_c}-a_2\left(\frac{\Delta T}{G_c}\right)^2$$

gdje je $\eta_0=F_R\,(\tau\alpha)_n$.



Slika 4.35. Krivulja efikasnosti za zadani kolektor

Na slici 4.35. koja se dobiva s pomoću izračunatih vrijednosti iz tablice 4.23. nacrtana je parabola kroz eksperimentalne točke. Jednadžba te parabole jest

$$\eta=0{,}77-4{,}79\frac{\Delta T}{G_c}-35{,}7\left(\frac{\Delta T}{G_c}\right)^2$$

te je

$$\eta_0=F_R\,(\tau\alpha)_n=0{,}77.$$

Ako ovisnost efikasnosti o $\Delta T/G_c$, umjesto parabolom, aproksimiramo pravcem povučenim metodom najmanjih kvadrata kroz eksperimentalne točke, dobivamo

$$\eta=F_R\,(\tau\alpha)_n-k\frac{\Delta T}{G_c}=0{,}8-7{,}6\frac{\Delta T}{G_c}$$

$$F_R\,(\tau\alpha)_n=0{,}8$$

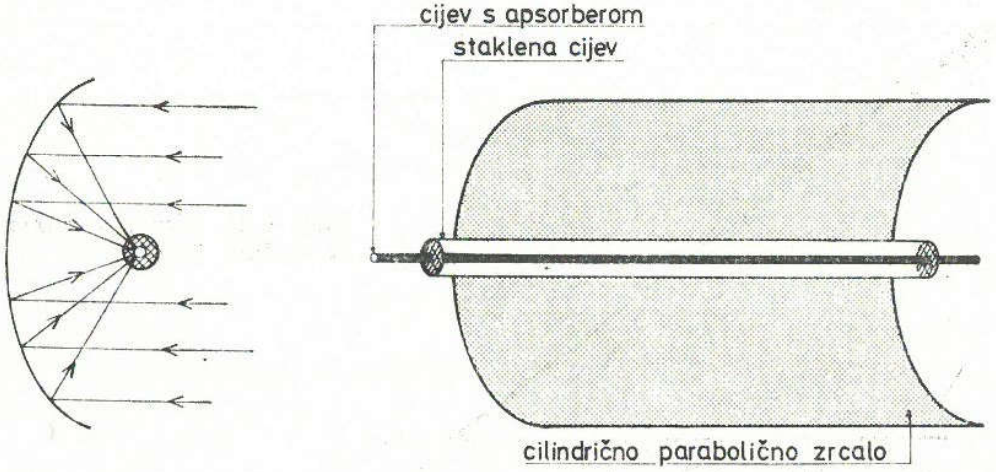
$$F_R\,k=7{,}6\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}.$$

4.2.7. Koncentrirajući kolektori

Ravnim kolektorom mogu se dobiti temperature do oko 100 °C, što ograničuje njihovu primjenu samo za niskotemperaturne sustave (npr. grijanje prostorija i vode). Više radne temperature dobivaju se koncentrirajućim kolektorima koji s pomoću zrcala ili leća fokusiraju Sunčevo zračenje i tako povećavaju ozračenost (iradijaciju) apsorbirajuće površine. Za razliku od ravnih, koncentrirajući kolektori koriste samo izravno Sunčevo zračenje i zbog toga trebaju složeni sustav za praćenje Sunca. Mana im je

da za vrijeme naoblake nisu upotrebljivi. Uglavnom se upotrebljavaju pri pretvaranju topline u mehanički rad jer su za tu pretvorbu potrebne visoke temperature koje ravni kolektori ne mogu proizvesti.

Postoje razne izvedbe koncentrirajućih kolektora. Oni mogu koncentrirati zračenje ili u točku ili na dio pravca, tj. fokus im može biti točkast ili linearan. Posebna vrsta koncentrirajućeg sustava jest polje ravnih zrcala (heliostata) koja prate Sunce i reflektiraju izravno Sunčevo zračenje na prijemnik na vrhu tornja (v. poglavlje 4.5.4).



Slika 4.36. Parabolični kolektor

Na slici 4.36. prikazan je parabolični kolektor koji se sastoji od cilindričnog paraboličnog zrcala u fokusu kojeg je apsorberska cijev kroz koju protječe radni fluid za odvođenje topline.

Koncentrirajući kolektori primaju sunčanu energiju velikom površinom i koncentriraju je na malu površinu. Pri tome je važan omjer koncentriranja R, tj. omjer između površine otvora kolektora koji prima Sunčevo zračenje i površine apsorbera koja prima koncentrirano zračenje. Taj omjer za ravni kolektor jest, naravno, jedan, a za koncentrirajuće kolektore može biti od 2 do 1 000. Što je radna temperatura viša, potreban je kolektor većeg omjera koncentriranja. Kolektore omjera $R \leq 10$ dovoljno je povremeno, sezonski zakretati, a kolektori velikih omjera koncentriranja moraju se stalno okretati i precizno pratiti Sunce, što im povećava složenost i cijenu. Iznos omjera koncentriranja linearno fokusirajućih kolektora kreće se do 50, a točkasto fokusirajućih mnogo je veći (do 1 000, a i više od 1 000).

Efikasnost koncentrirajućeg kolektora jest

$$\eta = F_R \left[\rho\gamma\,(\tau\alpha)_{ef} - \frac{k}{R}\,\frac{T_u - T_z}{G_b} \right] \quad (4.87)$$

F_R je faktor koji opisuje efikasnost prijenosa topline iz apsorbera u fluid,

ρ je spekularni refleksijski faktor površine reflektora,

γ je faktor koji određuje koliki dio reflektirane energije od reflektora dođe na apsorber,

$(\tau\alpha)_{ef}$ je efektivni produkt transmisijskog faktora cijevi u kojoj je apsorber i apsorpcijskog faktora apsorbera,

k je faktor ukupnih toplinskih gubitaka,

T_u je temperatura fluida na ulazu u kolektor,

T_z je temperatura okolnog zraka,

G_b je izravno sunčano ozračenje koje upada na kolektor i

R omjer koncentriranja kolektora.

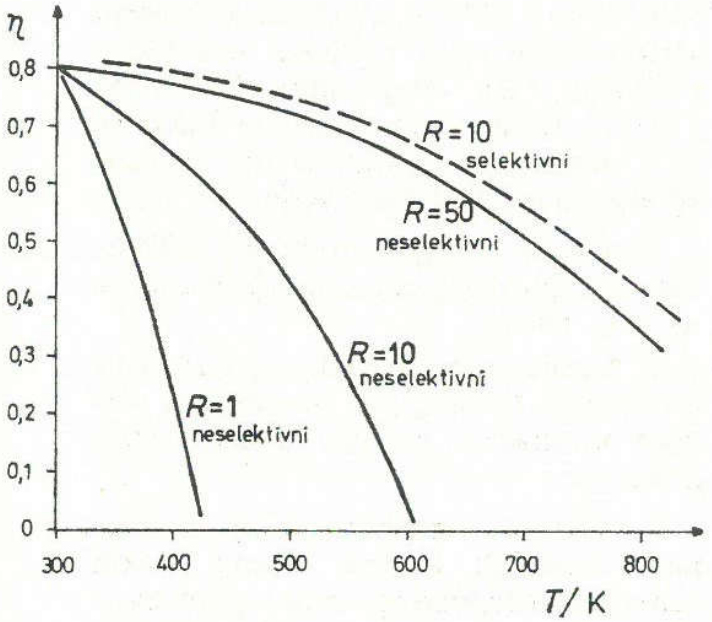
Budući da koncentrirajući kolektori rade uglavnom na višim temperaturama, prevladavaju gubici zračenjem, te se izraza (4.87) može pisati u obliku

$$\eta = F_R\left[\rho\gamma(\tau\alpha)_{ef} - \frac{\epsilon\sigma}{RG_b}(T_u^4 - T_z^4)\right] \quad (4.88)$$

$$\eta = F_R\left(a - \frac{\sigma\epsilon T^4}{RG_b}\right) \quad (4.89)$$

gdje su $a = \rho\gamma\,(\tau\alpha)_{ef}$, ϵ toplinski emisijski faktor apsorbera, T radna temperatura ($T \gg T_z$) i σ Boltzmannova konstanta.

Faktor a zapravo je udio (%) upadnog solarnog toka koji dođe do apsorberske površine. Uspoređujući tu jednadžbu s jednadžbom za efikasnost ravnog kolektora (4.71) uočavamo da je za koncentrirajući kolektor prvi član malo manji, ali i da je drugi (negativni) član bitno manji, osobito za vrijeme vedrih dana kad je izravno zračenje relativno veliko. Koncentrirajući kolektori efikasniji su za više temperature (npr. za više od 100 °C), a za niže radne temperature bolji su ravni kolektori.



Slika 4.37. Ovisnost efikasnosti koncentrirajućih kolektora o radnoj temperaturi apsorbera

Na slici 4.37. prikazana je efikasnost koncentrirajućih kolektora ovisno o radnoj temperaturi. Za zadane uvjete potrebno je naći kompromis između ekonomičnosti i efikasnosti.

Iz jednadžbe (4.89) vidi se da upotreba selektivnih apsorbera bitno povećava efikasnost koncentrirajućih kolektora. Selektivni apsorber za postizavanje istog učinka omogućuje upotrebu manjeg omjera koncentriranja i tako smanjuje cijenu uređaja za koncentriranje i praćenje Sunca [Se 81].

Za primjenu koncentrirajućih kolektora važno je ekonomično dobivanje selektivnih površina i koje mogu izdržati visoke temperature. Intenzivno se istražuje tehnologija selektivnih slojeva otpornih na visoku temperaturu (npr. 500 °C) u nizu laboratorija u svijetu. Izrada takvih površina utjecala bi na bržu realizaciju ekonomičnih sunčanih (solarnih) centrala na termodinamičkom principu.

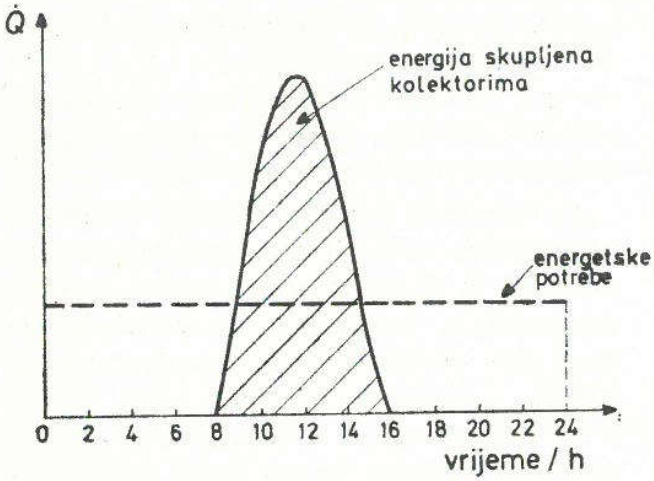
Koncentrirajući kolektori koriste se za dobivanje visokih temperatura u metalurgiji, s pomoću njih može se dobiti vodena para za pokretanje turbina u sunčanim elektranama i sl.

Poznata sunčana peć snage 1 MW u francuskim Pirinejima (u mjestu Odeillo) sastoji se od 63 ravna zrcala (heliostata) koja prate Sunčeve zrake i reflektiraju ih na parabolično zrcalo koje koncentrira oko 60% ukupne upadne snage (0,6 MW) na površini oko 7 dm^2 u žarišnoj ravnini zrcala i tako omogućuje dobivanje visokih temperatura. Omjer koncentriranja tog sustava jest 3 000, toplinska snaga 1 MW, a temperatura u fokusu 3 000 °C.

4.3. Uskladištenje sunčane energije

4.3.1. Uvod

Zbog intermitentnog svojstva sunčane energije (oblaci, dan—noć, godišnje doba) jedan je od najvažnijih problema uskladištenje (akumuliranje) energije. U svaki solarni sustav potrebno je ugraditi akumulacijski uređaj u kojem se skuplja energija za vrijeme sunčanih razdoblja, odnosno iz kojeg se energija crpi za vrijeme kad Sunčeva zračenja nema ili nije dovoljno. Ta je činjenica ilustrirana na slici 4.38. koja prikazuje dnevnu raspodjelu energije skupljene kolektorima



Slika 4.38. Raspodjela skupljene i potrebne energije za zagrijavanje neke zgrade kao ilustracija vremenske neusklađenosti dobivanja i potrošnje sunčane topline

i energetske potrebe neke zamišljene zgrade. (Radi jednostavnosti pretpostavljeno je da je toplinsko opterećenje konstantno.) Višak energije koju skupi kolektor za vrijeme dok Sunce sja uskladištava se i koristi za vrijeme kad Sunčeva zračenja nema. Tako npr. sustav za grijanje (hlađenje) prostorija i grijanje vode mora imati i odgovarajući spremnik u koji se pohranjuje, odnosno iz kojeg se uzima toplinska energija. Razliku između energije koja je potrebna i one koju skupi kolektor osigurava pomoćni konvencionalni grijač.

Postoje različite metode za uskladištavanje energije: toplinska, kemijska, termokemijska, mehanička i magnetsko-električna... Obradit ćemo uglavnom samo akumuliranje toplinske energije koje se najviše koristi pri primjeni sunčane energije.

Izbor načina uskladištavanja ovisi o mnogim činiteljima i u konkretnim slučajevima uskladištenje ne treba promatrati izolirano, nego u sklopu odgovarajućeg solarnog sustava. Metoda koja je uspješna u jednoj vrsti primjene često nije prihvatljiva za neku drugu. Jedan od najvažnijih parametara koji utječe na izbor načina akumuliranja jest vremenski interval uskladištenja: očito je da će za sezonsko uskladištenje (ljeto - zima) problemi biti sasvim drukčiji nego ako je energiju potrebno akumulirati za kraće razdoblje (dan - noć, odnosno nekoliko dana).

Glavni problem pri izradi akumulacijskog uređaja jest izbor materijala koji ima fizikalno-kemijska svojstva pogodna za uspješno uskladištenje energije. Faktori koje je pri tome potrebno promatrati jesu: gustoća energije, tj. količina energije koja se može pohraniti po jedinici volumena (J/m^3), odnosno po jedinici mase (J/kg), zatim temperaturni interval, tj. temperatura pri kojoj se toplina dovodi i temperatura pri kojoj se toplina uzima, temperaturni gradijent u spremniku, gubici pri uskladištenju, troškovi izgradnje i održavanja sustava, reverzibilnost procesa, utjecaj korozije, zapaljivost i toksičnost materijala, brzina kojom se toplina može dovoditi i odvoditi iz sustava itd.

Sustave za toplinsko uskladištenje možemo podijeliti na niskotemperaturne (20 °C do 120 °C), srednjetemperaturne (100 °C do 250 °C) i visokotemperaturne (250 °C do 1 000 °C). Ovdje ćemo govoriti samo o spremanju toplinske energije u području nižih temperatura (20 °C do 120 °C), dakle o spremnicima kakvi se npr. koriste u sustavima za grijanje zgrada i dobivanje tople vode.

Toplinska energija može se uskladištiti u toplinski izoliranim spremnicima na više načina:

1. zagrijavanjem određenog materijala (čvrstog ili tekućeg), tj. povećanjem njegove unutrašnje energije molekularnog gibanja;

2. taljenjem čvrstih tijela, tj. korištenjem latentnih toplina taljenja nekih materijala, odnosno općenito toplina transformacije pri prijelazu jedne faze u drugu;

3. korištenjem raznih kemijskih reakcija pri kojima se oslobađa odnosno veže toplina; itd.

Uglavnom se koristi prva metoda, tj. zagrijavanje raznih tvari, npr. vode, usitnjenog kamena; danas već postoje komercijalni uređaji koji rade tako. Prednost spremnika koji koriste promjenu faze, jest da mogu spremiti određenu koli-

činu energije u manjem volumenu nego spremnici s vodom. Međutim, postoji još dosta problema u primjeni te metode. Takvo je spremanje za sada skuplje i rjeđe se upotrebljava. Od nedavno se intenzivno istražuju materijali pogodni za spremanje energije u obliku latentne topline i očekuje se da će ta atraktivna metoda u skoroj budućnosti postati ekonomičnijom.

Razvoj ostalih metoda još je na početku i potrebna su detaljna istraživanja prije nego što se one eventualno komercijalno primijene. Opisat ćemo samo prve dvije metode.

4.3.2. Uskladištenje energije zagrijavanjem materijala

Pri toj se metodi u spremniku upotrebljava materijal koji u intervalu radnih temperatura ne mijenja fazu, nego mu se dovođenjem topline povećava temperatura: toplina se pretvara u unutrašnju energiju molekularnog gibanja. Koristi se, dakle, toplinski kapacitet određenog materijala.

U materijalu mase m i specifičnog toplinskog kapaciteta c može se spremiti toplina $Q=mc\Delta T$, gdje je ΔT povećanje temperature sustava. Pri tome je masa potrebnog materijala

$$m=\frac{Q}{c\Delta T} \qquad (4.90)$$

odnosno volumen

$$V=\frac{Q}{c\rho\,\Delta T} \qquad (4.91)$$

gdje je ρ gustoća materijala.

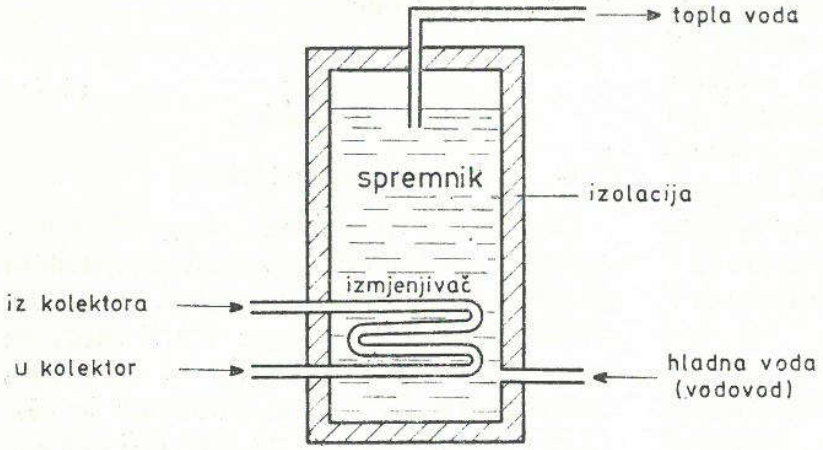
Za takve spremnike zbog relativno malenih specifičnih toplinskih kapaciteta potrebni su veliki volumeni, odnosno velike mase upotrebljene tvari. Npr. za spremanje 1 MJ energije u intervalu temperature $\Delta T=20$ K potrebno je oko 12 L (12 kg) vode ili 27 dm³ (60 kg) kamena (šljunka).

Pri izboru materijala relevantni parametri jesu gustoća ρ, specifični toplinski kapacitet po jedinici mase c odnosno po jedinici volumena ρc, toplinska vodljivost λ, cijena itd. U tablici 4.24. navedeni su neki od tih parametara za materijale koji bi se mogli upotrijebiti u spremnicima. Osobito je važno uočiti da djelotvorni materijali moraju imati velik volumni toplinski kapacitet ρc, ali i što veću vodljivost λ kako bi se toplina mogla što brže prenositi kroz spremnik. Pri tome se ne smije zaboraviti ni cijena izrade spremnika.

Najčešće se kao materijal za spremanje toplinske energije koristi voda. Ona ima najveći specifični volumni kapacitet, ima je u izobilju, jeftina je, nije otrovna, nije zapaljiva itd. Nedostaci su mogućnost smrzavanja, korozivno djelovanje vode, relativno nisko vrelište itd.

Tablica 4.24. Svojstva nekih materijala koji bi se mogli koristiti za toplinsko akumuliranje [Me 76, Ab 78]

Materijal	Gustoća ρ / kg/m³	Spec. topl. kapacitet c / kJ/(kgK)	Volumni topl. kapacitet ρc / J/(m³K)	Vodljivost k / W/mK
voda	10^3	4,19	4,19	0,9
usitnjeni kamen	$2{,}2\cdot10^3$	0,84	1,8	2,5
željezo	$7{,}6\cdot10^3$	0,46	3,5	47
granit	$2{,}7\cdot10^3$	0,80	2,2	2,7
beton	$2{,}5\cdot10^3$	0,92	2,26	2,4
cigle	$1{,}7\cdot10^3$	0,84	1,42	0,62
suha zemlja	$1{,}26\cdot10^3$	0,80	1	0,3
mokra zemlja	$1{,}7\cdot10^3$	2,1	3,6	2,5



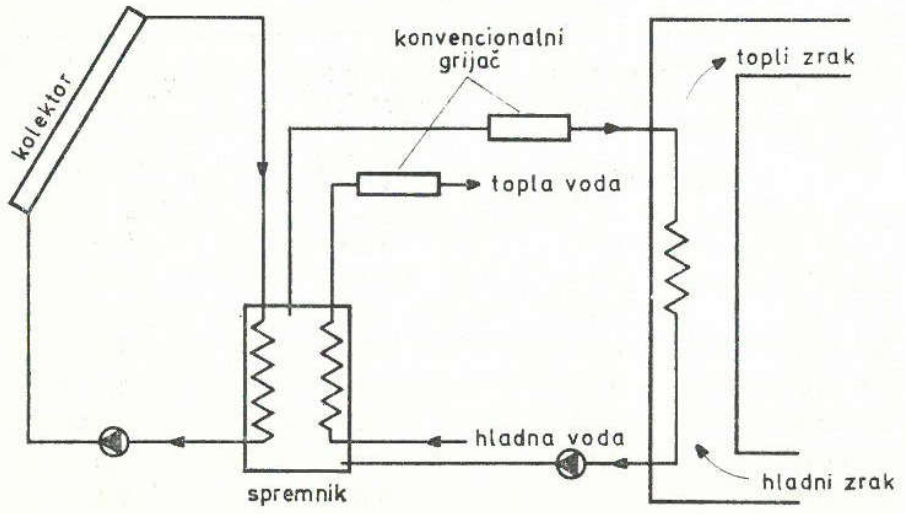
Slika 4.39. Toplinski spremnik s vodom (sunčani bojler)

Kamen je također dobar materijal jer je jeftin, ali mu je volumni toplinski kapacitet relativno malen. Vodeni spremnici obično se koriste do 100 °C, a pod tlakom i za više temperature, ali najviše do oko 200 °C. Jedna je od prednosti kamena pred vodom što se može upotrijebiti i za više temperature od 100 °C.

Komercijalno se za kolektore u kojima je voda radni fluid za prijenos topline obično kao spremnik koristi toplinski izolirani rezervoar napunjen vodom (sl. 4.39). Često se toplina iz kolektora u spremnik prenosi preko izmjenjivača topline tako da se tekućina u kolektorskom krugu ne miješa s vodom u spremniku. Izmjenjivač je svakako potreban ako je u kolektorskom sustavu otopina antifriza.

Na slici 4.40. prikazan je jedan takav sustav u kojem se kao spremnik koristi rezervoar napunjen vodom. Topla voda iz spremnika koristi se za zagrijavanje zgrada ili za grijanje sanitarne vode za domaćinstvo. Topla voda iz spremnika može se koristiti i za zagrijavanje zraka preko izmjenjivača topline voda - zrak tako da se — premda su kolektori s tekućinom — prostorije griju toplim zrakom.

Temperatura vode u spremniku može biti svuda jednaka što se postiže pri većim brzinama protoka vode iz spremnika kroz kolektor ili kroz sustav za centralno grijanje. Druga je mogućnost da pojedini slojevi vode imaju različite temperature (tj. u spremniku postoji temperaturni gradijent) — slojevi vode pri vrhu spremnika više su temperature, a pri dnu spremnika voda je najhladnija. Topla voda iz kolektora dolazi pri tome na vrh spremnika, a hladna voda s dna odlazi u kolektor. Slojevi se vode ne miješaju, nego se spuštaju prema dolje tako da se postupno cijeli spremnik puni sve toplijom i toplijom vodom. Topla voda uzima se s vrha spremnika, a istodobno na dno dolazi hladna iz vodovodne mreže. (Takav slojeviti sprem-



Slika 4.40. Shematski prikaz solarnog sistema s vodenim spremnikom

nik jest npr. obični električni bojler u kupaonici odnosno kuhinji.) Proračuni pokazuju da je rad sustava s jednom ili drugom vrstom spremnika približno isti: za prvu vrst protok je veći što povećava efikasnost, a temperatura je kolektora malo veća što smanjuje efikasnost; za drugu je vrst obratno [Lu 80].

Jedan od praktičnih problema takvih sustava jest relativno velik i skup rezervoar za spremnik koji mora biti nepropustan i otporan na koroziju. Osobito su skupi spremnici velikih volumena.

Rezervoari se izrađuju od čelika, betona, plastičnih materijala, umjetnih smola i sl. Najekonomičniji su vjerojatno rezervoari od betona obloženi s unutrašnje strane slojem koji ne propušta vodu. Čelične rezervoare treba također obložiti zaštitnim slojem s unutrašnje strane da bi se spriječilo korozivno djelovanje vode.

Spremnik (a i cijevi za dovod vode u spremnik i odvod iz njega) potrebno je dobro toplinski izolirati tako da bi gubici topline bili što manji. (Ako se spremnik nalazi u prostoriji koju zagrijavamo, gubici iz spremnika zapravo i nisu gubici.)

Toplinski gubici spremnika mogu se prikazati izrazom

$$\Phi_g = k_s A_s (T_s - T_z), \qquad (4.92)$$

gdje su: Φ_g toplinski tok,

k_s koeficijent gubitaka topline iz spremnika,

A_s vanjska površina spremnika,

T_s temperatura materijala spremnika i

T_z temperatura okolice u kojoj je smješten spremnik.

Obično se spremnik dobro izolira tako da mu je koeficijent gubitaka topline k_s što manji. Tako npr. za staklenu vunu toplinska vodljivost jest $\lambda = 0{,}038\ \mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$ i za izolaciju spremnika debelu 2 cm koeficijent prijelaza topline iznosi

$$k_s = \frac{\lambda}{d} = 1{,}9\mathrm{W/m^2K} = 6{,}8\mathrm{kJ/hK}.$$

Ako je Φ_u toplinski tok koji iz kolektora ulazi u spremnik, Φ_i toplinski tok koji je izašao iz spremnika (npr. u obliku tople vode za domaćinstvo ili centralno grijanje), tada je

$$m_s c_s \frac{\Delta T_s}{\Delta \tau} = \Phi_u - \Phi_i - k_s A_s (T_s - T_z), \qquad (4.93)$$

m_s je masa materijala u spremniku,

c_s je njegov specifični toplinski kapacitet,

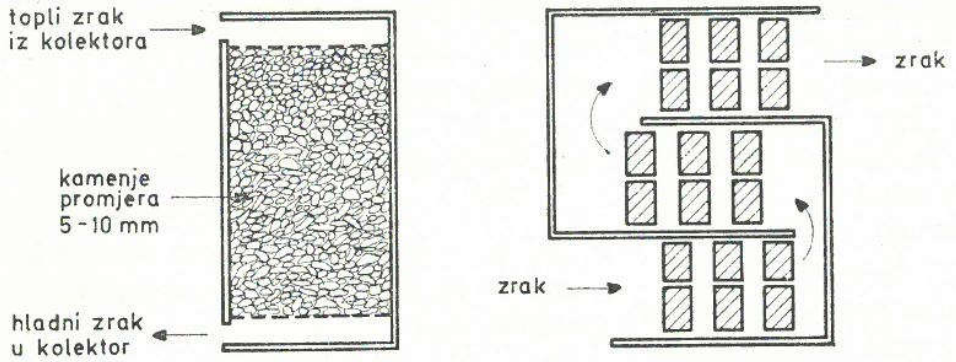
ΔT_s je promjena temperature materijala za vrijeme $\Delta\tau$ i

A_s je površina spremnika.

Pri tome pretpostavljamo da je temperatura materijala u spremniku svuda jednaka, tj. da nema slojeva različitih temperatura što nije u praksi uvijek ispunjeno.

Što je veći volumen spremnika, kolektor prikupi više energije jer radi na nižim temperaturama. Međutim, povećanjem volumena raste i vanjska površina spremnika pa i toplinski gubici. Zato postoji optimalni volumen spremnika. Računi pokazuju da je optimalni volumen vodenog spremnika u sustavu za dobivanje tople vode oko 300 do 400 litara vode, dakle oko 50 do 60 litara vode po četvornom metru kolektorske površine [Ma 77, Ku 79]. Upotreba većih spremnika od optimalnih vrlo malo pridonosi povećanju efikasnosti. Na primjer dobivena energija u sustavu sa spremnikom volumena 1 000 L samo je za oko 2% veća od energije dobivene istim sustavom sa spremnikom volumena 400 L. Međutim, ako se upotrijebi premalen spremnik (npr. 100 L) efikasnost sustava smanjuje se za oko 20% [Br 77, Ma 77]. Slično vrijedi i za sustave za zagrijavanje prostorija. Komercijalni sustavi za dobivanje tople vode za domaćinstvo obično imaju volumen spremnika od 300 do 400 litara za kolektor površine od 4 do 6 $\mathrm{m^2}$.

Ako se toplina prenosi s pomoću zraka, u spremniku može biti obično kamenje ili neki drugi čvrst materijal naslagan tako da zrak može cirkulirati između tog materijala i na taj način izmjenjivati toplinu (sl. 4.41). Materijal (voda, parafin i sl.) može se nalaziti u manjim posudama (npr. bocama, plastičnim vre-



Slika 4.41. Spremnici kroz koje struji zrak

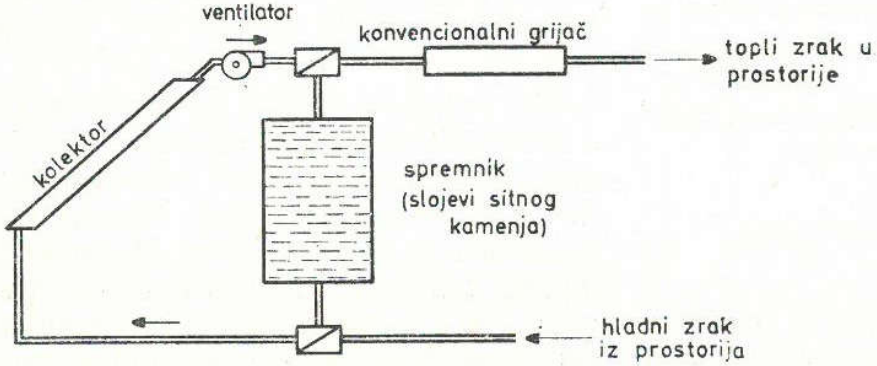
ćicama i sl.) naslaganim tako da se omogući strujanje zraka kroz spremnik.

Od svih čvrstih materijala najčešće se u spremnicima upotrebljava usitnjen kamen ili riječni šljunak. Iako se na prvi pogled upotreba kamenja čini najekonomičnijom, postoji mnogo teškoća u izvedbi spremnika s kamenjem. Budući da je potrebno oko 400 do 1 000 kg usitnjenog kamenja po četvornom metru kolektora, dosta je teško nabaviti kamenje određene veličine i izraditi spremnik. Kamenje (šljunak) u takvu spremniku treba biti približno iste veličine (promjera 3—5 cm), čisto, bez sitnih čestica (pijeska) između pojedinih komada, kako bi zrak mogao lagano cirkulirati kroz spremnik. Ako je promjer kamenja manji, potrebna je veća snaga ventilatora za protok zraka, a ako je kamenje većih dimenzija izmjena je topline lošija. Obično se uzima 0,2—0,3 m^2 kamenja po četvornom metru površine kolektora [Lö 81] pa sustav s kolektorima površine 50 m^2 treba spremnik volumena oko 10 do 15 m^3. Spremnici za kamen mogu se izrađivati od betona, željeza ili drveta. Za sustav kolektora površine 50 m^2 dimenzije takvog spremnika mogle bi biti npr. 3 m · 2 m · 2 m. Brzina protoka zraka kroz spremnik kolektora jest reda veličine 5 m/min.

Na slici 4.42. prikazan je tipičan sustav za grijanje s pomoću toplog zraka. Zagrijan u kolektorima, zrak se vodi ili u spremnik gdje predaje toplinu ili se upotrebljava izravno za zagrijavanje prostorija. Sanitarna topla voda može se dobiti preko izmjenjivača topline voda — zrak i eventualno pomoćnog grijača koji je dogrije na potrebnu temperaturu.

Topli zrak iz kolektora obično ulazi pri vrhu spremnika, struji oko kamenja, predaje im toplinu, hladi se, izlazi na dnu spremnika i odlazi u kolektor; ciklus se zatim ponavlja. U spremniku tako nastaje temperaturni gradijent, sloj na vrhu spremnika ima najvišu temperaturu (npr. 60 °C). Topli zrak iz kolektora može se odvoditi i izravno u prostorije i zagrijavati ih ili u izmjenjivač topline zrak —voda u sustavu za dobivanje sanitarne tople vode.

Pri uzimanju topline iz spremnika hladni zrak iz prostorija ulazi na dnu spremnika, prolazi oko kamenja, grije se i na vrhu spremnika dobivamo topli zrak za zagrijavanje prostorija [Lö 81].



Slika 4.42. Sistem za grijanje prostorija s toplim zrakom

4.3.3. Uskladištenje energije korištenjem latentne topline

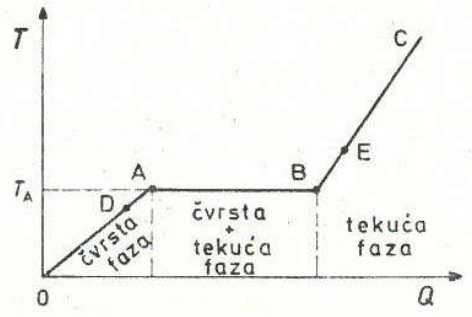
Kad se energija u obliku topline dovodi nekom materijalu, njegova se unutrašnja energija povećava i kao posljedica toga povećava mu se temperatura (zagrijavanje) ili mijenja faza (latentno zagrijavanje). Akumuliranje s pomoću latentnog zagrijavanja koristi npr. toplinu taljenja nekog kemijskog spoja, npr. neorganskih soli, parafinskih voskova itd. Materijal u spremniku, naime, utjecajem dovedene topline prelazi iz čvrstog u tekuće stanje na određenoj temperaturi — koja je za čiste tvari konstantna i odgovara talištu. Jedan od najuobičajenijih materijala za spremanje energije s pomoću takve metode — Glauberova sol tali se na 32 °C, parafin na 40 °C itd.

Toplina koja se apsorbira ili sprema u tvari za vrijeme mijenjanja faze jest

$$Q=mL, \qquad (4.94)$$

gdje je m masa tvari, a L specifična toplina faznog prijelaza potrebna da tvar pređe iz jedne u drugu fazu.

Kada se tvar nalazi u čvrstom kristalnom stanju, molekule su poredane u kristalnoj rešetki i titraju oko položaja koji su određeni minimalnom potencijalnom energijom molekule. Titranje svake molekule superpozicija je vrlo mnogo harmoničkih titranja kojih frekvencije ovise o molekularnim silama. Dovođenjem topline raste titranje i srednja kinetička energija, što se očituje kao porast temperature tvari. Na slici 4.43. prikazan je T—Q dijagram grijanja neke čiste kristalne tvari. Područje OA odgovara zagrijavanju čvrste faze tog materijala. Kad temperatura dosegne talište (T_A na sl. 4.43), uzbuda molekula dovoljno je velika da većina molekula napusti svoja mjesta u rešetki i rešetka se počinje raspadati: tvar se tali, čvrsta faza prelazi u tekuću. Sve dok se sva tvar ne rastali, energija koja se u obliku topline dovodi tvari troši se na gibanje i sudaranje molekula i uvjetuje povećanje potencijalne energije molekula, a srednja kinetička energija (dakle i temperatura) pri tom ostaje konstantna (dio dijagrama AB na sl. 4.43). Kad se sva tvar rastali, daljnje dovođenje topline ponovno povećava temperaturu tekućine (pravac BC na sl. 4.43).



Slika 4.43. T—Q dijagram

Spremnici koji koriste latentnu toplinu rade u temperaturnom intervalu oko tališta (dio DABE na sl. 4.43), tako da je temperatura T_D nešto ispod tališta, a T_E nešto iznad tališta tvari.

Ukupna količina topline dovedena tvari u intervalu D—E (sl. 4.43) može se pisati ovako

$$Q=m\int_{T_D}^{T_A} c_1(T)\,\mathrm{d}T+mL+\int_{T_B}^{T_E} c_2(T)\,\mathrm{d}T \qquad (4.95)$$

gdje su: m masa tvari, c_1 i c_2 specifični toplinski kapacitet čvrste i tekuće faze a mL latentna toplina taljenja.

Odvođenjem topline iz tvari, događa se obratan proces: tekućina se hladi do temperature T_B, očvršćuje na toj temperaturi ($T_B=T_A$) te se nastala čvrsta faza hladi do temperature T_D.

Zbog relativno velikih specifičnih latentnih toplina, može se energija spremati u relativno malom volumenu i uskom temperaturnom intervalu — to je jedna od bitnih karakteristika takve metode. Na primjer za uskladištenje energije 1 MJ u temperaturnom intervalu $\Delta T=20$ K potrebno je oko 12 dm^3 odnosno (12 kg) vode, 27 dm^3 odnosno 60 kg kamena ili 3,1 kg Glauberove soli ($Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O$). Glauberova sol može uskladištiti oko 6 puta više topline nego voda istog volumena. U tablici 4.25. prikazane su potrebne količine raznih materijala za uskladištenje

Tablica 4.25. Uskladištenje toplinske energije iznosa 40 MJ

Materijal	voda	kamen	Glauberova sol	parafin
spec. topl. kapacitet/kJ/(kg K)	4,2	0,84	2,1	2,9
spec. latentna toplina/kJ/kg	—	—	250	180
gustoća/ (kg/m³)	1 000	2 200	1 460	890
masa materijala/kg	480	2 400	138	168
obujam materijala/m³	0,48	1,08	0,094	0,19
omjer obujma spremnika s vodom i obujma spremnika ispunjenog odgovarajućim materijalom	1	2,3	0,2	0,4

energije 40 MJ. (40 MJ prosječna je dnevna potreba energije za toplu vodu u domaćinstvu.)

Posebna nada polaže se u parafine kao sredstvo za uskladištenje topline [Ma 81]. Postoji više od 20 vrsta parafina koji bi se mogli primijeniti u spremnicima. Parafini su zasićeni ugljikovodici C_xH_{2x+2} relativne velike specifične topline taljenja (150 kJ/kg do 250 kJ/kg), s talištem u intervalu od oko 10 °C do 70 °C. Ne djeluju korozivno na konteiner, nisu otrovni, relativno su jeftini i imaju još neke prednosti. Međutim, pri njihovoj primjeni postoje i neki problemi (mala toplinska vodljivost, velika promjena volumena pri promjeni faze itd.).

Spremnici u kojima se koristi latentna toplina (latentno zagrijavanje) imaju i druge prednosti pred onima u kojima se koristi samo metoda zagrijavanja: interval je radnih temperatura manji, kolektor radi na nižoj temperaturi, manji su jer je za akumuliranje određene energije potrebno manje materijala nego u metodi zagrijavanja itd.

Metoda latentnog zagrijavanja tek se razvija; istražuju se pogodni materijali i nastoje riješiti tehnički problemi. Najviše je istraženo uskladištenje s pomoću Glauberove soli i takvi se spremnici već pojavljuju na tržištu.

Iako se istražuju različite metode uskladištenja toplinske energije, ipak većina komercijalnih sustava koristi prvu metodu uskladištenja (toplinski kapacitet), upotrebljavajući uglavnom spremnike s vodom. U literaturi se spominju i spremnici koji koriste kemijske procese, ali potrebno ih je još istraživati prije nego se spremnici temeljeni na transformaciji faze i kemijskim reakcijama počnu mnogo primjenjivati.

4.3.4. Ostale metode uskladištenja energije

Osim korištenjem toplinskih kapaciteta i latentnih toplina, termička se energija u principu može uskladištiti i s pomoću raznih reverzibilnih kemijskih reakcija. Spomenut ćemo neke od njih. Pri razrjeđivanju sulfatne kiseline oslobađa se toplina, a dovođenjem topline povećava se koncentracija otopine sulfatne kiseline [Ma 81]. Toplina otapanja nekih soli (npr. KNO_3, $NaNO_3$, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, NH_2-$CONH_2$ i dr.) relativno su velike, a topljivost ovisi o temperaturi. Tako je npr. za zasićenu vodenu otopinu KNO_3 u vodi promjena entalpije (tj. toplina otapanja) $\Delta H = -24$ kJ/mol, a temperaturni je gradijent topljivosti pozitivan ($\bar{\alpha} = 0{,}18$ mol/LK). Takvo se svojstvo može iskoristiti za spremanje toplinske energije. Dovodimo li toplinu u takvu zasićenu otopinu (npr. KNO_3 u vodi), otopina se grije, postaje nezasićena i sposobna da otopi dodatne količine soli pri čemu se toplina apsorbira. Hlađenjem

otopine nastupa kristalizacija i oslobađa se vezana energija. Na primjer otopina načinjena od 125 kg kalij-nitrata i 147 L vode (volumen je otopine 205 litara) može uskladištiti istu količinu topline kao i spremnik s 320 L vode [Ku 80]. Otopina načinjena od 100 kg Glauberove soli ($Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$) i 100 L vode (volumen je otopine 160 L) može uskladištiti u temperaturnom intervalu od 15 °C do 25 °C istu toplinu kao i spremnik od 400 L vode (17 MJ). Potrebno je međutim, ispitivanjem ocijeniti praktičnost i ekonomičnost takva uskladištenja topline.

Uskladištenje toplinske energije za dulje razdoblje može se ostvariti u tlu ili podzemnim rezervoarima (bazenima) vode, koristeći pri tome toplinske kapacitete velikih (izoliranih) volumena zemlje odnosno vode. Međutim, pojavljuju se razni praktični problemi pri pripremanju i korištenju takvih dugoročnih (sezonskih) spremnika.

Osobito je zanimljiv slani bazen za skupljanje i uskladištenje sunčane energije [Ta 81]. To je bazen dubine 1—2 m napunjen vodenom otopinom anorganske soli (NaCl ili $MgCl_2$) tako da je masena koncentracija soli pri vrhu malena (oko 20 kg/m³) i raste s dubinom pa je pri dnu otopina gotovo zasićena (oko 300 kg/m³). Tako se dobiva vertikalna raspodjela slojeva razne gustoće od oko 1 000 kg/m³ pri vrhu do 1 300 kg/m³ pri dnu. Kad Sunčevo zračenje upada u takav bazen, ono se apsorbira kroz vodu odnosno u crno obojenom dnu bazena. Tako slojevi pri dnu postaju sve topliji, a budući da gradijent gustoće sprečava konvekciju, ne dižu se prema vrhu, slojevi se ne miješaju i u bazenu se uspostavlja temperaturni gradijent. Dok je površinski sloj bazena na temperaturi okoline ili nešto većoj od nje, temperatura donjih slojeva sve je veća i veća što su dublje pod površinom i pri dnu može narasti i do 90 °C. Slani sunčani (solarni) bazen u kojem nema konvekcije služi dakle kao kolektor i spremnik sunčane energije. Jedan od problema pri izradi jest osiguranje nepropusnosti, odnosno sprečavanje propuštanja u okolna zemljišta.

Toplina uskladištena u sunčanom solarnom slanom bazenu može se koristiti za grijanje (hlađenje) prostorija, dobivanje mehaničke i električne energije i druge primjene. S pomoću njih se može ostvariti sezonsko uskladištenje: toplina skupljena ljeti može se koristiti zimi. Izrađene su manje termoelektrane koje koriste toplinu iz takvih bazena, a projektiraju se i termoelektrane snage nekoliko megavata [Ta 81].

Jedan od načina uskladištenja sunčane energije jest i dobivanje goriva koje izgaranjem daje energiju. Upotrebom nekonvencionalnih energetskih izvora (npr. sunčane energije) mogao bi se iz vode (elektrolizom ili pirolizom) proizvesti vodik koji bi se koristio ili uskladištavao za kasniju upotrebu [Ve 81]. Tako dobiveni vodik mogao bi se upotrijebiti izravno kao gorivo (kuhanje, grijanje, pogon vozila), u industriji ili pak za proizvodnju električne energije. Mogao bi se koristiti na mjestu proizvodnje ili cjevovodima odvoditi od mjesta proizvodnje do potrošača.

Vodik ima niz prednosti pred fosilnim gorivima: ima ga u neograničenim količinama u vodi, može se uspješno pretvoriti u druge oblike energije, pri izgaranju se dobiva voda, dakle nema štetnih produkata koji onečišćuju atmosferu pa se iz njega bez polucije atmosfere mogu dobiti druge vrste energije (toplinska, električna).

Jedan od problema jest uskladištenje. Vodik se može uskladištiti na tri načina: u obliku plina, kao tekući vodik i u obliku hidrida. Spremanje tekućeg vodika povezano je s nizom problema (veliki volumen spremnika, dobra izolacija, niske temperature itd.). Perspektivna je mogućnost uskladištenja vodika u obliku metalnih hidrida. Apsorpcijom vodika u nekim materijalima (metalima ili legurama) nastaju hidridi a oslobađa se toplina. Dovođenjem topline (ili smanjenjem tlaka) reakcija se odvija u suprotnom smjeru i oslobađa vodik. Tako npr.

magnezij veže vodik u obliku labilnog spoja, magnezij(II)-hidrida:

$$Mg + H_2 \rightleftarrows MgH_2; \quad \Delta Q > 0$$

gdje je ΔQ (oslobođena) toplina.

Osim magnezijeva može se koristiti niz drugih hidrida, npr. TiH_2, VH_2 itd. [v. npr. Ve 81]. Hidriranje je vrlo praktična metoda uskladištenja vodika; izbjegavaju se nepogodnosti i opasnosti povezane s upotrebom tekućeg vodika ili vodika pod visokim tlakom. Takav način uskladištenja energije ispituje se a postignuti rezultati dosta obećavaju.

Upotreba vodika još nije ekonomski prihvatljiva: danas je elektrolizom proizveden vodik 2 do 4 puta skuplji od fosilnih goriva. Međutim, postoje opravdane nade da će energetski sustav s vodikom dati obilnu čistu energiju u budućnosti [Bo 76, Ve 81].

Energija se može uskladištiti i u obliku mehaničke energije upotrebom zamašnjaka velikih momenata tromosti. Kinetička energija rotacije $\frac{1}{2} I\omega^2$ može biti znatna pri velikom broju okretaja zamašnjaka i mogla bi se upotrijebiti za dobivanje električne energije u elektranama ili za pogon vozila. Proračuni pokazuju da bi masa takvih zamašnjaka za pogon automobila bila reda veličine 100 kg i da bi takva vozila bila ekonomičnija od vozila na benzinski pogon. Takvim načinom mogu se uskladištiti ograničene količine energije zbog napetosti koje u materijalu nastaju zbog centripetalne sile, a one ne smiju prijeći određene (maksimalne) vrijednosti. Pri tome je bitni faktor čvrstoća i gustoća materijala, a da bi se postigla maksimalna gustoća spremljene energije poželjno je za danu čvrstoću izabrati najlakši materijal. U svijetu postoji velik interes za istraživanje pojedinih materijala i izvedbu takvih zamašnjaka. Međutim, čini se da primjene zamašnjaka za uskladištenje mehaničke energije dobivene iz solarne u budućnosti neće biti.

Poseban je problem uskladištenje sunčane električne energije. Električna energija dobivena iz sunčane mogla bi se uskladištiti i upotrebom kemijskih akumulatora (npr. olovnoga) koji bi se punili za vrijeme sunčanog razdoblja, a davali energiju kada nije sunčano. Današnji fotonaponski sustavi obično koriste olovne akumulatore kao spremnike energije. Akumulatori se pune za vrijeme kada je insolacija dovoljno velika, a iz njih se uzima energija kad solarne ćelije zbog nedovoljne insolacije ne mogu opskrbiti potrošač s dovoljno energije. Moduli solarnih ćelija (tj. sustavi u kojima su ćelije spojene serijski i paralelno da bi se osigurao potreban napon i struja) spojeni su s akumulatorom preko bloking-diode koja sprečava pražnjenje akumulatora kad nije dovoljna insolacija i preko uređaja koji isključuje punjenje akumulatora kad je akumulator već napunjen. Takvi sustavi solarnih ćelija i olovnih akumulatora pogodni su jedino za manje potrošače (do 1 kW); za veće snage moraju se primjenjivati drugi načini uskladištenja.

Cijena današnjih olovnih akumulatora (oko 60 $/kWh) još je visoka te takvi sustavi nisu konkurentni, osim tamo gdje drugi izvori nisu dostupni, praktični ili ekonomični. Osim toga olovni akumulatori imaju određene mane: relativno kratko trajanje pri režimu neprekidnog punjenja i pražnjenja (oko 1 500 ciklusa), malen specifični kapacitet uskladištenja (oko 20 W h/kg) i dr. Istražuju se i druge pogodne vrste akumulatora, pa se očekuje da će u drugim vrstama akumulatora takve mane biti uklonjene ili barem smanjene. Akumulatori pogodni za upotrebu u sustavima solarnih ćelija trebaju imati velik specifični kapacitet uskladištenja (oko 100 W h/kg), vijek trajanja oko 2 500 ciklusa punjenja—pražnjenja, a ne bi smjeli stajati više od 30 $/kWh.

Osim u akumulatore solarna električna energija može se uskladištiti i na druge načine. Jedan od njih jest crpljenje vode na veće visine, tj. povećanje njezine potencijalne energije koja se, kad je potrebno, može u turbinama ponovno pretvoriti u električnu energiju. Problem je pri tome izgradnja i smještaj akumulacijskih jezera, veličina takvih sustava

i dr. Takav način uskladištenja pogodan je samo za velike sustave.

4.4. Solarno grijanje i hlađenje

4.4.1. Uvod

Jedna od najvažnijih primjena Sunčeve energije jest njezina niskotemperaturna toplinska konverzija, tj. dobivanje tople vode, zagrijavanje prostorija i dobivanje topline za industrijske procese. Metode za tu primjenu već su dosta razvijene, svakim se danom usavršavaju i na tržištu se pojavljuju razni solarni sustavi, osobito za grijanje vode.

Mnogo energije troši se na grijanje prostorija i dobivanje tople vode za domaćinstva, hotele, bolnice i sl., za potrebe raznih industrijskih procesa. Korištenjem Sunčeve energije mogla bi se smanjiti potrošnja drugih izvora.

Do sada se nije osobito pazilo na upotrebu Sunčeve energije u industrijskim procesima. Procjenjuje se da se u industriji troši oko 40% energije, a od toga jedan dio i za dobivanje tople vode do 100 °C koja bi se mogla proizvesti (barem djelomično) s pomoću raznih solarnih kolektora. Sunčana energija mogla bi se, naime, primijeniti za predgrijavanje vode potrebne za određeni tehnološki proces, a zatim bi se ta voda na konvencionalni način zagrijala do potrebne temperature. Velike količine topline skupljene za vrijeme ljeta, mogle bi se u industriji, za razliku od domaćinstva, potpuno iskoristiti. Takva primjena mogla bi osobito uspješna biti u prehrambenoj industriji kojoj su potrebne velike količine vode relativno niske temperature (do 100 °C); tako bi se s pomoću ravnih sunčanih kolektora ostvarile odgovarajuće uštede konvencionalnih izvora.

Prve primjene sunčane energije u našoj zemlji očekuje se upravo u području toplinske konverzije. Neke naše tvornice već rade prve sunčane kolektore, a pojavljuje se i pokoji sunčani uređaj. U zadnjih nekoliko godina pojavilo se u našoj literaturi niz radova o toplinskoj konverziji Sunčeve energije, a održano je i nekoliko znanstvenih skupova o temama toga područja.

U ovom poglavlju najviše ćemo govoriti o sustavima za dobivanje tople vode; principi rada koje ćemo tu upoznati mogu se primijeniti i na složenije sustave za grijanje i hlađenje prostorija. Za projektiranje sunčanih (solarnih) sustava i pronalaženje optimalnih rješenja koristi se simulacija rada računskim putem ili s pomoću složenih kompjutorskih programa ili jednostavnijim proračunima s pomoću džepnih računala odnosno semiempiričkih relacija i dijagrama. O proračunu jednog takvog tipičnog sustava govorit ćemo u poglavlju 4.4.4.

Postoje aktivni i pasivni sustavi za grijanje prostora; opisat ćemo ukratko obje te vrste zagrijavanja, njihove principe rada i osnovne karakteristike.

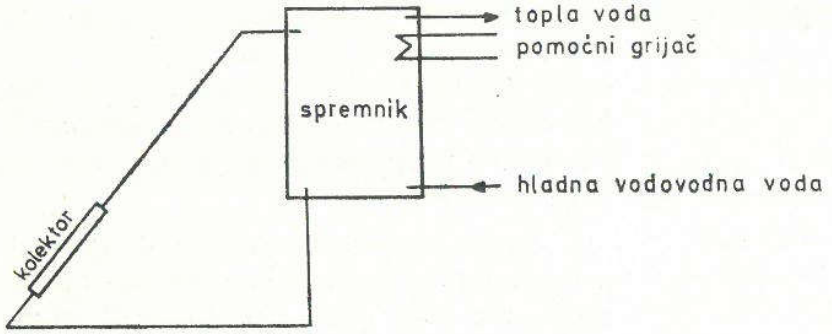
Na kraju ćemo govoriti o hlađenju s pomoću sunčane energije. Prikazat ćemo dva aktivna sustava za hlađenje i klimatizaciju: apsorpcijski uređaj u kojem se koristi toplinska energija dobivena iz sunčane i kompresijski uređaj koji koristi mehanički rad dobiven s pomoću sunčane energije.

4.4.2. Solarni sustavi za dobivanje tople vode

Od svih primjena Sunčeve energije, dobivanje je tople vode najjednostavnija i najraširenija. Razloga za to ima više, a najvažniji su visoka efikasnost takvog sistema i relativno malo početno ulaganje u njegovu izgradnju.

Topla voda potrebna je tokom čitave godine pa se solarni sustav stalno koristi (za razliku od onog za grijanje prostorija) i tako brže amortizira.

Takvi su se sustavi počeli primjenjivati već prije pedesetak godina, ali su ih šezdesetih godina ovog stoljeća drugi, jeftiniji izvori energije (plin, električna



Slika 4.44. Termosifonski sistem

energija) sasvim istisnuli. Nakon početka energetske krize 1973. interes za takve uređaje ponovno počinje naglo rasti i danas je mnogo takvih sistema (koji se mogu komercijalno nabaviti) instalirano i u upotrebi širom svijeta.

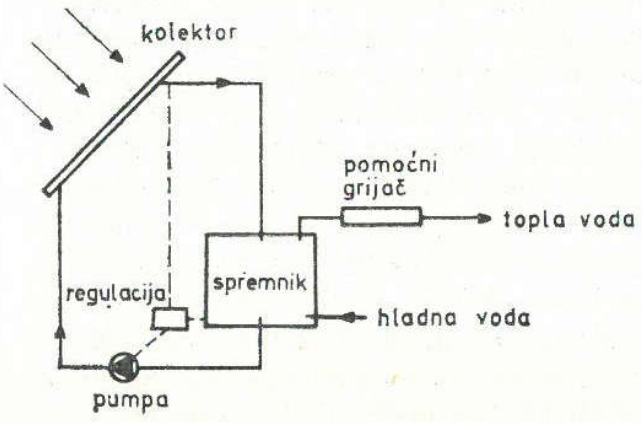
Najjednostavniji sustav za sunčano grijanje vode radi na tzv. termosifonskom principu. Ravni kolektor nalazi se npr. na krovu zgrade i spojen je sa spremnikom koji se nalazi iznad njega (sl. 4.44). Voda se zagrijava prolazeći kroz sustav i cirkulira zbog razlike gustoće između toplije vode na vrhu i hladnije na dnu sustava. Zagrijavana se voda zbog manje gustoće diže nad hladnu vodu i tako nastaje prirodna cirkulacija koja omogućuje prenošenje topline iz kolektora u spremnik.

Prednost je takvih sustava jednostavnost i efikasnost osobito u područjima s velikom insolacijom. Za njihov pogon nisu potrebne pumpe pa ni energija za pogon tih pumpi. Međutim, uz niz prednosti imaju i mana. Spremnik mora biti iznad kolektora, najmanje oko 20 cm iznad gornjeg kolektorskog ruba, te u potkrovlju mora biti dovoljno mjesta za teški spremnik što je katkad praktični problem. Da bi se omogućio nesmetan i efikasan protok, cijevi između kolektora i spremnika moraju biti što šire (promjera većeg od 2 cm) i što kraće. Brzina protoka u takvim sustavima relativno je vrlo malena: 30 do 40 L vode u satu i za četvorni metar kolektora za vrijeme sunčanog razdoblja. Problem pri upotrebi takvog sustava jest i opasnost od smrzavanja u razdobljima niskih temperatura; to se može spriječtiti upotrebom antifriza ili ispuštanjem vode iz kolektora. Obično se termosifonski sustav upotrebljava bez izmjenjivača topline, ali ako se u kolektorskom krugu upotrebljava otopina antifriza mora se upotrijebiti specijalna izvedba izmjenjivača koja usprkos malenoj brzini protoka omogućuje uspješnu izmjenu topline.

Na svjetskom tržištu nude se jednostavni komercijalni termosifonski sustavi sastavljeni od kolektora i spremnika u obliku bojlera montiranog iznad kolektora tako da s njim čini jednu (kompaktnu) cjelinu praktičnu za instaliranje na ravnim krovovima, terasama i sl. Površina je kolektora npr. oko 2 m^2, a volumen bojlera oko 100 L: više se takvih jedinica može paralelno spajati i tako povećati kapacitet ustava.

Sustav s ugrađenom crpkom i prisilnom cirkulacijom (sl. 4.45) složeniji je od termosifonskoga, međutim, ima i niz prednosti pa se u novije vrijeme sve više upotrebljava. U takvom sistemu spremnik ne mora biti iznad kolektora (pa se npr. može smjestiti u podrumu zgrade), protok može biti brži, lakše je izraditi izmjenjivače topline i sl.

Dvije su vrste takvih sustava: sustav s izmjenjivačem topline u kolektorskom

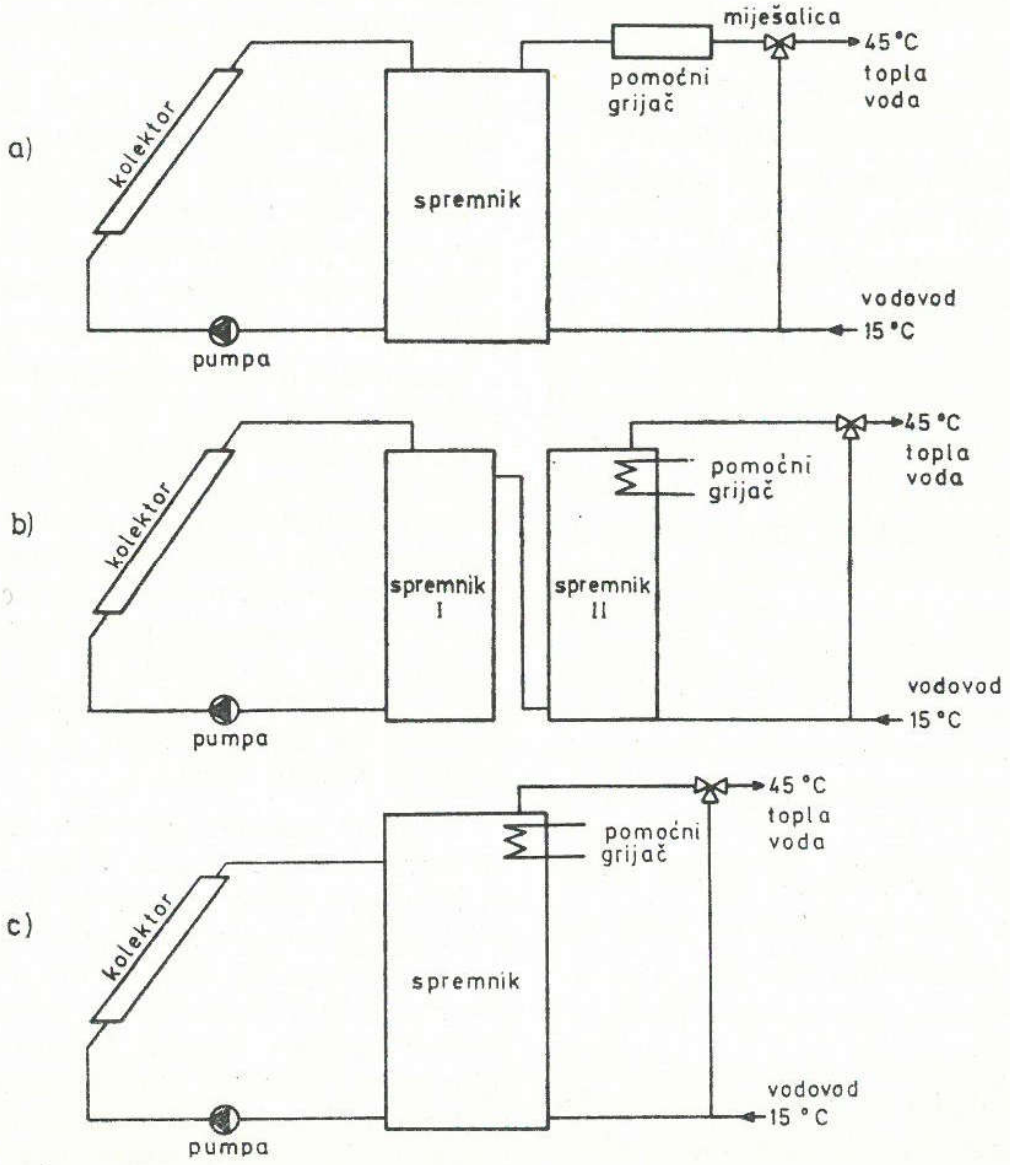


Slika 4.45. Sistem s crpkom

krugu i sustav bez izmjenjivača. U prvom tipu fluid koji struji kroz kolektor (voda, zrak, antifriz) nije isti kao u spremniku, što je posebno praktično za područja gdje postoji opasnost od smrzavanja vode u kolektorskom krugu. Ugrađivanje izmjenjivača topline, međutim, povećava trošak i smanjuje (oko 15%) efikasnost sustava. U izravnim sustavima (bez izmjenjivača) voda iz spremnika prolazi izravno kroz kolektor, tu se zagrijava i vraća natrag u spremnik.

Aktivni sustav za dobivanje tople vode sastoji se od ovih glavnih dijelova: kolektora, spremnika, pumpe, automatike i regulacije i konvencionalnog (pomoćnog) grijača (elektricitet, plin i sl.). Toplina skupljena u kolektoru odvodi se u spremnik. Pumpa radi samo kad je temperatura fluida u kolektoru viša od temperature u spremniku, tako da se izbjegava hlađenje kolektora. To se postiže diferencijalnim termostatom koji uspoređuje temperaturu na izlazu kolektora i temperaturu pri dnu spremnika i uključi pumpu kad je temperatura vode u kolektoru malo viša nego u spremniku, odnosno isključi je kad ta razlika temperature postane vrlo malena. Pomoćni (konvencionalni) grijač dogrijava vodu do potrebne temperature kad Sunčevo zračenje nije dovoljno (zimi, za oblačna vremena i sl.).

Na slici 4.46. prikazano je nekoliko izvedbi sustava za grijanje vode. U sustavu na slici 4.46. a pri dnu spremnika (dakle i na ulazu u kolektor) najniža je



Slika 4.46. Nekoliko izvedbi sistema za dobivanje tople vode

temperatura te je takav sustav najefikasniji. Njegova je mana protočni pomoćni grijač koji mora imati veliku snagu. Na slici 4.46.b spremnik je podijeljen u dva dijela, drugi je dio klasični električni bojler koji dogrijava vodu (ako je potrebno). Na slici 4.46. c pomoćni (električni) grijač uključen je izravno u spremnik.

Sustav radi efikasnije što je temperatura apsorbera manja. Da bi sustav na slici 4.46.c efikasnije radio potrebno je da u spremniku postoji temperaturni gradijent, da temperatura vode pri dnu spremnika (gdje se nalazi odvod za kolektor) bude što niža. Zato je potrebno (pomoćni) električni grijač ugraditi pri vrhu spremnika iznad dovoda vode iz kolektora i upotrijebiti spremnik u obliku visokog i užeg valjka da bi se postigla slojevitost odnosno temperaturni gradijent.

Sustav za dobivanje tople vode za domaćinstvo obično se sastoji od 4 m^2 — 6 m^2 kolektorske površine i spremnika od 200 do 400 litara vode (50 L—70 L za svaki četvorni metar kolektora). Potrebna je temperatura tople vode između 45 °C i 60 °C. Obično se pretpostavlja da je potrošnja vode oko 50 do 60 litara po osobi, odn osno 250 do 300 litara u tipičnom domaćinstvu, što odgovara godišnjim energetskim potrebama oko 4 500 kW h. Solarni sustav u sjevernom kontinentalnom dijelu naše zemlje mogao bi osigurati oko 2 500 kW h s neselektivnim odnosno oko 3 000 kW h sa selektivnim kolektorima, a u jadranskom području solarni doprinos bio oko 20% — 25% više.

Ekonomska opravdanost takvih solarnih sustava ovisi o njihovom solarnom doprinosu, proizvodnji energije, o cijeni odnosno vremenu amortizacije. Radi orijentacije napomenimo da je cijena u SAD oko 200 do 400 $ za četvorni metar instaliranog sistema odnosno oko 2 000 $ za čitav sistem [Di 80 .

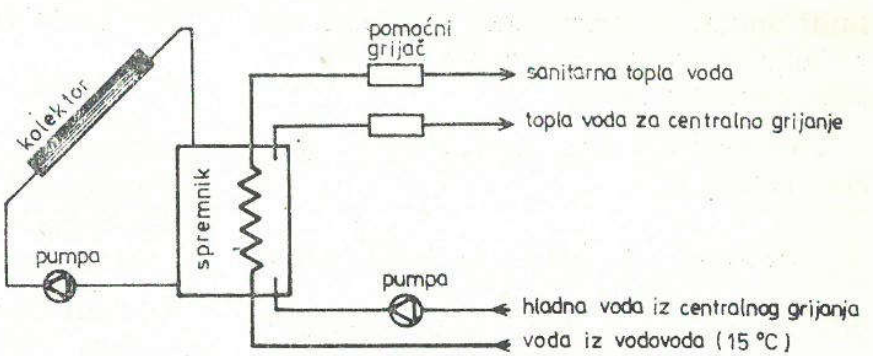
4.4.3. Solarni sustavi za zagrijavanje prostora

Zagrijavanje prostorija jedan je od važnih načina korištenja Sunčeve energije i ono bi u budućnosti, kada postane ekonomski opravdano, moglo pridonijeti znatnijoj uštedi drugih, konvencionalnih izvora energije. Za grijanje prostorija troši se i u našoj zemlji mnogo energije pa su i troškovi svakog domaćinstva za grijanje veliki. Zato je razumljivo da je interes za takvu primjenu sunčane energije vrlo velik.

Sunčano grijanje prostorija može biti aktivno i pasivno. U aktivnim sustavima Sunčeva se energija skuplja kolektorima, pohranjuje u toplinski spremnik i odatle uzima ili u obliku tople vode ili toplog zraka za zagrijavanje prostorija. Pri pasivnom korištenju Sunčeve energije sami elementi zgrade igraju ulogu kolektora i spremnika i toplina se prenosi vođenjem odnosno prirodnom cirkulacijom (konvekcijom) bez dodatnih pumpi, ventilatora i sl. O aktivnim sustavima govorit ćemo u ovom odjeljku, a o pasivnima u idućem.

Izgrađeno je niz solarnih (aktivnih i pasivnih) kuća širom svijeta koje svoje energetske potrebe dobrim dijelom zadovoljavaju s pomoću solarne energije. U takvim kućama obično se dio energetskih potreba (50%—70%) podmiruje sunčanom energijom, a ostatak klasičnim konvencionalnim sustavom koji je tako dimenzioniran kao da solarni ni ne postoji. Međutim, korištenjem solarne energije troškovi za gorivo znatno se smanjuju i tako se postižu uštede.

Solarno grijanje prostora može se ostvariti na više načina. Zagrijani zrak iz kolektora može se koristiti izravno za grijanje ili provoditi kroz spremnik (obično od naslaganog sitnijeg kamenja, odnosno šljunka) da bi se tako uskladištena toplina koristila kasnije. U sustavima s tekućinom (vodom) za grijanje može se upotrebljavati topla voda ili se preko izmjenjivača topline voda—zrak dobiva topli zrak za zagrijavanje prostorija.



Slika 4.47. Solarni sistem s tekućinom

Jedna od izvedbi solarnog sustava sa zračnim kolektorima za zagrijavanje prostorije prikazana je na slici 4.42, a sustav koji koristi kolektore s tekućinom na slici 4.47.

Solarni sustav za centralno grijanje sastoji se uglavnom od ovih dijelova: kolektora Sunčeva zračenja (koji su okrenuti prema jugu i nagnuti pod kutom približno jednakom zemljopisnoj širini mjesta gdje su postavljeni), spremnika topline, radijatora, odnosno odgovarajućih grijaćih tijela, automatike i regulacije, te klasičnog grijača koji daje energiju kad Sunčeva energija nije dovoljna.

Sustav također omogućuje dobivanje sanitarne tople vode s pomoću odgovarajućeg izmjenjivača topline.

Konvencionalni uređaj za zagrijavanje (električni, plinski i sl.) mora biti tako dimenzioniran da zadovolji potrebe kad Sunčev doprinos nije dovoljan; zato mora biti gotovo iste veličine kao da solarnog i nema.

Toplinski spremnik u sistemu za grijanje toplom vodom obično je rezervoar koji sadrži 50 do 120 L vode za svaki četvorni metar površine kolektora, a u sistemu za zagrijavanje toplim zrakom sadrži šljunak veličine 1 do 4 cm i to 0,2—0,3 m^3 za svaki četvorni metar kolektora. Tipični sustav (stambena površina oko 100 m^2) ima kolektorsku površinu oko 50 m^2 i spremnik od oko 4 m^3 do 5 m^3 vode odnosno oko 10 m^3 kamenja.

Toplina potrebna za zagrijavanje zgrada ovisi o vanjskoj temperaturi (T_z) i toplinskim karakteristikama zgrade. Podaci o temperaturi zraka poznati su za mnoga mjesta i mogu se naći u literaturi. U tablici 4.26. navedene su srednje mjesečne vrijednosti temperature zraka ($\bar{T}_z/°C$) za Beograd, Split i Zagreb.

Toplinski gubici neke zgrade mogu se prikazati izrazom

$$\Phi = kA\,(T_r - T_z) = kA\Delta T, \quad (4.96)$$

gdje je Φ tok ukupnih toplinskih gubitaka nastalih prijenosom topline kroz zidove, krov i prozore zgrade i zagrijavanje zraka koji u zgradu ulazi infiltracijom odnosno ventilacijom.

Produkt kA jest toplinska karakteristika pojedine zgrade i određuje se mjerenjem ili proračunom.

Kao referentna temperatura T_r za unutrašnjost zgrade obično se odabire 18 °C, što je malo niže od temperature koja se obično održava u prostorijama (20 °C—22 °C). Namjerno je tako odabrana da bi se na neki način uključila toplina koja dolazi od kućanskih aparata i

Tablica 4.26. Srednje mjesečne temperature zraka

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Beograd	−0,4	1,5	5,9	11,9	16,6	20,2	22,1	21,7	17,7	12,6	7,1	2,2
Split	7,5	8,3	10,5	14,3	19,0	22,9	25,7	25,3	21,6	16,7	12,6	9,1
Zagreb	−0,2	1,9	6,8	11,8	15,9	19,6	21,5	20,6	16,9	11,9	6,1	1,9

ljudi unutar prostorije kao i od pasivnog grijanja Sunčevom energijom kroz zidove, krov i prozore zgrade.

Toplinski tok kroz krov, zidove i prozore jednak je

$$\Phi' = k_k A_k \Delta T + k_z A_z \Delta T + k_p A_p \Delta T, \quad (4,96a)$$

gdje su k_k, k_z i k_p koeficijenti toplinskih gubitaka krova, zidova i prozora, a A_k, A_z i A_p odgovarajuće površine.

Toplinski tok za zagrijavanje zraka koji se infiltrira u zgradu (ventilacijom i sl.) jest

$$\Phi'' = c_z \dot{m} \Delta T = c\rho \frac{dV}{dt} \Delta T \qquad (4.97)$$

gdje je c_z specifični toplinski kapacitet zraka (1 000 J/(kgK), $\dot{m}$ masa zraka koja uđe u zgradu u jedinici vremena, $\rho = 1{,}2$ kg/m^3 gustoća zraka a dV/dt volumen zraka koji uđe u zgradu (odnosno iz nje izađe) u jedinici vremena. Ako pretpostavimo da se cijeli volumen V zraka u zgradi izmjeni jedanput za jedan sat tada je

$$\Phi'' = \frac{c\rho\, V}{3\,600} \Delta T = 0{,}34\, V\, \Delta T.$$

Koeficijenti toplinskih gubitaka ovise o konstrukciji zgrade. Za toplinski dobro izoliranu zgradu tipične su vrijednosti tih koeficijenata:

$k_z = 0{,}4$ W/(m^{2}K) za vanjske zidove,

$k_k = 0{,}3$ W/(m^{2}K) za tavan i krov i

$k_p = 1{,}8$ W/(m^{2}K) za prozore.

Međutim, mnogo zgrada ima lošiju toplinsku izolaciju pa je često $k_z \doteq k_k \doteq$ $\doteq 1$ W/(m^{2}K) i $k_p = 2{,}6$ W/m^{2}K. Za obične jednostruke prozore $k_p \doteq 6{,}5$ W/m^{2}K.

Ukupni koeficijent toplinskih gubitaka za dobro izoliranu zgradu jest oko 6 do 8 W/(m^{2}K).

Produkt kA za neku zgradu određuje se ili iz podataka o konstrukciji zgrade ili iz podataka o toplinskim potrebama zgrade. Ako je npr. pri srednjoj vanjskoj temperaturi 8 °C bilo potrebno $Q = 60$k W h da bi se prostorije unutar zgrade 24 sata održavale na temperaturi koja je ugodna za boravak (20 °C—22 °C), tada je

$$Q = kA\tau\Delta T,$$

odnosno

$$kA = \frac{Q}{\tau\, \Delta T} = 250\ \text{W/K}.$$

Ako se produkt kA računa iz podataka o zgradi, najprije se procijeni koeficijent k za svaki pojedini dio zgrade (npr. zidove) i pomnoži s površinom tog dijela, odredi se infiltracija zraka i zbrajanjem dobije ukupni kA. Ilustrirajmo takav proračun primjerom.

Primjer. Koliki su toplinski gubici u toku jednog dana kuće koja ima krov i zidove površine 300 m^2, a prozore 50 m^2? Pretpostavite da je koeficijent toplinskih gubitaka za krov i zid $k_z = 0{,}35$ W/(m^2 K), a za prozore $k_p = 1{,}8$ W/(m^2 K). Infiltracijom u zgradu uđe 20 litara zraka svake sekunde. Srednja je temperatura okolice 8 °C. (Gustoća je zraka 1,25 kg/m^3, specifični toplinski kapacitet zraka $c_p = 1\,000$ J/(kgK).

Toplinski gubici kuće mogu se procijeniti primjenom izraza (4.96);

$$\Phi = kA\,\Delta T = (k_z A_z + k_p A_p)\,\Delta T + \rho \frac{dV}{dt} c_p\, \Delta T = 2\,210\ \text{W}.$$

Umnožak $k\,A$ za tu kuću jest $\Phi/\Delta T = 221$ W/K, što pokazuje da je vrlo dobro toplinski izolirana.

4.4.4. O proračunu solarnih sustava

Da bi se proračunao rad sustava za dobivanje tople vode i zagrijavanje zgrada iz podataka o Sunčevu zračenju, parametara sustava i podataka o toplinskim potrebama, potrebno je za svaki dan u mjesecu integracijom po satima izračunati doprinos solarne energije. Taj opsežan posao najčešće se obavlja s pomoću kompjutora. Izrađen je niz programa za kompjutorsku simulaciju rada solarnih sustava. Jedan je npr. TRNSYS sa Sveučilišta Wisconsin u Madisonu [Kl 76,Be77].

Na temelju mnogih kompjutorskih simulacija razvijene su semiempiričke metode s pomoću kojih se i bez kompjutora, ali s pomoću raznih dijagrama i empiričkih formula, može odrediti mjesečni solarni doprinos određenog sustava, koristeći mjesečne prosjeke za temperaturu zraka i sunčanu ozračenost (solarnu iradijaciju).

Toplina Q_c koja se skupi kolektorom koristi se dijelom za podmirenje toplinskih potreba (Q_p) a dijelom se uskladištava u spremniku (Q_s). Ta se energetska bilanca za jedinicu vremena može napisati u obliku

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_s + \dot{Q}_p. \qquad (4.98)$$

Obično se rad sustava računa od sata do sata te jednadžba (4.98) integrirana u vremenskom intervalu jednog sata glasi

$$Q_s = A_c F_R [\tau\alpha H_s - k(\bar{T}_u - \bar{T}_z) t_s] - Q_p, \qquad (4.99)$$

gdje je Q_p toplina koja se potroši za jedan sat, H_s satna sunčana ozračenost kolektorske plohe, $\bar{T}_u$ srednja temperatura vode na ulazu u kolektor (odnosno pri dnu spremnika), $t_s = 3\,600$ s i $\bar{T}_z$ srednja temperatura okolnog zraka.

Da bismo jednadžbu (4.99) mogli primijeniti za proračun rada sustava, potrebno je poznavati T_u. Aproksimativno se može umjesto T_u u (4.99) uvrstiti T_{s1} — početna temperatura vode pri dnu spremnika i s pomoću nje izračunati količina topline Q_s uskladištene u spremniku u tom satu. Zatim se primjenom relacije

$$Q_s = m_s c_s (T_{s2} - T_{s1}) \qquad (4.100)$$

izračuna konačna temperatura vode pri dnu spremnika T_{s2} te se postupak nastavlja za idući sat. (Ako se želi postići veća točnost, može se umjesto T_{s1} uzeti srednju vrijednost $(T_{s1} + T_{s2})/2$, ponoviti račun i tako iteracijom točnije odrediti T_{s2}.)

Primjer. Proračunajte rad solarnog sustava za grijanje vode u Splitu za dan u siječnju za koji su satne temperature zraka T_z i satne ozračenosti plohe kolektora Hc dane u tablici 4.27. Površina je kolektora 4 m², $F_R\tau\alpha = 0{,}69$ i $F_R k = 5$ W m^{-2} K^{-1}. Dnevna je potrošnja 280 L vode temperature 60 °C, a troši se kontinuirano, tj. 11,7 L/h. Temperatura je vode iz vodovoda 15 °C. Početna je temperatura vode u spremniku 20 °C. Volumen je spremnika 200 litara.

Tablica 4.27. Temperature zraka i ozračenosti kolektora

Sat	7—8	8—9	9—10	10—11	11—12	12—13	13—14	15—14	15—16
H_c/(MJ/m²)		0,6	1,26	1,71	1,78	1,95	1,76	1,33	0,94
T_z/°C		6	6,5	7	8,2	9,4	9,8	9,4	8,5

Primjenom izraza (4.99) i (4.100) može se izračunati T_{s2} temperatura vode u spremniku na kraju svakog sata od 9 sati do 16 sati. Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.28. Količina topline Q_K skupljena je kolektorima i predana radnom fluidu, količina Q_p uzeta je u obliku predgrijane vode, a $Q_s = Q_K - Q_p$ predana je spremniku i pretvorena u njegovu unutrašnju energiju. Količina topline Q_s računa se relacijom (4.99), a Q_p dobije se s pomoću

$$Q_p = \dot{m}\ c\ (T_{s1} - T_{s2})\ \Delta t,$$

gdje je $\dot{m} = 12{,}7$ L/h, $c = 4\,190$ J/kg.

Tablica 4.28.

Sat	T_z/°C	H_c/(MJ/m²)	Q_c/MJ	Q_p/MJ	Q_s/MJ	T/°C	T_s
7–8							
8–9	6	0,6	0,63	0,25	0,38	0,5	20,5
9–10	6,5	0,87	2,48	0,27	2,21	2,6	23,1
10–11	7	1,18	3,56	0,4	3,16	3,8	26,9
11–12	8,2	1,23	3,56	0,58	2,98	3,6	30,5
12–13	9,4	1,35	3,88	0,76	3,12	3,7	34,2
13–14	9,8	1,21	3,1	0,94	2,16	2,6	36,8
14–15	9,4	0,92	1,72	1,07	0,65	0,8	37,6
15–16	8,6	0,65	0,5	1,1	−0,6	−0,7	36,9
16–17							
Zbroj			19,4MJ	5,4 MJ	14 MJ		

Ukupne su toplinske potrebe 52,8 MJ. Solarni je doprinos 19,4 MJ, a ostatak treba osigurati konvencionalnim (npr. električnim) grijačem.

U primjeru je pokazana simulacija rada solarnog sustava za jedan dan. Slično bi se moglo proračunati skupljena toplina tokom čitava mjeseca, zbrajajući količine topline skupljene za svaki dan. Obično se računa solarni doprinos za svaki mjesec i izražava kao

$$f = \frac{Q_k}{Q_p}$$

gdje je Q_k ukupna toplinska energija dobivena iz sunčane u čitavom mjesecu, a Q_p ukupne toplinske potrebe u tom mjesecu. Jednostavniji proračuni mogu se obaviti i s pomoću džepnog računala, a za potpunu simulaciju rada solarnog sustava potreban je kompjutor.

Osobito praktična metoda za određivanje prosječnog doprinosa sunčanog sustava u toku mjeseca jesu tzv. *f*-dijagrami dobiveni kao rezultat mnogobrojnih kompjutorskih simulacija rada takvog sustava [Be 77].

Pokazano je [Be 77] da je solarni doprinos *f*, tj. dio od ukupne potrebne energije koji osigurava sunčani uređaj u pojedinom mjesecu, funkcija dvaju parametara

$$X = \frac{A_c F_R k (T - T_Z) \Delta t}{Q_L}$$

$$Y = \frac{A_c F_R (\overline{\tau\alpha})_{ef} \overline{H}_c N}{Q_L}$$

gdje je A_c površina kolektora, F_R faktor koji određuje prijenos topline iz kolektora u spremnik, k ukupni koeficijent toplinskih gubitaka, T referentna temperatura (100 °C), T_z srednja temperatura zraka u pojedinom mjesecu, Δt ukupni broj sekundi u mjesecu, Q_L ukupna potrebna energija za grijanje vode za čitav mjesec, $(\overline{\tau\alpha})_{ef}$ srednji efektivni umnožak transmisijskog faktora i apsorpcijskog faktora, N broj dana u mjesecu i $\overline{H}_c$ mjesečni prosjek dnevne ozračenosti plohe kolektora. Solarni doprinos f ovisi i o volumenu spremnika i obično se računa za spremnike volumena 50—75 L/m² kolektora.

Funkcija f(*X*, *Y*) i odgovarajući dijagrami za tipične solarne sustave za gri-

janje vode i prostorija objavljeni su u literaturi [npr. Be 77] i mogu se koristiti za brzo određivanje solarnog doprinosa. Za poznate X i Y za određeni sustav i mjesec može se, naime, iz dijagrama odmah očitati solarni doprinos f i tako i bez upotrebe kompjutora simulirati rad sunčanog sustava.

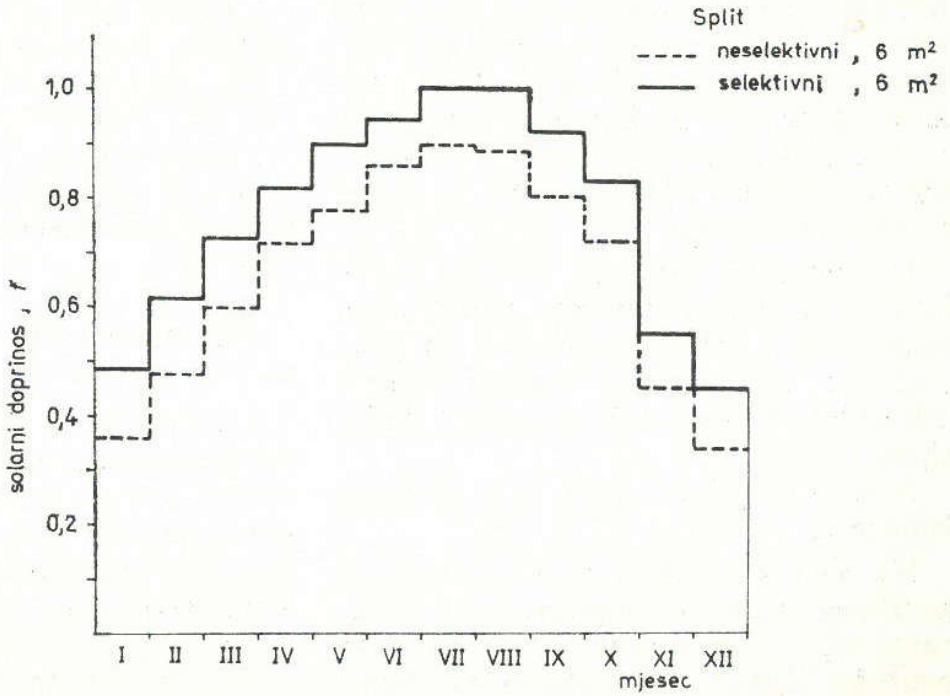
Da bi se projektirao solarni sustav, potrebno je izabrati optimalne parametre i proračunati solarni doprinos i ekonomsku opravdanost. Takvi detaljni proračuni relativno su skupi i često je preliminarnim procjenama moguće utvrditi da li je opravdano obavljati detaljne proračune. Preliminarne procjene mogu se napraviti s pomoću jednostavnih proračuna integracijom po satima za prosječni dan u svakom mjesecu ili primjenom semiempiričkih dijagrama iz literature [npr. f-dijagrama iz Be 77]. Takvi jednostavni proračuni daju samo red veličine ušteda dobivenih solarnim sustavom, ali svatko ih može napraviti (i bez kompjutora) i tako dobiti određenu informaciju o radu sustava.

U literaturi se mogu naći proračuni sustava za dobivanje tople vode i za zagrijavanje prostora za neka područja naše zemlje [v. npr. De 79, Pi 80, Ku 81, De 83]. Neki od tih proračuna rađeni su kompjutorskom simulacijom, a drugi s pomoću f-dijagrama odnosno simulirajući rad sustava od sata do sata za prosječni dan u mjesecu i računajući doprinos bez upotrebe kompjutora.

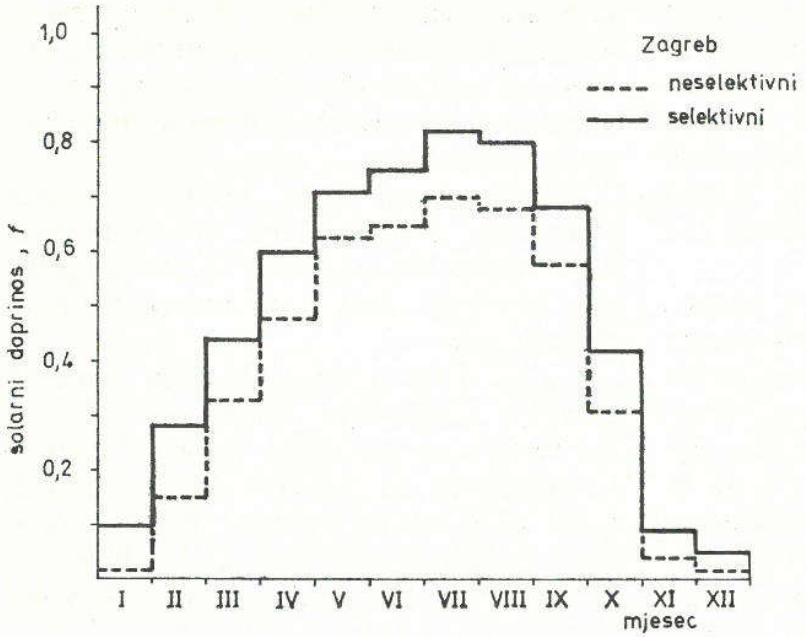
Navest ćemo neke rezultate takvih proračuna, najprije one dobivene jednostavnijim proračunima, a zatim rezultate dobivene detaljnom kompjutorskom simulacijom.

Na sl. 4.48. prikazan je udio Sunčeve energije u grijanju sanitarne vode po mjesecima za područje Splita. Pretpostavljajući da su dnevne potrebe 300 L tople vode temperature 60 °C (što odgovara godišnjoj potrošnji $2{,}06 \cdot 10^{10}$J odnosno 5 700 kW h), sustav s neselektivnim kolektorom ($F_R k = 7$ W/(m²K), $F_R \tau\alpha = 0{,}76$) površine 6 m² mogao bi osigurati oko 66% potrebne količine tople vode odnosno $1{,}4 \cdot 10^{10}$ J (3 800kW h) godišnje.

Selektivni kolektor ($F_R k = 4{,}8$W/m²K[1]) dao bi oko 16 % više, tj. $1{,}6 \cdot 10^{10}$ J (4 400 kW h) godišnje. Izraženo energijom na jedinicu površine kolektora doprinos bi bio 2350 MJ/m² za neselektivni odnosno 2670 MJ/m² za selektivni kolektor. Selektivni sustav uštedi godišnje za oko 100 kWh/m² više od neselektivnog sustava.



Slika 4.48. Solarni doprinos sistema za dobivanje tople vode u području Splita po mjesecima



Slika 4.49. Solarni doprinos sistema za dobivanje tople vode u području Zagreba

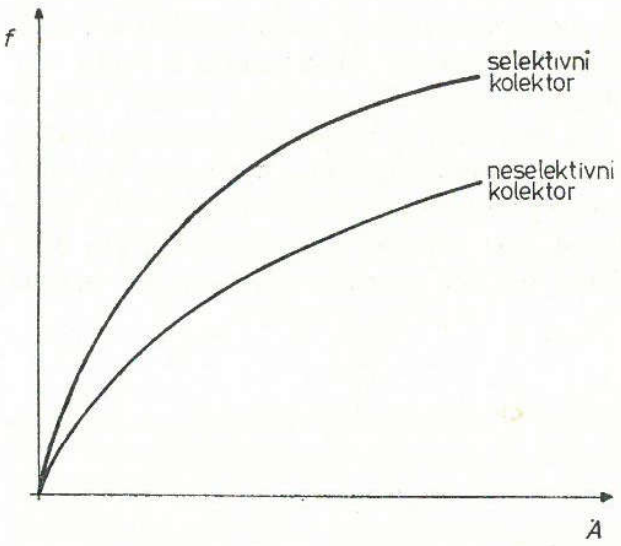
Na sl. 4.49. prikazani su rezultati sličnog proračuna za Zagreb. Sustav s neselektivnim kolektorom s jednim staklom površine 6 m² mogao bi prema tim proračunima osigurati 38% potrebne količine tople vode ($7{,}9 \cdot 10^9$ J odnosno 2200 kW h godišnje). Upotrebimo li selektivni kolektor solarni je doprinos 48 % (10^{10} J odnosno 2800 kW h godišnje) dakle za 27 % veći.

Izrazimo li solarni doprinos po četvornom metru kolektora, prema tim aproksimativnim proračunima domaćinstvo u Splitu moglo bi dobiti godišnje oko 650 kW h/m² s neselektivnim i oko 750 kW h/m² sa selektivnim kolektorom površine 6 m² i spremnikom 75L/m². Solarni doprinos u Zagrebu mnogo je manji: 370 kW/m² za sustav s neselektivnim i 470 kW h/m² za sustav sa selektivnim kolektorom.

U. Desnica i suradnici [De 83] simulirali su rad solarnog sustava za dobivanje tople vode i grijanje prostorija za neka područja naše zemlje upotrebljavajući TRNSYS kompjutorski program i dobili slične rezultate.

Solarni doprinos ovisi i o površini kolektora.

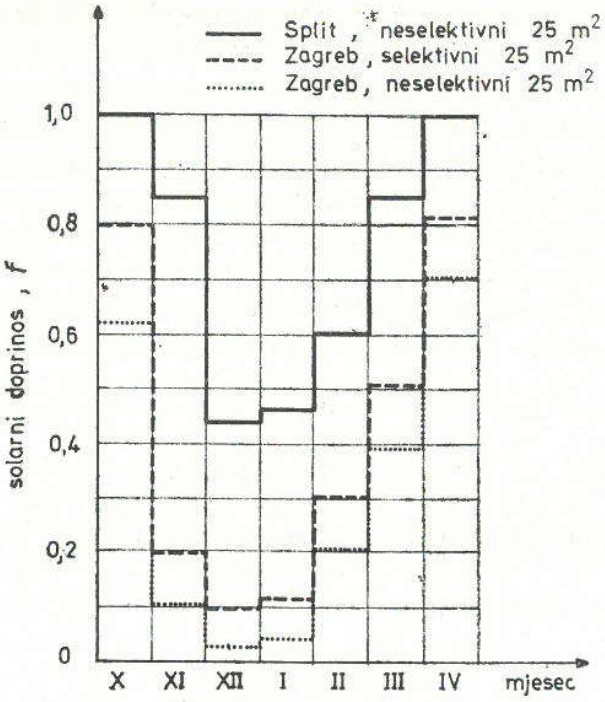
Na slici 4.50. prikazana je ovisnost godišnjeg solarnog doprinosa za dobivanje tople vode o površini kolektora za područje Zagreba. Ovisnost o volumenu spremnika manja je i povećanje volumena iznad optimalnoga (50L/m² do 75L/m²) bitno ne utječe na solarni doprinos.



Slika 4.50. Ovisnost godišnjeg solarnog doprinosa sistema za dobivanje tople vode o površini kolektora

Navedimo i rezultate proračuna tipičnog sustava za zagrijavanje zgrada.

Na slici 4.51. prikazan je solarni doprinos sustava za zagrijavanje zgrade u Splitu i u Zagrebu. Pri proračunu je pretpostavljeno da je površina kolektora 25 m² a toplinski gubici kuće 250 W/K. Račun je obavljen za neselektivni s jednim staklom ($F_R k$=7 W/m²K) i selektivni s jednim staklom ($F_R k$=4,26 W/m²K)



Slika 4.51. Solarni doprinos sustava za zagrijavanje zgrada u Zagrebu

apsorber. Volumen je spremnika 1,9 m³. Ukupni solarni doprinos u sezoni grijanja, tj. od 1. X do 1. V u Zagrebu jest 22 % od ukupnih toplinskih potreba za neselektivni kolektor, a 32 % za selektivni. Neselektivni kolektor s dvostruko većom površinom (50 m²) zadovoljio bi oko 35 % toplinskih potreba. Sličan sustav u Splitu zadovoljio bi oko 64 % toplinskih potreba; solarni bi sustav u Splitu dao u sezoni grijanja oko 36 % više toplinske energije. Ako se uspoređuje rad uređaja od 1.X do 1.III tada je razlika još očitija. Uređaj u Splitu dao bi oko 3,5 puta više energije od jednakog uređaja u Zagrebu. Selektivni sustav u zimskim mjesecima dao bi oko 2 puta više energije od neselektivnoga.

4.4.5. O ekonomičnosti solarnih sustava

Prije kupovanja i instaliranja solarnog sustava potrebno je proračunati njegovu ekonomičnost i izabrati optimalno (najrentabilnije) rješenje. Opseg ove knjige ne dopušta da se upustimo u detaljnu ekonomsku analizu solarnih sustava, za to postoji opsežna literatura [v. npr. Di 79 Lu 80, Du 81, No 80, itd.]. Mi ćemo iznijeti samo najosnovnije činjenice i proračune. Da bi se odredila ekonomičnost solarnog sustava, potrebno je uzeti u obzir niz parametara od kojih su neki dobro, a neki samo približno poznati. Potrebno je poznavati troškove projektiranja, nabavke i instaliranja sustava, troškove pogona i troškove održavanja. Najveći su troškovi za kolektore i spremnike topline i uglavnom su proporcionalni površini kolektora. Ostali troškovi (za reguliranje, cjevovode, motore, pumpe) manje ovise o veličini sustava. Obično se ukupni troškovi instaliranog sustava izražavaju po jedinici površine kolektora, npr. 10 000 din/m² pa bi cijena sustava za dobivanje tople vode kolektorima površine 6 m² bila 60 000 dinara. Treba dodati i troškove projektiranja, pogona i održavanja sustava. Obično se određuje da su godišnji troškovi pogona i održavanje 1 %—2 % cijene instaliranog sustava.

Samo solarni sustav ne može osigurati svu potrebnu energiju te je uz njega potrebno predvidjeti i konvencionalni sustav iste veličine kao da sunčanoga i nema. Solarni je sustav, dakle, dodatna investicija koja se jedino može isplatiti odgovarajućom uštedom konvencionalnog goriva (npr. ugljena, mazuta, električne energije). Da bi se proračunala ušteda goriva, potrebno je procijeniti solarni doprinos uređaja. To se može učiniti na razne načine, npr. proračunom solarnih sustava (v. poglavlje 4.4.4). Solarni doprinos ovisi o kakvoći sustava i zemljopisnom području gdje je instaliran. Izračunato je da sunčani prinos sustava za zagrijavanje zgrade u Zagrebu [De 80] koji se sastoji od 22 m² kolektora nagnutih 60° iznosi $16{,}5 \cdot 10^9$ J (4 580 kW h) godišnje odnosno 208 kW h/m². Na Jadranu bi taj doprinos bio veći (oko 10^9 J/m² odnosno 280 kW h/m²). Sustavi za dobivanje sanitarne tople vode imaju još veći solarni doprinos. Približni proračuni pokazuju da su ti solarni doprinosi

u Zagrebu oko 400 kW h/m², a u Splitu oko 700 kW h/m² godišnje. Budući da ove vrijednosti ovise o nizu parametara, potrebno ih je precizno proračunati u svakom konkretnom slučaju.

Kad se odredi solarni doprinos, izračuna se ušteda u konvencionalnom gorivu ili cijena tako uštođenog goriva. Ako je η efikasnost konvencionalnog grijača (koja je za električni grijač vrlo velika, viša od 90 %, pri zagrijavanju mazutom oko 60 % do 70 %), ušteda je goriva

$$\Delta m = f \frac{Q}{Q_{iz}\,\eta}$$

gdje je Δm uštođena masa goriva, Q potrebna godišnja energija, f solarni doprinos, Q_{iz} specifična toplina izgaranja.

Ako npr. solarni sustav za grijanje daje 4 600 kW h godišnje, a specifična toplina izgaranja ulja za loženje jest $3{,}9 \cdot 10^7$ J/kg (10,8kW h/kg) i $\eta = 65$ %, uštedjelo bi se 655 litara ulja za loženje ili — ako je litra ulja 20 din — uštedjelo bi se 13 000 din.

Proračuni koje su napravili B. Pivac i suradnici [Pi 80] za Beograd pokazuju da bi sustav za dobivanje tople vode s neselektivnim kolektorima površine 6 m² i spremnikom 300 L mogao godišnje osigurati $1{,}16 \cdot 10^{10}$ MJ (3 220 kW h) odnosno $1{,}93 \cdot 10^9$ J/m² ili 540 kW h/m². Selektivni kolektor dao bi 17,5 % više (630 kW h/m²). Ako se pretpostavi da se voda grije električnim grijačem efikasnosti 95 % i da je cijena električne energije 2 din/kW h, godišnja ušteda selektivnog sustava bila bi 8 000 din, a neselektivnog 6 780 din. Slični proračuni pokazali su da bi u Zagrebu solarni doprinos neselektivnog sustava sa 6 m² kolektora bio oko 380 kW h/m² (godišnja ušteda 2 760 kW h). Uštede u jadranskom području bile bi primjetno veće.

Da bi se odredilo realno vrijeme amortizacije solarnog uređaja, tj. razdoblje n godina u kojima će postignuta ušteda biti jednaka uloženom novcu, potrebno je predvidjeti porast cijena goriva, vijek trajanja, troškove održavanja i sl.

Ako bi porast cijena gorivu (karakteriziran eskalacijskim faktorom e) bio jednak kamatnoj stopi k, vrijeme amortizacije moglo bi se dobiti tako da se troškovi investicije podijele s godišnjom uštedom. U općenitom slučaju račun je složeniji. Ako je npr. investicija 60 000 din, kamatna stopa 10 %, predviđeno godišnje poskupljenje energije 15 % i godišnja ušteda 6 000 din, u prvoj godini vrijednost bi uštede bila $u_1 = u\,\frac{1+e}{1+k} = uR = 6\,220$ din, u drugoj godini $u_2 = u_1 R = u_2 R^2 = 6\,445$ din, u trećoj 6 856 din itd. Ukupna ušteda kroz n godina bila bi

$$u = u_1 + u_2 + \ldots + u_n = u\,(R + R^2 + \ldots + R^n) = u\,R\,\frac{R^n - 1}{R - 1}$$

gdje je

$$R = \frac{1+e}{1+k}.$$

Ako je ukupna ušteda nakon n godina jednaka uloženoj glavnici, tada je

$$G = u\,R\,\frac{R^n - 1}{R - 1} = u\left(\frac{1+e}{1+k}\right)\frac{\left(\frac{1+e}{1+k}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+e}{1+k}\right) - 1}.$$

Označimo li $\frac{1+e}{1+k} = 1 + k_1$, tada jednadžba dobiva jednostavniji oblik

$$G = u\,(1+k_1)\,\frac{(1+k_1)^n - 1}{1 + k_1 - 1} = u\,(1+k_1)\,\frac{(1+k_1)^n - 1}{k_1}.$$

Iz jednadžbe se može odrediti realno vrijeme amortizacije n ako poznajemo G/u i faktor k_1. U gornjem je primjeru $G/u = 10$, $k_1 = 0{,}045$. Vrijednost n možemo naći grafički ili pogađanjem. Uvrstimo li $n = 8{,}2$, dobivamo da je $G/u = 10{,}1$ pa možemo zaključiti da će se uređaj uz navedene pretpostavke otplatiti za oko 8 godina.

Da bi se mogla odrediti optimalna veličina solarnog uređaja potrebno je

proračunati ovisnost godišnje uštede o ukupnim investicijskim ulaganjima G, tj. dijagram $u=f(G)$. Umjesto da crtamo uštedu i troškove u dinarima možemo na ordinatu crtati solarni doprinos (omjer energije dobivene solarnim sustavom i ukupne potrebne energije), a na apscisu površinu kolektora ili omjer površine kolektora i godišnjih energetskih potreba [Lu 80]. Iz tog dijagrama može se procijeniti koliki su minimalni troškovi da bi uređaj bio ekonomičan, koliki su maksimalni investicijski troškovi iznad kojih uređaj prestaje biti ekonomičan i kakav treba biti uređaj u optimalnom slučaju. Detalji o proračunu rentabilnosti mogu se naći u literaturi.

4.4.6. Pasivni solarni sustavi

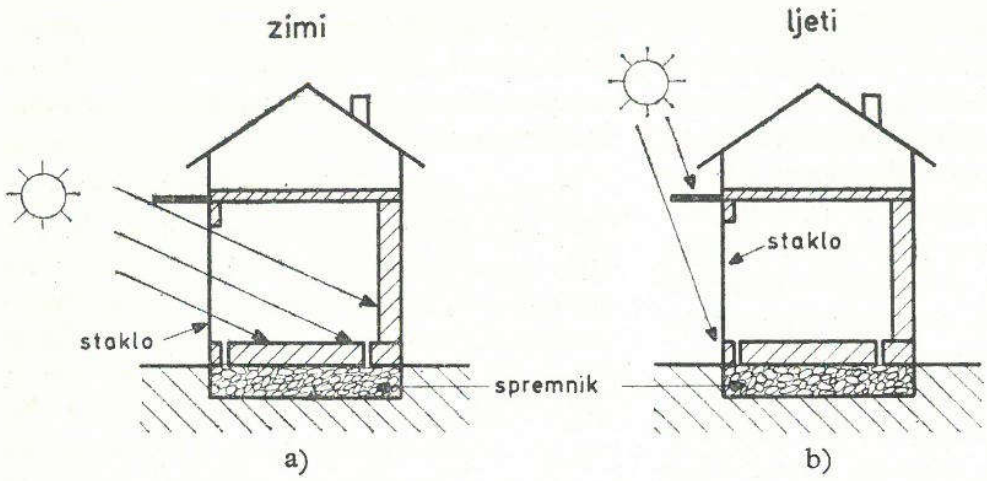
Prostorije se mogu zagrijavati (hladiti) aktivnim ili pasivnim solarnim sustavom ili njihovom kombinacijom. Aktivne sustave opisali smo u prethodnom odjeljku; oni se sastoje od kolektora koji skupljenu Sunčevu energiju pretvaraju u toplinu. Prisilnom cirkulacijom radnog fluida tako skupljena toplina odvodi se u spremnik, a odatle za zagrijavanje prostorija. U pasivnim sustavima koriste se dijelovi zgrade za skupljanje topline (nema posebnih kolektora), toplina se prenosi uglavnom prirodnom konvekcijom, vođenjem ili zračenjem. (Katkad se i u pasivnom sustavu može upotrijebiti ventilator da bi cirkulacija zraka bila brža i efikasnija, ali njegova je funkcija tu sasvim drukčija nego u aktivnom sustavu gdje je prisilna cirkulacija prijeko potrebna.) Pri pasivnom zagrijavanju elementi zgrade integralni su dio sustava. Kolektori su tu dijelovi zgrade: prozori, krov, zidovi, bazeni s vodom i sl. Spremnici topline mogu biti zidovi, krov i drugi dijelovi prostorije, a katkad se mogu i u pasivnom, kao i u aktivnom sistemu upotrijebiti posebni spremnici, npr. naslagani šljunak oko kojega struji zrak. Toplinski gubici noću ili kad nije sunčano, smanjuju se pokretnim izolacijskim pločama odnosno kapcima kojima se npr. prekrivaju ostakljeni zidovi, prozori, krovovi koji su za vrijeme dana bili otkriveni radi skupljanja Sunčeve energije.

Pri izgradnji solarnih kuća (s aktivnim ili pasivnim sustavom) potrebno je što više smanjiti toplinske gubitke jer se dobrom toplinskom izolacijom mogu znatno povećati energetske uštede. Koeficijent toplinskih gubitaka zidova i krova ne bi smio prijeći 0,3 W/(m²K), prozori bi trebali biti s dvostrukim, a sa sjeverne strane i s trostrukim staklom, i ako je potrebno trebali bi se moći zasjeniti odnosno prekriti izolacijskim kapcima.

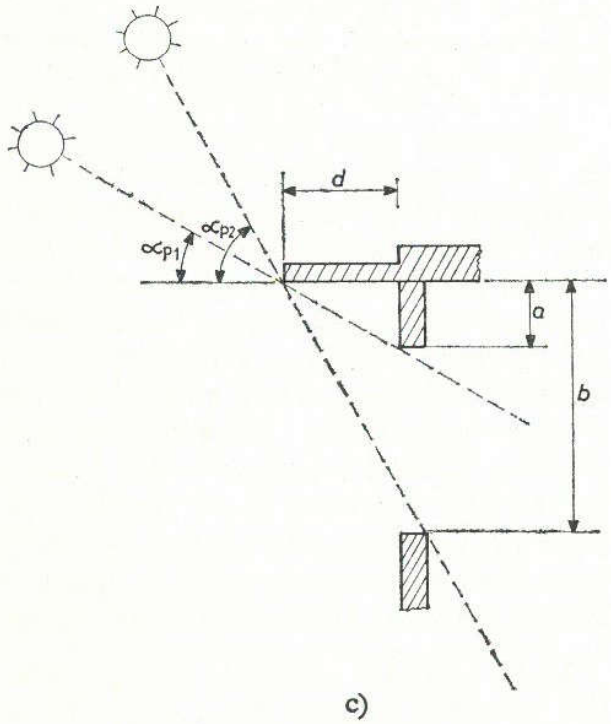
Građevina mora biti projektirana tako da se postignu maksimalne uštede i osigura što bolja upotreba Sunčeva zračenja. Pasivni sustav najlakše je inkorporirati u građevinu pri projektiranju i zato je pogodniji za nove, još neizgrađene zgrade. Pri projektiranju pasivne sunčane kuće valja dobro odrediti položaj zgrade, njezinu orijentaciju, položaj i veličinu prozora, položaj i boju zidova i krova i sl. [Gi 81]. Potrebno je da zgrada, npr. južni zid i prozori na toj strani prime što više Sunčeve energije zimi, a naprotiv ljeti te površine treba zaštititi od sunca.

Vješto izrađen pasivni sustav može biti isto tako efikasan kao i odgovarajući aktivni sustav. Pasivni sustavi imaju niz prednosti: održavanje je minimalno, upravljanje sustavom jednostavno, cijena je manja, a vijek trajanja dulji. Često se isti pasivni sustav može koristiti za zagrijavanje zimi i rashlađivanje prostorija ljeti [Gi 81]. Mana im je da se često ne mogu primijeniti na već izgrađene zgrade jer položaj, orijentacija i konstrukcija zgrade ne odgovara zahtjevima pasivnog načina grijanja.

Postoji više načina pasivnog grijanja zgrade. Jedan od najjednostavnijih prikazan je na slici 4.52. Sunčevo zračenje upada kroz velik staklen prozor ili staklen zid i izravno zagrijava prostoriju. Skupljena toplina uskladištava se u elementima prostorije (zidovima, podu) ili u posebnom spremniku sa šljunkom (ili posudama s



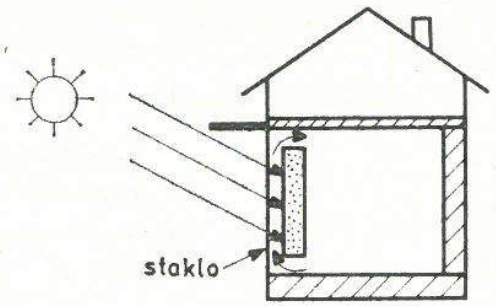
Slika 4.52. Direktno pasivno zagrijavanje



vodom) koji se zagrijava danju, a daje toplinu noću. Nadstrešnica (balkon) sprečava da Sunčevo zračenje za ljetnih mjeseci (kad je Sunce visoko) prodire u prostoriju. To je najefikasniji način pasivnog zagrijavanja. Katkad je, međutim, teško spriječiti pregrijavanje ili gubitke noću i kad nije sunčano.

Primjer. Dimenzije nadstrešnice (balkona) mogu se proračunati npr. tako da Sunce u podne nesmetano ulazi kroz prozor u periodu od 15. XI do 1. II a da od 1. V do 15. VIII prozor bude potpuno u sjeni (sl.4.52 c). Budući da je u Zagrebu kut visine Sunca 1. II $\alpha_{p1}=26°$ a 1. V $\alpha_{p2}=59°$, to gornja ivica prozora treba biti ispod nadstrešnice za $a=d\,\mathrm{tg}\,\alpha_{p1}=0{,}49d$, a donja ivica prozora za $b=d\,\mathrm{tg}\,\alpha_{p2}=1{,}66\,d$ gdje je d širina nadstrešnice. Ako je npr. $d=0{,}8$ m, tada je $a=0{,}4$ m i $b=1{,}3$ m.

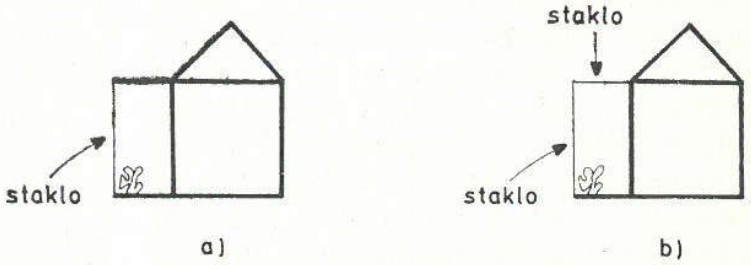
Ostakljeni južni zid zgrade, tzv. Trombeov zid, također je efikasan pasivni sustav koji je istodobno i kolektor i spremnik (sl. 4.53). Vertikalni zid zgrade obojen je crnom bojom i ostakljen jednostrukim ili dvostrukim staklom. Sunčevo zračenje upada kroz staklo, apsorbira se u zidu i zagrijava ga. Gore i dolje na zidu nalaze se otvori za cirkulaciju zraka. (Kad je potrebno, ti se otvori mogu i zatvoriti.) Hladni zrak ulazi iz prostorije i prolazi kroz prostor između stakla i zida, grije se, diže prirodnom konvekcijom i kao topli zrak struji kroz gornje otvore u zgradu. Toplinska energija akumulirana u masivnom zidu danju, koristi se noću i tako se postiže gotovo kontinuirano zagrijavanje prostorija. Između stakla i zida obično je nekoliko centimetara prostora, ali on može biti i veći da bi se olakšalo održavanje i radove u tom međuprostoru [Gi 81]. Noću je potrebno pre-



Slika 4.53. Trombeov zid

kriti staklo da bi se spriječili gubici topline. Katkad se Trombeov zid može i naknadno ugraditi ako zgrada ima masivni zid okrenut prema jugu. Takav način pasivnog grijanja pogodan je i za veće zemljopisne širine.

Veliki ostakljeni i pokriveni balkoni (lođe) okrenuti prema jugu, odnosno staklene verande ispred kuće s ostakljenim ili običnim krovom (sl. 4.54. a i b) mogu zimi djelotvorno skupljati Sunčevu energiju. Vrući zrak koji nastaje u tako ostakljenom prostoru vodi se u zgradu, zagrijava sobe ili prenosi toplinu u odgovarajući spremnik. Ljeti se prozori otvore ili ostakljenje ukloni (a stakleni krov prekrije) da bi zrak mogao cirkulirati i osigurati ugodnu hladovinu. Ako je takav prostor veći, može se iskoristiti i kao vrlo dobar staklenik za uzgoj biljaka. Takvo zagrijavanje može se primijeniti i u postojećim zgradama pa i višekatnicama koje imaju južne balkone.

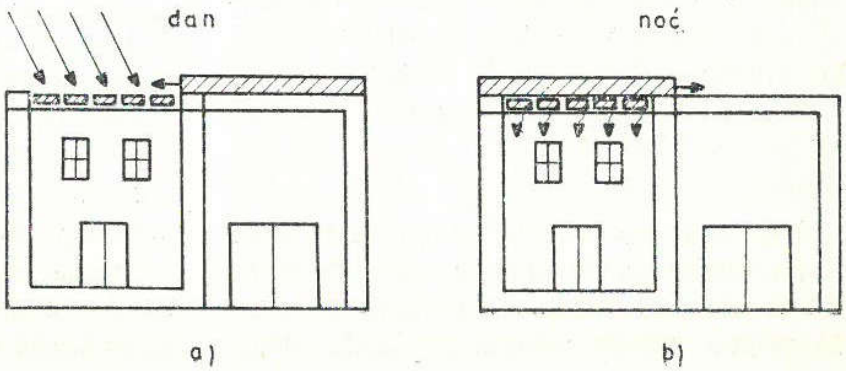


Slika 4.54. Staklenik ispred kuće kao element pasivnog sistema

Energija se može skupiti i uskladištiti i u posebno napravljenom krovu [Gi 81], (sl. 4.55.a i b). Metalni krov s plastičnim vrećama napunjenim vodom (ili u obliku plitkog bazena napunjenog vodom) zagrijava se Sunčevom energijom, a skupljena toplina služi za zagrijavanje zgrade. Noću se krov pokriva pomičnim izolacijskim pločama da bi se spriječio gubitak topline. Tako se može osigurati efikasno kontinuirano zagrijavanje danju i noću. Ljeti takav krov može služiti za rashlađivanje prostorija. Noću je krov otkriven pa se voda u spremnicima na krovu hladi. Danju je krov prekriven izolacijskim pločama da bi se spriječilo zagrijavanje vode. Na takav način noću rashlađena voda održava sniženu temperaturu danju i tako služi za pasivno hlađenje zgrade.

4.4.7. O solarnom hlađenju

Iako je, barem za sada, najvažnija primjena solarne energije zagrijavanje prostorija i vode (osobito u klimatskim područjima poput našega), istražuju se i solarni uređaji za rashlađivanje i klimatizaciju. Na svjetskom tržištu već se pojavljuju uređaji za hlađenje za pogon kojih se može koristiti Sunčeva energija.



Slika 4.55. Krov kao solarni kolektor u pasivnom sistemu

Očekuje se da će se ti uređaji usavršiti i postati ekonomski prihvatljivi.

Poput grijanja, sunčano hlađenje zgrade može biti aktivno i pasivno. Aktivni sustavi koriste toplinu dobivenu solarnim kolektorima ili elektricitet iz sunčanih ćelija za pogon rashladnih uređaja. Pasivni sustavi mogu koristiti nižu temperaturu atmosfere noću te tu „hladnoću" spremiti za hlađenje za vrijeme vrućeg dana; noću rashlađen spremnik može oduzimati toplinu zraku koji danju kroz njega struji iz prostorija koje se hlade. Pasivno hlađenje može se ostvariti i isparivanjem vode koristeći njezinu relativno veliku latentnu toplinu te na još neke načine.

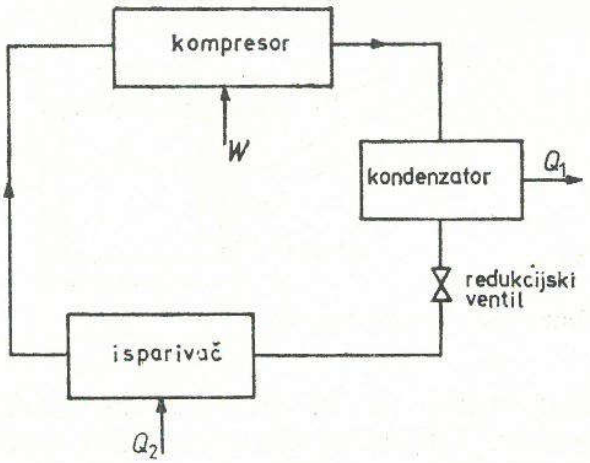
Primjena Sunčeve energije za hlađenje vrlo je atraktivna jer je potreba za hlađenjem najveća upravo u vrijeme kad je Sunčeve energije najviše; sezonske i dnevne promjene Sunčeva zračenja upravo pogoduju primjeni sunčane energije za hlađenje (klimatizaciju) prostorija. Vjerojatno će takva primjena u budućnosti biti vrlo važna. Često je potrebno osigurati hlađenje ljeti, a grijanje zimi, pa bi kombinirani sustav mogao biti relativno ekonomičan jer bi se koristio čitave godine [Du 74].

Sunčana energija mogla bi se uspješno koristiti u solarnim hladnjacima za čuvanje hrane, što je osobito važno za zemlje u razvoju u tropskim krajevima.

Na žalost uređaji za solarno hlađenje još nisu ekonomični; oni su 3—5 puta skuplji od sličnih konvencionalnih uređaja. Očekuje se da će istraživanjima i ti uređaji postati ekonomični u skoroj budućnosti.

Razlikujemo dva tipa aktivnih sustava za hlađenje: apsorpcijski koji koristi toplinsku energiju dobivenu solarnim kolektorima i kompresijski koji koristi mehaničku energiju dobivenu iz sunčane elektrane. To su zapravo konvencionalni rashladni uređaji koji za pogon koriste sunčanu energiju.

Shema kompresijskog sunčanog sustava za hlađenje prikazana je na slici 4.56. To je klasični kompresijski hladnjak koji za pogon koristi solarni toplinski stroj.



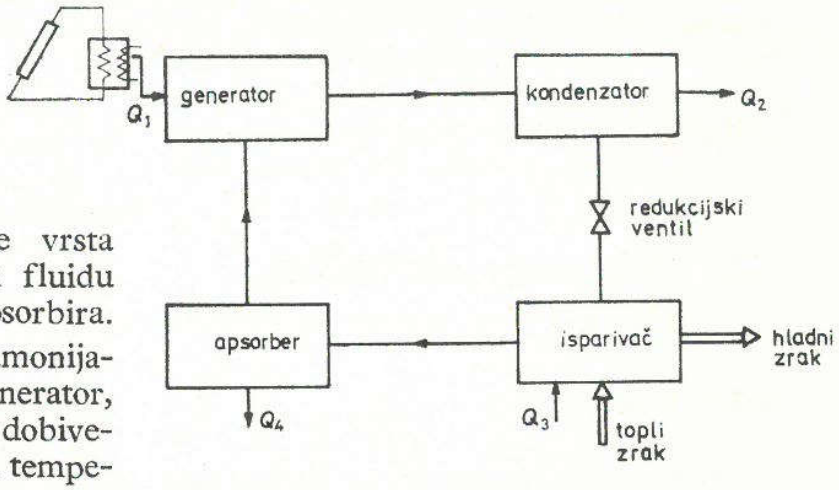
Slika 4.56. Shema kompresijskog solarnog sistema za hlađenje

Kao radni fluid koriste se lako isparive tekućine: amonijak (NH_3), ugljik-dioksid (CO_2) i dr., ali ipak najčešće freon 12 (CCl_2F_2).

S pomoću kompresora, ulaganjem mehaničkog rada W, adijabatski se zbija para rashladnog sredstva (npr. freona) u kondenzator. Tu se para pretvara u tekućinu predajući toplinu Q_2 okolici, npr. vodi koja cirkulira oko kondenzatora. Iz kondenzatora tekućina dolazi u redukcijski ventil gdje joj se adijabatskom ekspanzijom snižava tlak i temperatura. Tako nastala ohlađena mješavina tekućine i pare („vlažna para") dolazi u isparivač gdje se isparuje pri stalnom tlaku i temperaturi, oduzimajući toplinu Q_2 prostoru oko isparivača. (Strujanjem zraka oko isparivača može se npr. dobiti hladni zrak za klimatizaciju prostorija.) Iz isparivača para odlazi u kompresor gdje joj se adijabatskom kompresijom povećava tlak i temperatura; tako dobivenom suhom zasićenom parom ciklus se ponavlja.

U apsorpcijskom sustavu toplinska energija dobivena iz sunčane izravno se koristi za pogon rashladnog stroja. Može se npr. upotrebljavati topla voda temperature 90 °C—100 °C dobivena sunčanim kolektorima. Apsorpcijski solarni rashladni sustav razlikuje se od konvencionalnoga samo prema izvoru topline.

Shema apsorpcijskog hladnjaka prikazana je na slici 4.57. Glavni dijelovi sustava jesu apsorber, generator, konden-



Slika 4.57. Shema apsorpcijskog sistema za hlađenje

zator i isparivač. Postoji više vrsta takvih hladnjaka prema radnom fluidu odnosno tvari u kojoj se fluid apsorbira.

U NH_3/H_2O sustavu otopina amonijaka u vodi crpi se iz apsorbera u generator, gdje se grije primajući toplinu Q_1 dobivenu sunčanim uređajem. Porastom temperature i tlaka smanjuje se topivost amonijaka u vodi te se amonijak počinje isparavati. Tako dobivene pare prelaze u kondenzator, a razrijeđena otopina vraća se u apsorber.

U kondenzatoru (koji se hladi cirkulacijom vode ili zraka) pare se kondenziraju u tekući amonijak predajući toplinu Q_2 fluidu koji kruži oko kondenzatora. Zatim tekući amonijak prolazi kroz redukcijski ventil gdje mu se adijabatskom ekspanzijom snizi tlak i temperatura. Pri tom nastala mješavina tekućeg i parovitog amonijaka vodi se u isparivač. Tu se amonijak potpuno isparava oduzimajući toplinu Q_3, tj. hladeći okolni prostor ili fluid koji struji oko isparivača (npr. vodu koja se zatim upotrebljava za klimatizaciju). Pare NH_3 iz isparivača odlaze u apsorber i otapaju se u vodi uz oslobađanje topline Q_4. Iz apsorbera se vodena otopina amonijaka crpi u generator i proces se ponavlja.

Iako sustav radi uglavnom s pomoću dovedene topline iz nekog toplinskog izvora relativno visoke temperature (oko 100 °C), potrebna je i mehanička pumpa — da bi se otopina prebacila iz apsorbera u generator — i konvencionalni izvor za njezino napajanje (npr. električna energija); tako sustav nije sasvim neovisan o drugim izvorima energije. (Postoje i izvedbe bez mehaničke pumpe; poznati plinski apsorpcijski hladnjak grijan plinskim plamenikom koristi smjesu amonijaka i vodika, a cirkulacija fluida obavlja se prirodnom konvekcijom.) Snaga potrebna za pumpanje tekućine iz apsorbera u generator relativno je malena (samo nekoliko promila snage hladnjaka) i mnogo manja nego snaga kompresora u kompresijskim hladnjacima pa se glavni potrošak vanjske energije u obliku topline može relativno lako osigurati s pomoću solarnih kolektora.

U novije vrijeme sve se više koristi apsorpcijski sustav $H_2O/LiBr$. U njemu se koristi litij-bromid kao apsorber a voda odnosno vodena para kao radni fluid. Zagrijavanjem litij-bromida u kojem je apsorbirana voda u generatoru oslobađa se vodena para koja odlazi u kondenzator. Ta se para kondenzira u vodu, predajući toplinu vodi koja hladi kondenzator. Voda nastala kondenzacijom pare preko redukcijskog ventila prelazi u isparivač. Tu se voda isparuje i oduzima toplinu okolnom sredstvu (npr. fluidu koji struji kroz izmjenjivač topline u isparivaču) te se tako postiže hlađenje. Nastala vodena para prelazi zatim u apsorber, apsorbira se u LiBr, nastala otopina $LiBr+H_2O$ odlazi u generator i ciklus se ponavlja.

U tom sustavu razlike tlakova manje su nego u sustavu s amonijakom pa se hladnjak može napraviti i bez mehaničkih pumpi.

Budući da se sunčana energija može lakše i djelotvornije pretvarati u toplinsku energiju nego u mehanički rad (odnosno električnu energiju) zasad su apsorpcijski uređaji perspektivniji nego kompresijski. Relativno visoku temperaturu (80 °C—120 °C) potrebnu za rad apsorpcijskog solarnog hladnjaka dosta je teško postići s pomoću ravnih kolektora te će se vjerojatno u budućnosti selektivni

fokusirajući kolektori primjenjivati u takvim sustavima. Kad se cijena elektriciteta iz solarnih ćelija bitno smanji, i kompresijski će se sustavi više upotrebljavati.

4.5. Dobivanje električne energije

4.5.1. Uvod

Postoji više načina da se iz sunčane energije dobije električna energija. Najjednostavnija je izravna pretvorba s pomoću solarnih ćelija. Princip rada sunčanih ćelija temelji se na fotovoltaičnom efektu: kad se Sunčevo zračenje apsorbira u solarnoj ćeliji, na njezinim se krajevima pojavljuje elektromotorna sila tako da se ćelija obasjana Sunčevim zračenjem može koristiti kao izvor električne energije. Prema rezultatima najnovijih istraživanja i na taj način moći će se vjerojatno uskoro više koristiti sunčana energija [Ba 81, De 81].

Drugi je način da se sunčana energija najprije pretvori u toplinsku, a zatim iz toplinske u električnu energiju; to je zapravo klasičan način dobivanja električne energije s pomoću turbina i generatora, samo se kao toplinski izvor koristi solarna energija. U svijetu se gradi ili je već dovršeno više takvih energana odnosno elektrana; u njima se stječu iskustva za eventualnu buduću komercijalnu proizvodnju električne energije iz solarne.

Energija vjetra, koja je također uzrokovana solarnom energijom, može se također pretvoriti u mehaničku, a zatim u generatorima u električnu energiju. Energija valova, morskih struja i toplinskog gradijenta mora također bi se u principu mogla upotrijebiti za dobivanje električne energije. Od svih tih načina najjednostavniji je i najperspektivnije dobivanje električne energije s pomoću solarnih ćelija; o tome ćemo najviše i govoriti.

4.5.2. Fotonaponska konverzija

S pomoću fotonaponskog efekta može se sunčana energija izravno pretvoriti u električnu u solarnim ćelijama. Kad solarna ćelija apsorbira Sunčevo zračenje, fotovoltaičnim efektom na njezinim se krajevima proizvede elektromotorna sila (napon) i tako solarna ćelija postaje izvor eletrične energije.

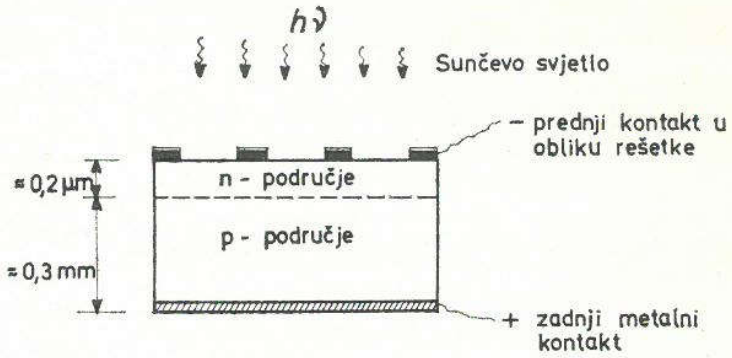
Razvoj fotoelektričkih pretvarača energije počinje istraživanjima Becquerela 1839. godine. On je uočio da se jakost struje između metalnih elektroda u elektrolitu poveća kad se elektrode osvijetle. Oko 40 godina kasnije napravljena je prva fotoćelija od selena. U početku ovog stoljeća nastavljaju se istraživanja i objašnjava se fotoefekt (Einstein, 1905). Nešto kasnije razvijaju se ispravljači od selena i bakar-oksida i prema tom principu izrađuju se prvi svjetlomjeri. Nagli razvoj solarnih ćelija počinje 1954. godine, kada Pearson, Fuller i Chapin izrađuju prvu solarnu ćeliju od monokristalnog silicija. Kasnije se silicijeva sunčana ćelija usavršuje i efikasnost joj se od 6% povećava do 14%. Gotovo istodobno pronađena je i solarna ćelija od kadmijeva sulfida [Reynolds 1955].

Intenzivna istraživanja solarnih ćelija od 1956. do 1962. nisu uspjela sniziti njihovu cijenu i učiniti ih ekonomičnima za terestričku primjenu. Ekonomska kriza 1973. ponovno je ubrzala istraživanja i razvoj solarnih ćelija.

Prve važnije primjene solarnih ćelija bile su u satelitima. Od 1958. godine kad je krenuo prvi satelit, svi sateliti i svemirski brodovi opskrbljeni su silicijevim solarnim ćelijama. U tom razdoblju silicijeva ćelija tehnološki se tako razvila da je danas vrlo pouzdan (iako, na žalost, ne jeftin) izvor solarnog elektriciteta.

Nakon energetske krize 1973. godine počinje se intenzivno istraživati proizvodnja solarnih ćelija i za terestričke primjene. Danas se solarne ćelije koriste tamo gdje drugi izvori elektriciteta nisu dostupni. Najveći problem u terestričkoj proizvodnji električne energije s pomoću

Slika. 4.58. Shematski prikaz silicijeve solarne ćelije



sunčanih ćelija jest vrlo visoka cijena solarnih fotonaponskih sustava.

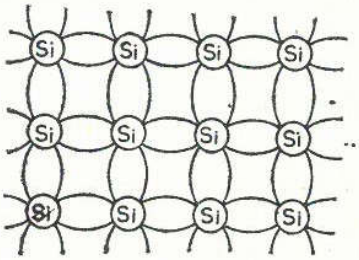
Silicijeva solarna ćelija (sl. 4.58) je p-n spoj koji se dobija npr. tako da se na površini pločice p-tipa silicija difundiraju primjese (npr. fosfora) tako da na tankom površinskom sloju nastane područje n-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorpcijom fotona iz Sunčeva zračenja, na prednjoj površini nalazi se metalna rešetka, a zadnja je strana prekrivena metalnim kontaktom. Rešetkasti kontakt na prednjoj strani načinjen je tako da ne prekrije više od oko 5% površine te on gotovo ni ne utječe na apsorpciju Sunčeva zračenja. Prednja površina ćelije prekrivena je i prozirnim antirefleksijskim slojem koji sprečava refleksiju Sunčeva svjetla i tako povećava efikasnost.

Sunčane ćelije proizvode napon oko 0,5 V i jakost struje oko 20 mA/cm^2. Da bi se dobio odgovarajući napon odnosno snaga, ćelije se mogu spajati serijski i paralelno. Tako se dobivaju moduli solarnih ćelija u obliku ploče (panela) na kojoj su ćelije učvršćene i zaštićene od atmosferskih i drugih utjecaja. Moduli se slažu jedan do drugog u fotonaponske ravne kolektore, a kolektori zajedno s ostalim potrebnim elementima (pretvaračima, regulatorima, akumulatorima i sl.) tvore fotonaponski sustav.

Da bismo razumjeli princip rada solarnih ćelija, podsjetimo se kristalne strukture poluvodiča i osnovne teorije p-n spoja [v. npr. Ju 75]. Atomi u kristalnoj rešetki poluvodiča (npr. Si) vezani su međusobno kovalentnom vezom. Silicijev atom $_{14}$Si ima 2 elektrona u prvoj K ljusci, 8 elektrona u drugoj L, i 4 elektrona u trećoj, vanjskoj M ljusci. Ta 4 valentna elektrona raspoređena su tako da se dva nalaze u 3s, a dva u 3p stanju. Budući da se u 3p podljusci može nalaziti 6 elektrona, to nedostaju 4 elektrona da bi vanjska 3p podljuska bila popunjena.

U kristalnoj rešetki silicija atomi su pravilno raspoređeni tako da se oko svakog atoma nalaze četiri susjedna atoma koji s njim imaju zajednički jedan elektron i tako se međusobno vežu kovalentnom vezom.

Na slici 4.59. prikazana je dvodimenzionalna slika kristalne rešetke silicija u kojoj svaki silicijev atom ima zajedničke parove elektrona s četiri susjedna silicijeva atoma.



Slika 4.59. Dvodimenzionalna slika kristalne rešetke čistog silicija

Energetski nivoi elektrona pojedinih atoma u kristalnoj rešetki poluvodiča preklapaju se i čine tzv. energetske vrpce.

Na slici 4.60. prikazan je energetski dijagram intrinsičnog čistog poluvodiča. Na apsolutnoj nuli valentna je vrpca popunjena elektronima, a vodljiva je vrpca prazna. Između valentne i vodljive vrpce nalazi se zabranjena vrpca, a širina te vrpce E_g važan je parametar o kojem ovise svojstva poluvodiča.



Slika 4.60. Energetski dijagram za intrinsični poluvodič

Raspodjela elektrona u dozvoljene nivoe može se opisati Fermijevom funkcijom $f(E)$ koja daje vjerojatnost da je stanje energije E popunjeno elektronom. Fermijeva raspodjela ima oblik:

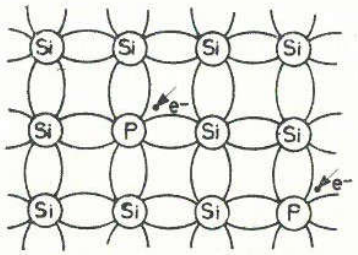
$$f(E)=\frac{1}{e^{(E-E_f)/kT}+1}. \qquad (4.101)$$

gdje je E energija dozvoljenog stanja, E_f Fermijeva energija, k Boltzmannova konstanta i T apsolutna temperatura.

Uočite da je Fermijeva energija E_f intrinsičnog poluvodiča u sredini između valentne i vodljive vrpce.

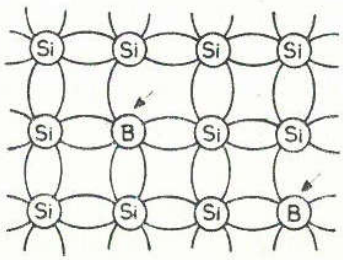
Ako je u nekom materijalu gornja dopuštena vrpca (tj. vodljiva vrpca) potpuno prazna, a valentna vrpca potpuno puna, vanjsko električno polje ne može proizvesti struju u takvom materijalu (jer nema slobodnih nosilaca naboja) i materijal se ponaša kao odličan izolator. Upravo je to slučaj i s poluvodičem na apsolutnoj nuli. Međutim, pri običnim temperaturama, zbog relativno malene vrijednosti za širinu zabranjene vrpce E_g (za poluvodiče oko 1 eV, za izolatore oko 10 eV) elektroni u poluvodičima iz valentne vrpce mogu prijeći u vodljivu vrpcu (npr. toplinskom uzbudom), ostavljajući pri tom šupljine u valentnoj vrpci. Tako nastaju parovi elektron-šupljina i porastom temperature povećava se vodljivost poluvodiča. Vodljivost je poluvodiča prema tome uzrokovana elektronima u vodljivoj i šupljinama u valentnoj vrpci; što je koncentracija elektrona odnosnošupljina veća, i vodljivost je poluvodiča veća. U čistom poluvodiču broj slobodnih elektrona u vodljivoj vrpci jednak je broju šupljina u valentnoj vrpci te u vodljivosti ravnopravno sudjeluju i elektroni i šupljine.

Dodaju li se siliciju primjese, može se od čistog (intrinsičnog) silicija dobiti p-tip odnosno n-tip. Time se znatno povećava vodljivost poluvodiča. Valentnost atoma takvih primjesa razlikuje se od valentnosti silicijeva atoma za jedinicu, tj. atomi primjesa imaju tri odnosno pet valentnih elektrona. Ako se atom silicija u kristalnoj rešetki zamijeni atomom fosfora (sl. 4.61), koji ima 5 valentnih elektrona, četiri valentna elektrona fosfora uključe se u kovalentnu vezu sa susjednim atomima a preostali peti elektron lako se odvaja od jezgre, postaje gotovo slobodan, giba se kroz kristalnu rešetku i tako povećava vodljivost poluvodiča. Takav poluvodič s viškom negativnih nosilaca naboja (elektrona) naziva se n-tip.

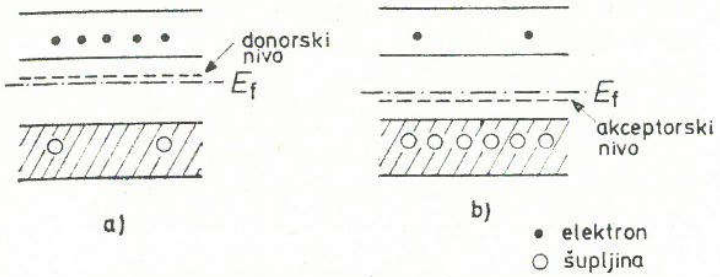


Slika 4.61. Kristalna rešetka silicija s peterovalentnim (donorskim) primjesama (n-tip)

Slično, ako se silicijevu kristalu dodaju trovalentne primjese (bor, galij. . .), za svaki dodani atom nedostaje jedan elektron (sl. 4.62). Valentni elektron lako može popuniti tu vezu stvarajući šupljinu u valentnoj vrpci. Tako nastaje p-tip poluvodiča u kojeg prevladavaju nosioci naboja pozitivne šupljine.



Slika 4.62. Kristalna rešetka silicija s trovalentnim (akceptorskim) primjesama (p-tip)



Slika 4.63. Energetski dijagram za a) n-tip i b) p-tip poluvodiča

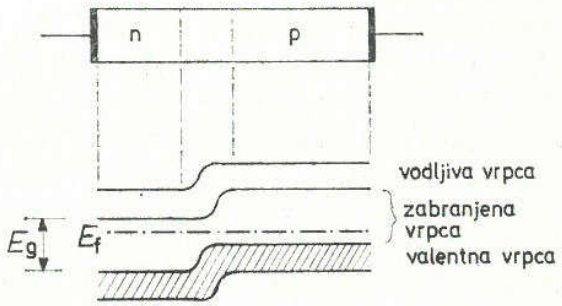
Na slici 4.63.a i b prikazan je dijagram energetskih vrpca za n-tip odnosno p-tip poluvodiča. Primjese su stvorile dodatni energetski nivo unutar zabranjene vrpce. U p-tipu na taj način nastaje akceptorski nivo u koji mogu prijeći elektroni iz valentne vrpce stvarajući pozitivne nosioce naboja (šupljine) u valentnoj vrpci. Slično, u n-tipu postoji donorski nivo iz kojeg mogu prijeći elektroni u vodljivu vrpcu i tako povećati koncentraciju negativnih nosilaca naboja (elektrona) u toj vrpci.

U intrinsičnom poluvodiču Fermijeva energetska razina E_f u sredini je zabranjene vrpce (jer je broj elektrona u vodljivoj vrpci jednak broju šupljina u valentnoj vrpci), u n-tipu Fermijeva razina E_f pomaknuta je prema vodljivoj, a u p-tipu prema valentnoj vrpci. Pomak Fermijeve razine ovisi o koncentraciji primjesa i o temperaturi.

Pri nastajanju p-n spoja, kao npr. pri izradi solarne ćelije (sl. 4.58), elektroni iz n-područja (u kojem su oni većinski nosioci naboja) difundiraju u p-područje, a šupljine (više koncentrirane u p-području) difundiraju u n-područje. Ta difuzija traje sve dok se na p-n spoju ne uspostavi odgovarajuća potencijalna barijera koja zaustavlja difuziju. U p-n spoju uspostavlja se, dakle, unutrašnje električno polje (usmjereno od n-područja prema p-području) koje će elektrone koji se eventualno nađu u tom području ubrzati prema n-strani, a šupljine prema p-strani.

Na slici 4.64. energetski je prikaz p-n spoja u ravnoteži. Dodatna potencijalnta energija mijenja energetski dijagram te se dno vodljive i vrh valentne vrpce na p-strani podigne. Fermijev nivo mora biti isti u čitavom spoju jer je to sustav elektrona u ravnoteži: na n-strani nalazi se bliže vodljivoj, a na p-strani bliže valentnoj vrpci.

Važno je svojstvo p-n spoja njegovo ispravljačko djelovanje: on mnogo lakše vodi struju kad je p-strana pozitivna, a n-strana negativna (napon u propusnom smjeru), nego kad je obratno (napon u zapornom smjeru); p-n spoj radi, dakle, kao dioda.



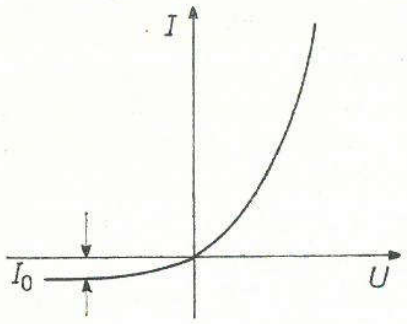
Slika 4.64. Dijagram energetskih vrpca homogene n-p solarne ćelije

Kad se na p-n spoj priključi izvor napona tako da je pozitivni pol na p-strani, a negativni pol na n-strani, smanjuje se visina barijere i potekne struja elektrona (prema p-strani) i šupljina (prema n-strani). Ta struja eksponencijalno raste s primijenjenim naponom i p-n spoj radi kao dioda u propusnom smjeru. Pri inverznom naponu (tj. ako je p-strana priključena na negativni, a n-strana na pozitivni pol izvora napona) povećava se visina potencijalne barijere i kroz p-n spoj teče vrlo mala struja (tzv. struja zasićenja) uzrokovana parovima elektron—šupljina nastalim toplinskom pobudom u blizini spoja.

Veza između vanjskog napona U i struje I kroz p-n spoj, tzv. I-U karakteristika diode, može se prikazati jednadžbom

$$I = I_0 \left(e^{eU/kT} - 1\right) \qquad (4.102)$$

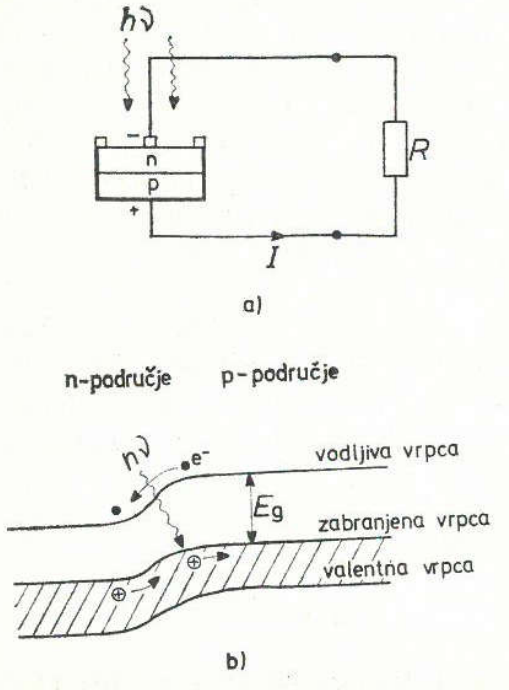
gdje je I_0 struja zasićenja (zaporna struja) koja ovisi o p-n spoju, e elementarni naboj, k Boltzmannova konstanta, a T apsolutna temperatura.



Slika 4.65. I—U karakteristika p-n spoja

Na slici 4.65. prikazana je I-U karakteristika p-n spoja.

Solarna ćelija načinjena je tako da se, kada je osvijetlimo, na njezinim krajevima javlja elektromotorna sila. Kada se solarna ćelija (p-n spoj) obasja svjetlošću (sl. 4.66. a i b), apsorbirani fotoni dovoljno velike energije proizvode parove elektron—šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od p-n spoja, nastali par ubrzo rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija unutar ili u blizini p-n spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, odvaja nastali elektron i šupljinu — elektron se giba prema n-strani, šupljina prema p-strani.



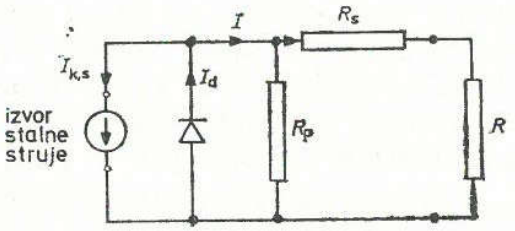
Slika 4.66. Solarna ćelija obasjana svjetlošću; a) shematski prikaz ćelije, b) unutrašnje električno polje razdvaja nosioce naboja nastale apsorpcijom fotona

Takvo skupljanje elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama p-n spoja uzrokuje elektromotornu silu na krajevima ćelije. Ako su kontakti solarne ćelije spojeni s vanjskim potrošačem, kroz osvijetljenu solarnu ćeliju proteći će električna struja.

Kad je solarna ćelija spojena s vanjskim potrošačem i osvijetljena, u ćeliji će se generirati fotostruja I_s, te će kroz vanjski potrošač teći struja I jednaka razlici normalne struje diode I_d određene jednadžbom (4.102) i fotostruje I_s

$$I = I_d - I_s = I_0 (e^{eU/kT} - 1) - I_s. \quad (4.103)$$

Osvijetljena solarna ćelija ponaša se kao izvor konstantne struje. Njezin ekvivalentni sklop prikazan je na slici 4.67.



Slika 4.67. Ekvivalentni sklop solarne ćelije

Izvor konstantne struje paralelno je spojen s diodom. Serijski otpor R_s ovisi o materijalu i izradi solarne ćelije, a poželjno je da bude što manji. Paralelni otpor (shunt) R_p ovisi o kvaliteti ćelije i većinom je dovoljno velik da ga možemo zanemariti. Uz te pretpostavke struja kroz vanjski otpor R određena je izrazom (4.103). Međutim, u slučaju da serijski otpor R_s nije zanemariv jednadžba (4.103) ima oblik

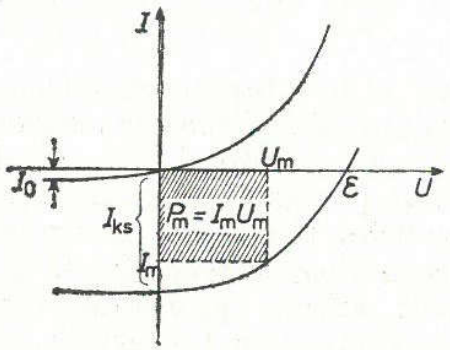
$$I = I_0 (e^{e\,(U+R_s I)/kT} - 1) - I_s. \quad (4.104)$$

Jedan od najvažnijih parametara sunčane ćelije jest njezina elektromotorna sila, tj. napon na njezinim stezaljkama pri otvorenom strujnom krugu ($I=0$). Uvrštavajući $I=0$ u jednadžbu (4.103), dobivamo da je napon

$$\epsilon = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right). \quad (4.105)$$

Elektromotorna sila solarne ćelije ϵ ovisi o fotostruji I_s (koja raste s porastom sunčana ozračenja — solarne iradijancije) i o zapornoj struji diode, a poželjno je da je ona što manja. Zaporna struja diode I_0 ovisi o temperaturi te će i elektromotorna sila solarne ćelije ovisiti o temperaturi i biti manja što je temperatura veća.

Važan podatak za ćeliju jest i struja kratkog spoja, tj. jakost struje kad je napon na stezaljkama ćelije jednak nuli. Uvrstimo li u (4.103) $U=0$, dobivamo da je struja kratkog spoja jednaka fotogeneriranoj struji I_s.



Slika 4.68. I—U karakteristika osvijetljene i neosvijetljene solarne ćelije

Na slici 4.68. prikazana je I-U karakteristika osvijetljene i neosvijetljene solarne ćelije. Vidi se, uz ostalo, i elektromotorna sila i struja kratkog spoja ćelije.

Snaga koju može dati sunčana ćelija dobiva se množenjem napona i struje

$$P=UI=U\,(I_s-I_0\,e^{eU/kT}+I_0). \quad (4.106)$$

Maksimalna snaga koju ćelija može dati $P_m=U_m I_m$ označena je na slici 4.68. i odgovara površini iscrtkanog pravokutnika. Računski se može odrediti traženjem ekstrema funkcije (4.106), odnono pravokutnika na slici 4.68. koji ima maksimalnu površinu.

Maksimalna snaga solarne ćelije može se prikazati i s pomoću elektromotorne sile i struje kraktog spoja

$$P_m=I_m U_m=\epsilon I_{ks} F \quad (4.107)$$

gdje je

$$F=\frac{U_m\,I_m}{\epsilon\,I_{ks}} \quad (4.108)$$

tzv. faktor punjenja koji je jednak omjeru između površine pravokutnika sa stranicama U_m i I_m i pravokutnika sa stranicama ϵ i I_s. On pokazuje koliko se stvarna ćelija približuje idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije. Obično je $0{,}7<F<0{,}9$.

Efikasnost ćelije omjer je između njezine maksimalne snage i ulazne snage Sunčeva zračenja

$$\eta=\frac{P_m}{P_u}=\frac{P_m}{GA}=\frac{I_m\,U_m}{GA}=\frac{\epsilon\,I_s\,F}{GA}, \quad (4.109)$$

gdje je G sunčano ozračenje, a A površina ćelije.

Da bi efikasnost bila veća, potrebno je da i I_s bude što veći, a faktor punjenja što bliži jedinici. Tipične vrijednosti za silicijeve ćelije jesu $F\doteq 0{,}82$, $R_s=0{,}96\ \Omega$, $\epsilon=0{,}57$ V, $\eta=10\%$ [Ba 81].

Primjer. Pri ozračenju 1 kW/m² elektromotorna sila solarne ćelije jest 0,54 V, a struja je kratkog spoja 50 mA. Maksimalna snaga dobije se pri opterećenju 9 Ω i naponu 0,43 V. Površina je ćelije 4 cm². Kolika je efikasnost ćelije i faktor punjenja?

Efikasnost ćelije možemo odrediti s pomoću jednadžbe (4.109)

$$\eta=\frac{I_m U_m}{GA}=\frac{U_m^2}{RGA}=5\%.$$

Faktor je punjenja

$$F=\frac{U_m I_m}{\epsilon I_{ks}}=\frac{U_m^2}{I_{ks} R}=0{,}76.$$

Napomenimo da je maksimalna teoretska vrijednost za fotostruju oko 40 mA/cm² [Wi 79] pri ozračenju 1 kW/m² (tj. za AM 1), što bi za elektromotornu silu 0,6 V i maksimalni teoretski faktor punjenja 0,88 dalo efikasnost 21% — što je teoretska vrijednost za maksimalnu efikasnost silicijeve (n-p) solarne ćelije.

Pri apsorpciji fotona unutar poluvodičke solarne ćelije nastaje par elektron—šupljina kojega je energija ovisna o energiji (frekvenciji) upadnog fotona. Pri tom mora biti ispunjen uvjet

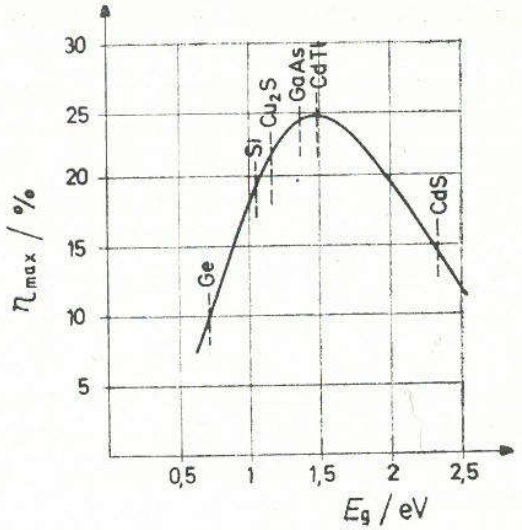
$$h\nu \geqslant E_g \text{ odnosno } \lambda \leqslant \frac{hc}{E_g}, \qquad (4.110)$$

gdje je ν frekvencija upadnog fotona, c brzina svjetlosti, h Planckova konstanta, a E_g širina zabranjenog pojasa u poluvodiču. Fotoni valnih duljina većih od granične $\lambda_g = hc/E_g$ ne apsorbiraju se u solarnoj ćeliji. Pri apsorpciji fotona valne duljine manje od granične, višak energije $h\nu - E_g$ prelazi u kristalnu rešetku povećavajući joj unutrašnju energiju. Iz toga bi se moglo zaključiti da je poluvodič prikladniji što mu je širina zabranjene vrpce E_g manja, jer poluvodič s manjim E_g može apsorbirati veći opseg valnih duljina iz Sunčeva spektra. Međutim, elektromotorna sila solarne ćelije također ovisi o E_g: za veći E_g manja je inverzna struja zasićenja kroz diodu, a tako je veća i elektromotorna sila. Poluvodiči malog E_g nisu, dakle, prikladni jer su dobiveni naponi preniski. Ta dva efekta suprotna su jedan drugome: zbog jednog se povećanjem E_g smanjuje efikasnost, a zbog drugog povećava, tako da je efikasnost složena funkcija od E_g.

Na slici 4.69. prikazana je maksimalna teoretska efikasnost solarne ćelije kao funkcija širine zabranjenog pojasa E_g. Na slici su također označeni neki od poluvodiča koji bi mogli poslužiti za izradu solarnih ćelija. Efikasnost u početku raste s E_g, postiže maksimum, a zatim opada. Maksimum efikasnosti jest oko 25% na oko 1,5 eV (što odgovara maksimalnoj valnoj duljini 0,83 μm).

Postoji mnogo vrsta poluvodiča od kojih bi se mogle izraditi ćelije. Međutim, u praksi se mnogi od tih poluvodiča ne mogu upotrijebiti zbog tehnologije izrade, cijene ili malene efikasnosti.

Širina zabranjenog pojasa u siliciju jest 1,1 eV, što odgovara efikasnosti oko 20%; dakle, silicij nije teoretski najbolji materijal za izradu solarnih ćelija.

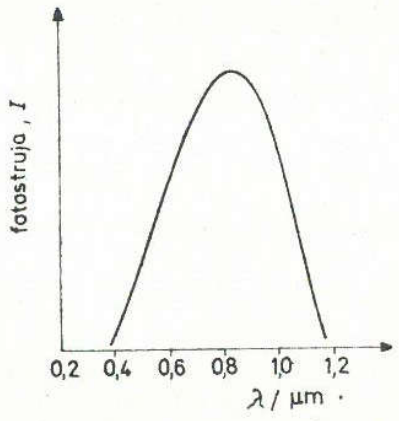


Slika 4.69. Ovisnost maksimalne teoretske efikasnosti solarne ćelije o širini zabranjenog pojasa

Najbolje bi bilo, barem teoretski, upotrebljavati materijale širine zabranjenog pojasa od 1,4 eV do 1,6 eV. Međutim, efikasnost postignuta u praksi manja je od teoretske. Najbolja je postignuta efikasnost za silicijeve ćelije oko 15%. Neki u novije vrijeme istraživani materijali [GaAs, CdTe i dr.] velikih teoretskih efikasnosti također se upotrebljavaju za izradu solarnih ćelija. Međutim, dosad postignute efikasnosti nisu veće od efikasnosti silicijevih ćelija, a takve su ćelije skuplje i nestabilnije od silicijevih. Cilj je razvoja solarnih ćelija povećanje efikasnosti i sniženje cijene.

Solarna ćelija različito je osjetljiva na različite valne duljine Sunčeva spektra [Di 79a].

Na slici 4.70. prikazana je spektralna ovisnost struje silicijeve solarne ćelije.



Slika 4.70. Spektralna osjetljivost silicijeve solarne ćelije

Najveća joj je osjetljivost u području valnih duljina oko 0,8 μm jer se većina fotona u tom području apsorbira blizu ili u osiromašenom području (p-n spoju). Fotoni kratkih valnih duljina apsorbiraju se odmah na ulazu u ćeliju (dakle, daleko od p-n spoja) te ne utječu bitno na struju ćelije. Fotoni velikih valnih duljina (infracrvena svjetlost) prolaze kroz spoj i apsorbiraju se pri dnu ćelije ili čak prođu kroz nju tako da i oni bitno ne pridonose struji.

4.5.3. Sadašnje stanje i perspektive razvoja solarnih ćelija

Iako su u laboratorijima napravljene i ispitane solarne ćelije od raznih poluvodičkih materijala, jedino se, zasad, silicijske solarne ćelije mogu komercijalno nabavljati. Te se ćelije izrađuju od monokristala silicija. Površina im je ovisno o površini monokristala od kojeg se proizvode, od 5 cm^2 do 10 cm^2, a debljine su oko 0,2 mm do 0,3 mm. Elektromotorna je sila od 0,55 V do 0,7 V, struja kratkog spoja reda je veličine stotinjak mA i ovisi o površini, a efikasnost od 10% do 13,5%. Silicijeva solarna ćelija pouzdana je, dugog vijeka trajanja (više od 15 godina u terestričkim uvjetima, a u svemirskim zbog utjecaja radioaktivnog zračenja malo manje), vrlo je pogodna za upotrebu u satelitima i jedino visoka cijena onemogućuje njezinu masovnu primjenu.

Najveći problem u terestričkoj primjeni solarnih ćelija jest njihova visoka cijena. Iako se zadnjih godina vrlo napredovalo u tehnologiji sunčanih ćelija, one su, na žalost, danas još preskupe za dobivanje solarnog elektriciteta i uglavnom se primjenjuju tamo gdje se ne mogu upotrijebiti drugi izvori. Međutim, cijena im ipak stalno pada. Kad su se 1954. pojavile, cijena im je bila oko 10 000 $ po 1 W vršne snage (tj. snage pri maksimalnom osvjetljenju), 1965. cijena im je pala na 1 000 $/W, 1973. na 300 $/W, 1975. na 100 $/W, a 1977. na oko 15 $/W. Današnja im je cijena oko 10 $/W. Prema predviđenoj cijeni električne energije iz nuklearnih elektrana i specifičnostima Sunčeve energije cijena solarnih ćelija ne bi smjela biti veća od oko 0,3 $/W (30 $/$m^2$) da bi one bile ekonomski prihvatljive. A to je bitno sniženje cijene (do 50 puta) prema današnjima. Taj se cilj može postignuti jedino ako se intenzivnim istraživanjem uspiju naći novi materijali i pojednostavniti tehnologiju proizvodnje. Sadašnju tehnologiju proizvodnje ćelija od monokristalnog silicija treba učiniti jeftinijom i povećati efikasnost tih ćelija; potrebno je razviti tehnologiju proizvodnje ćelija od tankih filmova polikristalnog ili amorfnog silicija te drugih fotovoltaičnih materijala. Masovna proizvodnja solarnih ćelija također će utjecati na smanjenje cijene.

Kada govorimo o cijeni, valja točno označiti da li je to cijena samo ćelije, modula ćelija ili pak kompletnog instaliranog sustava koji se sastoji od kolektora s modulima, ožičenja i potrebnih instalacija. Ne treba, naime, zaboraviti da je cijena ćelija u nekom sustavu samo dio cijene ukupnog sustava.

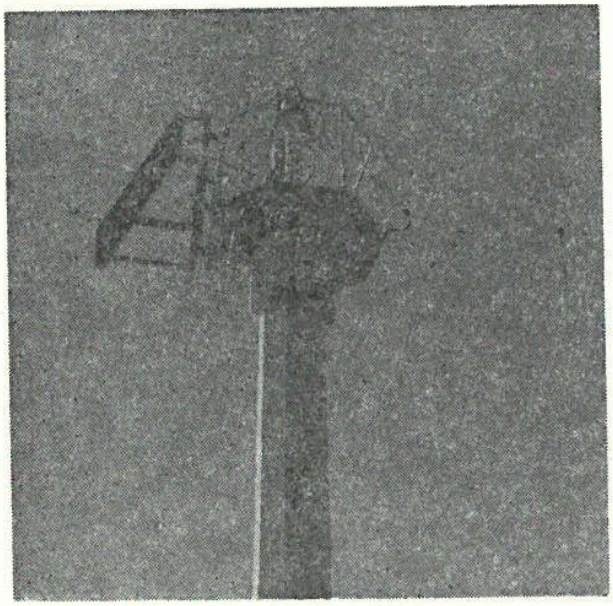
Sadašnja je cijena modula solarnih ćelija oko 10 $/W (što odgovara oko 2 $/kW h); to je vrlo skupo i ograničuje njihovu upotrebu. Očekuje se da će cijena solarnih ćelija (u modulima) do 1986. godine pasti na 0,7 $ po vatu vršne snage [Ba 81], što bi odgovaralo cijeni 2 $/W za sistem, odnosno 0,5 $/kW h električne energije. Cijena bi do 2 000. godine trebala pasti na oko 0,2 $/W.

Pri upotrebi sunčanih ćelija s fokusirajućim uređajima (Fresnelovim lećama) dobiju se dosta veće gustoće struje, međutim, potrebni su uređaji za praćenje Sunca i hlađenje ćelija što povećava cijenu sustava. Povećanjem koncentracije dolazi do povišenja temperature, a time do pada napona i efikasnosti. Silicijeve ćelije pogodne su za koncentracije do 100 puta i za temperature do 100 °C.

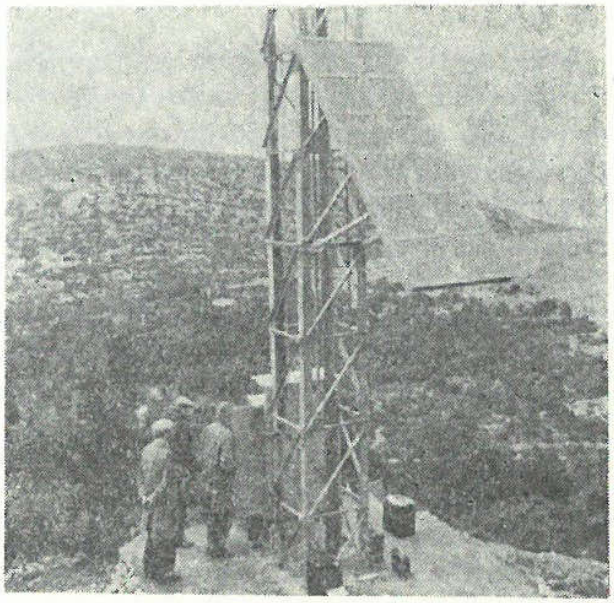
Iako je sada doprinos solarnih ćelija energetskim potrebama zanemariv, ipak su one važne u mnogim primjenama. Njihova je upotreba svakako potrebna

u satelitima i svemirskim brodovima, gdje su se upravo najprije i počele primjenjivati. Njihove terestričke primjene zasad su ograničene uglavnom na mjesta gdje nema drugih izvora elektriciteta. Signali na prelazima preko željezničke pruge, udaljeni telekomunikacijski sistemi (npr. u planinama, na otocima i sl.), telefonske centrale, relejne stanice, svjetionici, električne ograde na pašnjacima, sustav za navodnjavanje, neki su od primjera gdje se solarne ćelije mogu praktično primijeniti. Solarni fotonaponski sustav mogao bi se upotrebljavati i za opskrbu električnom energijom manjeg naselja, osobito u predjelima gdje je insolacija velika, a drugih izvora nema. Ono bi se mogao kombinirati s generatorima koje pokreće vjetar u područjima gdje nema električne mreže (npr. za planinske kuće, hotele, planinske domove i sl.) tako da bi se vjetar i sunce nadopunjavali u tom sustavu.

Kao ilustraciju primjene solarnih ćelija na slici 4.71a. prikazan je kolektor sa solarnim ćelijama na jednom svjetioniku. Snaga je kolektora oko 30 W. Kao spremnik služi olovni akumulator od 12 V. Na slici 4.71b. prikazan je kolektor sa solarnim ćelijama za napajanje elevizijskog pretvarača na Pelješcu.



Slika 4.71a. Svjetionik u Splitu sa solarnim ćelijama



Slika 4.71b. Kolektor sa solarnim ćelijama za napajanje televizijskog pretvarača na Pelješcu

Danas se komercijalne solarne ćelije uglavnom izrađuju od čistog silicija. Kompliciran tehnološki proces proizvodnje glavni je uzrok visoke cijene. Da bi se spoznala složenost izrade, navest ćemo, ukratko, tok proizvodnje. Iz rastaljenog čistog silicija (cijena oko 65 $/kg) nakon ubacivanja malog monokristala koji služi kao klica kristalizacije dobiva se izvlačenjem monokristal silicija promjera oko 8 cm i duljine oko 50 cm. Rezanjem tog komada monokristala dobivaju se tanke okrugle pločice silicija (debljine 0,2 mm — 0,4 mm). Pri tom postupku samo jedan dio kristala uspije se iskoristiti, ostalo (oko 70%) pri rezanju propadne, što bitno povećava troškove izrade. Da bi se od tankih silicijevih pločica dobila solarna ćelija, potreban je još niz postupaka obrade (poliranje, difuzija drugog poluvodičkog sloja na površini itd.) što još više smanjuje dio korisno upotrebljenog silicija i povećava troškove izrade.

Da bi se cijena solarnih ćelija bitno smanjila, bit će potrebno pojednostavniti izradu i upotrijebiti druge, jeftinije materijale, npr. tanki film polikristalnog odnosno amorfnog silicija, heterospojeve, npr. Cu_2S/CdS itd. Intenzivnim istra-

živanjima zadnjih godina već su postignuti određeni rezultati i može se očekivati da će se cijena solarnih ćelija i u budućnosti smanjivati.

Ćelije od polikristaliničnog silicija izrađuju se u obliku tankog filma na jeftinoj podlozi pa se tako uštedi materijal i izbjegava skupa tehnologija izrade pločica od monokristalnog silicija. Cilj je napraviti ćelije efikasnosti 10% i više, stabilne dovoljno dugo (20 godina), a cijene niže od 0,5 $/W.

Prva ćelija od amorfnog silicija (α-Si:H) proizvedena je 1974. (Carlson i Wronski), imala je $\epsilon=0{,}8$ V, $I_{ks}=12$ mA/cm², $A=0{,}02$ cm² i efikasnost $\eta=5{,}5\%$. Nakon intenzivnog istraživanja proizvedena je ćelija efikasnosti 7%, a očekuje se da će se postignuti efikasnost barem 10% jer je to preduvjet da ćelije postanu ekonomski opravdane. Naime, troškovi proizvodnje modula i instalacije uređaja za ćelije male efikasnosti ($\eta<10\%$) tako su veliki da bez obzira na cijenu ćelije sustav ne može postati ekonomski konkurentan [Ba 81]. Prema najnovijim istraživanjima ćelije od amorfnog silicija izgledaju najperspektivnije.

Uz silicijeve, najperspektivnije su i najviše istražene solarne ćelije od kadmijeva sulfida. Cu_2S/CdS solarna ćelija sastoji se od tankog sloja CdS (oko 20 μm) kao n-područja na koji je nanesen p-sloj bakar-sulfida Cu_2S debljine oko 0,2 m. Efikasnost je takvih ćelija 7%—9%, a vijek im je trajanja kraći nego silicijevim solarnim ćelijama. Tehnologija takvih ćelija još se razvija, očekuje se da bi im se cijena mogla spustiti i do 5 $/m². Vjerojatno će ubrzo početi i njihova komercijalna proizvodnja.

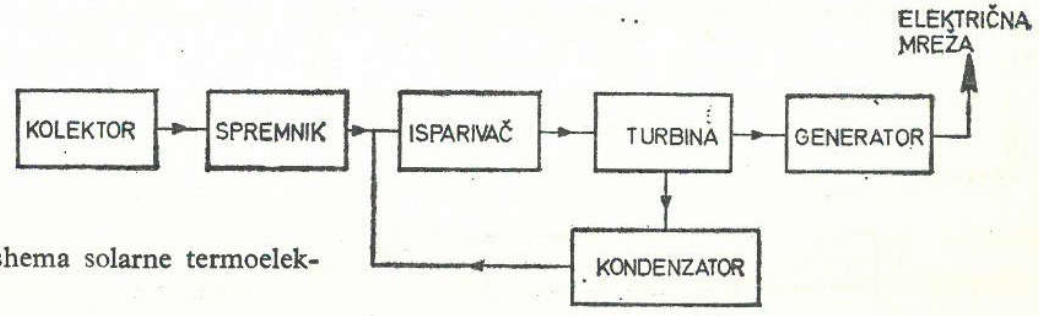
Ćelije od galij-arsenida prave se u obliku tankog filma od jedne (GaAs) ili dvije komponente ($GaAs+Cu_2S$) na nekoj podlozi. Takva bi ćelija, barem prema teoretskim predviđanjima, bila vrlo efikasna. Širina zabranjene vrpce GaAs (v. sl. 4.69) jest 1,4 eV što odgovara teoretskoj efikasnosti 24%. Međutim, dobivene efikasnosti kreću se oko 11% do 13%. Istraživanjima tih i drugih materijala valja pronaći jednostavne i jeftine tehnologije izrade, povećati efikasnost i sniziti cijenu solarne ćelije.

Izravna konverzija solarne energije u električnu još je preskupa da bi bila ekonomski konkurentna. Rezultati dosadašnjih istraživanja, međutim, pobuđuju optimizam...

4.5.4. Solarne elektrane

Osim izravnom konverzijom s pomoću solarnih ćelija, električna energija može se iz sunčane dobiti u solarnim elektranama. Solarna se energija pretvara u toplinsku, njome se grije radni fluid koji zatim pokreće turbine i električne generatore. Toplinska energija potrebna za rad takvih elektrana dobiva se fokusirajućim kolektorima (sustavima zrcala odnosno leća) jer se ravnim kolektorima ne mogu postignuti dovoljno visoke temperature za proizvodnju pare. Obično se pregrijana vodena para, dobivena solarnom energijom, uvodi u turbine i nakon obavljenog rada vraća u kondenzator gdje se pretvara u vodu predajući latentnu toplinu i zatim kao voda vraća u isparivač gdje ciklus počinje ponovno. To je poznati Rankinov proces s pomoću kojeg se obično proizvodi električna energija u termoelektranama.

Solarna je energija tu djelomičan ili potpuni izvor potrebne topline. Glavni su dijelovi solarne elektrane (sl. 4.72) dakle: kolektori (koncentrirajući, obično



Slika 4.72. Blok shema solarne termoelektrane

cilindrično parabolični ili heliostati), prijemnik (apsorber), spremnik topline i turbine s generatorom za proizvodnju električne energije.

Zbog intermitentnosti Sunčeve energije takve elektrane moraju imati dobro riješeno toplinsko uskladištenje energije ili pomoćni izvor topline kad Sunčeva zračenja nema ili nije dovoljno. Vjerojatno bi najpovoljniji bio tzv. hibridni sustav koji bi imao konvencionalni izvor topline i relativno maleni toplinski spremnik.

Iako sunčane elektrane ne rade na principu Carnotova nego Rankinova procesa, može se njihova efikasnost približno procijeniti primijenjujući teoriju idealnog Carnotova procesa za koji je

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (4.111)$$

gdje je T_1 temperatura toplijeg spremnika, a T_2 temperatura hladnijeg spremnika (obično okolne atmosfere).

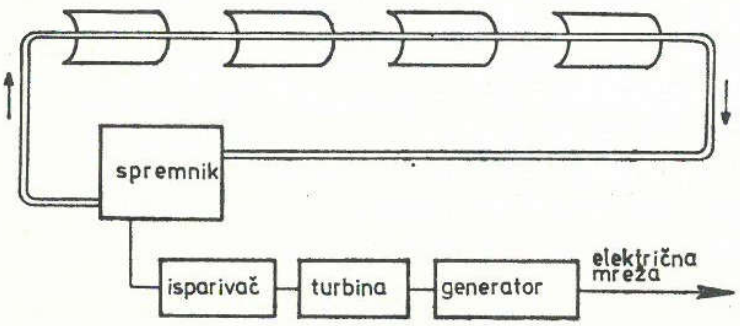
Odatle se vidi da je uvjet za visoku efikasnost visoka temperatura radnog fluida koja je u solarnim elektranama ograničena raznim faktorima (izradom kolektora, efikasnošću kolektora na višim temperaturama, materijalnim troškovima izrade itd.). Budući da je ukupna efikasnost umnožak efikasnosti termodinamičkog ciklusa i efikasnosti kolektora, postoji optimalna temperatura za svaku solarnu termoelektranu.

Postoje uglavnom dva načina kako se može dobiti potrebna solarna toplina za pogon takve elektrane: sustav s raspoređenim kolektorima (DCS-Distributed Collector System) i sustav sa središnjim prijemnikom (CRS-Central Receiver System).

U sustavu s raspoređenim kolektorima (sl. 4.73) s pomoću niza koncentrirajućih cilindrično-paraboličnih zrcala (omjera koncentracije 10—100) raspoređenih na većoj površini skuplja se Sunčeva energija i fokusira na apsorberske cijevi koje se nalaze u žarišnoj liniji kolektora i kroz koje protječe fluid za prijenos topline. Tako se dobiva para potrebna za pokretanje turbine povezane s električnim generatorom. Taj je sustav pogodan za manje elektrane. Njegove su mane veliki broj zrcala koja moraju pratiti Sunce, kompliciran sustav cijevi kroz koje teče fluid itd.

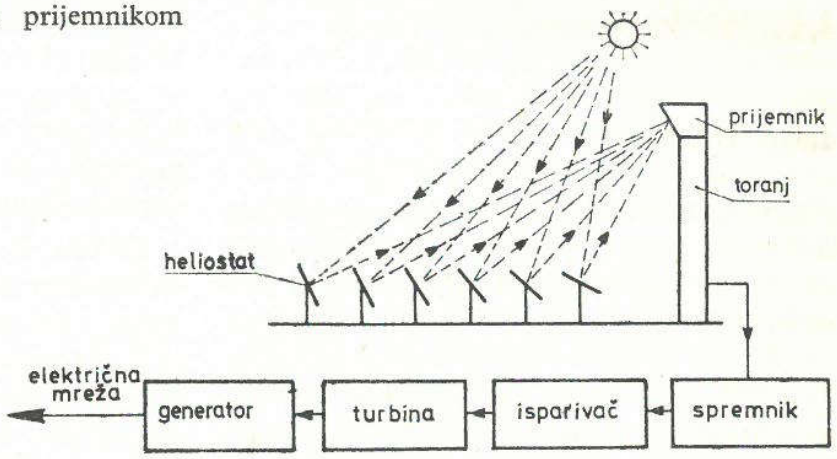
U elektranama sa središnjim prijemnikom (sl. 4.74) izravno Sunčevo zračenje s pomoću velikog broja heliostata reflektira se u prijemnik koji se nalazi na vrhu visokog tornja. Heliostati su ravna (točnije — malo zakrivljena) zrcala koja stalno prate Sunce i usmjeravaju njegovu energiju na vrh tornja gdje se zagrijava odgovarajući fluid. Tako dobivena toplinska energija koristi se za pogon termoelektrane. Omjer koncentriranja ta kvog sistema reda je veličine 500. Sustav je pogodan za elektrane veće snage.

Za električnu centralu snage 100 MW. bilo bi npr. potrebno oko 20000 zrcala (heliostata) — svaki površine oko 40 m² — poredanih na oko 3,5 km². Izrada takve solarne centrale vrlo je skupa i složena. Jedan od problema jest izrada heliostata. Svaki heliostat mora sadržavati precizni mehanizam s pomoću kojeg prati Sunce. Zrcala se moraju tako razmjestiti da sjenom ne smetaju jedan drugom. Cijena je polja heliostata oko 50% ukupnog troška



Slika 4.73. Sistem s raspoređenim kolektorima

Slika 4.74. Sistem s centralnim prijemnikom



čitavog postrojenja. Heliostati su danas vrlo skupi i takvo postrojenje postat će ekonomično tek kad im cijena bude oko 10 puta manja od današnje. Istraživanjima se želi smanjiti cijena heliostata i eventualno poboljšati njihova svojstva.

U svijetu se gradi nekoliko solarnih elektrana, ali sve su eksperimentalne jer je cijena solarne električne energije još vrlo visoka za komercijalnu upotrebu. Spomenimo neke od njih.

Pokusne solarne elektrane prvog tipa izgrađene su i rade u nekoliko zemalja. Uglavnom su male snage. U Seibersdorfu (Austrija) izgrađena je solarna elektrana snage 10 kW [Fa 81]. U cijevima smještenim u fokusu paraboličnih kolektora zagrijava se voda do 130 °C. Dobivena toplina upotrebljava se za isparivanje freona. S pomoću freonskih para pokreću se turbine i dobiva električna energija. Međunarodna agencija za energiju (IEA — Pariz) izgradit će u Španjolskoj (Almeria) dvije solarne elektrane, po jednu svakog tipa, snage oko 500 kW [Br81b]. U prijemniku na vrhu tornja kao radni fluid bit će natrij (530 °C), a u kolektorima druge elektrane kao radni fluid upotrebljavat će se mineralno ulje (280 °C). Te dvije eksperimentalne elektrane omogućit će usporedbu oba načina dobivanja električne energije iz solarne.

Pokusna elektrana u Albuquerqueu (USA), završena 1979. godine, ima 222 heliostata (svaki površine 37,3 m²) koji koncentriraju Sunčevo zračenje na toranj visok 66 m [Fa 81]. Toplinska je snaga 5 MW. Elektrana u Aldranu (Sicilija) ima toplinsku snagu 4,8 MW, a električnu 1 MW. Sastoji se od 182 heliostata i prijemnika na vrhu tornja visokog 55 m.

Procjene troškova izgradnje termičke solarne elektrane [v. npr. Ca 77] razlikuju se ovisno o tome na temelju kojih su pretpostavaka rađene. No, može se procijeniti da će biti oko 2 000 $ po 1 kW električne snage (0,08 $/kW h), a troškovi su konvencionalnih elektrana dva do četiri puta manji. Međutim, prema tim procjenama očekuje se da će troškovi izgradnje nuklearne i solarne elektrane postati usporedivi pri kraju stoljeća. Osobito ako se uzme u obzir i porast cijena goriva, cijena će elektriciteta iz solarnih elektrana oko 2000. godine vjerojatno biti uporediva s cijenom električne energije iz nuklearnih elektrana i termoelektrana.

Spomenimo na kraju još jedan način dobivanja električne energije posrednim korištenjem solarne energije. S pomoću razlike u temperaturi slojeva na površini i slojeva u velikoj dubini oceana može se također dobiti električna energija. Zbog malene razlike u temperaturi (npr. 20 °C) efikasnost takvih toplinskih strojeva vrlo je malena (reda veličine 1%), a izvedba elektrane vrlo skupa [Br 81, Ha 80]. Jedna takva mala OTEC (Ocean Thermal Electric Conversion) elektrana (50 kW) radi na Havajima, međutim, efikasnost je malena pa se većina dobivene energije upotrebljava za pogon same elektrane.

4.6. Biokonverzija

4.6.1. Uvod

Čovjek se služio biološkim energetskim izvorima otkad postoji, koristeći proizvode fotosinteze u biljkama ne samo kao hranu nego i kao gorivo. Do početka intenzivne upotrebe fosilnih goriva (ugljena i nafte) drvo je bilo primarno gorivo za kuhanje, grijanje i industriju. U mnogim krajevima svijeta drvo je i danas jedan od važnih izvora energije. U zadnjih stotinjak godina fosilna goriva postala su primarni izvor energije i uspješno su zadovoljavala energetske potrebe, pogotovo u razvijenijim zemljama. U novije je vrijeme i nuklearna energija važna u energetici mnogih zemalja. Biološki energetski izvori sve su se manje koristili, osobito sve manje, što je zemlja postajala razvijenija. Energetska kriza 1973. godine uputila je na razvoj i primjenu nekonvencionalnih izvora energije: tako se uz ostala istraživanja sve više istražuje i primjena biomase za proizvodnju energije.

Primjena biomase, dobivene uzgojem biljaka, za proizvodnju energije ima niz prednosti, ali i nedostataka. Navest ćemo samo neke od njih. U agrikulturi i šumarstvu do sada su postignuti vrijedni uspjesi koji se mogu izravno primijeniti i za proizvodnju biomase kao goriva. Biomasu dobivamo uzgajanjem i na zemljištu koje nije pogodno za poljoprivredu. Sunčeva je energija izravno uskladištena u biomasi i može se prenositi i koristiti prema potrebi. (Pri ostalim primjenama Sunčeve energije uskladištenje je velik problem koji većinom još nije zadovoljavajuće riješen). Međutim, biomasa ne može osigurati pokrivanje većeg dijela energetskih potreba neke zemlje jer bi na ogromnim površinama trebalo uzgajati sasvim određene biljke. To bi vrlo negativno djelovalo na ekološki sustav i ravnotežu u prirodi, smanjilo poljoprivredna zemljišta i proizvodnju hrane; pretvaranje tako velikih količina biomase u energiju onečistilo bi znatno okolicu itd. Prema prednostima i manama moglo bi se reći da će i biokonverzija, uz ostale nekonvencionalne izvore, u budućnosti biti važna u proizvodnji energije, te da će služiti kao dopuna ostalim izvorima.

Dobro je poznato da je modernoj poljoprivredi potrebno mnogo energije — za proizvodnju umjetnih gnojiva, pesticide, za mehanizaciju i dr. Pri proizvodnji bioloških energetskih izvora valja nastojati da omjer između dobivene energije i energije uložene za proizvodnju biomase bude što veći. Često je, naime, pri proizvodnji hrane, osobito u razvijenim zemljama, taj omjer manji od jedan, tj. više se energije (u obliku umjetnih gnojiva, pesticida, mehanizacije) potroši nego što se dobije. Pri proizvodnji hrane takvu energetsku bilancu teško je i napraviti jer se dobiveni proizvodi upotrebljavaju za prehranu, a ne kao gorivo. Pri proizvodnji biomase bit će potrebno potrošiti što manje energije odnosno povećati energetsku efikasnost proizvodnje i konverzije. Međutim, zbog nedostatka i sve veće cijene fosilnih goriva (nafte) postat će ubrzo takva pitanja aktualnima i u poljoprivredi. I u njoj će trebati štedljivijom upotrebom kemijskih proizvoda, većom upotrebom prirodnih načina gnojenja i sl. nastojati dobiti što pozitivniju energetsku bilancu, te naći optimum između potrošene energije i dobivenog prinosa.

Opseg ove knjige ne dopušta da fotosintezu i dobijanje biomase obradimo detaljno. Samo ukratko prikazat ćemo proces fotosinteze u biljkama, ne govoreći detaljnije o kemijskim procesima koji se pri tome zbivaju. Zatim ćemo opisati neke načine proizvodnje i pretvaranja biomase u energiju. O biokonverziji je objavljeno mnogo članaka u raznim znanstvenim časopisima i mnogo izvrsnih knjiga; neke su navedene u popisu literature.

4.6.2. Fotosinteza

Fotosinteza u biljkama važan je oblik konverzije Sunčeve energije. Ona omogućuje da se osim hrane dobije i gorivo. Taj je proces počeo na našoj planeti prije oko tri milijarde godina [Br 81] i u njemu su nastali i kisik koji postoji u našoj atmosferi i fosilna goriva koja nalazimo u Zemlji.

U biljkama utjecajem Sunčeva svjetla nastaje proces fotosinteze u kojem se od ugljik-dioksida iz atmosfere i vode dobivaju organski spojevi, a oslobađa se kisik. To je vrlo složen proces; svi njegovi detalji još nisu potpuno objašnjeni. Za objašnjavanje fotosinteze osobito su zaslužni M. Calvin i J. A. Bassham. Melvin Calvin razvio je osnovnu teoriju fotosinteze organskih tvari iz CO_2 i prema njemu se niz reakcija koje se pri fotosintezi događaju u biljkama naziva Calvinov ciklus. Za svoje radove o fotosintezi Calvin je dobio Nobelovu nagradu 1952. godine.

Proces fotosinteze, iako vrlo složen, možemo s bioenergetskog gledišta prikazati jednostavnim izrazom

$$CO_2+H_2O \xrightarrow[\text{klorofil}]{\text{svjetlost}} \{CH_2O\}+O_2, \tag{4.112}$$

gdje smo s $\{CH_2O\}$ simbolično označili organsku tvar nastalu fotosintezom. U lišću biljaka nalazi se, naime, zeleni klorofil koji apsorbira svjetlosnu energiju i djeluje kao fotokatalizator, stvarajući od ugljik-dioksida i vode organske spojeve u biljci (npr. glukozu $C_6H_{12}O_6$). Fotosintezu može uzrokovati samo vidljivi dio Sunčeva spektra (0,4 μm do 0,7 μm), dakle, samo oko 43% upadne sunčane energije.

Istraživanja su pokazala da je za redukciju svake molekule CO_2 potrebno 8 do 9 kvanata vidljive svjetlosti (fotona) neovisno o frekvenciji. Za redukciju jednog mola CO_2 potrebna je energija oko 470 kJ [Ba 81, Br 81] i ona je uskladištena u dobivenim organskim spojevima. Energija fotona koji sudjeluju u fotosintezi veća je i npr. za crvenu svjetlost iznosi $9N_A h\nu \doteq$ $\doteq 1\,540$ kJ; dakle za crvenu je svjetlost maksimalna teoretska efikasnost oko 470 kJ/1 540 kJ $\doteq 30\%$. Budući da samo dio Sunčeva spektra ($400\ \mu m < \lambda < 700\ \mu m$), tj. 43% od ukupne Sunčane energije može uzrokovati fotosintezu, maksimalna je teoretski moguća efikasnost fotosinteze Sunčevim svjetlom $43\% \cdot 0{,}3 \doteq$ $\doteq 13\%$. Budući da se Sunčevo svjetlo u biljkama ne apsorbira potpuno (100%), nego samo djelomično (oko 80%), maksimalna teoretska efikasnost fotosinteze ne može biti veća od 10% [Ba 81].

Osim fotosinteze u biljkama se zbiva i suprotna reakcija (fotorespiracija)

$$\{CH_2O\}+O_2 \rightarrow CO_2+H_2O,\ \Delta Q = 470\ \text{kJ} \tag{4.113}$$

Energija dobivena takvim „disanjem" koristi se za održavanje fizioloških procesa u biljci kad nema Sunčeva svjetla (noću), a i danju ako biljki treba mnogo energije. Jedan dio tako nastale energije potreban je i za sintezu složenijih spojeva. Ako se pretpostavi da se takvim izgaranjem potroši oko 30% proizvoda nastalih fotosintezom, gornja je granica efikasnosti fotosinteze oko 7% [Ba 81].

Stvarna srednja efikasnost fotosinteze u biljkama mnogo je manja — od 0,1% do 0,2%. U uzgajanim kulturama postignuta je efikasnost od 1% do 3%, u posebnim optimalnim uvjetima do 5%, a u laboratorijima i do 6%.

Osim običnih (tzv. C3) biljaka postoje neke biljke sa složenijim ciklusom asimilacije ugljik-dioksida i smanjenom fotorespiracijom, nazivamo ih C4 biljke. One mogu dati dosta veće prinose od C3 biljaka. Biljke C4 uglavnom uspijevaju u tropskim i suptropskim krajevima, a najvažnije su šećerna trska i kukuruz s najvećim dnevnim prinosima od 40 g/m² do 50 g/m² i najvećom efikasnošću oko 3%. Najefikasnije C3 biljke (šećerna repa, alfalfa, eukaliptus, chlorea) mogu dati dnevne prinose od 20 g/m² do 30 g/m² odnosno postignuti efikasnost od 1% do 2% [Ba 81].

Proces fotosinteze mnogo je složeniji nego što ga prikazuje izraz (4.112). Sastoji se od niza reakcija; za prvu je potrebno svjetlo, a ostale se događaju bez utjecaja svjetla i zovu reakcije u tami. Navest ćemo te procese u vrlo pojednostavnjenom obliku [Br 81]. Utjecajem svjetlosti i putem klorofila u biljkama iz dvije molekule vode prenesu se četiri elektrona na četiri molekule posebne bjelančevine — feredoksina (ova se redukcija odvija na ionima željeza u molekuli):

$$2H_2O + 4Fe^{3+} \xrightarrow[\text{klorofil}]{8h\nu} 4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+. \tag{4.114}$$

Kisik se oslobađa u atmosferu, a iz nastalog reduciranog feredoksina Fe^{2+}, H^+ i CO_2 iz atmosfere nastaje organska tvar $\{CH_2O\}$, npr. glukoza $C_6H_{12}O_6$. Reakcije u tami — u kojima se djelovanjem reduciranog feredoksina, ugljik-dioksid pretvara u biomasu — možemo shematski prikazati ovako

$$4Fe^{2+} + 4H^+ + CO_2 \rightarrow 4Fe^{3+} + \{CH_2O\} \tag{4.115}$$

gdje je opet $\{CH_2O\}$ simbolička oznaka za fotosintetizirane ugljikohidrate.

Navedene reakcije daju samo približnu predodžbu kako se zbivaju procesi u biljkama. Iz njih se npr. ne vidi da su za proizvodnju organske tvari biljkama potrebni i drugi elementi: dušik, fosfor, sumpor itd. Detaljnije su procesi fotosinteze opisani u navedenoj literaturi [npr. Ba 81, Sl 79, Wi 79].

4.6.3. Proizvodnja energije iz biomase

Godišnje se na Zemlji fotosintezom proizvede oko $2 \cdot 10^{11}$ tona organske tvari (oko 10^{11} tona ugljika), što bi energetski iznosilo $3 \cdot 10^{21}$ J. To je oko deset puta više nego svjetske energetske potrebe [Br 81]. Naravno, sva proizvedena organska tvar ne može se pretvoriti u energiju, međutim, očekuje se da će biokonverzija biti važna u podmirenju energetskih potreba čovječanstva u budućnosti, čak važnija nego što je bila u prošlosti.

U novije vrijeme sve se više istražuje proizvodnja i upotreba biomase (posebno uzgojene ili razni organski ostaci) kao oblika energije. Zasad se samo mali dio (oko 1%) fotosintetizirane tvari na Zemlji upotrebljava za hranu; tako teoretski ostaje velik dio biomase neiskorišten i potencijalni je izvor energije. Osim toga proizvodnja biomase može se učiniti efikasnijom i prinosi se povećati. Navedimo prinose nekoliko biljaka pogodnih za proizvodnju biomase. Šećerna trska, poznata C4 biljka, daje godišnje oko 50 tona suhe tvari po hektaru, šećerna repa (C3 biljka) 6 t/ha, kukuruz 6 t/ha posebna vrsta algi (uzgajaju se u bazenima) od 20 do 60 t/ha i sl. Osobito su veliki prinosi biljaka u kojih nema fotorespiracije, takva je npr. šećerna trska. Efikasnost fotosinteze mogla bi se povećati smanjenjem respiracije biljaka; ako bi se u budućnosti u tome uspjelo, mogla bi se tako mnogim C3 biljkama poboljšati efikasnost odnosno povećati prinos. Postoji više načina poboljšanja produktivnosti biljaka. Gajenjem dviju ili više biljaka zajedno može se bolje iskoristiti zemljište i tako povećati prinosi. Uzgajanjem u kontroliranim uvjetima u staklenicima također se može povećati proizvodnja. Očekuje se da će se pronaći načini kako bi se raznim genetskim promjenama u biljkama moglo bitno utjecati na buduću proizvodnju biomase. Ako bi biljke mogle koristiti dušik izravno iz atmosfere, uštedjele bi se ogromne količine dušičnih gnojiva. Zasad mogu asimilirati atmosferski dušik jedino bakterije i plavo-zelene alge. Leguminoze (npr. grašak) u čvorovima na korijenju sadrže bakterije (Rizobium sp.) koje svojim encimima anaerobično (bez prisutnosti kisika) vezuju atmosferski dušik pretvarajući ga u amonijak i organske dušične spojeve.

Leguminoze obogaćuju zemljište dušikom te se često plodoredom kultura (tako da se izmjenjuju leguminoza i druga kultura) mogu uštedjeti umjetna gnojiva, a tako i energija. Upotreba pri-

rodnih gnojiva (stajskog, komposta) može također poboljšati energetsku bilancu. Ne smije se, naime, zaboraviti da se, osobito u razvijenim zemljama, mnogo energije u poljoprivredi troši na proizvodnju umjetnih gnojiva, pesticida i sl. pa uštede u tom području povećavaju omjer između dobivene i uložene energije koji pri korištenju bioloških energetskih izvora treba biti što manji. Poljoprivredni i drugi otpaci mogu se također koristiti na razne načine kao nekonvencionalni izvori energije; i ispravno gospodarenje s otpacima moglo bi također pridonijeti uštedama konvencionalnih izvora energije.

Omjer između energije dobivene iz biomase i energije uložene u proizvodnju biomase (tzv. energetski omjer) nizak je za uzgoj povrća (manji od 1), za žitarice i kukuruz nešto je veći od jedan, a za šume (i za biljke koje rastu „na divlje") može biti čak od 30 do 50 [Br 81].

Upotreba umjetnih (dušičnih) gnojiva jako smanjuje energetski omjer i pri proizvodnji biomase za energiju treba upotrebljavati što manje umjetnih gnojiva ili ih čak uopće ne upotrebljavati.

Uzgojem jednostavnih organizama — zelenih i modrozelenih algi — također se dobiva biomasa. Prinos je velik, a potrebne površine relativno malene. Efikasnost fotosinteze u algama jest 3% do 5%, a prinosi oko 50 tona suhe tvari po hektaru godišnje. Istražuje se rast mikroskopskih i makroskopskih algi (npr. Scedesmus, Spirulina, Chlorella i dr.) radi dobivanja biomase koju bismo koristili za dobivanje energije ili kao hranu. Takve alge mogu se upotrebljavati kao (životinjska) hrana, fermentirati u metan ili osušene koristiti kao gorivo [Br 81]. Među najpoznatije sadašnje istraživače algi pripadaju W. Oswald iz Berkeleyja (Kalifornija) i G. Florenzano iz Firenze.

Neke biljke mogu izravno proizvoditi hidrougljike, npr. Hevea proizvodi mnogo hidrougljika u obliku gume. Destilacijom se npr. od biljke Euphorbia mogu dobiti hidrougljici, a fermentacijom ostatka alkohol. Neke druge biljke daju ulja koja se mogu izravno upotrebljavati u dizelskim motorima.

Postoje razni načini da se iz biomase dobije energija. Biomasa se može izravno pretvoriti u energiju jednostavnim izgaranjem. To je zapravo i najstariji način energetske primjene biomase kojom se čovječanstvo uglavnom koristilo do početka upotrebe fosilnih goriva. Izgaranjem osušene organske tvari može se proizvesti pregrijana vodena para koja se može upotrijebiti za grijanje u industriji i za dobivanje električne energije, npr. u malim termoelektranama u poljoprivrednim kombinatima.

Fermentacija biomase u alkohol za sad je najrazvijenija metoda kemijske konverzije biomase. Takav se postupak najopsežnije razvija u Brazilu gdje se godišnje dobiva oko milijun tona etanola za pogon motora (vozila), a očekuje se da će se tako u budućnosti proizvesti mnogo više (u Brazilu oko $2 \cdot 10^7$ tona godišnje pri kraju stoljeća). Etanol se može dobiti fermentacijom šećernog soka (melase) iz šećerne trske, šećerne repe i drugih biljaka. Taj proces fermentacije možemo prikazati izrazom

$$\underset{\text{(šećer)}}{C_6H_{12}O_6} \xrightarrow{\text{fermentacija}} \underset{\text{(alkohol)}}{2C_2H_5OH} + 2CO_2. \qquad (4.116)$$

Tehnologija proizvodnje sastoji se od četiri faze: iscjeđivanja soka iz smljevene šećerne trske, fermentacije s pomoću kvasca, destilacije i dehidracije. Ostatak (bagasa) može se npr. upotrijebiti kao gorivo za pogon tvornice.

Etanol se može dobiti i tako da se celulozni materijal encimskom hidrolizom pretvara u glukozu iz koje se zatim fermentacijom dobiva alkohol.

Etanol pomiješan s benzinom u omjeru 1:5 do 1:10 može se jednostavno upotrebljavati u benzinskim motorima (bez ikakvih promjena na motoru). Pri tome se mogu ostvariti odgovarajuće uštede benzina, a ako bi primjena bila ekonomski opravdana, takva mješavina (poznata pod engleskim imenom „gasohol") mogla bi se naveliko upotrebljavati za pogon auto-

mobila. Pri proizvodnji alkohola od C4 biljaka, energetski je omjer povoljan (5—10), pa bi to bila jedna od najperspektivnijih konverzija biomase ako istraživanja omoguće ekonomski prihvatljivu značajnu primjenu.

Anaerobičnom fermentacijom (tj. fermentacijom bez prisutnosti kisika) može se iz biomase dobiti metan. Djelovanje posebnih bakterija na organske materijale može se prikazati pojednostavljenom jednadžbom

$$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \xrightarrow{\text{anaerobne bakterije}} 3\,n\,CO_2 + 3\,n\,CH_4 \qquad (4.117)$$

Tako nastali „bioplin" sadrži metan i ugljik-dioksid u volumnom omjeru 2:1 (i tragove NH_3 i H_2S) te se može upotrijebiti kao gorivo. Posebno je zanimljiva fermentacija stajskog gnojiva i poljoprivrednih otpadaka. Poznati su generatori bioplina iz stajskog gnojiva kojim se npr. u Indiji dobiva plin za kuhanje, rasvjetu, grijanje i pogon motora [Gu 81]. Takav uređaj može proizvesti oko 0,15 m^3 do 0,3 m^3 bioplina od kilograma fermentiranog gnojiva. Nakon fermentacije dobiva se kvalitetno prirodno gnojivo s oko 2% dušika, kvalitetnije od gnojiva upotrebljenog za fermentaciju. Fermentacija se može ubrzati zagrijavanjem, npr. s pomoću sunčanih sustava pa se tako može uspješno povezati toplinska i biološka konverzija sunčane energije.

Grijanjem bez prisutnosti zraka, tzv. suhom destilacijom ili pirolizom može se od biomase dobiti metanol, aceton, drveni ugljen i drugi produkti. Zagrijavanjem u prisutnosti ograničenih količina kisika dobiva se iz biomase smjesa plinova CO i H_2 koja se može koristiti u industriji ili kao gorivo.

U ovom smo prikazu ukratko opisali najvažnije načine proizvodnje energije iz biomase. Više o biološkim energetskim izvorima može se naći u literaturi [npr. u Sl 79, Ma 81, Ba 81a].

Literatura

[Ab 78] Abhat, A.: *First Seminar on Solar Energy Storage*, Trieste, September 1978.

[An 77] Anderson, B.: *Solar Energy*, McGraw-Hill, New York, 1977.

[An 56] Angstrom, A.: *Computation of Global Radiation from the Records of Sunshine Hours*, Arkiv Geophysik 3 (1956) 556—557

[As 77] ASHRAE Standard 93—77, *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors* ASHRAEE, New York, 1977.

[Ba 76] Backus, C. E.: *Solar Cells*, IEEE Press, New York, 1976.

[Ba 81] Backus, C. E.: *Principles of Photovoltaic Conversion and Photovoltaic Tehnology Assessment*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste 1981.

[Ba 74] Baće, M. i V., Knapp, *Zamašnjak — inercijalni spremnik energije*, Elektrotehnika 6 (1974) 338

[Ba 77] Badahori, M. N.: *Thermal Energy Storage Fourth Course on Solar Energy Conversion*, Trieste 1977.

[Ba]57] Bassham, J. A., M., Calvin: *The Path of Carbon in Photosynthesis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1957.

[Ba 81] Bassham, J. A.: *Photosynthetic Plants as Renowable Sources of Energy*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste 1981.

[Ba 81a] Bassham, J. A.: *Biachemical Transformations*, ibid.

[Be 77] Beckman, W. A.: *Solar Heating Design*, John Wiley and Sons, New York, 1977.

[Bi 77] Biswas, D. R.: *Thermal energy storage using sodinm sulfate deca hydrate and water*, Solar Energy 19 (1977) 99

[Bl 59] Bliss, R. W.: *The Derivation of Several Plate Efficiency Factors Useful in the Design of Flat Plate Solar Heat Collectors*, Solar Energy 3 (1959) 55

[Bo 76] Bockris, I. O. M.: *Energy: The Solar Hidrogen Alternative*, The Arhitectural Press Ltd, London, 1976.

[Bo 82] Bosanac, M.: *Testiranje kolektora za niskotemperaturnu konverziju sunčane energije*, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1982.

[Br 80] Bratanić, A.: *Mjerenje sunčevog zračenja*, Sunčeva energija 3 (1980) 13

[Br 81] Bratanić, A.: *Republički hidrometeorološki zavod*, Zagreb, privatno saopćenje.

[Br 78] Broda, E.: *The Evaluation of the Bioenergetic Processes*, Pergamon Press, Oxford, 1978.

[Br 81a] Broda, E.: *Photosynthesis and Bioconversion*, Second Inter. Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Br 81b] Broda, E.: *Solar Energy in the Nineteen Eighties*, 2nd Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste 1981.

[Br 79] Brooks, H., J. M., Hollander: *United States Energy Alternatives to* 2010 *and Beyond*, the Conaes Study, Ann. Rev. Energy 4 (1970) 1—70

[Br 80a] Brown, N. L.: *Renewable Energy Resources for Developing Countries*, Ann. Rev. Energy 5 (1980) 389—413

[Br 77] Bruno R., et al.: *Berechung and Optimierung von Sonnenenergie Systemen zur Warmwasserversorgung*, Arbeitsgemeinschaft Solarenergie ASE, Essen, 1977.

[Bs 78] *Usability of Solar Collectors*, Bundesverband Solarenergie (BSE), 1978.

[Bu 78] Bujakowski, E.: *The Performance of Solar Water Heating Systems with Flat Plate Collectors*, Proceedings of the 2nd International Solar Forum, Hamburg, Vol. II, (1978) 65

[Bu 77] Bureta, F.: *Solar Thermal Energy in Industrial Process*, 4th Course on Solar Energy Conversion, Trieste 1977.

[Ca 76] Calvin, M.: *Photosynthesis as a Resource for Energy and Materials*, Amer. Scient. 64 (1976) 270

[Ca 77] Caputo, R. S.: *Solar Power Plants: Dark Horse in a Energy Stable*, Bull. Atomic Scient. May (1977) 47

[Cl 80] Clayton, R.K.: *Photosynthesis: Physical Methods in Chemical Patterns*, Cambridge University, 1980.

[Co 69] Cooper, P. I.: *The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills*, Solar Energy 12 (1969) 3

[Co 79] Collares-Pereira, M., A., Rabl: *The Average Distribution of Solar Radiation-Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values*, Solar Energy 22 (1979) 155

[Cv 75] Cvitaš, T., N., Kallay: *Fizičke veličine i jedinice Međunarodnog sustava*, Hrvatsko kemijsko društvo i IRO Školska knjiga, Zagreb, 1981.

[De 81] Deb, S.: *The Status of Advanced Photovaltaic R&D at Solar Energy Research Institute*, Sec. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[De 80] Derrick A., W. B., Gillet: *Recommendations for European Solar Collector Test Methods*, CEC, Cardiff, 1980.

[De 79] Desnica, U., N., Galešić: *Efikasnost rada solarnog uređaja za dobivanje tople vode na Jadranu*, Zbornik radova savjetovanja Primjena sunčeve energije u turističkim objektima, Trogir, 1979.

[De 80a] Desnica, U., N., Urli: *Određivanje optimalnih odnosa među pojedinim komponentama solarnog sistema za dobivanje tople potrošne vode*, Sunčeva energija 2 (1980) 31

[De 80b] Desnica, V., B., Pivac: *Mogućnosti zagrijavanja zgrade sunčevom energijom u Zagrebu*, Sunčeva energija 3 (1980) 25

[De 83] Desnica, U., et al.: *Climatic Predispositions of Yugoslavia for Solar Energy Application*, Solar Energy 30 (1983) 401

[Di 80] Dickinson, W. C., P. N., Cheremisinoff: *Solar Energy Technology Handbook*, M. Dekker, Inc. New York, 1980.

[Di 79] Dixon, A. E., J. D., Leslie: *Solar Energy Conversion*, Pergamon Press, New York, 1979.

[Di 79a] Dixon, A. E.: *Basic of Solar Cells*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

[Djo 77] Đorđević, N.: *Sunčeva energija — mjerenje količine i metodologija obrade u zavisnosti od namene i korištenja*, Savetovanje sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.

[Do 78] Dorf, R. C.: *Energy, Resources and Policy*, Addison-Wesley Publ. Comp. Reading, Mass., 1978.

[Du 74] Duffie, J. A., W. A., Beckman: *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley and Sons, New York, 1974.

[Du 80] Duffie, J. A., W. A., Beckman: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, New York, 1980.

[Fa 81] Faninger, G.: *Solar Thermal Conversion*. Sec. Int. Simp. on Non-Conv. Energy, Trieste, 1981.

[Fi 78] Fittipaldi, F.: *Energy Storage by Solid — Solid Phase Changing Materials*, First Seminar on Solar Energy Storage, Trieste, 1978.

[Fo 68] Fogg, G. E.: *Photosynthesis*, English University Press, London, 1968.

[Ga 70] Gamser, F.: *Prilog metodici obrade globalnog zračenja*, 8. Savetovanje klimatologa Jugoslavije, Zlatibor, 1970.

[Ga 77] Gamser, F.: *Raspodela komponenata sunčevog zračenja u Jugoslaviji prema merenjima u mreži stanica*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.

[Ga 78] Gamser, F.: *Merenje sunčanog zračenja u Jugoslaviji*, Klimatizacija, grejanje i hlađenje, 2 (1978) 43

[Ga 81] Gardel, A.: *Energy, economy and prospective*, Pergamon Press, Oxford, 1981.

[Ga 63] Gates, D. M., W. J., Harrop: *Infrared transmission of the atmospheric to solar radiation*, Appl. Opt. 2 (1963) 887

[Gb 77] Gburčik, V.: *Sunčevo zračenje u meteorološkom informacionom sistemu*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.

[Gb 80] Gburčik, V., Z., Krajinović: *Dnevne i godišnje varijacije globalnog sunčevog zračenja*, Zbornik radova Solar 80, Beograd, 1980.

[Gi 79] Givoni, B.: *Passive Cooling of Buildings by Natural Energies*, Energy and Building, 2 (1979) 279

[Gi 81] Givoni, B.: *Integrated Passive Systems of Heating and Cooling Buildings by Natural Energies*, Sec. Int. Symp. on Non-Conv. Energy, Trieste 1981.

[Gr 80] Grabovac, J., M., Rogošić: *Domaća proizvodnja solarnih uređaja*, Sunčeva energija, 4 (1980) 15

[Gr 81] Grabovac, J., M., Živković: *Priprema tople vode stambenog naselja pomoću sunčane energije*, Sunčeva energija, 3 (1981) 225

[Gr 82] Grabovac, J., et al: *Possibilities for Yugoslav Manufacture of Solar Plants*, 4 Int. Solar Forum, Berlin, (1982) 287

[Gu 81] Gupta, M. C.: *Solar Energy Use in Rural India*, Perspectives, Prospects and Challenges, Sec. Int. Symp. on Non-Conv. Energy, Trieste, 1981.

[Ha 79] Hauska, G.: *Photosynthesis in Chloroplast*, First, Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Triste, 1979.

[Ho 42] Hottel, H. C., B. B., Woertz: *The Performance of Flat Plate Solar Heat Collectors*, ASME Transactions, Vol. 64 (1942) 91

[Iv 77] Ivanović, D.: *Raspodela trajanja sijanja Sunca u Jugoslaviji po godišnjim dobima i za godinu*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.

[Ja 80] Jaras, L., L., Hoffmann, A., Jaras, G., Obermair: *Wind-energie*, Springer-Verlag, Berlin, 1980.

[Jo 75] Jurrison, J., R. E., Peterson, H. Y. B., Mar: *Principles and applications of selective solar coatings*, J. Vac. Sci. Technol., 12 (1975) 1010

[Ju 75] Juzbašić, B.: *Elektronički elementi*, Školska knjiga, Zagreb, 1975.

[Ju 78] Juzbašić, B.: *Solarna ćelija kao fotoelektrički pretvarač energije*, Elektrotehnika 21 (1978) 5

[Ka 78] Kadiroglu, O. K.: *Nuclear Energy and Alternatives*, Ballinger Publ., Cambridge, Mass., 1978.

[Ka 76] Kauffman, K. W., H. G., Lerch: *Thermal energy Storage with Saturated Aqueous Solution*, Sharing the Sun, Vol. 8. Winnipeg, (1976) 227

[Ke 77] Ketani, M. A.: *Storage of Solar Energgy*, in *Solar Energy Engineering*, ed. A. A. M. Sayigh, Academic Press, New York, 1977.

[Kl 76] Klein, S. A., W. A., Beckman: TRNSYS, *A Transient System Simulation Program*, ASHRAE Trans. 82 (1976) 623

[Kl 77] Klein, S. A.: *Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces*, Solar Energy 19 (1977) 325

[Kr 75] Kreider, J. F., F., Kreith: *Solar Heating and Cooling*, McGraw-Hill, New York, 1975.

[Kr 81] Kreider, J. F., F., Kreith: *Solar Energy Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1981.

[Kr 78] Kreith, F., J. F., Kreider: *Principles of Solar Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1978.

[Ku 80] Kulišić, P., et al: *Thermal Energy Storage Using Heat of Solution*, Tagungsbericht des 3. Internationalen Sonnenforums, Hamburg, 1980.

[Ku 81] Kulišić, P.: *Mogućnosti dobivanja tople vode pomoću solarne energije*, Energija, 7—8 (1981) 351

[Ku 82] Kulišić, P.: *The Estimation of Diffuse Radiation in Yugoslavia*, Report on Non-Conventional Energy, Activities, ICTP 82/237, Trieste, 1982.

[La 82] Lalović, B.: *Solarne kuće*, specijalno izdanje „Galaksije", BGZ, Beograd 1982.

[La 82] Lalović, B.: *Nasušno Sunce*, Nolit, Beograd, 1982.

[La 81] Lambić M., et al.: *Prilog analizi karakteristika ravnih pločastih kolektora*, Sunčeva energija 3 (1981) 205

[Li 60] Liu, B. Y. H., R. C., Jordan: *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse* and *Total Solar Radiation*, Solar Energy 4 (1960) 1

[Li 62] Liu, B. Y. H., R. C., Jordan: *Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator*, ASHRAE Trans. (1962) 526

[Lö 66] Löf, G., et al.: *World Distribution of Solar Radiation*, Report No 21, Solar Energy Lab., University of Wisconsin, July 1966.

[Lö 81] Löf, G.: *Solar Collectors and Components of Air Systems*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Lu 80] Lunde, P. J.: *Solar Thermal Engineering, Space Heating and Hot Water System*, J. Wiley, New York, 1980.

[Ma 81] Manchini, N. A.: *Methods of Thermal Storage*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Ma 77] Mastronarde, T. P.: *A Study of Solar Water Heating for Existing Homes in Southern New England*, Heat Transfer in Solar Energy System, ASME, New York, 1977.

[Ma 81c] Mattar, H.: *Biomass Conversion to Fuel*, Sec. International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Ma 76] Mattax, D. M.: *Coatings and Surface Treatments in Solar Energy Applications*, Plating and Surface Finishing, Jan. (1976) 55

[McD 79] McDaniels, D. K.: *The Sun, Our Future Energy Source*, John Wiley and Sons, New York, 1979.

[McM 76] McMullan, J. T., R., Morgan, R. B., Murray: *Energy Resources and Supply*, John Wiley and Sons, New York, 1976.

[McV 77] McVeigh, J. C.: *Sun Power*, Pergamon Press, Oxford, 1977.

[Me 76] Meinel, A. B., M. P., Meinel: *Applied Solar Energy*, Addison-Wesley Pub. Comp., New York, 1976.

[Me 75] Messel, H., S. T., Butler: *Solar Energy*, Pergamon Press, Oxford, 1975.

[Mi 77] Mitsui, A., et al.: *Biological Solar Energy Conversion*, Academic Press, New York, 1977.

[Mu 80] Murr, L. E.: *Solar Material Science*, Academic Press, New York, 1980.

[No 78] Novak, P.: *Metode ispitivanja niskotemperaturnih kolektora sunčane energije*, Međunarodni simpozijum o tehničkim, ekonomskim i organizacionim aspektima korišćenja Sunčeve energije, Beograd, 1978.

[No 79] Novak, P.: *Sunčeva energija, zgrade i sistemi grijanja*, Sunčeva energija 2 (1979) 9

[Pa 64] Page, J. K.: *The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunchine Record for Latitudes* 40° N—40° S, Proc. U. N. Conf., New Sources of Energy, Vol. 4 (1964) 378

[Pa 81] Parangtopo et al.: *Review and Analysis of the Global and Diffuse Solar Radiations in Jakarta*, Sec. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Pa 80] Pažanin, J.: *Kakvi su trenutni izgledi za popravak energetske bilance uključivanjem u sistem sunčeve energije*, Sunčeva energija 3 (1980) 31

[Pe 74] Penner, S. S., L., Icerman: *Energy*, Ad. Wesley Publ. Comp. Reading Mass. 1974.

[Pe 59] Penzar, I.: *Globalna radijacija u Zagrebu na temelju* 10-*godišnjega mjerenja*, Radovi Geof. zavoda 2 (1959) 1—31

[Pe 60] Penzar, B., I., Penzar: *Raspodjela globalne radijacije nad Jugoslavijom i Jadranskim morem*, Hidrografski Institut JRM, Split, 1960.

[Pe 63] Penzar, I.: *Kakva je veza između globalnog zračenja i trajanja insolacije u Zagrebu*, Vjesnik HMS, Beograd. 3—4 (1963) 1—9

[Pe 65] Penzar, I.: *Ovisnost direktne difuzne i globalne radijacije o ekstinkciji u atmosferi*, Zbornik meteoroloških i hidroloških radova 2 (1965) 2

[Pe 70] Penzar, B.: *Klimatski podaci opservatorija Zagreb, Grič za razdoblje* 1982—1967, Geofizički Zavod, Zagreb, 1970.

[Pe 73] Penzar, I.: *Dnevne količine ekstraterestričke i prizemne radijacije pri povoljnim uvjetima u pojasu od* 41° do 47° N, Rukopis, Zagreb, 1973.

[Pe 73a] Penzar, I.: *Ekstraterestričke vrijednosti Sunčeve radijacije na geografskoj širini* 45°49′ *N*, Zbornik meteoroloških i hidrometeoroloških radova, 4 (1973) 3

[Pe 77] Penzar, I.: *Neki podaci o Sunčevoj iradijaciji u Jugoslaviji*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.

[Pe 77a] Penzar, I.: *Aktinometrijski podaci potrebni za iskorištavanje sunčeve energije*, II konferencija SITH o tehnološkom razvoju SRH, Poreč, 1977.

[Pe 79] Penzar, I., A., Bratanić: *Proračun dnevnog hoda sunčevog zračenja u Splitu na južnu kosu plohu*, Savjetovanje Primjena Sunčeve energije u turističkim objektima, Trogir, 1979.

[Pe 76] Pettit, R. B., R. R., Sowell: *Solar absorptance and emitance properties*, J. Vac. Sci. Technol. 13 (1976) 599

[Pi 80] Pivac, B., et al.: *Utjecaj koeficijenata apsorpcije i emisije premaza apsorbera na efikasnost rada kolektora sunčevog zračenja*, Sunčeva energija 4 (1980) 9

[Pl 77] Pleško, N.: *Odnosi sunčeva zračenja, trajanja sijanja sunca i naoblake u Zagrebu*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.

[Po 78] Popović, M., et al.: *Raspodela globalnog zračenja nad Jugoslavijom*, Klimatizacija grejanje hlađenje, (KGH), Beograd 2 (1978) 31

[Po 79] Popović, M.: *Optimalni nagib prijemnika sunčeve energije i rezultati mjerenja sunčevog zračenja*, KGH 3 (1979) 49

[Po 77] Požar, H., V., Knapp: *Oscilacija intenzivnosti Sunčevog zračenja i ritam potrošnje energije*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd 1977.

[Pu 78] Pulfrey, D. L.: *Photovoltaic Power Generation*, Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 1978.

[Qu 79] Quercia, I. F.: *Bioconversion of Solar Energy*, First Inter. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

[Ra 69] Rabinovitch, E., Govindjee: *Photosynthesis*, J. Willey, New York, 1969.

[Ru 75] Ruedisili, L. C., M. W., Firebaugh: *Perspectives of Energy*, Oxford University Press, London, 1975.

[Sa 77] Sabbagh, J. A., et al.: *Estimation of the total radiation from meteorological data*, Solar Energy, 19 (1977) 307

[Sa 77] Sayigh, A. A. M.: *Solar Energy Engineering*, Academic Press, New York, 1977.

[Sa 77] Sayigh, A. A. M.: *Estimation of Total Radiation Intensity*, Fourth Course on Solar Energy Conversion, Trieste, 1977.

[Sa 78] Sayigh, A. A. M.: *The Technology of Solar Heat Flat Plate Collectors*, Journal of Eng. Scient., 4 (1978) 75

[Sa 81] Sayigh, A. A. M.: *Solar Radiation and its Measuring Equipment*, Sec. Int. Symp. on Non-Conv. Energy, Trieste, 1981.

[ScA 71] *Scientific American* 134 (1971), broj posvećen energetskim pitanjima.

[Sch 78] Schröer, R., H. J., Stein, H. D., Talarek: *Use of Collector Deficiency Testing*, Proceedings of Australian-German Workshop on Solar Energy System Design, Düseldorf, 1978.

[Se 79] Selders, M., D., Bonnet: *Solarzellen*, Physik in unserer Zeit, 1 (1979)

[Se 79] Selcuk, M. C.: *A Graphical Approach to the Efficiency of Flat Plate Collectors*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

[Se 81] Seraphin, B. O.: *Material Science Aspects of Photothermal Solar Energy Conversion*, Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Sl 79] Slesser, M., C., Lewin: *Biological Energy Resources*, Spon, London, 1979.

[Sm 76] Smith, I. E.: *Energy Storage* in I. M., Blair et al., *Proceeding of Summer School*, Oxford, 1975, Pergamon Press, 1976.

[So 59] Sokić, S.: *Meteorološki instrumenti*, Hidrometeorološki zavod, Beograd, 1959.

[Sz 75] Szokolay, S. V.: *Solar Energy and Building*, Architectural Press, London, 1975.

[Ta 79] Tabor, H.: *Selective Surface*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

[Ta 79] Talarek, H. D.: *Testing of Liquid Heating Flat Plate Collectors Based on Standard Procedures*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, ICTP, Trieste, 1979.

[Ta 79] Tabor, H.: *Energy Storage in Solar Energy Exploitation*, First Inter. Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

[Ta 80] Tabor, H.: *Solar Ponds*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Ta 80a] Tabor, H., Z., Weinberger: *Non-Conventing Solar Pond*, Solar Energy Handbook, ed. J. F. Kreider, McGraw-Hill, New York, 1981.

[Ta 81] Talarek, H. D.: *Pyranometry in Solar Energy*, Sec. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Te 74] Telkes, M.: *ASHRAE Transactions*, Vol. 80, 1974.

[Te 82] *Tehnička enciklopedija*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1976.

[Th 73] Thekaekara, M. P.: *Solar Energy Outside the Earth's Atmosphere*, Sol. Energy, 14 (1973) 109—127

[Tr 79] Trebst, A.: *Photosynthesis in Chloroplast*, First Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

[Ve 77] Veziroglu, T. N., S., Kakac: *Solar Production of Hydrogen* in *Solar Energy Engineering*, ed. A. A. M. Sayigh, Academic Press, New York, 1977.

[Ve 81] Veziroglu, T. N.: *The Unifier of Non-Conventional Energy Sources: Hydrogen Energy System*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.

[Vl 81] Vlahović, B., et al.: *Globalno zračenje na južne nagnute plohe u Jugoslaviji*, Sunčeva energija 3 (1981) 199

[Vu 77] Vuletin, J., F., Marčelja, P., Kulišić, M., Bosanac: *Selektivni slojevi za konverziju sunčeve energije*, Energija, 11—12 (1977) 425

[Vu 78] Vuletin J., et al.: *Fototehnička metoda konverzije sunčane energije* KGH 2 (1978) 53

[Vu 81] Vuletin, J., P., Kulišić, M., Bosanac: *Selectively Absorbing Coatings*, Journal de Physique, 42 (1981) C 1-191

[Vr 80] Vršnak, B.: *Sunce besprijekorni termonuklearni reaktor*, Sunčeva energija, 2 (1980) 9—11

[Wa 80] Walton, J. D.: *Introduction*, Proceedings of the First Seminar on Thermal Solar Energy Storage, Trieste, 1978.

[We 73] Weast, R. C.: *Handbook of Chemistry and Physics*, The Chemical Rubber Co., Cleveland, 1973.

[Wh 77] Whillier, A.: *Prediction of Performance of Solar Collectors*, ASHRAE GRP 170, New York, 1977.

[Wi 79] Wilson, J. I. B.: *Solar Energy*, Wykeham, London, 1979.

[WMO 82] *Commission for Instruments and Methods of Observation*, Abridged Report of the Eighth Session, Mexico City 19—30. X 1981. — WMO No 520

[Ya 73] Yass, K., H. B., Curtis: *Low Cost Air Mass 2 Solar Simulator* NASA TM X — 3059, 1973.

5. Nuklearna fisija

Zadatak ovog dijela utvrđen je u poglavlju 3.3. Tamo smo govorili o dugoročnom potencijalu energije nuklearne fisije. Zaključeno je da se potencijal fisijske energije može procijeniti tek na temelju detaljnijeg pregleda razvoja koji bi omogućio bolje iskorištenje energije urana, odnosno energije fisije urana-238 i torija-232.

O tome se ponajviše raspravlja u 1, 2, 3. i 4. poglavlju ovog dijela. U poglavlju 5. i 6. govori se o odlaganju radioaktivnog otpada i sigurnosti, kao odlučnim činiteljima za dugoročnu prihvatljivost fisijske nuklearne energije.

U 7. poglavlju raspravlja se o zalihama urana kao vrlo važnom činitelju za procjenu perspektive dobivanja fisijske energije. U ovom dijelu nisu opisani svi putovi razvoja koji bi mogli voditi prema boljem iskorištavanju energije urana i torija. Konverzija urana-238 i torija-232 u plutonij-239 odnosno uran-233 moguća je i s neutronima proizvedenim u akceleratorima ili fuzijskim uređajima. Danas se čine osobito interesantni za to fuzijski uređaji. Zato je logično da je simbiotički fuzijsko-fisijski sustav opisan u 6. dijelu kako bi se mogla promotriti perspektiva a i uvjeti koje mora zadovoljiti fuzijski dio sustava. Svugdje se izlaže samo ono što je prijeko potrebno za ocjenu dugoročnog potencijala fisije. Sustavan i detaljniji pregled raznih reaktorskih sustava nepotrebno bi povećao opseg ovoga rada. Detaljniji podaci za danas prevladavajuće termičke i brze oplodne reaktore, podloga su za kvantitativno prosuđivanje potreba za uranom.

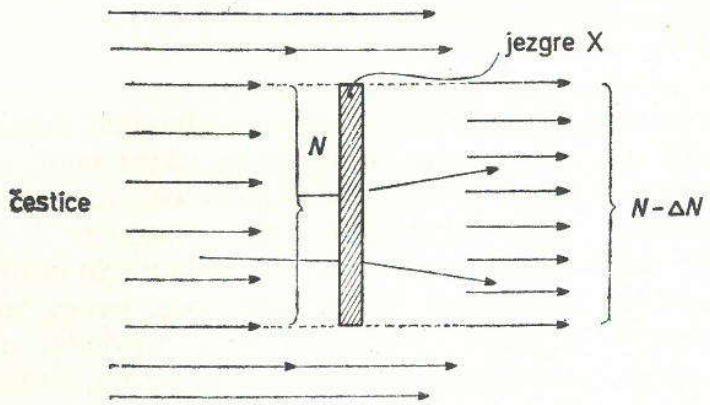
5.1. Fizikalni aspekti iskorištavanja energije fisije

5.1.1. Cijepanje atomske jezgre; fisija

Jedna od osnovnih i najvažnijih karakteristika svake nuklearne reakcije, pa tako i fisije, jest vjerojatnost kojom se ona odvija. Nuklearnu reakciju $a+X \rightarrow Y+b$ pripadna vjerojatnost reakcije određuje kvantitativno. U nuklearnoj i reaktorskoj fizici vjerojatnosti reakcija izražavaju se udarnim presjekom σ. Dodavanjem indeksa pobliže se označuje tip reakcije, npr. σ_a jest oznaka za udarni presjek za apsorpciju, a σ_s za raspršenje.

Udarni presjek

Jednostavne su prilike za kvantitativno određivanje vjerojatnosti nuklearne reakcije ako u struju čestica a stavimo tanak sloj, foliju materijala koji sadrži jezgre X. Ako je N broj čestica koje prođu kroz foliju, a ΔN broj reakcija, vjerojatnost reakcije na foliji izražena omjerom $\frac{\Delta N}{N}$ ne ovisi o njezinoj površini. Udvostručimo li njezinu površinu, udvostručit će se broj čestica koje kroz nju prolaze, ali i broj reakcija (sl. 5.1) pa kvocijent ostaje nepromijenjen. Međutim, vjerojatnost nuklearne reakcije ovisi o debljini folije. To je očigledno stavimo li drugu foliju iza prve; bit će tada više reakcija za isti broj upadnih čestica. Pri određivanju vjerojatnosti nuklearne reakcije treba isključiti ovisnosti o nenuklearnim makroskopskim odnosima. Debljina folije određuje broj jezgara tipa X po jedinici površine. Ako je debljina folije Δx, a materijal sadrži ρ jezgara po jedinici volumena, na jediničnoj površini nalazi se $n=\rho\Delta x$ jezgara X. Ako želimo isključiti nenuklearnu ovisnost vjerojatnosti reakcije, treba folija biti takve debljine dx da sadrži samo jednu jezgru X po jedinici površine. Ili, što je isto, vjerojatnost raspršenja $\frac{\Delta N}{N}$ na foliji debljine Δx valja podijeliti brojem jezgara po jedinici površine n.



Slika 5.1. Odnosi uz definiciju udarnog presjeka

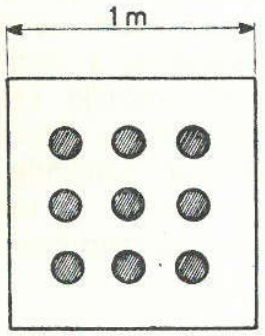
Tako dobivena vjerojatnost nuklearne reakcije ovisi samo o nuklearnim svojstvima čestice a i jezgre X, te o njihovoj relativnoj energiji, a naziva se udarni presjek. Udarni presjek označuje se grčkim slovom sigma σ. Iz definicije

$$\sigma = \frac{1}{n}\frac{\Delta N}{N} \tag{5.1}$$

razabire se da udarni presjek ima dimenzije površine. Prijašnjih godina kao jedinica za udarni presjek koristio se barn, b; 1 b$=10^{-28}$ m^2. Prema definicijskoj jednadžbi za udarni presjek broj reakcija na foliji debljine Δx iznosi

$$\Delta N = N\,\sigma\cdot\rho\,\Delta x. \tag{5.2}$$

Budući da udarni presjek ima dimenziju površine može se zorno predočiti kao površina koju jezgra X „izlaže" projektilima a, a reakcija se dogodi ako čestica a pogodi u tu površinu. Da je ta predodžba korektna može se vidjeti na slici 5.2. Na foliji debljine Δx jezgrama je „prekri-



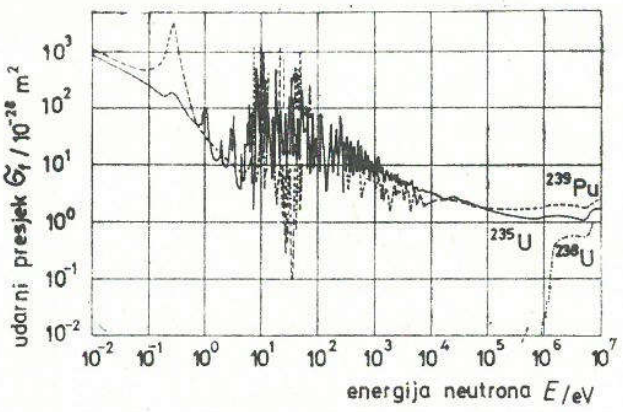
Slika 5.2. Zorna predodžba udarnog presjeka površinom koja se efektivno izlaže upadnoj čestici

ven" dio površine $\frac{\sigma\rho\Delta x}{1}$, pa u istom omjeru stoji i omjer broja reakcija prema broju upadnih čestica

$$\frac{\Delta N}{N} = \sigma\rho\Delta x. \tag{5.3}$$

Relacija za broj reakcija identična je s onom koju smo dobili polazeći od definicije udarnog presjeka kao vjerojatnosti, što znači da je takva zorna predodžba ispravna. Međutim, valja napomenuti da „izložena" površina općenito nema mnogo veze sa stvarnim dimenzijama jezgre i površinom $R^2\pi$ koju ona doista izlaže upadnim česticama ako je njezin polumjer R. Udarni presjek može biti i veći i manji od te površine.

Na primjer pri reakcijama fisije sa sporim neutronima udarni je presjek znatno veći od površine koju izlaže fisijska jezgra. To je zato što pri reakcijama neutrona niskih energija njihove valne duljine valova materije postaju velike i određuju efektivnu veličinu u izazivanju nuklearne reakcije. Da bi nastala reakcija treba se neutron približiti jezgri do reda veličine njegove valne duljine. Ovisnost o valnoj duljini samo je jedan od činitelja koji određuju vjerojatnost reakcije; samo se neke jezgre pobuđuju na fisiju sporim neutronima, u nekim područjima relativnih energija vjerojatnost je vrlo promjenljiva. To su tzv. rezonancije, koje odražavaju ovisnost udarnog presjeka o unutrašnjoj strukturi fisibilne jezgre.



Slika 5.3. Udarni presjeci za fisiju σ_f jezgri Pu-239, U-235 i U-233 u ovisnosti o energiji neutrona

Na slici 5.3. prikazani su udarni presjeci za fisiju jezgara plutonija-239 i urana-235, te jezgara urana-238 ovisno o energiji neutrona. Vidi se da su udarni presjeci odnosno vjerojatnosti reakcije značajno ovisni o energiji neutrona. Prema sklonosti fisiji razlikuju se nuklid urana-238 i nuklid plutonija-239 i urana-235. Jezgra urana-238 ne može se cijepati ako energija neutrona nije najmanje 1 MeV, a jezgre druga dva nuklida cijepaju se već pri najmanjim energijama neutrona. Udarni presjeci tih nuklida pri niskim, tj. termičkim energijama neutrona veći su i tisuću puta nego pri visokim energijama. Općenito govoreći, to može uzrokovati povećana valna duljina pripadnih valova materije, određena prema De Broglievoj relaciji $\lambda = \frac{h}{p}$ kvocijentom Planckove konstante h i količine gibanja p. Povećanje udarnog presjeka pri niskim energijama neutrona dolazi do izražaja samo u fisibilnih jezgara, na primjer plutonija-239 i urana-235, koje se mogu cijepati i sa sasvim sporim neutronima. Za uran-238 taj se učinak ne može iskoristiti jer jezgra urana-238 ima paran broj neutrona.

Jezgre s parnim brojem istovrsnih nukleona redovito su jače vezane nego slične jezgre s neparnim brojem nukleona. Stoga će se jezgri urana-238 dodan neutron slabije vezati i unijeti manju energiju u novonastalu složenu jezgru urana-239 nego neutron dodan jezgri s neparnim brojem neutrona, npr. jezgri urana-235.

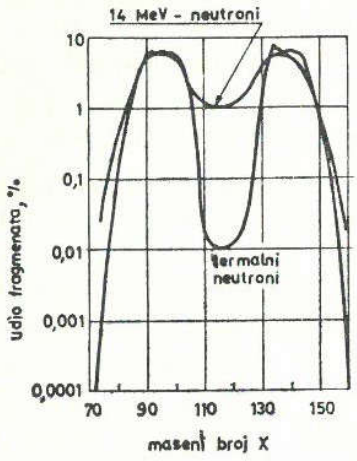
Ta veća energija unesena s dodanim neutronom u uran-235 dovoljno je velika da pobudi nastalu složenu jezgru urana-236 na oscilacije toliko snažne da je raskidaju u dijelove, tj. uzrokuju fisiju. Pobuđenje jezgre urana-239 pri dodavanju sporog neutrona uranu-238 nije dovoljno da uzrokuje fisiju.

Zbog istog razloga sporim neutronima ne cijepaju se ni nuklidi Th-232, Pu-240 ili Pu-242, a cijepaju se nuklidi U-233, Pu-241 i izrazito fisibilni nuklidi U-235 i Pu-239. U vrijednostima udarnih presjeka plutonija-239 i urana-235 za energije od 1 eV do 100 eV opažaju se izrazite i oštre oscilacije. To je tzv. rezonantno područje udarnih presjeka.

Ako se materijal koji sadrži fisibilni nuklid obasjava neutronima, broj u njemu uzrokovanih fisija bit će proporcionalan udarnom presjeku za fisiju tog nuklida. Tu je veličina udarnog presjeka za fisiju prema tome odlučujuća za tehničku konstrukciju uređaja za iskorištavanje energije fisije. O njoj će ovisiti veličina uređaja, gustoća snage i potrebna količina fisibilnog materijala.

Kad se neutron apsorbira u nekoj fisibilnoj jezgri (npr. jezgri urana-235), nastala složena jezgra (urana-236) bit će u pobuđenom stanju. Neutron je jezgri „donio" svoju energiju vezanja. Energijsko pobuđenje jezgre manifestira se kao oscilacija oblika jezgre. U osnovnom stanju jezgra ima oblik rotacijskog elipsoida, s neznatno različitim poluosima. U pobuđenom stanju jezgra vibrira oko tog osnovnog oblika produžujući i skraćujući dulju poluos. Pri intenzivnim izduženjima jezgra gubi oblike rotacijskog elipsoida, suzuje se u pojasnom dijelu i prima oblik u kojem se ističu dva posebna dijela kuglastog oblika. Ponašanje je slično oscilacijama kapljice tekućine kao posljedice djelovanja molekularnih sila, odnosno napetosti površine. Zbog niza svojstava jezgre koja pokazuju paralelizam sa svojstvima tekućine; stalnog volumena, kratkog dosega i zasićenja nuklearnih sila, mogu se oscilacije oblika jezgre pre-

dočiti i opisati teorijom o oscilaciji kapljice tekućine. Kao i kapljica tekućine, jezgra nastoji poprimiti oblik najmanje površine pri određenom volumenu. Pri velikoj deformaciji jezgra se najprije suzuje u pojasu, a zatim se zbog tendencije smanjenja površine prekida pa se razdvajaju krajnji kuglasti oblici. Dogodila se fisija! U približno 85% slučajeva apsorpcija neutrona u jezgri urana-235, intenzivne oscilacije uzrokuju cijepanje jezgre. Pri fisiji uzrokovanoj neutronima niskih energija karakteristično je da cijepanje nije simetrično (sl. 5.4).



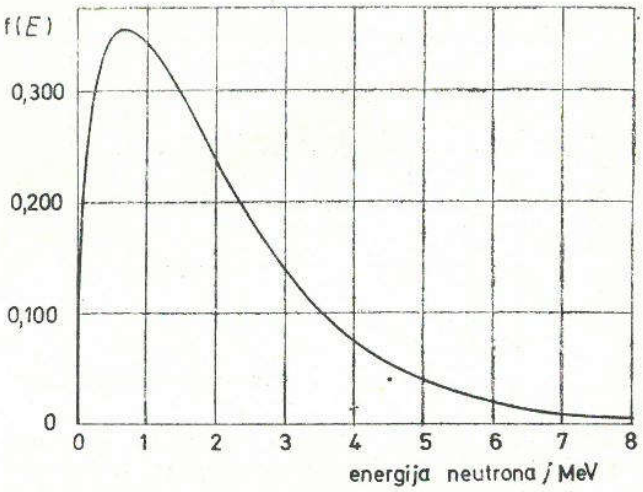
Slika 5.4. Udio fisijskih fragmenata masenog broja X u produktima fisije

Kvalitativno objašnjenje moguće je u sklopu tzv. ljuskastog modela jezgre koji opisuje strukturu jezgre pri niskim pobuđenjima. Neutroni pri fisiji emitiraju se u širokom spektru energija, a njihov oblik može se analitički izraziti ovisnošću o energiji neutrona E (u MeV):

$$f(E)\,dE = 0{,}453\ e^{-1{,}036E}\ 34\sqrt{2{,}29\,E}\cdot dE \qquad (5.4)$$

gdje funkcija $f(E)\,dE$ daje dio neutrona emitiran energijom u području od E do $E+dE$. Pri fisiji urana-235 maksimum raspodjele u spektru energije nalazi se oko 0,72 MeV, a srednja je neutronska energija približno 2 MeV (sl. 5.5).

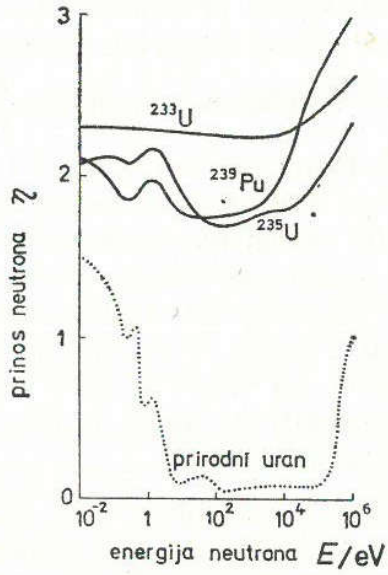
Prosječan broj fisijskih neutrona $\bar{\nu}$ po jednoj fisiji ovisi o energiji neutrona koji je prouzročio fisiju. Pri termičkim



Slika 5.5. Energetski spektar neutrona emitiranih pri fisiji U-235

energijama neutrona, taj broj za uran-235 jest 2,43 i raste gotovo linearno do 2,50 pri energijama neutrona oko 1 MeV. Budući da jedan dio apsorbiranih neutrona ne uzrokuje fisiju, važnija je veličina neutronski prinos η; to je broj fisijskih neutrona proizvedenih po jednom neutronu apsorbiranom u materijalu goriva. Neutronski prinos η toliko je manji od $\bar{\nu}$, koliko je nefisijska apsorpcija neutrona veća

$$\eta = \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}\,\bar{\nu}. \qquad (5.5)$$



Slika 5.6. Neutronski prinos η fisibilnih nuklida urana—233, urana—235, plutonija—239 i prirodnog urana u zavisnosti od energije fisijskih neutrona E

Uran-235 ima relativno visoki prinos neutrona u području niskih energija neutrona.

Pri visokim energijama neutrona osobito visok prinos ima plutonij-239 (sl. 5.6).

Najveći dio fisijskih neutrona emitira se istodobno s fisijom, a manji dio iz fisijskih dijelova sa zakašnjenjima i do više desetaka sekundi. Pri fisiji urana-235 udio je zakašnjelih neutrona 0,65%, a srednje je zakašnjenje 13 sekunda.

5.1.2. Samoodržanje fisije; lančana reakcija

Samoodržanje fisije omogućuju u procesu fisije oslobođeni neutroni, prosječno oko 2,5 po fisiji jedne jezgre. Samoodržanje fisije može se ostvariti ako bar jedan od tih neutrona prouzroči novu fisiju u okolnim jezgrama. Samoodržanje fisijske reakcije tako da fisijski neutroni uzrokuju nove fisije, naziva se lančanom reakcijom. Za odvijanje lančane reakcije odlučne su dvije veličine: faktor multiplikacije k i trajanje fisijske generacije τ u lančanoj reakciji.

Trajanjem jedne fisijske generacije naziva se prosječno vrijeme između dviju uzastopnih fisija (da bi fisijski neutroni bili emitirani iz neke jezgre i dospjeli do drugih fisibilnih jezgara potrebno je neko vrijeme). Faktor multiplikacije k omjer je između broja fisija jedne fisijske generacije i broja fisija prethodne generacije. Lančana je reakcija divergentna ako je $k>1$, konvergentna ako je $k<1$. Ako je $k=1$, lančana reakcija održava se trajno s istim brojem fisija u jediničnom volumenu.

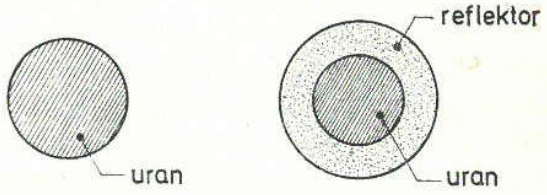
Kritična masa u lančanoj reakciji. Prosječna je energija fisijskih neutrona relativno visoka, oko 2 MeV, pa je malena vjerojatnost da oni prouzroče iduće fisije jezgri urana. Sudaranjem s jezgrama urana njihova se energija smanjuje, a sposobnost za fisiju povećava. U tom procesu fisijski se neutroni mogu izgubiti za fisiju na dva načina:

a) nefisijskom apsorpcijom u uranu-238 koji s relativno velikom vjerojatnošću apsorbira neutrone energije između 5 eV i 300 eV, i

b) bijegom u okoliš iz prostora u kome se nalazi uran.

Nefisijska apsorpcija može se smanjiti tako da se masi urana dodaju laki elementi, pa neutroni u sudaru s njihovim jezgrama malog masenog broja brže gube energiju i brže prolaze kroz energijsko područje rezonancije za uran-238. Takve jezgre nazivaju se moderatorskim jezgrama, a tvari sa sposobnošću da usporavaju neutrone nazivaju se moderatorima.

Drugi, odnosno, dodatni način da se smanji gubitak neutrona nefisijskom apsorpcijom u uranu-238 jest da se u gorivu smanji udio urana-238, a poveća udio urana-235 na više od 0,7% (koliko ga ima u prirodnom uranu). Nadalje, gubitak neutrona bijegom u okolni prostor može se smanjiti postavljanjem tzv. reflektora oko mase goriva. Od jezgara tih materijala dio se neutrona reflektira i vraća u uran. Smanjenje gubitka neutrona bijegom postiže se i povećanjem mase urana: time se smanjuje odnos površine kroz koju neutroni bježe prema obujmu odnosno masi u kojoj nastaju fisijom.



Slika 5.7. Kritična masa ovisna je o sastavu i geometriji goriva. Okruženjem goriva neutronskim reflektoriom kritična masa se smanjuje.

Za odabrani moderator i reflektor te određeni sastav urana i njegov geometrijski raspored, postoji granična masa urana, tj. najmanja masa u kojoj se još može ostvariti faktor multiplikacije $k=1$. S manjom masom urana ne može se održavati lančana reakcija jer je gubitak neutrona bijegom prevelik. Najmanju masu potrebnu za održavanje lančane reakcije uz zadane uvjete nazivamo kri-

tičnom masom. U specijalnim uvjetima, kritične mase izdvojenih nuklida, plutonija-239 ili urana-235, mogu biti i manje od jednog kilograma, a u reaktorima one iznose i više desetaka tona. Za uran-235 metal i sfernu raspodjelu goriva te berilijski reflektor kritična je masa približno 16 kg. U istim uvjetima kritična masa plutonija-239 jest približno 4,5 kg.

Natkritični uvjeti za nuklearnu eksploziju mogu se postignuti npr. naglim spajanjem dviju ili više potkritičnih masa s pomoću konvencionalnih eksplozija. Drugi je način smanjenje površine bijega neutrona, a da se ne smanji masa urana. To se postiže povećanjem gustoće urana implozijom, također s pomoću konvencionalnih eksploziva.

Uređaje u kojima se ostvaruju uvjeti za održavanje kontrolirane lančane reakcije zovemo nuklearnim reaktorima. Reaktori moraju sadržavati količinu urana veću od kritične mase, kako bi se pri stavljanju u pogon mogao postignuti faktor multiplikacije veći od 1 i divergentna lančana reakcija. Kad se postigne određena razina snage, faktor multiplikacije $k=1$ postiže se ubacivanjem neutronskih apsorbera u reaktor. Mijenjanje faktora multiplikacije prema potrebi naziva se kontrolom reaktora. To se najčešće obavlja s pomoću kontrolnih šipki ili dodavanjem apsorbera moderatoru. Za reaktor u kojem je $k=1$ kaže se da je kritičan, potkritičan ako je $k<1$, a natkritičan kad je $k>1$. Odvijanje lančane reakcije određeno je faktorom multiplikacije k i srednjim trajanjem generacije neutrona τ prema relaciji

$$N=N_0 e^{\frac{k-1}{\tau}\cdot t} \qquad (5.6)$$

gdje je N broj neutrona u trenutku t ako je N_0 njihov broj u trenutku $t=0$.

Trajanje generacije funkcija je niza uvjeta u reaktoru. U reaktoru s moderatorima generacija traje najmanje koliko i proces usporavanja neutrona. Međutim, dio fisijskih neutrona emitira se sa zakašnjenjem, pa ako je faktor multiplikacije k veći od 1, tek uključivši i te zakašnjele neutrone, onda njihovo zakašnjenje određuje pravo, efektivno trajanje generacije. Produženja su znatna i ona omogućju udobnu kontrolu reaktora. Relacija koja opisuje odvijanje lančane reakcije prima u tim uvjetima složenije oblike.

U opisivanju odvijanja reaktorskih procesa prikladnije je uvesti tzv. reaktivnost ρ, definiranu izrazom

$$\rho=\frac{k-1}{k}. \qquad (5.7)$$

5.1.3. Promjene u gorivu reaktora

Odvijanjem lančane reakcije zbivaju se u gorivu znatne promjene koje na različite načine utječu na rad reaktora. Neki fisijski proizvodi apsorbiraju neutrone i njihovom akumulacijom u gorivu smanjuje se faktor multiplikacije k.

Sve promjene u gorivu ipak nemaju nepovoljan krajnji učinak. Apsorpcija neutrona u uran-238 omogućuje stvaranje fisibilnih jezgara plutonija-239 sljedom reakcija:

$$^{238}\mathrm{U}+\mathrm{n}\rightarrow{}^{239}\mathrm{U}\xrightarrow[T_{1/2}=23{,}5\ \mathrm{min}]{\beta^-}{}^{239}\mathrm{Np}$$

$$^{239}\mathrm{Np}\xrightarrow[T_{1/2}=2{,}35\ \mathrm{d}]{\beta^-}{}^{239}\mathrm{Pu}.$$

Tim procesom u nuklearnom reaktoru dio jezgara urana-238 prelazi u jezgre plutonija-239 koji je nuklearnim svojstvima sličan uranu-235, tj. i njegove su jezgre fisibilne. Takav proces u reaktoru pri kojem se trošenjem fisibilnog nuklida istodobno proizvodi drugi fisibilni nuklid naziva se konverzijom. Obično je gorivo prirodni ili obogaćeni uran. Tada je fisibilni nuklid koji se troši uran-235, a plutonij-239 nuklid koji nastaje. No, postoje i druge mogućnosti. Sadrži li gorivo torij-232, nuklid koji je prema nuklearnim karakteristikama sličan uranu-238, stvarat će se slijedom reakcija fisibilne jezgre urana-233

$$^{232}\mathrm{Th}+\mathrm{n}\rightarrow{}^{233}\mathrm{Th}\xrightarrow[T_{1/2}=23\ \mathrm{min}]{\beta^-}{}^{233}\mathrm{Pa}$$

$$^{233}\mathrm{Pa}\xrightarrow[T_{1/2}=27\ \mathrm{d}]{\beta^-}{}^{233}\mathrm{U}$$

Bilo koja od fisibilnih jezgara ^{233}U, ^{235}U ili ^{239}Pu može biti polazna fisibilna jezgra. Kvantitativno se proces konverzije opisuje *faktorom konverzije* C. Taj faktor definiran je omjerom:

$$C=\frac{\textit{neto brzina stvaranja fisibilnog nuklida}}{\textit{brzina trošenja fisibilnog nuklida}}$$

Faktor konverzije mijenja se prema duljini boravka goriva u reaktoru. Istodobno s nastajanjem novog fisibilnog nuklida počinje i njegovo trošenje. Pri duljem boravku goriva u reaktoru trošenje novog fisibilnog nuklida može dosegnuti njegovu proizvodnju, pa će faktor konverzije doći na vrijednost nula. Za promatranje iskorištenja goriva važan je *prosječni faktor konverzije* $\bar{C}$ — njegov iznos uvjetovan je proizvodnjom i trošenjem fisibilnih nuklida za vrijeme boravka goriva u reaktoru.

$$\bar{C}=\frac{\textit{neto proizvedeni fisibilni nuklid}}{\textit{potrošeni fisibilni nuklid}}$$

Konverzija i iskorištenje goriva u reaktoru: Ako prosječni konverzijski faktor dosegne vrijednost 1, fisibilni je materijal nadomješten novoproizvedenim. Reaktor takva svojstva ne treba novih fisibilnih materijala, energiju efektivno proizvodi trošenjem oplodnih nuklida u gorivu. Konverzija je vrlo važna jer je malo fisibilnih nuklida u prirodnom uranu. Ona omogućuje iskorištenje urana-238, kojeg ima 140 puta više nego urana-235. Promotrimo odnose kvantitativno. Označimo broj jezgara jedne vrste zadnjim znamenkama rednog i masenog broja, npr. oznaka $N_{25}=N_{(9)2,\ (23)5}$ označuje broj jezgara urana-235 rednog broja 92 i masenog broja 235. Oznaka N_{49} označuje npr. broj jezgara plutonija-239. Konverziju u uranskom gorivu možemo tako opisati relacijom

$$N_{49}=\bar{C}\cdot N_{25}^0$$

gdje N_{25}^0 označuje početni broj jezgri urana-235 u gorivu. Relacija implicira da je ta čitava količina potrošena, odnosno „izgorena" u reaktoru (što je pojednostavnjenje stvarne situacije) i da je početna količina plutonija nula ($N_{49}^0=0$). I konverzijom proizvedeni plutonij doprinosit će proizvodnji nove količine plutonija N'_{49}. Oznakom $\bar{C}$ označen je prosječan faktor konverzije.

Jednostavnosti radi pretpostavit ćemo također da je pri tom faktor konverzije jednak kao i za uran-235. Izgaranjem plutonija-239 (količine N_{49}) do kraja, nastat će novoproizvedena količina $N'_{49}=N_{49}\cdot\bar{C}$, odnosno

$$N'_{49}=N_{25}^0\cdot\bar{C}\cdot\bar{C}=N_{25}^0(\bar{C})^2$$

U slijedećim generacijama izgorjet će količine N'_{49}, N''_{49}, tj. $N_{25}^0(\bar{C})^2$, $N_{25}^0(\bar{C})^3$ itd. Ukupan broj jezgara N koje na taj način fisijom izgore u reaktoru iznosi

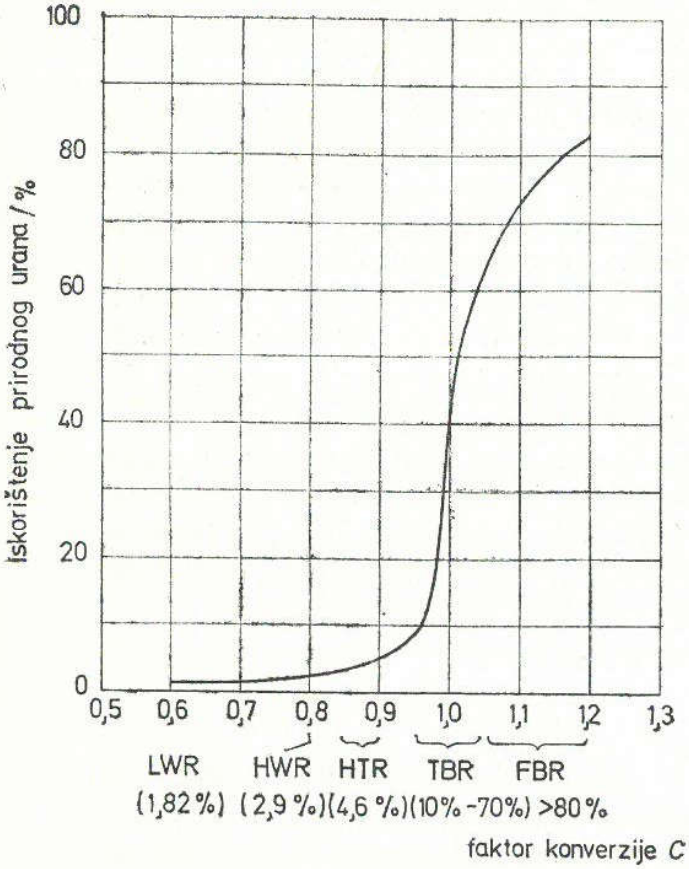
$$N=N_{25}^0+N_{25}^0(\bar{C})+N_{25}^0(\bar{C})^2+N_{25}^0(\bar{C})^3+$$
$$+\ldots=N_{25}^0\,(1+\bar{C}+\bar{C}^2+\bar{C}^3+\bar{C}^4+\ldots)$$

Ako je $\bar{C}<1$, red konvergira; dobiva se N

$$N=\frac{N_{25}^0}{1-\bar{C}} \qquad (5.8)$$

Ako je npr. $\bar{C}=0{,}5$, slijedi da smo iz goriva dobili dva put više energije nego što daje cijepanje samo urana-235. Udvostručenje nastaje konverzijom urana-238 u plutonij-239. Ako $\bar{C}\rightarrow 1$, ukupan broj fisija teži prema beskonačnosti. Takav rezultat dobivamo jer smo u našem pojednostavljenom prikazu zanemarili da plutonij-239 nastaje iz urana-238, a količina se urana-238 smanjuje. Ukupan broj izgorjelih jezgara N ne može, naravno, biti veći od N_{28}^0 ako se ne dovodi novi uran-238.

Ako se prihvati takvo ograničenje, te se uzme u obzir da se dio fisibilnih jezgara gubi u preradi istrošenog goriva (npr. 1%), a dio pri obogaćenju, dobiva se stupanj iskorištenja goriva (prirodnog



Slika 5.8. Stupanj iskorištenja prirodnog urana u ovisnosti o faktoru konverzije. Gubici u preradi 1 %, u obogaćenju 0,7 — 2 %. Naznačene su vrijednosti faktora konverzije za najvažnije reaktorske sisteme s odgovarajućim iskorištenjima prirodnog urana.

urana) ovisno o faktoru konverzije $\bar{C}$ (prikazan na sl. 5.8).

5.2. Nuklearni reaktori; osnovna klasifikacija i tipovi reaktora

5.2.1. Termički reaktori

Fisijski su reaktori uređaji u kojima se održava kontrolirana lančana reakcija, a različiti oblici energije fisije transformiraju se u toplinu koja se odgovarajućim prijenosnim medijem izvodi iz reaktora.

Osnovna podjela reaktora temelji se na različitom fizikalnom uspostavljanju lančane reakcije u uranu. U prirodnom uranu ne može se uspostaviti lančana reakcija zbog prevelike nefisijske apsorpcije neutrona u uranu-238. Pomiješa li se uran s moderatorom kojim se pospješuje usporavanje neutrona, ubrzava se i prolaz kroz područje rezonantne energije jezgri urana-238 i tako smanjuje nefisijska apsorpcija neutrona. Takvi reaktori u kojima se lančana reakcija održava sa sporim neutronima nazivaju se termički reaktori.

Moderacija neutrona

Ako je zadatak moderatora da što brže smanji energiju neutrona, prema osnovnim zakonima mehanike treba upotrijebiti jezgre što manjeg masenog broja. Osim toga one ne smiju apsorbirati neutrone. Ovisnost moderacije o masi jezgre moderatora M, odnosno o masenom broju A moderatora, vidi se iz odnosa između energija neutrona E i E_0, tj. energije nakon centralnog elastičnog sudara s jezgrom moderatora i energije prije sudara

$$\frac{E}{E_0}=\frac{(M-m)^2}{(M+m)^2} \quad \text{odnosno} \quad \frac{E}{E_0}=\frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$$

jer je približno $M \approx A \cdot m$, gdje je m masa jednog nukleona.

I u složenijem necentralnom sudaru gubitak će energije neutrona biti veći što je manja masa M, odnosno manji maseni broj A. Za niz uzastopnih sudara može se odrediti prosječno smanjenje energije neutrona u svakom sudaru: $\frac{E_{n+1}}{E_n}=f$, gdje je E_n energija neutrona nakon n-tog sudara. Iznos faktora f bit će između jedan i minimalne vrijednosti $\frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$ za centralni sudar. Energija neutrona nakon n sudara iznosi $E_n=E_0 f^n$. U reaktorskoj fizici i tehnici umjesto faktora f uvodi se tzv. srednje logaritamsko smanjenje energije

$$\xi=\ln \frac{E_n}{E_{n+1}}. \qquad (5.9)$$

Veza faktora f sa srednjom vrijednosti smanjenja energije neutrona u jednom sudaru određena je izrazom $f=e^{-\xi}$

Broj potrebnih sudara N za smanjenje početne energije E_0 na konačnu vrijednost E_n određen je relacijom $E_n=E_0 e^{-\xi N}$. Da bi se okarakterizirao neki moderator uspoređuje se broj sudara od početne energije neutrona $E_0=2$ MeV do energije $E_n=0{,}025$ eV.

U tablici 5.1. najvažnije su karakteristike glavnih moderatorskih materijala. Radi usporedbe u tablici su i podaci za uran.

Tablica 5.1. Neke osnovne karakteristike važnijih moderatora

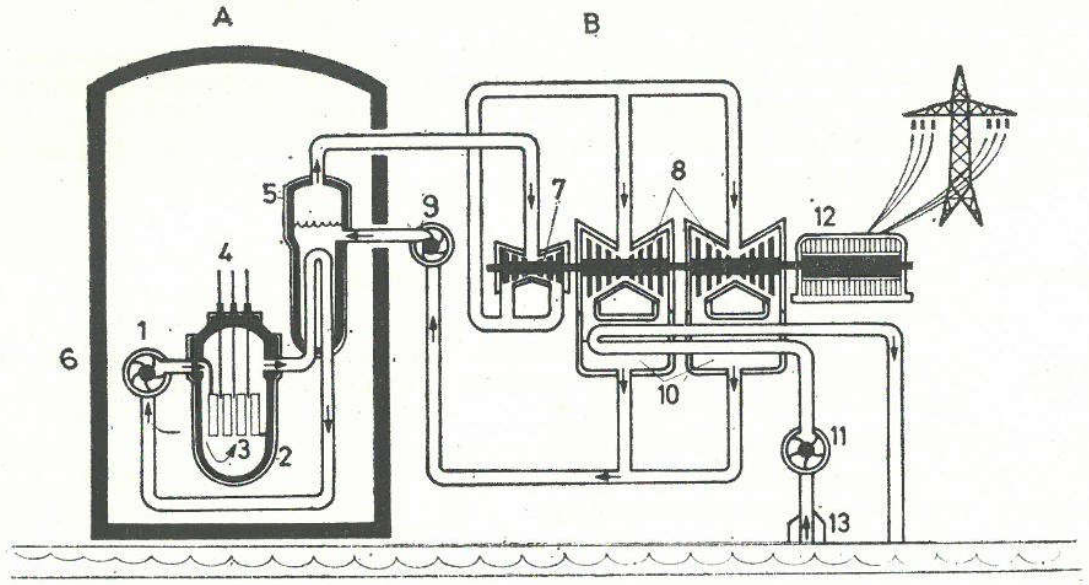
Moderator	Maseni broj A	Prosječno logaritamsko smanjenje energije ξ	Broj sudara N do termalizacije neutrona	Apsorpcijski udarni presjek* $\sigma_a/10^{-28}$ m^2
vodik	1	1,000	18	0,30
deuterij	2	0,725	25	0,0006
litij	7	0,268	67	
berilij	9	0,208	87	0,009
ugljik	12	0,158	114	0,005
kisik	16	0,120	150	0,0016
uran	238	0,0084	2 160	

*U području nuklearne fizike bila je do 1981. za udarni presjek dopuštena jedinica — barn. 1 b$=10^{-28}$ m^2.

Iz tablice se vidi da se postiže najbrža moderacija s vodikom, odnosno s običnom vodom kao praktično upotrebljivim materijalom. No običan vodik ima dosta velik apsorpcijski udarni presjek za neutrone. Prema sposobnosti moderacije i malom apsorpcijskom udarnom presjeku neutrona idealan je moderator teški vodik, odnosno teška voda. Međutim, teški se vodik mora posebnim metodama izdvajati iz prirodnog vodika u kojemu se pojavljuje s vrlo malim udjelom — oko 1 u 7 000; zato je vrlo skup. Osim obične i teške vode uobičajen moderator jest grafit. Kao moderator on je manje djelotvoran, ali ima dosta malen apsorpcijski udarni presjek za neutrone i nije skup.

Neutronska apsorpcija u uranu-238 može se smanjiti i takvim grupiranjem goriva u moderatoru da se proces moderacije prostorno odvoji od goriva. Neutroni nastali fisijama u gorivu izlijeću iz goriva u okolni moderator. U moderatoru se moderiraju bez apsorpcije u uranu-238 i kao usporeni, termički neutroni difundiraju kroz moderator dok ne dopru do goriva i prouzroče u njemu nove fisije.

Heterogena raspodjela goriva i moderatora karakteristična je za sve do danas razvijene energetske reaktore. Prema različitom rashladnom sredstvu, gorivu i moderatoru postoji mnogo različitih koncepcija termičkih reaktora. Kao rashladna sredstva najčešće se koriste obična i teška voda, te plinovi ugljik-dioksid i helij; moderatori su obična i teška voda i grafit. Koristi li se kao moderator obična voda, ona dosta intenzivno apsorbira neutrone pa je potrebno to kompenzirati povećanom koncentracijom urana-235 u gorivu, tj. obogaćenjem urana u gorivu. Takvi su reaktori danas najčešći; poznati su pod zajedničkim nazivom lakovodni reaktori i najčešće su označeni kraticom LWR (Light Water Reactor). Grade se dva tipa takvih reaktora. U jednima se voda nalazi pod tlakom dovoljno visokim da u reaktoru ne ključa. Para se proizvodi u toplinskom izmjenjivaču izvan reaktora. To su tzv. tlakovodni reaktori, odnosno reaktori s vodom pod tlakom — uobičajena je međunarodna kratica PWR (Pressurised Water Reactor). Niz zemalja uvodi vlastite oznake što stvara nejasnoće.



Slika 5.9. Shema lakovodnih reaktora s tlačenom vodom kao moderatorom i rashladnim sredstvima (PWR). Voda se u primarnom krugu nalazi pod tlakom oko 15 MPa kako bi se osiguralo da u primarnom krugu ne dođe do vrijanja. Za visoki tlak u primarnom krugu traže se masivne tlačne posude s debljinom stijenke većom od 20 cm. Dva rashladna kruga odlaze u turbinu.

A. Nuklearni sistem za proizvodnju pare

1. pumpa za rashladnu vodu primarnog kruga
2. tlačna posuda reaktora
3. reaktorska jezgra
4. kontrolni štapovi
5. parogenerator
6. zaštitna zgrada — containment

B. Preostali dio nuklearne elektrane

7. visokotlačna turbina
8. niskotlačna turbina
9. pumpa za povrat vode u parogenerator
10. kondenzatori
11. pumpa za kondenzatore
12. generator
13. usis rashladne vode za kondenzatore

Mi ćemo koristiti engleske oznake koje se najviše upotrebljavaju.

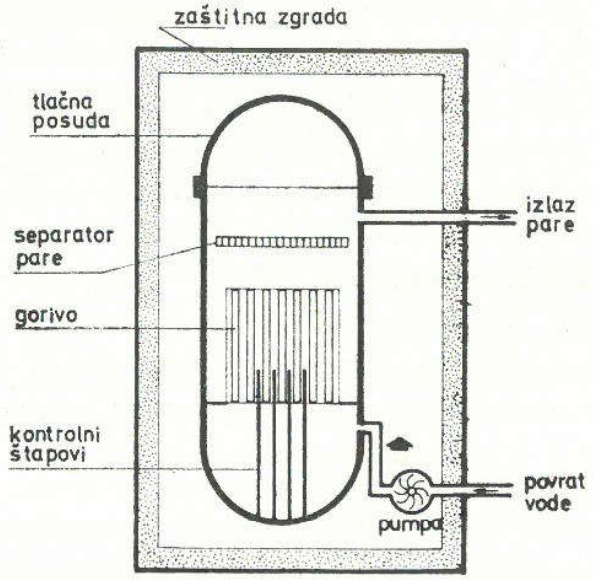
U drugom tipu lakovodnih reaktora voda ključa u reaktoru, te reaktor neposredno proizvodi paru. To su reaktori s kipućom vodom, uobičajena je oznaka BWR (Boiling Water Reactor).

Teškovodni reaktori s prirodnim uranom razvijeni su u Kanadi i SR Njemačkoj. Označavaju se kraticom PHWR (Pressurised Heavy Water Reactor), ili BHWR (Boiling Heavy Water Reactor), prema tome da li se para proizvodi u sekundarnom krugu, kao u lakovodnih reaktora (PWR), ili u samom reaktoru, kao u reaktora s kipućom vodom (BWR). Sustav razvijen u Kanadi poznat je kao CANDU reaktor (CANada Deuterium Uranium), a specifičnost mu je razdvajanje rashladnog sredstva od moderatora sustavom tlačnih cijevi. Pod tlakom se nalazi samo teška voda koja struji kroz tlačne cijevi u kojima se nalazi gorivo. Oko tlačnih cijevi nalazi se kao moderator također teška voda pod normalnim tlakom. Konstrukcijom s tlačnim cijevima izbjegavaju se glomazne tlačne posude u kojima se inače mora smjestiti čitava reaktorska jezgra.

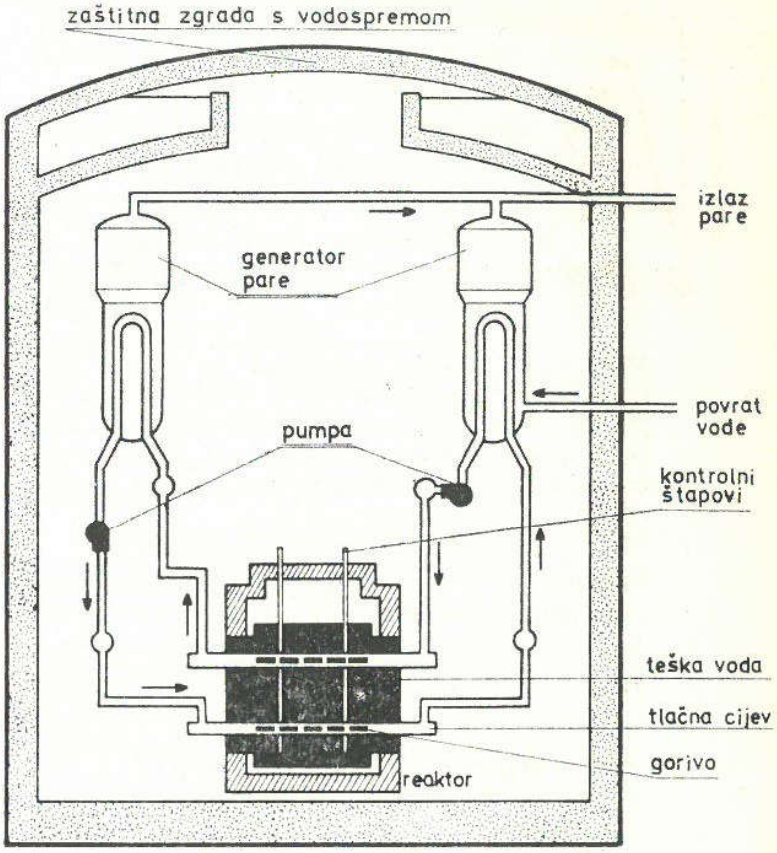
Teškovodni reaktori njemačke izvedbe koriste tlačnu posudu i po konstrukciji slični su reaktorima PWR-tipa.

Izvan te kategorije reaktora (i hlađenih i moderiranih vodom) jest reaktor s tlačnim cijevima — razvijen u Sovjetskom Savezu — u kojem je moderator grafit, a rashladno sredstvo obična voda. Gorivo je malo obogaćeni uran.

Svi plinom hlađeni reaktori koriste grafit kao moderator, ali se razlikuju prema gorivu i rashladnom plinu. Prva verzija tog tipa reaktora hlađena ugljik-dioksidom i prirodnim uranom kao gorivom poznata je kao GCR (Gas Cooled Reactor), a



Slika 5.10. Shema reaktora s ključajućom vodom kao rashladnim sredstvom i moderatorom (BWR) (sistem za proizvodnju pare). Ovaj reaktor proizvodi paru u samoj reaktorskoj posudi, pa nema potrebe za paro-generatorom. Tlak u reaktoru je niži nego kod reaktora tipa PWR, i iznosi oko 6 MPa. Međutim, reaktorska posuda pri istoj snazi reaktora s ključajućom vodom ima veće dimenzije nego reaktorska posuda reaktora PWR. Rashladni medij direktno povezuje jezgru reaktora i turbinski prostor.



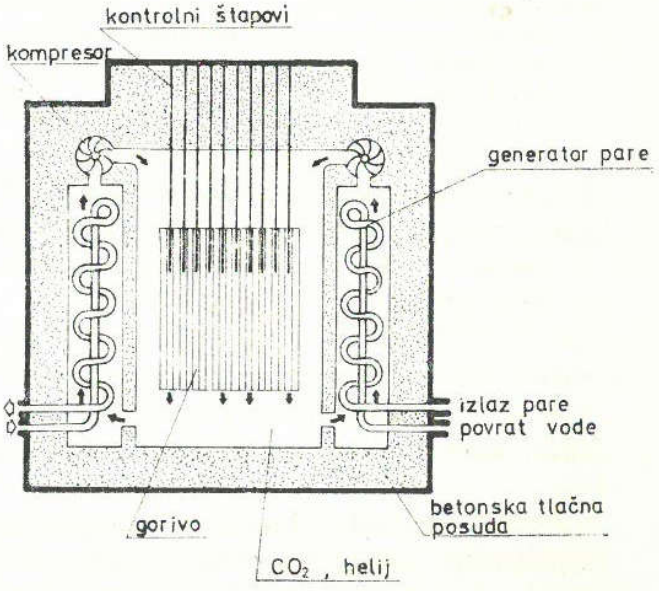
Slika 5.11. Shema teškovodnog reaktora s tlačnim cijevima (CANDU) (sistem za proizvodnju pare) Zbog jednostavnosti prikazan samo jedan od dva rashladna kruga. Svaki hladi jednu polovinu jezgre reaktora.

kasnija verzija, u kojoj je gorivo nisko obogaćeni uran, poznata je kao usavršeni reaktor hlađen plinom — AGR (Advanced Gas Cooled Reactor).

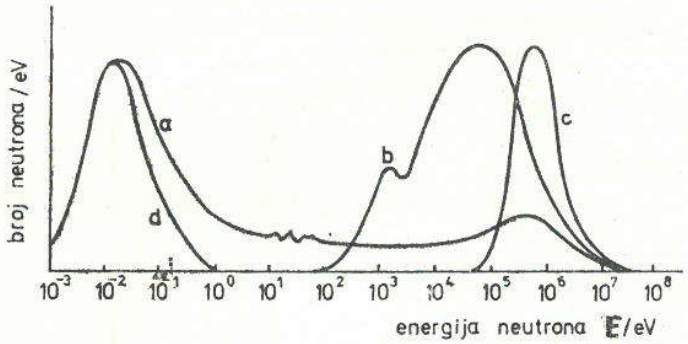
Sada se razvijaju reaktori sa srednje obogaćenim uranom i helijem kao rashladnim sredstvom; poznati su pod nazivom visokotemperaturni reaktori — HTR (High Temperature Reactors). Bitno im je (i poželjno) svojstvo: visoke temperature rashladnog sredstva koje se mogu postignuti zbog kemijske inertnosti helija.

Ako se lančana reakcija uspostavlja brzim neutronima, dakle bez dodavanja moderatora, govori se o brzim reaktorima (sl. 5.13).

Danas najvažniji tip brzog oplodnog reaktora jest reaktor hlađen natrijem, oznaka — LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor). U tablici 5.2. naveden je samo taj tip.



Slika 5.12. Shematski prikaz plinom hlađenog reaktora (sistem za proizvodnju pare)



Slika 5.13. Tipične energetske raspodjele neutrona (*a*) u termalnom i (*b*) u brzom reaktoru u poređenju sa (*c*) spektrom fisijskih neutrona i (*d*) Maxwell-Boltzmannovom raspodjelom pri temperaturi goriva odnosno temperaturi moderatora.

U brzim reaktorima povoljnije je koristiti gorivo s plutonijem-239 kao fisibilnim nuklidom; takvo se gorivo koristi u gotovo svim brzim reaktorima. To je zato što pri fisiji brzim neutronima plutonij daje najviše fisijskih neutrona. Uran-235 nepovoljniji je, ali se ipak predviđa mogućnost da se za početne faze rada oplodnih reaktora koristi gorivo s relativno visokim obogaćenjem u uranu-235 u slučaju ako bude nedostajalo plutonija.

Tablica 5.2. Pregled glavnih fizikalno-tehničkih karakteristika reaktora prema gorivu, moderatoru i rashladnom sredstvu

Reaktori hlađeni plinom			
reaktor, kratica	G C R	A G R	H T G R
gorivo	prirodni uran	malo obogaćeni uran	obogaćeni uran
moderator	grafit	grafit	grafit
rashladno sredstvo (plin)	CO_2	CO_2	He
Reaktori hlađeni vodom			
reaktor, kratica	P W R	B W R	
gorivo	malo obogaćeni uran	malo obogaćeni uran	
moderator	H_2O	H_2O	
rashladno sredstvo	H_2O } pod tlakom	H_2O } kipuća voda	
Reaktori hlađeni teškom vodom			
reaktor, kratica	P H W R	B H W R	
gorivo	prirodni uran	prirodni uran	
moderator	D_2O	D_2O	
rashladno sredstvo	D_2O } pod tlakom	D_2O } kipuća teška voda	
Brzi oplodni reaktori			
reaktor, kratica	L M F B R		
gorivo	^{239}Pu + uran, visoko obogaćeni uran		
moderator	nema		
rashladno sredstvo	tekući natrij		

5.2.2. Konvertori i oplodni reaktori

Zbog važnosti faktora konverzije za iskorištenje goriva njegova je vrijednost također kriterij za podjelu reaktora. Oplodnim reaktorima nazivamo one reaktore u kojima faktor konverzije prelazi vrijednost 1, a konvertori su oni reaktori u kojih taj faktor ima vrijednost manju od jedinice. Dva osnovna fizikalna i tehnički različita pristupa povećanju faktora konverzije mogu se razabrati iz slike 5.4. Vidi se da u termičkom području najveći neutronski prinos η daje uran-233. Ter-

mički reaktor s uranom-233 kao fisibilnim materijalom imat će, dakle, najveći višak neutrona i stoga će proizvoditi najviše novih fisibilnih nuklida. Oplodni reaktori s uranom-233 kao polaznim fisibilnim gorivom ostvarivi su. U principu svaki termički reaktor, hlađen plinom ili vodom, može bez većih prilagođenja koristiti uran-233 kao primarni fisibilni nuklid i tako povećati faktor konverzije. Dakako, lakše će se približiti oplodnim uvjetima, tj. faktoru konverzije većem od 1, oni termički reaktori koji već i s uranom-235 imaju relativno visok faktor konverzije. Tu su reaktori koji koriste tešku vodu i grafit kao moderatore u prednosti pred lakovodnim reaktorima.

Prema drugom osnovnom pristupu oplodni reaktor temelji se na visokoj vrijednosti prinosa neutrona plutonija-239 pri fisiji s brzim neutronima. Takav reaktor može se, međutim, ostvariti samo prema potpuno novoj koncepciji; naime, želi li se iskoristiti visoki prinos neutrona pri brzoj fisiji, valja ukloniti moderator iz reaktora. Zbog visoke vrijednosti prinosa neutrona η pri fisiji brzim neutronima takav tip oplodnog reaktora daje visoke faktore konverzije. Prednost ipak nije toliko velika kako bi se moglo zaključiti iz jednostavne usporedbe faktora konverzije termičkih i brzih oplodnih reaktora. Naime, ako nema moderatora, i ako se fisija odvija pri višim energijama u reaktoru treba biti dosta veća količina fisibilnih jezgara jer su za fisiju pri višim energijama neutrona znatno manji udarni presjeci.

U tablici 5.3. ilustrirani su takvi odnosi tipičnim podacima za termičke i brze oplodne reaktore. Termički oplodni reaktori sa znatno nižom vrijednošću faktora konverzije, tj. faktora oplodnje 1,07, proizveo bi tolik višak fisibilnih materijala da bi se za 20 godina mogao pokrenuti jednak reaktor. Jednakog ili sličnog učinka bio bi brzi oplodni reaktor sa znatno većim faktorom konverzije 1, 25.

Tablica 5.3. Usporedba osnovnih karakteristika termičkih i brzih oplodnih reaktora prema proizvodnji i potrošnji fisibilnih materijala [IA 78]

Karakteristika	Termički oplodni reaktori	Brzi oplodni reaktori
električna snaga	1 000 MW (e)	1 000 MW (e)
oplinska snaga	2 500 – 3200 MW	2 800 MW
masa fisibilnih nuklida u jezgri	1 400* – 2 500 kg	5 000 kg
godišnja potrošnja fisibilnih nuklida	1 000 kg	1 000 kg
godišnja proizvodnja fisibilnih nuklida	1 010 – 1 070 kg	1 250 kg
faktor oplodnje	1,01 – 1,07*	1,25
vrijeme udvostručenja mase plutonija	20 ili više godina	20 godina

*Vrijednosti 1 400 kg za masu fisibilnih nuklida i 1,07 za faktor oplodnje odnose se za reaktor s gorivom u stanju tekućih soli (MSBR – Molten Salt Breeder Reactor).

Velika količina fisibilnog materijala u jezgri brzog oplodnog reaktora jedna je od njegovih najvažnijih karakteristika. Iako se o prednosti izbora termičkih ili brzih oplodnih reaktora može raspravljati, ipak su se u početku u vodećim nuklearnim zemljama više razvijali brzi oplodni reaktori. Zbog toga, a i jer su njihove tehničke karakteristike sasvim specifične, kasnije ćemo detaljnije razmotriti brze oplodne reaktore.

Termički oplodni reaktori razlikuju se od konvertora relativno malo jer je isti osnovni pristup, a povećanje konverzije postiže se zamjenom urana-235 s uranom-233. Svaka razvijena koncepcija termičkog reaktora, konvertora može biti temelj za razvoj oplodnog reaktora. U SAD se istražuje varijanta lakovodnog termičkog oplodnog reaktora.

Na razvijenim termičkim konvertorima također se temelje teškovodni termički

oplodni reaktori. Premda ostvarivost takvog tipa nije dvojbena, ipak se još ne obavljaju intenzivnije pripreme da se to ostvari. Razlozi su ponajviše ekonomski. Za rad oplodnog reaktora bilo kojeg tipa potrebno je preraditi gorivo kako bi se fisibilni nuklidi oslobođeni nekorisnih fisijskih proizvoda vratili u reaktor. Cijena prerade previsoka je prema današnjoj cijeni urana pa se gradnja takvih reaktora zasad ne bi isplatila.

Kao treću mogućnost valja istaknuti razvoj visokotemperaturnih termičkih oplodnih reaktora. Takav pravac razvoja važan je jer će vjerojatno u budućnosti visokotemperaturni reaktori biti značajni. Premda još nisu u komercijalnoj upotrebi, reaktori takvog tipa znatne snage nalaze se u SR Njemačkoj (AVR, snage 15 MW (e), pogon od 1967) i u SAD (Fort St. Vrain, 330 MW(e), pogon 1976). U SR Njemačkoj u završnoj fazi izgradnje nalazi se reaktor THTR snage 300 MW (e). Ulazak u pogon predviđa se 1985. godine.

Prema različitim koncepcijama termičkih reaktora zamislive su i različite koncepcije termičkih oplodnih reaktora. Međutim, s obzirom na ogromna ulaganja u razvoj termičkih konvertora valja očekivati da će se razvoj temeljiti na tim razvijenim tipovima, odnosno i na drugima koji su također vrlo napredovali u razvoju npr. visokotemperaturni reaktori.

5.3. Neke bitne tehničke karakteristike najvažnijih tipova nuklearnih reaktora

5.3.1. Reaktori u komercijalnoj eksploataciji

U ovom poglavlju ne kanimo sustavno i detaljno tehnički opisati postojeće reaktorske sustave. Želimo na odabranim primjerima i karakteristikama pokazati današnji stupanj razvoja fisijskih reaktora i označiti tendencije razvoja. Za takav prikaz izabrat ćemo reaktore u komercijalnoj eksploataciji, osobito one koji su interesantni i za naše nuklearne planove i programe. Iznijeti ćemo i glavne informacije o visokotemperaturnim reaktorima. Njihova važnost u budućnosti temelji se ponajprije na novim mogućnostima upotrebe nuklearne fisijske energije. Na kraju su iznesene najbitnije karakteristike oplodnih reaktora da bi se moglo raspravljati i o njima jer su potencijalno vrlo važni za dugoročnu perspektivu fisijske energije.

U tablici 5.4. (a i b) popisani su energetski reaktori prema podacima s kraja 1983. godine.

Danas ima najviše lakovodnih reaktora, iako su se u prvim godinama tj. 60-ih godina najviše instalirali plinom hlađeni reaktori tipa GCR. Taj tip reaktora danas više nije ekonomski povoljan zbog visokih investicijskih troškova. Treba, međutim istaknuti da se veći investicijski troškovi bar dijelom nadoknađuju pogonskom pouzdanošću koja se odražava visokim faktorom raspoloživosti. Faktorom raspoloživosti za neko razdoblje naziva se omjer između proizvedene količine energije u tom razdoblju i količine energije koja bi se proizvela neprekidnim radom punom snagom reaktora. Obično se navode godišnji faktori raspoloživosti. U nekim se periodičkim publikacijama objavljuju godišnji i četvrtgodišnji pregledi faktora raspoloživosti nuklearnih elektrana u svijetu. Najveći je faktor raspoloživosti teškovodnih reaktora (sl. 5.14)

U tablici 5.5. naveden je srednji kumulativni faktor raspoloživosti za 4 osnovna tipa reaktora najprije dobiven kao jednostavna srednja vrijednost, a zatim s težinskim faktorima proporcionalnim veličini elektrana.

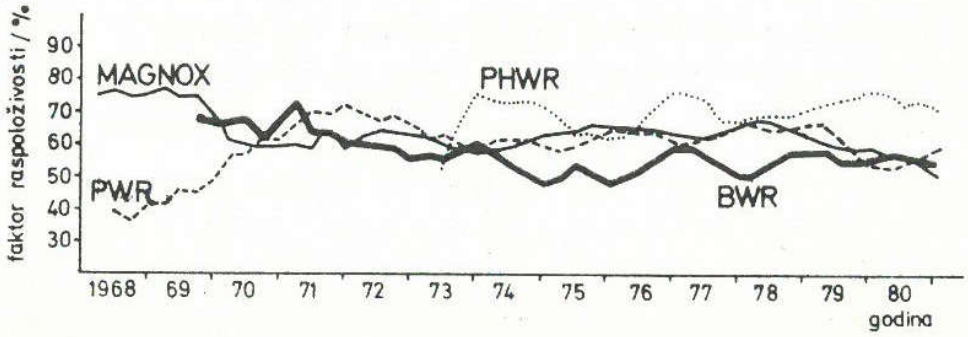
Zanimljivo je podrijetlo pojedinih reaktorskih sustava. Energetski reaktori hlađeni plinom razvili su se u Engleskoj od grafitnih plinom hlađenih vojnih reaktora izgrađenih ponajprije za proizvodnju plutonija. U SAD i u SSSR-u za vojne su potrebe izgrađene difuzijske instalacije za obogaćivanje urana.

Tablica 5.4a. Komercijalne elektrane u eksploataciji i gradnji, stanje krajem 1983. godine (Podaci MAAE)

Država	Elektrane u pogonu		Elektrane u gradnji		Udio u proizvodnji električne energije u 1983. godini	
	broj reaktora	snaga/MW(e)	broj reaktora	snaga/MW(e)	TWh	%
Argentina	2	935	1	692	3,4	8,8
Belgija	6	3473	2	2012	22,8	45,7
Brazil	1	626	1	1245	0,2	0,1
Bugarska	4	1632	2	1906	12,3	32,3
Čehoslovačka	2	762	9	4354	5,7	8,0
Filipini	—	—	1	620	—	—
Finska	4	2206	—	—	16,7	41,5
Francuska	36	26903	25	29200	136,9	48,3
Indija	5	1030	5	1100	2,9	(2,2)
Italija	3	1232	3	1999	5,6	3,2
Japan	28	19023	10	10022	106,5	(20)
Jugoslavija	1	632	—	—	3,72	(6)
Južnoafrička Republika	—	—	2	1842	—	—
Kanada	15	8303	8	5925	46,3	12,9
NR Kina	—	—	1	300	—	—
Republika Koreja	3	1789	6	5474	9,0	18,4
Mađarska	1	408	3	1224	2,3	10,0
Meksiko	—	—	2	1308	—	—
Nizozemska	2	501	—	—	3,4	5,9
DR Njemačka	5	1694	—	—	(11)	(12)
SR Njemačka	16	11110	11	11908	62,4	17,8
Pakistan	1	125	—	—	0,2	1,0
Rumunjska	—	—	2	1320	—	—
SAD	80	63315	50	55738	292,0	12,7
SSSR	43	20671	41	38001	(113)	(8)
Španjolska	6	3760	9	8369	10,2	9,1
Švedska	10	7355	2	2100	39,1	36,9
Švicarska	4	1940	1	942	14,8	29,3
Taivan	4	3110	2	1814	13,1	35,0
Velika Britanija	35	8304	7	4252	43,9	17,0
Ukupno	317	190839	210	195256	(1013)	(12)

Podaci u zagradi su procjene MAAE

Obogaćen uran korišten je najprije za energetske vojne reaktore za pogon površinskih brodova i podmornica. Obogaćen uran omogućio je da se načini kompaktan vodom hlađeni reaktor što je bilo važno za vojnu primjenu. Iz tih vojnih reaktora razvili su se današnji energetski tlakovodni reaktori (PWR).



Slika 5.14. Godišnje raspoloživosti za četiri najvažnija tipa komercijalnih reaktora
Izvor: *Nuclear Engineering Int*, prosinac 1981.

Tablica 5.4b. Komercijalne elektrane u eksploataciji, stanje krajem 1982. godine te projekcije za 1985. i 1990. (Podaci MAAE*)

Država	Elektrane u pogonu 1982.		1985.		1990.	
	broj reaktora	snaga/MW(e)	broj reaktora	snaga/MW(e)	broj reaktora	snaga/MW(e)
Argentina	1	335	2	935	3	1627
Belgija	6	3473	8	5485	8	5485
Brazil	1	626	1	626	3	3116
Bugarska	4	1632	5	2585	6	3538
Čehoslovačka	2	762	8	3282	8	3282
Filipini	—	—	1	620	1	620
Finska	4	2156	4	2156	4	2156
Francuska	32	23355	51	44195	60	54845
Indija	4	809	6	1249	9	1909
Italija	3	1232	4	1267	6	3231
Japan	25	16587	34	24705	36	26876
Jugoslavija	1	632	1	632	1	632
Južnoafrička Republika	—	—	2	1842	2	1842
Republika Koreja	2	1193	7	5534	9	7420
Kanada	14	7278	20	11076	24	14469
Kuba	—	—	—	—	1	408
Mađarska	1	408	3	1224	4	1632
Meksiko	—	—	1	654	2	1308
Nizozemska	2	501	2	501	2	501
DR Njemačka	5	1694	5	1694	5	1694
SR Njemačka	15	9831	21	16432	27	22986
Pakistan	1	125	1	125	1	125
Poljska	—	—	—	—	1	440
Rumunjska	—	—	—	—	2	1320
SAD	80	62376	110	94288	132	118979
SSSR	40	17219	60	36728	71	47405
Španjolska	4	1973	9	9460	15	12129
Švedska	10	7330	12	9430	12	9430
Švicarska	4	1940	5	2882	5	2882
Taivan	4	3110	6	4924	6	4924
Velika Britanija	32	6462	38	10062	42	12514
Ukupno	297	173039	427	291593	508	370025

*Informacijski sistem za energetske reaktore MAAE. Projekcije za 1985. i 1990. na osnovi gradnji u toku.

Tablica 5.5. Kumulativne raspoloživosti za četiri osnovna tipa reaktora*

Reaktor	Srednja kumulativna raspoloživost %	Srednja kumulativna raspoloživost (s težinskim faktorom) %	Obuhvaćen broj reaktora	Ukupna snaga reaktora
PHWR	65,4	71,5	13	6 526 MW (e)
MAGNOX	61,6	58,5	26	8 515 MW (e)
PWR	55,2	52,9	88	70 327 MW (e)
BWR	53,3	52,9	54	38 683 MW (e)

*Izvor: *Nuclear Engineering International*, ožujak, 1981.

5.3.2. Reaktori hlađeni plinom

Reaktori hlađeni plinom korišteni su prvotno za proizvodnju plutonija (*Windscale*, Velika Britanija), a zatim je prema njima konstruiran i energetski reaktor. Nuklearna elektrana tog tipa — *Calder Hall*, snage 60 MW (e), stavljena u pogon 1956. godine, bila je važna prekretnica u razvoju nuklearne energetike. U to vrijeme ta je elektrana bila značajan energetski objekt i prema njoj je uglavnom određen nuklearnoenergetski razvoj u Velikoj Britaniji, gdje je do danas stavljeno u pogon više od 30 plinom hlađenih energetskih reaktora. Koncepcija prvih i najvećeg dijela kasnije izgrađenih reaktora temeljila se na grafitnom moderatoru, hlađenju ugljik-dioksidom i prirodnom uranu u metalnom stanju kao gorivu. Taj tip reaktora poznat je pod nazivom „*Magnox*" prema magnezijskoj košuljici za gorivo. Prema toj jednostavnoj koncepciji Velika Britanija izgradila je seriju elektrana te je 60-ih godina imala najviše nuklearnih elektrana.

Razvoj drugih reaktorskih tipova, osobito lakovodnih, potaknuo je i daljnji razvoj reaktora hlađenih plinom. Umjesto prirodnog urana u metalnom stanju, što je ograničavalo izgor, počinje se koristiti gorivo u oksidnom stanju i malo obogaćeni uran. S korištenjem malo obogaćenog urana nastoji se smanjiti specifične investicije, koje su za obične Magnox reaktore bile veće nego za lakovodne reaktore. Upotrebom oksidnog goriva s košuljicom od nerđajućeg čelika omogućeno je postizanje viših radnih temperatura, a tako i boljeg ukupnog stupnja iskorištenja.

Zbog velikih dimenzija jezgre u reaktora s plinskim hlađenjem reaktorske se posude izrađuju od prenapregnutog betona.

Tablica 5.6. Karakteristike i tipični parametri za reaktore snage oko 500 MW (e) tipa Magnox i AGR

Karakteristike	Tipovi reaktora	
	Magnox	AGR
Gorivo		
materijal	uran metal	uranov oksid, UO_2
košuljica	magnezij	nerđajući čelik
obogaćenje	prirodni uran	2—2,5%
Hlađenje		
plin	CO_2	CO_2
tlak	2,7 MPa	3,1 MPa
ulazna temperatura	247 °C	290 °C
izlazna temperatura	414 °C	675 °C
Jezgra		
promjer × visina	18 m × 10 m	10 m × 8 m
gustoća snage	0,9 kW/L	2,2 kW/L
moderator	grafit	grafit
Tlačna posuda		
unutrašnji promjer promjer × visina	29 m × 29 m	19 m × 18 m
Turbinski dio		
tlak pare	4,7 MPa	16 MPa
temperatura pare	400 °C	560 °C
neto stupanj djelovanja	31,4 %	41,5 %

U tablici 5.6. uspoređuju se tipični parametri Magnox reaktora i usavršenih reaktora hlađenih plinom (uobičajena oznaka AGR — Advanced Gass Cooled Reactor). Razabire se da su usavršeni reaktori hlađeni plinom manji i imaju bolji stupanj djelovanja. Reaktori hlađeni plinom bili su prvi energetski reaktori. Zato su oni u početku bitno odredili razvoj nuklearne energetike. Usavršene verzije, osobito visokotemperaturni reaktori, mogu biti vrlo važni i u budućnosti. Iz osnovne koncepcije reaktora hlađenog plinom može se razviti i plinom hlađeni oplodni reaktor.

5.3.3. Lakovodni reaktori

U tablici 5.7.a navedene su odabrane tehničke karakteristike suvremenih velikih PWR elektrana prema projektima nekoliko zemalja u kojima ta tehnologija prevladava. Zapaža se znatna sličnost karakteristika. Međutim, ne bi valjalo zaključiti da je u sve tri države postignut isti tehničko-ekonomski optimum, nego su sva tri projekta potekla iz istog izvora tehničkog i tehnološkog razvoja. Francuski i njemački konstruktori (kao i japanski) pošli su od američkih licencija i razvoja reaktora tipa PWR; u kasnijim godinama pojavljuju se nebitne razlike.

U tablici 5.7.b su podaci iz kojih se razabire godišnja i ukupna potrošnja urana, te proizvodnja plutonija u reaktorima tipa PWR za koje su tehničke karakteristike prikazane u tablici 5.7.a. Podaci su važni za procjenu ekonomike reaktora i cijene proizvedene energije.

Karakteristike reaktora s ključajućom vodom (BWR) valja usporediti s karak-

Tablica 5.7a. Karakteristike PWR elektrana snage oko 1 300 MW (e) u Francuskoj, SR Njemačko i SAD (tehnički podaci prema međunarodnoj studiji INFCE)

	Francuska	SR Njemačka	SAD
Snaga			
toplinska snaga/MW	3 817	3 765	3 875
električna snaga/MW			
ukupno		1 299	1 344
neto	1 300	1 229	1 270
toplinski stupanj djelovanja/%	34	32,6	33,4
Jezgra			
volumna gustoća snage/ (kW/L)	100	94,3	95
specifična snaga/kW/kg urana	36,6	36,3	
ulazna temperatura rashladne tekućine/°C	293,2	291	296
izlazna temperatura rashladne tekućine/°C	328,8	326	327
tlak, primarni/MPa	15,5	15,8	15,5
masa urana/t	103,9	103,6	99,3
broj gorivih elemenata	193	193	241
Element goriva			
broj štapova u elementu	17×17−25	16×16−20	16×16−20
aktivna duljina/m	4,27	3,90	3,81
vanjski promjer štapa/cm	0,95	1,075	0,97
debljina košuljice/mm	0,57	0,725	
količina urana u elementu/kg	538	537	412,1
obogaćenje u ekvilibriju/%	3,1	3,15	3
srednje izgaranje/ (MWd/kg)	31,8	33	30,39
najveće izgaranje goriva/ (MWd/kg)	47	48	—

Tablica 5.7b. Potrošnja urana i separacijski rad, te proizvodnja plutonija u elektranama snage oko 1 300 MW (e) (sve su količine preračunate na snagu od 1 000 MW (e), uz faktor raspoloživosti 0,7 i rezidualno obogaćenje* 0,2%)

	Reaktori		
	Francuska	SR Njemačka	SAD
	Prirodni uran t/10³ MW (e)		
za početnu jezgru	324	367	303
godišnja izmjena	140	139	139
ukupno za 30 godina	4 380	4 363	4 347
neto**	—	4 224	4 193
	Separacijski rad t/10³ MW (e)		
za početnu jezgru	227	257	200
godišnja izmjena	113	111	109
ukupno za 30 godina	3 487	3 429	3 366
neto**	—	3 318	3 278
	Fisibilni materijal u istrošenom gorivu, (udio u masi teškog metala)		
uran-235	0,85%	0,82%	0,85%
fisibilni plutonij	0,68%	0,66%	0,68%
	Godišnje količine kg/10³MW (e)		
uran 235	202	188	205
fisibilni plutonij	168	152	166
Ukupne količine za 30 godina/kg			
uran-235	—	6 043	6 058
fisibilni plutonij	—	4 795	4 813

*vidi 5.4.3.
**odračunato nepotpuno iskorišteno gorivo zadnje jezgre.

teristikama reaktora s vodom pod tlakom. Dakako, osnovna je prednost sustava BWR što nema parogeneratora (sl. 5.8) jer se para proizvodi izravno u reaktorskoj posudi. Tako može raditi na nižem tlaku, tipično oko 6,5 MPa. Zbog velike topline isparavanja vode odvođenje fisijske energije iz reaktorske jezgre veoma je efikasno, te nije potreban tako velik protok rashladne tekućine kao u reaktoru tipa PWR. Oko 15 % vode ispari se pri prolazu kroz reaktorsku jezgru. Ako bi u reaktoru tipa BWR prestale raditi pumpe koje tjeraju rashladnu tekućinu kroz sustav, smanjena gustoća mješavine vode i pare u reaktorskoj jezgri pojačava prirodnu cirkulaciju toliko da može odvesti ostatnu toplinu jezgre. Takav tip lakovodnog reaktora ima i povoljna samoregulativna svojstva. Ako se nekontrolirano poveća snaga reaktora, povećani udio mjehurića pare u jezgri smanjuje gustoću moderatora pa se prigušuje snaga.

No, neke karakteristike nisu povoljne. Zbog mješavine vode i pare u jezgri smanjena je gustoća moderatora pa su potrebne veće reaktorske jezgre i veće reaktorske posude.

Nadalje, zbog povećanja udjela pare u gornjim dijelovima reaktorske jezgre i proporcionalnog smanjenja gustoće moderatora otežano je upravljanje reaktorom. Raspodjela snage u jezgri osim radijalne promjene pokazuje i znatnu aksijalnu ovisnost. Pojednostavnjenje je i ušteda što nema parogeneratora ali tako je i

omogućeno da do parne turbine dopiru radioaktivnosti koje se oslobađaju iz elemenata goriva odnosno stvaraju u rashladnoj tekućini. U reaktora tipa PWR cijeli primarni krug rashladne tekućine nalazi se u zaštitnoj zgradi, odvojen od turbine.

Tablica 5.8a. Karakteristike standardnog reaktora tipa BWR snage 1 270 MW (e), američki podaci*

Snaga	
ukupna toplinska snaga	3 800 MW
ukupna električka snaga	1 344 MW
neto električka snaga	1 270 MW
toplinski stupanj djelovanja	33,4 %
Jezgra	
volumna gustoća snage	51 kW/L
specifična snaga	24,6 kW/kg urana
rashladna tekućina, izlazna temperatura	cca 290 °C
tlak u tlačnoj posudi	7,3 MPa
prosječan volumni udio pare u jezgri	43,1 %
masa urana u jezgri	154,6 t
broj gorivih elemenata	848
Element goriva	
broj štapova u elementu	8 × 8 − 2
aktivna duljina	3,81 m
vanjski promjer štapa	1,23 cm
debljina košuljice	0,8 mm
masa urana u elementu	182,3 kg
obogaćenje u ekvilibriju	2,91 %
srednje izgaranje	28,4 MWd/kg
najveće izgaranje	40 MWd/kg

*INFCE WG 8

U tablici 5.8.a navedene su najvažnije tehničke karakteristike jednog suvremenog BWR reaktora američke konstrukcije, a u tablici 5.8.b podaci su o potrošnji urana i proizvodnji plutonija, svedeni na snagu 1 000 MW (e) i raspoloživost 0,7.

Tablica 5.8b. Potrošnja urana, separacijski rad i proizvodnja plutonija u reaktoru tipa BWR (karakteristika prikazanih u tablici 5.8. a — sve količine preračunate su na snagu 1 000 MW (e), uz faktor raspoloživosti 0,7 i rezidualno (preostalo) obogaćenje 0,2%.

Količina prirodnog urana	
početna jezgra	349 t
godišnja izmjena	146 t
ukupno u 30 godina	4610 t
Separacijski rad	
početna jezgra	198 t
godišnja izmjena	114 t
ukupno za 30 godina	3 594 t
Fisibilni materijal u istrošenom gorivu	
(udio u masi teškog metala)	
uran-235	0,93 %
fisibilni plutonij	0,64 %
godišnje, uran-235	257 kg/1000 MW(e)
godišnje, fisibilni plutonij	169 kg/1000 MW(e)
ukupno u 30 godina, uran-235	8 265 kg
ukupno u 30 godina, fisibilni plutonij	4 877 kg

5.3.4. Teškovodni reaktori

Teškovodni reaktori razvijeni su u Kanadi neovisno o vojnim projektima. Kanada nije imala nikakve vojne instalacije ili nakane koje bi unaprijed odredile izbor tipa reaktora, pa je njihov razvoj usmjeren tako da najpovoljnije proizvode energiju.

Prvi teškovodni reaktor izgrađen je u Kanadi 1945. godine *(ZEEP)*. Taj sasvim malen reaktor zajedno sa znatno snažnijima *NRX* (u pogonu 1947) i *NRU* (1957) omogućili su stjecanje osnovnih fizikalnih i kemijskih znanja te pružili tehnička iskustva potrebna za gradnju energetskih reaktora. Prvi kanadski energetski reaktor bio je *NPD* snage 22 MW (e), stavljen u

pogon 1962. godine. Nuklearna elektrana *Douglas Point* snage 208 MW (e), stavljena u pogon 1967. godine, osobito je važna u razvoju teškovodnog reaktora s tlačnim cijevima.

U tablici 5.9. prikazani su teškovodni reaktori s tlačnim cijevima kanadskog tipa, CANDU u pogonu, gradnji i pripremi za gradnju.

Izbor teške vode omogućio je da se izbjegne obogaćivanje urana, što bi za Kanadu bio znatan teret. Iako danas sve više zemalja posjeduje instalacije za obogaćenje urana, takva je tehnologija i nadalje skupa i teško ju je ekonomski opravdati ako ne postoji vrlo opsežni program gradnje nuklearnih reaktora. I usluge obogaćenja urana u drugim zem-

Tablica 5.9. Teškovodni reaktori kanadskog tipa CANDU u pogonu i gradnji

Naziv elektrane	Lokacija	Tip	Snaga MW (e)	Početak pogona
NPD	Ontario	PHWR	22	1962.
Douglas Pt.	Ontario	PHWR	206	1967.
Pickering A 1	Ontario	PHWR	515	1971.
Pickering A 2	Ontario	PHWR	515	1971.
Pickering A 3	Ontario	PHWR	515	1972.
Pickering A 4	Ontario	PHWR	515	1973.
KANUPP	Pakistan	PHWR	125	1971.
RAPP 1	Indija	PHWR	203	1972.
RAPP 2	Indija	PHWR	203	
Bruce A 1	Ontario	PHWR	740	1977.
Bruce A 2	Ontario	PHWR	740	1977.
Bruce A 3	Ontario	PHWR	740	1978.
Bruce A 4	Ontario	PHWR	740	1979.
Gentilly 2	Quebec	PHWR	638	1982.
Pt. Lepreau	N. Brunswick	PHWR	633	1981.
Cordoba	Argentina	PHWR	600	1982.
Pickering B 5	Ontario	PHWR	516	1982.
Pickering B 6	Ontario	PHWR	516	
Pickering B 7	Ontario	PHWR	516	
Pickering B 8	Ontario	PHWR	516	1984.
Wolsung 1	J. Koreja	PHWR	629	1982.
Bruce B 5	Ontario	PHWR	756	1983.
Bruce B 6	Ontario	PHWR	756	
Bruce B 7	Ontario	PHWR	756	
Bruce B 8	Ontario	PHWR	756	1987.
Černavoda	Rumunija	PHWR	600	1985.
Darlington 1	Ontario	PHWR	881	1988.
Darlington 2	Ontario	PHWR	881	
Darlington 3	Ontario	PHWR	881	
Darlington 4	Ontario	PHWR	881	1991.
Ukupno jedinica	30		ukupno 17 741	

ljama koje posjeduju takve instalacije vrlo su skupe. Stoga su veći troškovi za gorivo za reaktore koji koriste obogaćeni uran, tj. za lakovodne reaktore. Nasuprot tome, mogli bi biti investicijski troškovi za teškovodne reaktore malo veći, iako je o tome teško dati dokumentiran kvantitativan sud. O usporedbi investicija za ta dva sustava ne slažu se gledišta američkih i kanadskih stručnjaka.

Prema američkim procjenama, sustav za proizvodnju pare, tj. reaktor s parogeneratorima skuplji je za 10 % do 15 % od ekvivalentnog sustava lakovodnog reaktora. U svakom slučaju, valja znati da je cijena sustava za proizvodnju pare oko 20 % od ukupnih troškova izgradnje nuklearne elektrane.

Specifičnost je teškovodnog reaktora kanadskog tipa da nema tlačne posude koja obuhvaća čitavu reaktorsku jezgru. Tlačne posude reaktora tipa PWR — promjera oko 5 m, visine 10 m do 12 m — trebaju izdržati tlak viši od 15 MPa s najvećom sigurnošću kroz predviđenih 30 godina pogona.

Stoga je proizvodnja tlačnih posuda nedvojbeno jedan od najosjetljivijih tehničkih zadataka pri gradnji elektrane tipa PWR. Za teškovodni reaktor kanadskog tipa taj je problem zaobiđen stavljanjem goriva u tlačne cijevi promjera oko 10 cm. Tlak oko 10 MPa vlada samo u tlačnim cijevima, a oko njih se nalazi moderator pod niskim ili normalnim tlakom. Sustav tlačnih cijevi u kojima se nalazi gorivo omogućuje da se izmjena goriva obavlja bez zaustavljanja reaktora pa teškovodni reaktori imaju visoku raspoloživost. Investicijski troškovi nuklearne elektrane tipa CANDU mogli bi biti i dosta veći od troškova za reaktore tipa PWR, a da se to ipak nadoknadi boljom raspoloživošću. Ulaganje u tešku vodu približno je nadoknađeno time što nema troškova za obogaćivanje urana. Može se kazati da teškovodni reaktori imaju karakteristike prema kojima su pogodni za manje industrijske zemlje i zemlje u razvoju. Međutim, u svijetu je najviše lakovodnih reaktora zato što su te reaktore razvile i promiču ih dvije najveće nuklearne i industrijske sile, SAD i SSSR.

Od zemalja u razvoju najviše je usvojila tehnologiju teškovodnog reaktora Indija, a za njom Pakistan. U posljednje vrijeme i Rumunjska je izabrala takvu tehnologiju te gradi dva reaktora tipa CANDU.

U tablici 5.10. navedene su odabrane fizikalno-tehničke karakteristike teškovodnih reaktora s tlačnim cijevima i odgovarajući podaci za teškovodni reaktor s tlačnom posudom konstruiran u SR Njemačkoj (gradi se u Argentini, projekt Atucha II). Predviđa se da će idućih godina proraditi teškovodni reaktori s malo obogaćenim uranom (oko 1 %) što bi smanjilo potrošnju urana. Potrošnja urana i proizvodnja plutonija u teškovodnim reaktorima prikazana je u tablici 5.11. (INFCE 1980). Teškovodni reaktori s prirodnim uranom troše približno 15 % urana manje od lakovodnih, tj. oko 3 600 tona u 30 godina pri faktoru raspoloživosti 0,7 za elektranu snage 1 000 MW (e).

Korištenjem malo obogaćenog urana ukupne količine za 30 godina smanjuju se na oko 2 600 t, što je znatna ušteda urana prema 4 300 tona, koliko otprilike u istom razdoblju troši reaktor tipa PWR. Uvođenje malo obogaćenog urana u teškovodni reaktor ovisi o procjeni troškova. Dodatna ušteda na uranu djelomično se potroši za plaćanje obogaćenja. Prema očekivanom porastu cijena urana u idućim godinama bit će povoljnije koristiti malo obogaćeni uran. U Kanadi se planira stavljanje u pogon reaktora s malo obogaćenim uranom potkraj 80-ih godina.

Kao varijante teškovodnog reaktora klasificiraju se i reaktori u kojima se kao rashladno sredstvo koristi obična voda, a teška voda samo kao moderator. Tako je smanjena količina teške vode u sustavu. Reaktori takvog tipa, s okomitim tlačnim cijevima u kojima se proizvodi para izgrađeni su u Velikoj Britaniji (SGHWR — Steam Generating Heavy Water Reactor) i u Japanu (Fugen). Kao gorivo koriste lagano obogaćeni uran. Iako imaju niz privlačnih tehničkih karakteristika

Tablica 5.10. Karakteristike teškovodnih reaktora kanadske, njemačke i američke konstrukcije (prema INFCE WG 8)

	S prirodnim uranom		S malo obogaćenim uranom			
	Kanada	SR Njemačka	Kanada	SR Njemačka	Rumunjska	SAD
			Snaga elektrane			
toplinska/MW	3 425	2 160	3 425	2 160	3 450	4 029
električna, bruto/MW	1 074	685	1 074	685	—	1 343
električna, neto/MW	1 000	637	1 000	637	1 000	1 260
stupanj djelovanja/%	29,2	29,5	29,2	29,5	29	31,5
			Karakteristike reaktora			
efektivni promjer jezgre/m	7,74	6,06	7,74	6,06	7,8	8,8
duljina jezgre/m	5,94	5,3	5,94	5,3	6,0	5,9
gustoća snage/ (kW/L)	12,2	14,1	12,2	14,1	12,2	12,6
specifična snaga/ (kW/kg urana)	26,5	30,6	26,5	30,6	26,3	24,3
temperatura rashladne tekućine, ulaz/°C	267	268	267	268	265	299
temperatura rashladne tekućine, izlaz/°C	310	306	310	306	310	337
primarni tlak/MPa	10,0	11,5	10,0	11,5	10,7	15,5
broj tlačnih cijevi	577	—	577	—	585	740
			Gorivo			
broj elemenata goriva	577×12	451	577×12	451	585×12	740×12
teški elementi/t	129,5	70,7	129,5	70,7	131,2	166
broj štapova u elementu	37	37	37	37	37	37
aktivna duljina/m	0,48	5,30	0,48	5,30	0,48	—
promjer štapa/cm	1,308	1,19	1,308	1,19	1,308	—
debljina košuljice/mm	0,419	0,55	0,419	0,55	0,42	—
teški metal u elementu/kg	18,7	152,5	18,7	152,5	18,7	18,7
obogaćenje u ekvilibriju/%	0,711	0,711	1,2	1,2	0,98	1,2
srednje izgaranje/ (MW d/kg)	7,3	7,4	20,9	20,0	14,1	19,75
boravak goriva u reaktoru/ekvivalentni dani	276	242	790	654	536	813

nisu građene velike komercijalne jedinice. Reaktor u Velikoj Britaniji u Winfrithu snage je 100 MW (e), a japanski Fugen snage 160 MW (e).

Tim varijantama, u kojima je teška voda u rashladnom sustavu zamijenjena običnom, možemo priključiti i sovjetski tip reaktora. On još posjeduje osnovnu koncepciju reaktora s tlačnim cijevima a od britanske i japanske varijante razlikuje se po tome što je teška voda kao moderator zamijenjena grafitom. To je povoljno jer se smanjuju investicije ali se manje ekonomično koriste neutroni. Očuvane su prednosti gradnje reaktorske jezgre od standardnih osnovnih jedinica — tlačnih cijevi jer nije potrebna tlačna posuda. Zbog neposredne proizvodnje pare čitav je sustav relativno jednostavan i pogodan za serijsku proizvodnju. Nedovoljno se zna o radu i tehničko-ekonomskim parametrima takvog reaktora međutim, u SSSR-u je izgrađeno desetak jedinica snage 1 000 MW (e), a još veće jedinice su u gradnji.

Tablica 5.11. Potrebne količine urana i separacijskog rada te proizvodnja plutonija za teškovodne elektrane snage i karakteristika prema tablici 5.10. Količine određene za raspoloživost 0,7 i rezidualno (preostalo) obogaćenje 0,2% — svedene na snagu 1 000 MW (e) (prema INFCE WG 8)

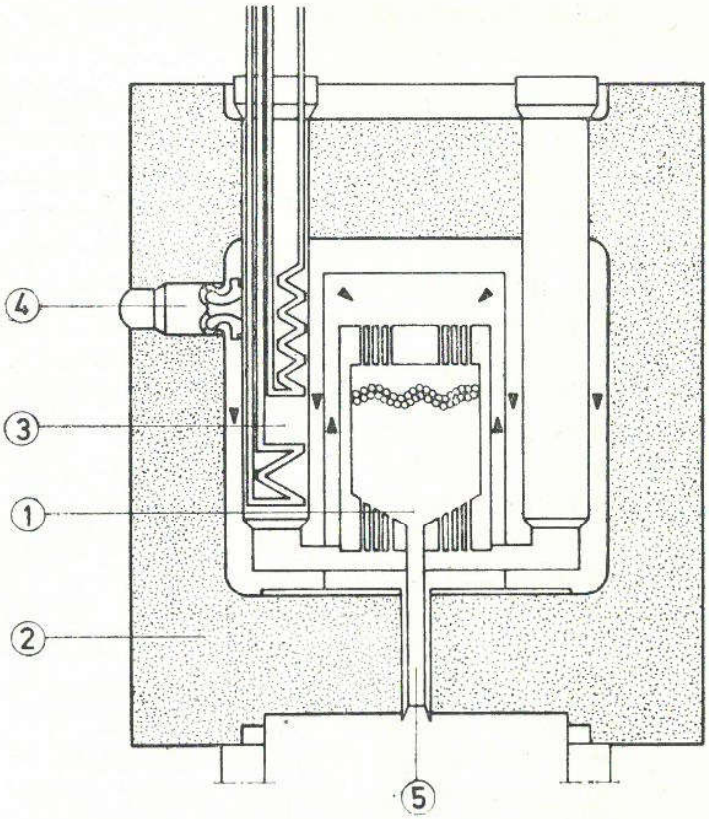
	S prirodnim uranom		S malo obogaćenim uranom			
	Kanada	SR Njemačka	Kanada	SR Njemačka	Rumunjska	SAD
Prirodni uran/ (t/1000 MW (e)						
prva jezgra	130,8	112	256	150	202	133,1
godišnja izmjena (ekvilibrij)	121,1	118,4	82,3	86,1	96	82
ukupno za 30 godina	3 716	3 608	2 651	2 679	3 000	2 559
neto	—	3 552	—	2 569	2 880	2 466
Separacijski rad, t/1 000 MW (e)						
prva jezgra	0	0	91,3	26	47	0
godišnja izmjena (ekvilibrij)	0	0	29,5	31	22,4	29
ukupno za 30 godina	0	0	945	930	706	861
neto	0	0	—	890	—	861
Fisibilni materijal u istrošenom gorivu, udio u masi teškog metala/%						
fisibilni uran	0,23	0,21	0,1	0,074	0,15	0,1
fisibilni plutonij	0,276	0,253	0,344	0,314	0,31	0,347
Godišnje količine/ (kg/1 000 MW (e))						
fisibilni uran	276	245	40,7	31,5	94	41,4
fisibilni plutonij	331	296	140	133	195	139
Ukupne količine za 30 godina/ (kg/1 000 MW (e)						
fisibilni uran	8 216	7 350	1 247	945	3 230	1 242
fisibilni plutonij	9 788	8 880	4 049	3 990	5 900	4 170

5.3.5. Visokotemperaturni reaktori

Današnji termički reaktori (osobito hlađeni vodom) imaju niži termodinamički stupanj iskorištenja od elektrana na fosilna goriva. U reaktorima hlađenim vodom temperatura rashladne vode odnosno pare ne prelazi 350 °C. Niski troškovi goriva smanjuju odgovarajući negativan ekonomski učinak; tehnički parametri birani su zapravo tako da smanjuju investicije, ali smanjen je i stupanj iskorištenja goriva. Obični reaktori hlađeni plinom nešto su bolji, ali i u njih se postižu relativno niske temperature, nedovoljne za izravnu primjenu u industrijskim procesima. To ograničuje upotrebu nuklearnih reaktora samo za proizvodnju električne energije i niskotemperaturne primjene u industriji, odnosno za toplifikaciju. Dugoročno to bi bilo ozbiljno ograničenje primjene energije fisije jer visokotemperaturna procesna toplina ima znatan udio u ukupnoj potrošnji energije. Važnost visokotemperaturnih reaktora jest upravo u tome što bi omogućili da se konvencionalni energetski izvori zamijene energijom fisije u visokotemperaturnim procesima, osobito u metalurgiji, kemijskoj industriji, u proizvodnji tekućih i plinskih goriva iz ugljena, a u budućnosti i u proizvodnji

vodika. Visokotemperaturni reaktori razvili su se iz reaktora hlađenih plinom. Veoma visoka radna temperatura — od 900 °C do 1 000 °C — može se postignuti zbog fizičkih svojstava potpuno keramičke jezgre reaktora i helija kao rashladnog sredstva. I gorivo je sasvim specifično u tim reaktorima. Metalna košuljica kakva se koristi u heterogenim termičkim reaktorima ne bi izdržala radne temperature visokotemperaturnih reaktora. Osnovni i najmanji element goriva sitna je kuglica promjera manjeg od milimetra. U središtu kuglice nalazi se gorivo, a vanjski je sloj pirolitički grafit koji služi kao košuljica i sprečava izlaz fisijskim produktima. Te sitne kuglice briketirane su grafitom u veće cjeline, a njihov se oblik određuje prema konstrukciji reaktora. Mogu biti u obliku punih ili šupljih štapova koji se ulažu u grafitnu noseću strukturu ili su u slučaju njemačkih reaktora, u obliku kugle.

Puni štapovi predaju toplinu grafitu kroz koji prolaze cijevi za rashladni plin. U izvedbi sa šupljim štapovima hlađenje je izravno.* Kuglasti elementi goriva promjera 6 cm u tzv. pebble bed



Slika 5.15. Visokotemperaturni reaktor s kuglastim gorivim elementima
1 — reaktorska jezgra — prostor popunjen kuglastim gorivim elementima
2 — tlačna posuda od prenapregnutog betona
3 — parni generator
4 — pumpa za rashladni plin (helij)
5 — kanal za odvođenje gorivih elemenata

Tablica 5.12. Visokotemperaturni reaktori u pogonu i gradnji

Reaktor i lokacija	Snaga MW (e)	Jezgra	Početak pogona
AVR SR Njemačka	15	promjer kugle 6 cm	1967.
Fort St. Vrain, SAD	330	šesterokutni blokovi	1976.
THTR-300, Uentrop, SR Njemačka	300	promjer kugle 6 cm	1985.

visokotemperaturnom reaktoru razvijenom u Njemačkoj ne ulažu se u grafit, nego slobodno leže u reaktorskoj posudi. Između kugala struji rashladni plin helij. Takav visokotemperaturni reaktor stavljen je u pogon 1967. u Njemačkoj. To je reaktor *AVR* snage 15 MW (e). Kuglasti briketi bez čvrste dodatne grafitne strukture omogućuju izmjenu goriva bez zaustavljanja reaktora. S dna reaktorske posude kontinuirano se ispuštaju istrošene kugle a svježe se dodaju na vrh (sl. 5.15).

Veći reaktor istog tipa, *THTR* snage 300 MW (e) trebao bi ući u pogon 1985. godine. Na razvoju visokotemperaturnih reaktora intenzivno se radi i u Japanu i SSSR-u.

* U SAD nakon izgradnje eksperimentalnog reaktora *Peach Bottom* snage 40 MW(e) koji je bio u pogonu od 1967—1974. godine, izgrađen je veći visokotemperaturni reaktor *Fort St. Vrain*, snage 330 MW(e), u pogonu od 1976. godine.

5.3.6. Termički oplodni reaktori

Kao što smo već uvodno spomenuli na dva se načina može povećati neutronski prinos a time i faktor konverzije. Prvi je da se uran-235 zamijeni uranom-233 koji u termičkom području daje veći neutronski prinos η. Karakteristična vrijednost neutronskog prinosa za termičke reaktore jest oko 2,25 za uran-233, a 2,07 za uran-235, pa bi se takvom zamjenom mogao povećati faktor konverzije približno za 0,2. Ako je faktor konverzije termičkog reaktora visok već s uranom-235 kao gorivom, prijelazom na uran-233 mogla bi se postignuti oplodnja. Takav termički reaktor postaje oplodni reaktor. Razlika prema običnom termičkom reaktoru, odnosno konvertoru, jest u gorivu odnosno ciklusu goriva. Fisibilni nuklid jest uran-233, ali da bi se on proizveo u reaktor treba staviti torij-232 kao oplodni materijal. Svaki termički reaktor bez većih promjena može prijeći na takav uran-torijev ciklus goriva.

Da bi se faktor konverzije povećao na način koji se temelji na visokoj vrijednosti neutronskog prinosa plutonija-239 pri fisiji s neutronima visokih energija, potrebno je bitno promijeniti koncepciju reaktora, pa ćemo o tome govoriti posebno.

Ostajući kod termičkih oplodnih reaktora, razabiremo da će kandidati za razvoj u termički oplodni reaktor biti oni termički reaktori koji već imaju visoki faktor konverzije. Od razvijenih i iskušanih termičkih reaktora takav je ponajprije teškovodni reaktor, u kojega je visoka vrijednost faktora konverzije posljedica male apsorpcije neutrona u moderatoru. Manje je povoljan reaktor s grafitnim moderatorom, a najlošiji bi za to bili lakovodni reaktori. Godišnja proizvodnja plutonija prikazana u tablicama 5.8. ili 5.11. u teškovodnim je reaktorima dva puta veća nego u lakovodnima. Faktor konverzije lakovodnih termičkih reaktora premalen je, mnogo manji od jedan, da bi ga prijelaz na uran-torijev ciklus goriva mogao približiti oplodnji. Da bi se to postiglo potrebne su velike promjene reaktorske koncepcije.

Lakovodni termički oplodni reaktor. Demonstracijski lakovodni reaktor konstruiran je da bi se povećao konverzijski faktor; stavljen je u pogon u SAD 1977. godine (Shippingport, snage 60 MW (e)). Reaktor je podmoderiran, što povećava neutronski prinos, a jezgra se sastoji od modula. Svaki modul sastoji se od središnjeg dijela — u kojem se nalazi visoko obogaćeno gorivo, a faktor je multiplikacije znatno iznad jedan — i vanjskog dijela s niskim obogaćenjem i niskim faktorom multiplikacije, koji služi kao reflektor za središnji dio. Sl. 5.16.

Ukupan faktor multiplikacije podešava se pomicanjem središnjih modula prema vanjskima. Takva kontrola reaktora promjenom rasporeda goriva umjesto apsorpcijom neutrona s kontrolnim štapovima poboljšava ekonomiju neutrona. Inače, pored tih promjena, elektrana koristi iskušanu PWR tehnologiju.

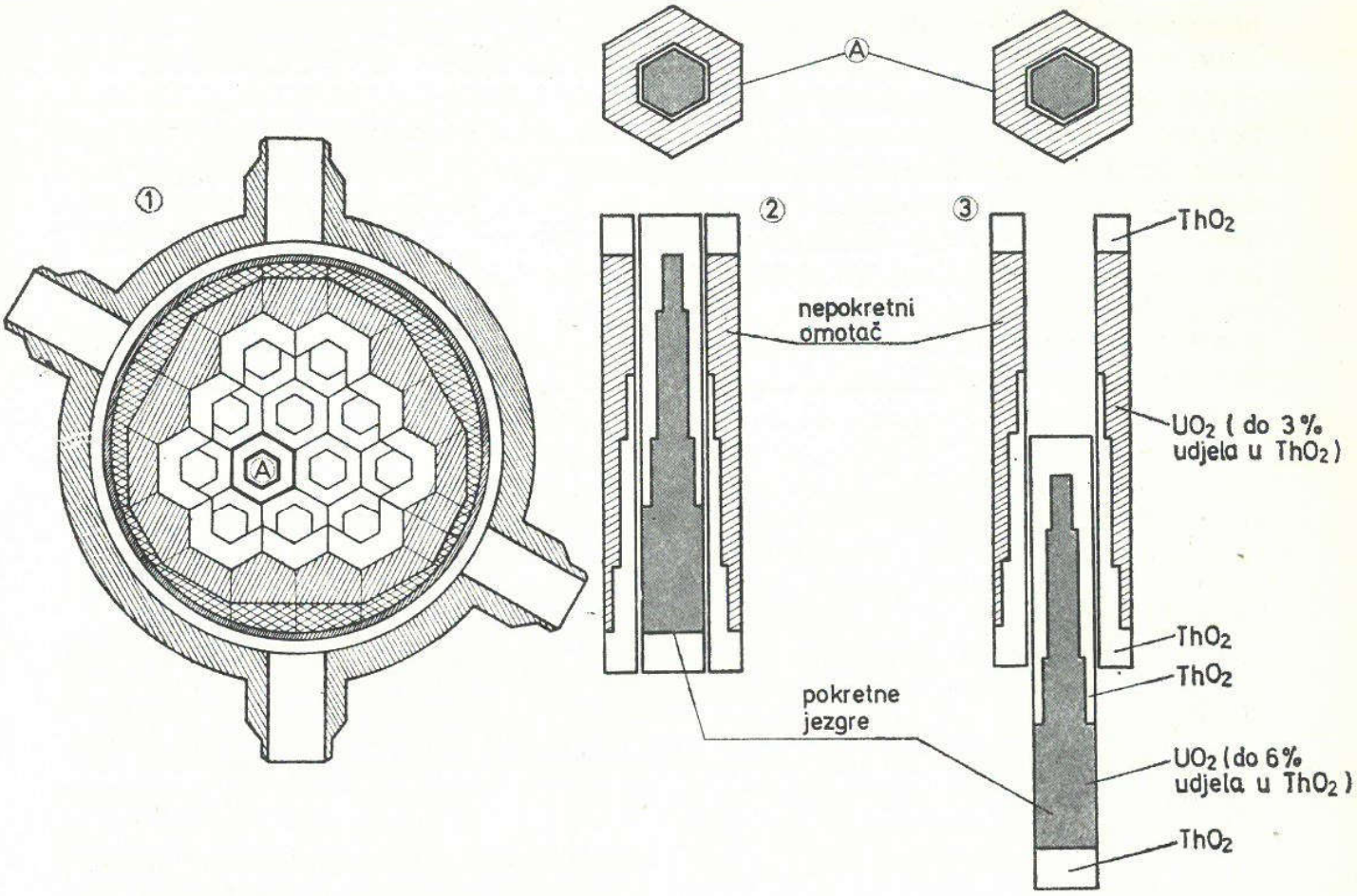
Ekstrapolacije prema podacima elektrane *Shippingport* daju sljedeće karakteristike za veliki lakovodni reaktor s modularnom jezgrom i promjenljivim rasporedom goriva u jezgri:

toplinska snaga	3 200 MW
električna snaga, neto	1 000 MW
ukupan stupanj djelovanja	31 %
količina urana-233 u jezgri	3 300 kg
faktor oplodnje	1,01 kg
količina torija u jezgri	188 000 kg

Temperatura i tlakovi kao za tipične reaktore tipa PWR.

Ako bi se osim modularne strukture jezgre i promjenljivog rasporeda goriva iskoristile i prednosti teške vode, povećao bi se faktor oplodnje, po mišljenju nekih stručnjaka čak do vrijednosti koje se očekuju za brze oplodne reaktore.

Reaktor s tekućom uranskom soli. Koncepcija termičkog oplodnog reaktora



Slika 5.16. Jezgra lakovodnog termalnog oplodnog reaktora s promjenljivom geometrijom
1 — poprečni presjek kroz jezgru i šestorouglate module,
2 — uzdužni presjek kroz jedan modul u pogonskom položaju,
3 — uzdužni presjek kroz jedan modul u zaustavljenom radu reaktora

s gorivom u obliku tekućih uranskih soli temelji se na malom eksperimentalnom reaktoru snage 8 MW (t) koji je eksperimentalno radio u SAD od 1965. do 1969. godine (Molten Salt Reactor Experiment, Oak Ridge National Laboratory). Taj homogeni reaktorski sustav pokazao je niz veoma povoljnih i zanimljivih karakteristika. Tekuće gorivo omogućuje kontinuiranu preradu i trajno izdvajanje fisijskih proizvoda u normalnom pogonu. Tako se povećava faktor konverzije, a i sigurnost. Trajnim izdvajanjem fisijskih proizvoda znatno je smanjena radioaktivnost goriva u reaktoru. Karakterističan je i visok stupanj djelovanja reaktora i niski tlakovi u primarnom krugu. Na žalost, eksperimentalni pogon i razvoj prekinut je prije nego što su dovoljno ispitani tehnološki problemi takve koncepcije.

Teškovodni reaktor s praškastim gorivom. Ovaj tip reaktora postoji samo kao eksperimentalni uređaj male snage. Gorivo su sitne čestice smjese uranova i torijeva oksida. Čestice su mikronskih dimenzija i suspendirane su u teškoj vodi koja služi i kao rashladno sredstvo i kao moderator. Vrlo povoljna ekonomija neutrona posljedica je dviju karakteristika sustava:

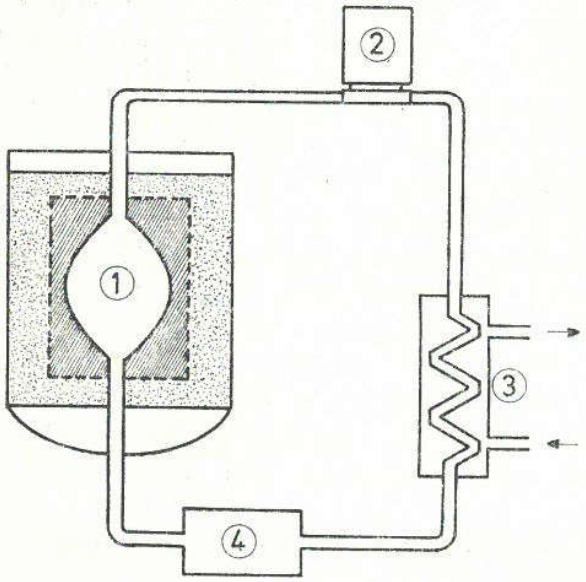
a) nema strukturnih materijala u jezgri,

b) čestice goriva tako su sitne da ih fisijski proizvodi nakon fisije mogu napustiti.

Trajnim izdvajanjem fisijskih proizvoda iz teške vode smanjuju se gubici

neutrona i postiže povoljna ekonomija neutrona.

Čestice suspendirane u teškoj vodi prolaze kroz proširenje, odnosno posudu tako dimenzioniranu da sadržaj goriva u njima dosegne količinu potrebnu za održavanje lančane reakcije (sl.5.17). Nakon prolaza kroz takvu reakcijsku komoru suspenzija je zagrijana te predaje toplinu u parogeneratoru i zatim se vraća u reakcijsku komoru.

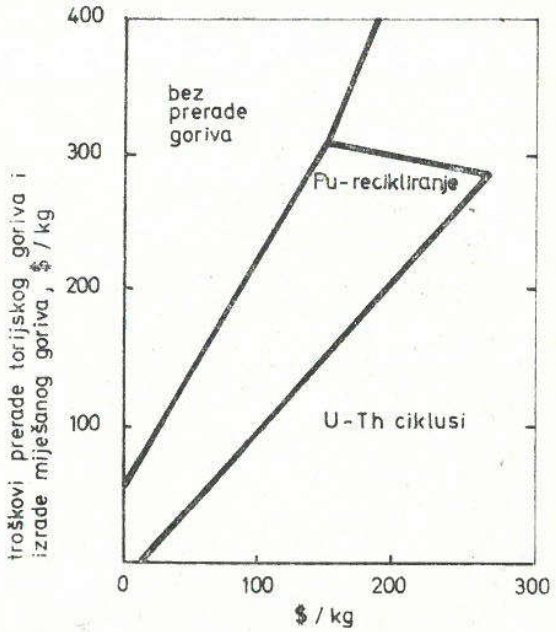


Slika 5.17. Teškovodni reaktor s vodenom suspenzijom praškastog goriva, principijelna shema
1 — reakcijska komora
2 — cirkulacijska pumpa
3 — parogenerator
4 — separator produkata fisije

Reaktor s praškastim suspendiranim gorivom razvijen je u Nizozemskoj, gdje je od 1975. godine u pogonu eksperimentalni reaktor snage do 1 MW(t).

Značajni tehnološki problemi u takvoj koncepciji vezani su uz abraziju koju suspendirane čestice goriva uzrokuju u primarnom krugu, te uz taloženje i nakupljanje goriva što bi moglo dovesti do nekontroliranih kritičnosti.

Teškovodni termički oplodni reaktori tipa CANDU. Prema visokoj vrijednosti faktora konverzije u radu s običnim uranom kao gorivom, teškovodni je reaktor od svih razvijenih termičkih reaktora najbliži oplodnji. Za prijelaz na



Slika 5.18. Uvođenje uran-torij ciklusa u ovisnosti o cijeni urana i preradi goriva. Prije ulaska u područje ekonomske prednosti uran-torijevog ciklusa, osim kod vrlo visoke cijene prerade povoljnije je recikliranje plutonija.

uran-torijev ciklus nisu potrebne nikakve značajnije promjene u reaktorskoj tehnologiji. Za uvođenje uran-torijeva ciklusa odlučujuća je u prvom redu ekonomičnost; smanjuje se potrošnja urana, ali se javljaju troškovi prerade goriva, izdvajanja i recikliranja urana-233. Povoljnost uvođenja uran-torijeva ciklusa, ovisno o cijeni urana i cijeni prerade, prikazana je za teškovodni reaktor tipa CANDU na slici 5.18.

Osnovne karakteristike CANDU reaktora s ciklusom goriva uran-torij [MAAE 78]:

toplinska snaga	3 400 MW
neto električna snaga	1 000 MW
ukupan stupanj djelovanja	29,4 %
masa fisibilnih nuklida u jezgri	2 134 kg
masa torija u jezgri	126 000 kg
faktor oplodnje	~ 1,0

Temperature i tlakovi kao za CANDU reaktore (tablica 5.10)

Faktor oplodnje ovisi također posredno i o cijeni prerade goriva. Kraćim zadržavanjem goriva u reaktoru i manjim stupnjem izgaranja smanjuju se gubici neutrona apsorpcijom u fisijskim proizvodima: to povećava faktor oplodnje, ali i troškove prerade.

Prema utvrđenim cijenama urana i prerade može se odrediti ona optimalna vrijednost faktora konverzije pri kojoj je cijena energije najniža. Zasad cijene urana nisu toliko visoke da bi ciklus uran-torija bio ekonomski povoljniji od ciklusa s prirodnim uranom, tj. da bi se tako proizvodila energija niže cijene.

5.3.7. Brzi oplodni reaktori

Iskorištenjem visokog neutronskog prinosa plutonija-239 na višim energijama neutrona u brzim se oplodnim reaktorima povećava faktor konverzije. Fisija brzim neutronima ostvaruje se izostavljanjem moderatora iz jezgre reaktora. Takvo izostavljanje moderatora ima i dodatne utjecaje na faktor konverzije, bez kojih učinak povećanog neutronskog prinosa ne bi bio dovoljan za oplodnju. Prvo, smanjeni su gubici neutrona u jezgri: ona osim goriva sadrži znatno manje drugih materijala nego termički reaktor.

Drugo, smanjuje se volumen jezgre. To omogućuje da se ona „omota" oblogom urana u kojem iz jezgre reaktora odbjegli neutroni bivaju iskorišteni za proizvodnju plutonija reakcijom s uranom-238. Bez tog „omotača" brzi oplodni reaktor ne bi postigao jedinični faktor konverzije. Faktor konverzije, odnosno faktor oplodnje za brze oplodne reaktore tvore unutrašnji faktor konverzije, određen konverzijom u jezgri, i vanjski, određen konverzijom u omotaču.

Pojednostavnjenim fizikalnim promatranjem utvrđuje se da je približna vrijednost za vanjski faktor oplodnje $\eta - 1$, pa slijedi da je doprinos omotača ukupnom faktoru konverzije bitan.

Vanjski faktor oplodnje

Konverzija u brzom oplodnom reaktoru zbiva se u jezgri i u omotaču. U prvom slučaju govori se o unutrašnjoj konverziji i unutrašnjem konverzijskom, odnosno oplodnom faktoru C_u; u drugom slučaju govori se o vanjskoj konverziji i vanjskom konverzijskom faktoru C_v. S makroskopskim udarnim presjecima za hvatanje neutrona i fisiju Σ_c i Σ_f možemo ukupni faktor oplodnje C pisati

$$C = \frac{\int_{\text{jezgra}} \Phi \Sigma_c^{\text{plodni}} \, dV + \int_{\text{omotač}} \Phi \Sigma_c^{\text{plodni}} \, dV}{\int_{\text{jezgra}} \Phi (\Sigma_f + \Sigma_c)^{\text{gorivo}} \, dV} \qquad (5.10)$$

Produkt neutronskog toka Φ i makroskopskog udarnog presjeka daje broj reakcija u jedinici vremena. Neutronski tok funkcija je položaja u jezgri i omotaču pa se ukupan broj reakcija u reaktoru dobiva integriranjem po volumenu jezgre i omotača. Brojnik prikazuje proizvodnju fisibilnih nuklida, a nazivnik, u kojem se integrira samo po volumenu goriva, potrošak fisibilnih nuklida. Prvi član u brojniku podijeljen s nazivnikom izražava vrijednost unutrašnjeg koeficijenta konverzije. Drugi član pokazuje brzinu stvaranja fisibilnih nuklida u omotaču, a podijeljen s nazivnikom vrijednosti vanjskog koeficijenta konverzije.

Pojednostavnjenu procjenu vrijednosti vanjskog faktora konverzije C_v možemo dobiti ako promatramo samo reakcije na fisibilnim i oplodnim materijalima, a zanemarimo ostale materijale u jezgri i omotaču. Tada se od η (neutronski prinos) neutrona proizvedenih pri jednoj apsorpciji neutrona u gorivu, jedan troši na održavanje lančane reakcije, a ostali napuštaju jezgru. Pretpostavimo da je debljina omotača dovoljna da se u oplodnim nuklidima apsorbiraju svi $\eta - 1$ neutroni. Slijedi da se po jednoj fisiji, tj. za jednu fisibilnu jezgru potrošenu u gorivu, proizvede $\eta - 1$ fisibilnih jezgara u omotaču, odnosno vanjski faktor oplodnje C_v iznosi $\eta - 1$. Uz navedene pretpostavke vanjski faktor konverzije određen je zapravo fizikalnim karakteristi-

kama fisibilnih nuklida u jezgri, $\eta = \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} \nu$, i energetskom raspodjelom neutrona, budući da o energiji neutrona ovise σ_f i σ_c, a i ν.

U tablici 5.13. navode se vrijednosti $\eta - 1$ za najvažnije fisibilne nuklide ovisno o energiji neutrona koji uzrokuju fisiju.

Tablica 5.13. Vrijednosti (η—1) za najvažnije fisibilne nuklide ovisno o energiji neutrona koji uzrokuju fisiju

Fisibilni nuklid	($\eta - 1$) za energije neutrona				
	termički neutroni	$1-3 \cdot 10^3$eV	3—10 keV	0,1—0,4 MeV	0,4—1MeV
^{239}Pu	1,09	0,62	0,93	1,61	1,94
^{235}U	1,06	0,68	0,90	1,12	1,33
^{233}U	1,27	0,888	1,29	1,30	1,58

Razabire se da u području termičkih neutrona najveću vrijednost daje nuklid ^{233}U, a u području brzih neutrona nuklid ^{239}Pu. Na tim vrlo važnim svojstvima nuklida temelji se mogućnost da se korištenjem urana-^{233} izgrade termički oplodni reaktori, tj. reaktori s konverzijskim faktorom blizu ili iznad jedan. Također postoji mogućnost da se u reaktorima u kojima se obavlja fisija brzim neutronima iskoristi visoka vrijednost ($\eta - 1$) za plutonij-239 za dobivanje konverzijskog faktora iznad jedan. Razabire se da je u takvim reaktorima nepostojanje moderatora bitna karakteristika koja omogućuje da neutroni do fisije zadrže visoke energije.

Iz neophodnog doprinosa omotača u proizvodnji plutonija slijede i osnovne tehničke karakteristike oplodnog reaktora. Da omotač ne bi bio preglomazan, što bi značilo suviše veliku količinu urana za izradu i preradu goriva, jezgra mora biti malena. Dakle, visoka volumna i težinska koncentracija snage specifična je i bitna karakteristika brzih oplodnih reaktora.

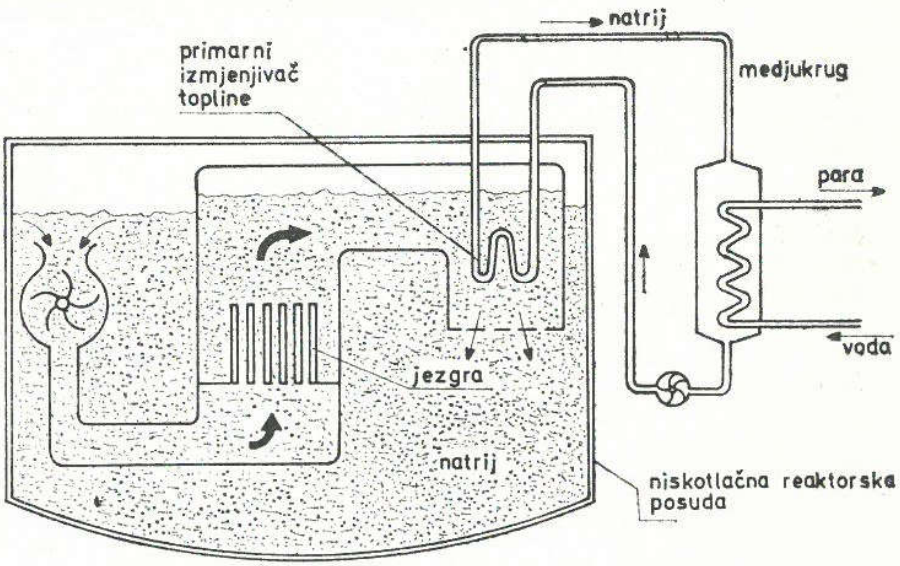
Efikasno hlađenje jezgre primaran je problem brzog oplodnog reaktora što odlučno utječe na njegove tehničke karakteristike. Hlađenje tekućim metalom, materijalom velike toplinske vodljivosti najpovoljnije je, iako bi i hlađenje plinom imalo pozitivnih strana.

Brzi oplodni reaktori hlađeni plinom tek se projektiraju, zasad još nije ni jedan izgrađen. Međutim, za takve reaktore moglo bi se iskoristiti dosta tehnologije termičkih reaktora hlađenih plinom i visokotemperaturnih reaktora. Osim poznatih i iskušanih rashladnih plinova ugljik-dioksida i helija, proučava se, osobito u SSSR-u, i hlađenje s pomoću N_2O_4. Taj plin procesom disocijacije u principu postaje vrlo efikasan rashladni medij, no da li je uistinu i u ostalim svojstvima prikladan malo je poznato.

Bude li većih tehničkih ili ekonomskih teškoća s oplodnim reaktorima hlađenim tekućim metalom, koncepcije reaktora hlađenih plinom mogle bi postati mnogo značajnije nego što su danas.

Brzi oplodni reaktori hlađeni natrijem. Nakon početnih pokušaja hlađenja živom i drugim metalima odnosno legurama niskog tališta, danas se odabire hlađenje tekućim natrijem. Prednosti su natrija nisko talište, dosta visoko vrelište (890 °C pri atmosferskom tlaku). Uz visoko vrelište nizak je tlak para te se reaktorska posuda ne nalazi pod visokim tlakom; tlakovi se kreću od atmosferskog do oko 1 MPa, za razliku od termičkih reaktora hlađenih vodom gdje zbog kvalitete pare i faktora iskorištenja tlakovi u reaktorskoj posudi moraju biti oko 7 MPa (BWR sustavi), odnosno 16 MPa (PWR sustavi). Međutim, natrij je kemijski veoma aktivan što postavlja teške uvjete na sve materijale s kojima zagrijani natrij dolazi u dodir. Drugi je nedostatak što

postaje radioaktivan djelovanjem neutronskog zračenja u reaktoru. Potrebno je prema tome posebno osiguranje protiv izlaska radioaktivnog natrija. Ono se postiže uvođenjem rashladnog međukruga tako da radioaktivni natrij ne dolazi u generator pare gdje bi eventualno mogao doći u dodir s vodom. U primarnom izmjenjivaču aktivni natrij predaje energiju neaktivnomu, a tek u sekundarnom izmjenjivaču ovaj predaje energiju vodi i proizvodi paru.



Slika 5.19. Shematski prikaz bazenskog tipa brzog oplodnog reaktora hlađenog tekućim natrijem. Jezgra, primarni krug i primarni izmjenjivač potopljeni su u tekućem natriju. Rashladni međukrug je osiguranje protiv eventualnog kontakta radioaktivnog natrija iz bazena i vode u parogeneratoru. S obzirom na nizak tlak pare natrija, tlak u bazenu iznosi svega oko 1 MPa.

Na shemi (sl. 5.19) prikazana je izvedba u kojoj je primarni izmjenjivač smješten u bazenu natrija zajedno s reaktorskom jezgrom. Ta izvedba osigurava da jezgra reaktora bude uvijek potopljena u natriju, a i dovoljnu prirodnu cirkulaciju ako bi se prekinuo rad reaktora i cirkulacijskih pumpi.

No, odvojeni primarni izmjenjivač omogućuje lakši pristup i održavanje pa postoji i takav raspored u više reaktora. U najvećih izgrađenih i upravo građenih reaktora najčešći je tzv. „bazenski" tip.

Dosad je izgrađeno petnaestak oplodnih reaktora hlađenih natrijem. Grade se intenzivno, iako je u nekim zemljama (SAD) bar privremeno smanjen program i usporena gradnja.

Veoma je impresivan francuski razvoj oplodnih reaktora. U sklopu francuskog programa gradi se veliki oplodni reaktor poznat pod nazivom *Super-Phenix*. Taj oplodni reaktor snage 1 200 MW (e) trebao bi biti završen 1984. godine.

U tablici 5.14. pregled je natrijem hlađenih oplodnih reaktora u pogonu i gradnji.

U tablici 5.15. navedene su glavne karakteristike brzog oplodnog reaktora snage 1 000 MW(e) za referentni projekt reaktora do 2000. godine. Projekt se temelji na *Super-Phenix*-u, a snaga je svedena na 1 000 MW(e).

Na temelju rada izgrađenih brzih oplodnih reaktora, koji već dosižu i znatne snage, prihvatljive su ekstrapolacije za velike oplodne reaktore.

U tablici 5.16. prikazana je prema studiji INFCE, ilustrativna bilanca ulaza i izlaza fisibilnih i plodnih nuklida, te početna jezgra za reaktor snage 1 000 MW (e). Bilanca ulaza i izlaza vrijedi pri raspoloživosti 70 % za oplodne reaktore s oksidnim gorivom, kakvi će se graditi do 2000. godine. Iz podataka o prinosu fisibilnog plutonija u jezgri i u oblozi jasno se razabire dominantan doprinos omotača.

Ekstrapolacije bilance goriva za takav tip dosta su pouzdane, ali tek nakon gradnja velikih reaktora moći će se odgovoriti na pitanja koja nisu samo fizikalno-tehnička, i o kojima će ovisiti budućnost oplodnog reaktora. Vrlo je aktualno pitanje ekonomičnosti oplodnog reaktora. Ocjenjuje se da bi investicije po jediničnoj snazi oplodnog reaktora mogle biti 20% do 50% veće nego za termičke

Tablica 5.14. Oplodni reaktori hlađeni tekućim natrijem — izgrađeni reaktori, reaktori u gradnji i planirana gradnja

Oznaka reaktora	Država	Snaga	Početak pogona
	Izgrađeni reaktori (u pogonu*)		
EBR 1	SAD	0,2 MW	1951.
Br 5	SSSR	5 MW(t)	1962.
Dounray	Velika Britanija	15 MW(e)	1962.
EBR 11*	SAD	20 MW(e)	1965.
Fermi	SAD	66 MW	1966.
Rapsodie	Francuska	40 MW(t)	1967.
SEFOR	SAD	20 MW(t)	1969.
BOR 60*	SSSR	12 MW(e)	1970.
BN 350*	SSSR	1 000 MW(t)	1973.
*Phenix**	Francuska	250 MW(e)	1974.
*PFR**	Velika Britanija	250 MW(e)	1974.
KNK II*	SR Njemačka	20 MW(e)	1977.
*Joyo**	Japan	100 MW(t)	1977.
BN 600*	SSSR	600 (MW(e)	1980.
*FFTF**	SAD	400 MW(t)	1982.
	Reaktori u gradnji		
Super-Phenix	Francuska	1 200 MW(e)	1984.
FBTR	Indija	12,5 MW(e)	1985.
SNR 300	SR Njemačka	300 MW(e)	1986.
PEC	Italija	140 MW(t)	1987.
CRBR	SAD	380 MW(e)	1989.
	Planirane gradnje		
Monju	Japan	300 MW(e)	
SNR 2	SR Njemčka	1 300 MW(e)	
Super-Phenix II	Francuska	1 500 MW(e)	
BN—800	SSSR	800 MW(e)	
BN-1600	SSSR	1 600 MW(e)	
CDFR	Velika Britanija	1 300 MW(e)	

Tablica 5.15. Glavne karakteristike brzog oplodnog reaktora hlađenog natrijem, snaga 1 000 MW (e)

Toplinska snaga	2 500 MW
Neto električna snaga	1 000 MW
Stupanj djelovanja	40 %
Vanjski promjer gorivnog štapa	8,5 mm
Promjer tablete	6,9 mm
Izgor u jezgri	70 MW dana/kg TE*
Specifična snaga u jezgri	79 kW/kg TE
Linearna snaga	450 W/cm
Temperatura natrija:	
na ulazu u jezgru	395 °C
na izlazu iz jezgre	545 °C
Masa fisibilnih nuklida u jezgri	4 000 kg
Faktor oplodnje	1,24
Vrijeme udvostručenja	30 godina

*TE = Teški element; podatak se odnosi na kilogram goriva, izuzimajući kisik ako se radi o oksidnom gorivu.

Tablica 5.16. Početne, te godišnje ulazne i izlazne količine izotopa urana i plutonija za brzi oplodni reaktor snage 1 000 MW (e) i faktora iskorištenja 0,7 (hlađenje natrijem, oksidno gorivo, do godine 2000) — podaci INFCE 1980.

	Izotopi urana			Izotopi plutonija					Fisibilni plutonij	Ukupno plutonij	Ukupno uran	Uran i plutonij
	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu				
					Količine za početno punjenje/kg							
jezgra	120	0	23 872	111	2 706	1 112	524	180	3 230	4 633	23 992	28 625
gornja i donja obloga	89	0	17 751	0	0	0	0	0	0	0	17 850	17 850
radijalna obloga	214	0	42 653	0	0	0	0	0	0	0	42 867	42 867
ukupno	423	0	84 286	111	2 706	1 112	524	180	3 230	4 633	84 709	89 342
					Godišnje ulazne količine/kg							
jezgra	48	0	9 549	44	1 083	445	209	72	1 292	1 853	9 597	11 450
gornja i donja obloga	36	0	7 104	0	0	0	0	0	0	0	7 140	7 140
radijalna obloga	45	0	8 849	0	0	0	0	0	0	0	8 894	8 894
ukupno	129	0	25 502	44	1 083	445	209	72	1 292	1 853	25 631	27 484
					Godišnje izlazne količine/kg							
jezgra	36	3	8 948	41	1 108	476	155	73	1 263	1 853	8 987	10 840
gornja i donja obloga	31	1	6 968	0	127	3	0	0	127	130	7 000	7 130
radijalna obloga	39	1	8 723	0	111	2	0	0	111	113	8 763	8 876
ukupno	106	5	24 639	41	1 346	481	155	73	1 501	2 096	24 750	26 848
					Godišnji prirast/kg							
jezgra	—12	3	—601	—3	25	31	—54	1	—29	0	—610	—610
gornja i donja obloga	—5	1	—136	0	127	3	0	0	127	130	—140	— 10
radijalna obloga	—6	1	—126	0	111	2	0	0	111	113	—131	— 18
ukupno	—23	5	—863	—3	263	36	—54	1	209	243	—881	—638

reaktore, što bi značajno utjecalo na cijenu energije.

Daljnji prigovori brzom oplodnom reaktoru odnose se na sigurnost. Pri tom oni ne proizlaze iz činjenice da se radi o reaktoru koji se tek razvija, nego iz njegovih osnovnih fizikalnih i tehničkih karakteristika. Te su: upotreba visoko obogaćenog goriva i veoma visoka koncentracija snage u jezgri oplodnog reaktora. Visoka koncentracija snage znatno više opterećuje reaktorski materijal. Učinci na materijalu veoma intenzivnih tokova brzih neutrona ozbiljni su, a njihovo se kumulativno djelovanje u duljem razdoblju još istražuje. Odvođenje topline iz jezgre pri volumnoj koncentraciji snage oko 400 kW/L težak je tehnički zadatak, a eventualno nepostojanje hlađenja zbog kvara još je veća opasnost nego u termičkog reaktora.

Već je opisano da se dobro hlađenje postiže tekućim metalom, natrijem koji struji kroz jezgru. No takvi reaktori sadrže tisuću i više tona natrija što je dodatna opasnost u slučaju kontakta s atmosferom.

Mogli bismo ipak, možda optimistički, kazati da će se svi navedeni problemi riješiti tehnološkim razvojem materijala i visokim stupnjem tehničke sigurnosti sustava za hlađenje jezgre u slučaju nužde te da će eventualni kvarovi i njihove posljedice biti locirane na elektranu ili neposredni okoliš. No postoje prigovori koji izlaze iz okvira tehničkih diskusija. Oni se odnose na mogućnost zloupotrebe plutonija. U oplodnom reaktoru ima mnogo plutonija, 4 do 5 t u reaktoru snage 1 000 MW. Manje od jednog postotka te količine bilo bi dovoljno za konstrukciju atomske bombe. Ovaj aspekt zaslužuje da ga se pobliže razmotri.

Neki tehnički aspekti zloupotrebe plutonija. U raspravama o mogućnosti zloupotrebe plutonija iz energetskih reaktora valja znati da plutonij iz goriva koje je prošlo znatniji dio radnog vijeka u reaktoru nije prikladan za nuklearni eksploziv.

U takvom plutoniju osim plutonija-239 ima i plutonija-240 koji se raspada spontanom fisijom i pri tom emitira neutrone. Nuklearna eksplozija izaziva se kompresijom potkritične mase plutonija klasičnim eksplozivom pri čemu masa postaje natkritična zbog povećanja gustoće.

Snažan neutronski izvor iz plutonija-240 uzrokuje prijevremenu lančanu reakciju te implozija ne može postići gustoću potrebnu da bi fisija obuhvatila znatan dio plutonija. Pokušaj kvantitativne procjene obavljen je u [Sa 1980].

Ako se u plutoniju nalazi 15 % plutonija-240, energija nuklearne eksplozije smanjuje se približno 100 puta prema energiji iz eksplozije plutonija u kome se nalazi samo 5 % plutonija-240, a koji se smatra nuklearnim eksplozivom. Energija eksplozije smanjuje se još 10 puta ako udio plutonija-240 poraste na 25 %.

U gorivu koje je proboravilo u reaktoru tipa PWR puni radni vijek te odgorjelo 30 MW d/kg, udio plutonija-240 jest do 40 % količine plutonija-239.

Da bi taj udio bio oko 15 %, trebalo bi gorivo izvaditi iz reaktora nakon samo oko 10 MW d/kg.

Prema tome za proizvodnju efikasnog nuklearnog eksploziva u energetskim reaktorima platila bi se visoka cijena zbog neekonomičnog režima rada, koji bi, osim toga, trebao biti zamijećen kontrolnim mjerama predviđenim prema Ugovoru o neširenju nuklearnog oružja.

Mišljenja stručnjaka o tom problemu suprotna su, pa već i to govori da se problem ne može zanemariti.

I poznati reaktorski stručnjak i zagovornik nuklearne energije, A. M. Weinberg nije uvjeren da je oportuno graditi brze oplodne reaktore [We 1969].

Neki misle da oplodni reaktori ne uvode nove elemente opasnosti jer plutonij nastaje i u termičkim reaktorima. No, suprotno takvom shvaćanju, ističe se da je plutonij u termičkim reaktorima proizvod izgorijevanja te se može dobiti tek iz iskorištavanih elemenata goriva. Oni su, međutim, tako intenzivno radioaktivni, da se njima ne može manipulirati bez specijalne i skupe opreme, a plutonija je u iskorištenom uranu manje od 1 %.

Druge su prilike s oplodnim reaktorima. Plutonij je sastavni dio još neupotrijebljenog, dakle ne intenzivno radioaktivnog goriva za takve reaktore. Koncentracija plutonija u gorivu također je znatno viša, pa se može i mnogo lakše izdvojiti. Problemi sigurnosti nisu novi, ali se s oplodnim reaktorima bitno zaoštravaju. Postoji, istina, kontrola nuklearnih pogona na temelju Međunarodnog ugovora o neširenju nuklearnog oružja (Non proliferation treaty). 5.9. No, postojeći i predviđeni postupci inspekcije u nuklearnim pogonima ne mogu utvrditi izdvajanje manje od 1 % godišnjeg ulaganja novog goriva. To je dovoljno za kontrolu termičkih reaktora, ali ne i za kontrolu oplodnih reaktora. Potrebno je razviti efikasniju kontrolu. No, kad i ako se takvi postupci razviju i budu međunarodno prihvaćeni, s pomoću njih će se moći sprečavati *tajno* izdvajanje plutonija iz pogona nuklearne elektrane. Mogućnost otmice pošiljke novog goriva pri prijevozu od mjesta izrade do nuklearne elektrane, i dalje će ostati. S druge strane, kako izotopni sastav plutonija odlučuje o njegovoj upotrebljivosti za pravljenje atomske bombe, možda bi djelotvorno osiguranje mogla biti kontrola i podešavanje izotopnog sastava plutonija u novom gorivu tako da ne bude prikladan za izradu atomske bombe.

Koncentracija svih pogona vezanih uz nuklearnu elektranu na jednom kontroliranom području također može biti osiguranje od zloupotrebe. Postoji niz načina za povećanje sigurnosti i o njima valja raspravljati, ne zbog želje za dramatizacijom nego zbog uvjerenja da se problem može riješiti samo ako se jasno i otvoreno postavi. Potcjenjivanjem problema sigurnosti mogle bi se napraviti još ozbiljnije pogreške nego pri termičkim reaktorima.

I za nas je pravodobna rasprava o sigurnosti vrlo važna. Brzi oplodni reaktori nisu jedina dugoročna perspektiva nuklearne energetike. Termički oplodni reaktori ili gotovo oplodni termički reaktori također omogućuju dugoročnu perspektivu, bez dodatnih problema sigurnosti svojstvenih brzim oplodnim reaktorima. Čak kad bi razvoj u svijetu definitivno dao prednost brzim reaktorima, to još ne bi moralo značiti da je takva orijentacija najpovoljnija za svaku zemlju.

Opredijeliti se za tehnički i tehnološki složenu, a ekonomski neizvjesnu koncepciju, ne smije se bez detaljnih analiza razmatranja razvoja, osobito brzih oplodnih reaktora i njima alternativnih termičkih oplodnih reaktora.

5.4. Ciklus goriva

5.4.1. Faze ciklusa goriva

Ciklusom goriva naziva se skup aktivnosti kojima se dobiva sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i brine o iskorištenom gorivu, tj. o spremanju, preradi i odlaganju radioaktivnog otpada. Dio tih aktivnosti odvija se u nuklearnoj elektrani. To su spremanje svježeg goriva, punjenje reaktora, razmještanje goriva u reaktoru, vađenje istrošenog goriva i njegovo čuvanje u elektrani. Taj se dio ciklusa naziva unutrašnjim, za razliku od onih aktivnosti koje se odvijaju izvan elektrane.

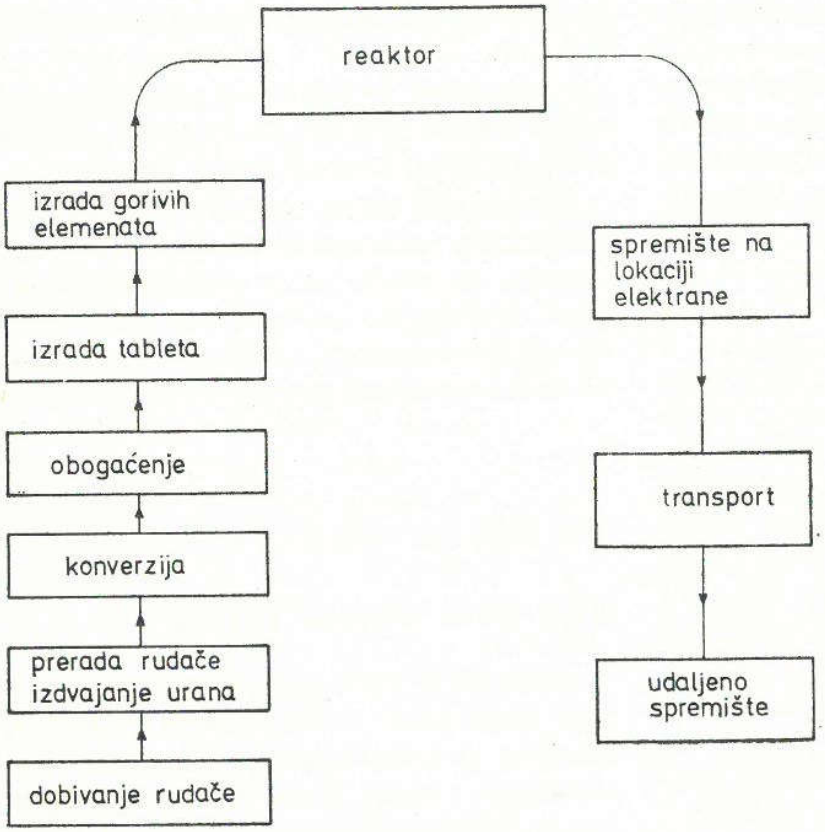
Faze ciklusa goriva prije ulaska goriva u reaktor:

1. prospekcija urana, dobivanje i prerada rudače,
2. konverzija i obogaćenje (nije potrebno za reaktore s prirodnim uranom),
3. izrada goriva do oblika u kojem se stavlja u reaktor.

Faze ciklusa goriva nakon izlaska iz reaktora:

4. privremeno spremanje u elektrani,
5. prijevoz do instalacije za preradu i prerada,
6. recikliranje fisibilnih i oplodnih nuklida,
7. odlaganje radioaktivnog otpada.

Ako se gorivo ne prerađuje, ono se poslije 4. faze dugoročnije sprema izvan



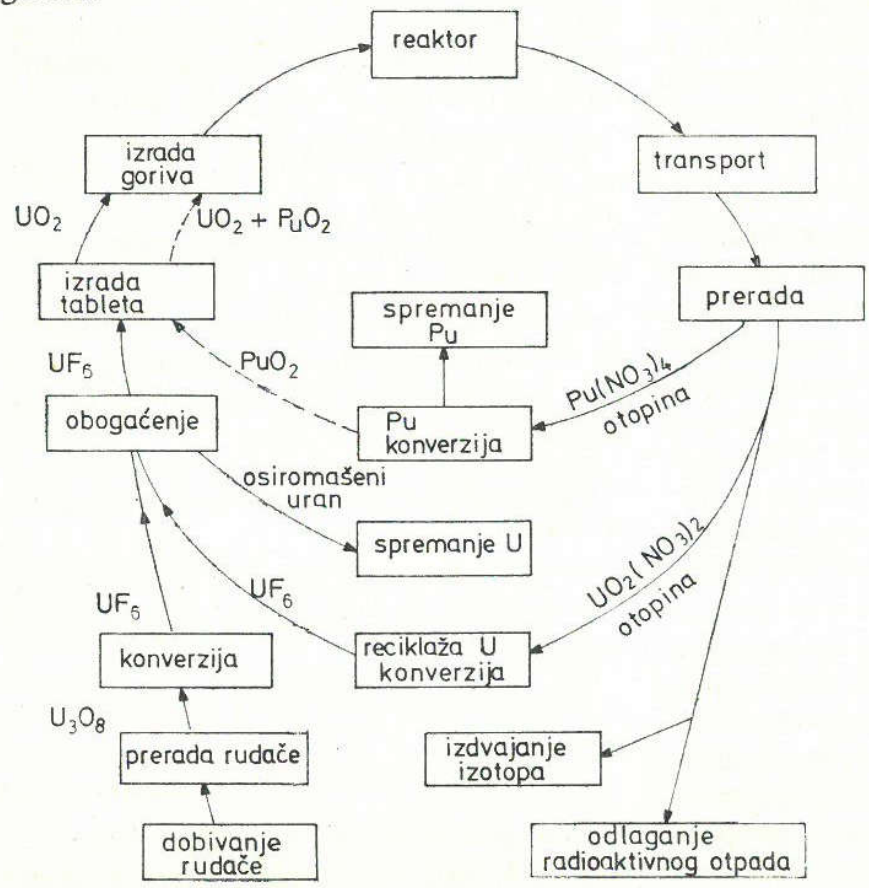
Slika 5.20. Faze ciklusa goriva bez prerade. Faze konverzije i obogaćenja izostaju kod reaktora s prirodnim uranom.

elektrane do odluke o preradi ili trajnom odlaganju.

Na slici 5.20. shematski su prikazane faze ciklusa goriva bez prerade istrošenog goriva.

Na slici 5.21. shematski su prikazane faze ciklusa goriva kad se gorivo s obogaćenim uranom prerađuje i reciklira.

Prerada goriva s prirodnim uranom nije zasad ekonomski opravdana. Nekoliko



Slika 5.21. Faze ciklusa goriva s preradom i recikliranjem i urana i plutonija

kratkih informacija o pojedinim fazama ciklusa potvrdit će da ciklus goriva obuhvaća niz složenih aktivnosti, za što su potrebne specijalne instalacije i oprema.

Ovladavanje ciklusom goriva odnosno potrebnom tehnologijom, ili, alternativno, osiguranje usluga za ciklus goriva u drugim zemljama, je potrebno za korištenje energije fisije. Neke faze ciklusa goriva, obogaćenje goriva ili prerada, tehnološki su teški i skupi pothvati, pa samo neke od država koje posjeduju nuklearne elektrane posjeduju i tehnologiju za sve faze ciklusa goriva.

5.4.2. Faze ciklusa goriva prije ulaza goriva u reaktor

Iskop uranske rudače. Uran nije rijedak element; prosječna je koncentracija u Zemljinoj kori oko 4 dijela u 10^6 dijelova. Međutim, vrlo je malo minerala u kojima ga ima u većem udjelu. Nalazišta uranskog smolinca (uraninita), s 1 % do 20 % urana iscrpena su. Većina uranskih nalazišta sadrže rudaču s 0,1 % do 0,5 % urana, dakle, potrebno je obraditi relativno velike količine rudače.

Nalazišta uranske rudače mogu biti površinska ili dubinska. Tehnike iskopa ne razlikuje se bitno od onih u rudnicima ugljena, osim što postoji i opasnost od radioaktivnosti za rudničko osoblje.

U novije vrijeme razvija se postupak dobivanja urana podzemnim ispiranjem, čime se zaobilazi potreba za iskapanjem uranske rude, a mogu iskoristiti i siromašnije.

Prerada rudače i koncentriranje urana. S obzirom da je uran u uranskoj rudači pomiješan s mnoštvom drugih minerala, rudača se mehaničkim i kemijskim metodama obrađuje, a uranski koncentrat izdvaja kao oksid U_3O_8. Preradom rudače oslobađaju se plinoviti članovi uranskog radioaktivnog niza pa postoji opasnost od radioaktivnosti. To dolazi u prvom redu od plina radona.

Konverzija u uranov heksafluorid. Konverzija tzv. žutog kolača U_3O_8 u uranov heksafluorid, UF_6 jest pripremna faza za obogaćenje.

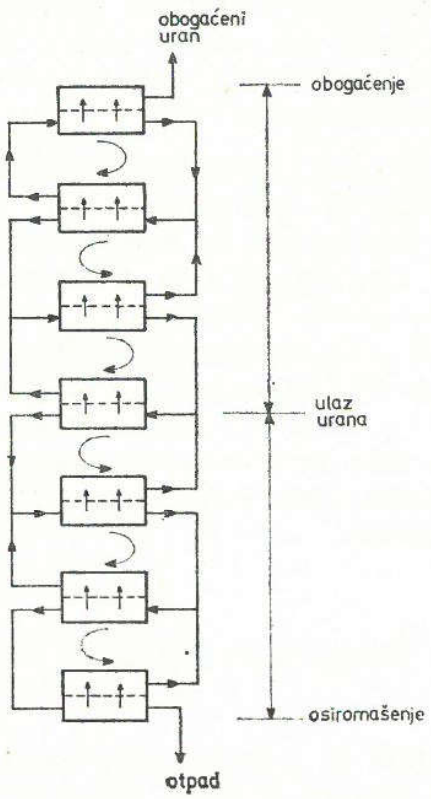
U procesu konverzije odstranjuju se i nečistoće do potrebnog stupnja nuklearne čistoće urana. Konverzijski kapaciteti nisu ograničenje u kompletiranju ciklusa goriva. Konverzijska postrojenja postoje u nizu država, u zemljama SEV-a, u Kanadi, Francuskoj, Velikoj Britaniji, SAD i projekti u drugim državama. Osim toga zemlje izvoznice urana nastoje obaviti konverziju i tako povećati izvoznu vrijednost urana.

5.4.3. Obogaćenje urana

Budući da prirodni uran sadrži samo 0,7 % izotopa ^{235}U na kome se temelji održavanje lančane reakcije, jedino ga reaktori s veoma dobrom ekonomijom neutrona mogu iskoristiti kao gorivo. Takvi su teškovodni i grafitom moderirani reaktori, a lakovodni energetski reaktori trebaju uran obogaćen od 1,7 % do 3,5 %. Obogaćenje se može obaviti uglavnom samo fizikalnim metodama. Samo je metoda plinske difuzije komercijalno razvijena. Nekoliko drugih nalazi se u više ili manje odmaklim fazama razvoja. U fazu komercijalne eksploatacije ulazi centrifugalna metoda.

a) *Difuzijska metoda obogaćenja urana.* Difuzijska metoda temelji se na pojavi da prolaz plina kroz poroznu membranu ovisi o brzini molekula plina. Zbog razlike u prosječnim brzinama molekula (u kojima se nalaze različiti izotopi urana) kroz membranu prolazi više molekula ^{235}U. Učinak je malen zbog male razlike brzina, pa je potrebno mnogo prolaza kroz komore s membranama vezane u kaskade dok se ne postigne potreban stupanj obogaćenja (sl. 5.22).

Potrebne su tisuće komora. Kako se za svaku komoru zahtijeva kompresija plina na ulaznoj strani membrane, razabire se vrlo velika složenost instalacije.



Slika 5.22. Protustrujna kaskada u difuzijskom uređaju za obogaćenje urana

Za instalacije za obogaćivanje plinskom difuzijom potrebne su velike instalacije uz velike troškove pogona. Prva instalacija izgrađena je od 1943. do 1945. u Oak Ridgeu (SAD).

Za troškove u separacijskom postupku odlučan je protok kroz separacijski uređaj potreban za dobivanje jedinične količine obogaćenog urana. Za poznati separacijski efekat pri prolazu kroz osnovnu jedinicu za separaciju složenog kaskadnog sustava, može se izračunati količina separacijskog rada ovisno o konačnom obogaćenju i ostatku urana-235 u izlaznom osiromašenom uranu (rezidualno obogaćenje).

U tablici 5.17. prikazani su rezultati za razna obogaćenja potrebna za energetske reaktore. Za određeno konačno obogaćenje i tri vrijednosti rezidualnog obogaćenja navedene su količine separacijskog rada za proizvodnju jednog kilograma obogaćenog urana. Također se navode i potrebne ulazne količine prirodnog urana.

U tablici 5.18. prikazani su za tri američke velike instalacije podaci o kapacitetu u jedinicama separacijskog rada (JSR), ukupna vlastita potrošnja energije, te specifična potrošnja energije po jedinici separacijskog rada.

Ta se metoda i instalacije mogu poboljšati, osobito pumpe, kompresori i membrane. Očekuje se da će se do 1985. smanjiti potrošnja energije po jedinici separacijskog rada na 2 500 kW h ili manje. Vrlo visoka vlastita potrošnja energije ostat će, međutim, i dalje karakteristika difuzijskih instalacija.

b) *Obogaćivanje centrifugama.* Centrifugalna metoda najrazvijenija je i najozbiljnije konkurira difuzijskoj metodi, a razvija se u Evropi, SAD i Japanu. Demonstracijske instalacije kapaciteta 200 0000 JSR stavljene su u pogon 1977. godine u Nizozemskoj *(Almelo)* i Velikoj Britaniji *(Capenhurst)*. U SAD intenzivno se razvijaju efikasnije centrifuge od suvremenih materijala koji omogućuju veće obodne brzine, a tako i veći separacijski učinak.

Ekonomičnost centrifugalne metode nije još dovoljno poznata, budući da ne postoje veće komercijalne instalacije u pogonu. Neke se pretpostavke ipak mogu načiniti na temelju samog fizikalnog procesa. Veći separacijski efekat po kaskadi (centrifugi) smanjuje broj kaskada. Procjenjuje se da će potrošak energije po jedinici separacijskog rada biti mnogo manji nego u difuzijskoj metodi; navodi se čak faktor 40, približno 80 kWh po kilogramu separacijskog rada. No, investicijski su troškovi, barem zasad, nešto veći [Ke 82].

c) *Aerodinamičke metode.* Aerodinamičke metode temelje se na centrifugalnoj separaciji pri skretanju mlaza plina. Takve metode razvijaju se u SR Njemačkoj i u Južnoafričkoj republici. Predstoji gradnja industrijskih demonstracijskih uređaja. Pri aerodinamičkim metodama specifičan utrošak energije podjednak je kao u difuzijskim uređajima, tj. oko 3 000 kW h po kilogramu separacijskog rada, ali separacijski je učinak po kaskadi znatno veći. Na temelju brazilsko-njemačke suradnje, u Brazilu se gradi aerodinamička mlazna instalacija *Resende* ka-

Tablica 5.17. Masa prirodnog urana i separacijskog rada* ovisno o konačnom i rezidualnom obogaćenju

Obogaćenje %	Masa prirodnog urana po jediničnoj masi obogaćenog urana			Separacijski rad po jediničnoj masi obogaćenog urana		
	Rezidualna koncentracija			Rezidualna koncentracija		
	0,2%	0,25%	0,3%	0,2%	0,25%	0,3%
0,711	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000
0,8	1,174	1,193	1,217	0,104	0,085	0,070
0,9	1,370	1,410	1,460	0,236	0,195	0,163
1,0	1,566	1,627	1,703	0,380	0,318	0,269
1,1	1,761	1,844	1,946	0,535	0,451	0,385
1,2	1,957	2,061	2,190	0,698	0,592	0,510
1,3	2,153	2,278	2,433	0,868	0,741	0,642
1,4	2,348	2,495	2,676	1,045	0,896	0,779
1,5	2,544	2,711	2,920	1,227	1,056	0,923
1,6	2,740	2,928	3,163	1,413	1,221	1,070
1,7	2,935	3,145	3,406	1,603	1,389	1,222
1,8	3,131	3,362	3,650	1,797	1,562	1,377
1,9	3,327	3,579	3,893	1,994	1,737	1,536
2,0	3,523	3,796	4,136	2,194	1,915	1,697
2,1	3,718	4,013	4,380	2,397	2,096	1,862
2,2	3,914	4,230	4,623	2,602	2,280	2,028
2,3	4,110	4,447	4,866	2,809	2,465	2,197
2,4	4,305	4,664	5,109	3,018	2,653	2,367
2,5	4,501	4,881	5,353	3,229	2,842	2,540
2,6	4,697	5,098	5,596	3,441	3,033	2,714
2,7	4,892	5,315	5,839	3,656	3,226	2,889
2,8	5,088	5,531	6,083	3,871	3,420	3,066
2,9	5,284	5,748	6,326	4,088	3,615	3,245
3,0	5,479	5,965	6,529	4,306	3,811	3,425
3,1	5,675	6,182	6,813	4,526	4,009	3,605
3,2	5,871	6,399	7,056	4,746	4,208	3,787
3,3	6,067	6,616	7,299	4,968	4,408	3,970
3,4	6,262	6,833	7,543	5,191	4,609	4,154
3,5	6,458	7,050	7,786	5,414	4,811	4,339
3,6	6,654	7,267	8,029	5,638	5,014	4,525
3,7	6,849	7,484	8,273	5,864	5,217	4,712
3,8	7,045	7,701	8,516	6,090	5,422	4,899
3,9	7,241	7,918	8,759	6,316	5,627	5,088
4,0	7,436	8,134	9,002	6,544	5,832	5,276
4,5	8,415	9,219	10,219	7,690	6,871	6,231
5,0	9,393	10,304	11,436	8,851	7,923	7,198

*Izražava se kilogramima, uobičajena je oznaka JSR (jedinica separacijskog rada), a u literaturi na engleskom jeziku SWU (Separative Work Unit).

Tablica 5.18. Karakteristike difuzijskih instalacija u SAD

Instalacija	Snaga/MW (e)	Kapacitet/10^6JSR	Specifični potrošak energije kW h/JSR
Oak Ridge	1 650	4,9	3 045
Paducah	2 550	7,3	3 050
Portsmouth	1 860	5,19	3 140

Optimalni ekonomski kapaciteti viši su od vrijednosti u tablici, oko $9 \cdot 10^6$ JSR godišnje. Za pogon instalacije *Paducah* potrebne su četiri elektrane snage NE *Krško*, a njezina godišnja proizvodnja obogaćenog urana dovoljna je za gotovo stotinu elektrana jednake snage. Očito je da se difuzijske instalacije mogu razvijati samo u sklopu veoma krupnog nuklearnog programa.

paciteta 200 000 JSR s ulaskom u pogon 1986—88. g.

d) *Kemijske metode obogaćivanja urana.* Mnogo godina istraživane su kemijske metode separacije izotopa, međutim, separacijski faktori bili su prihvatljivi samo za lagane elemente. Godine 1977. objavili su Francuzi da su postigli znatno poboljšanje separacijskog faktora pri ionskoj izmjeni. U reduciranom broju kaskada smanjili bi se i investicijski troškovi. Najbolji separacijski faktor prije francuskog poboljšanja bio je 1,0015. Procjenjuje se da bi francuski CHEMEX postupak imao specifični utrošak energije manji od 600 kW h/JSR.

Demonstracijski uređaj kapaciteta 100 tona separacijskog rada na godinu planira se za 1985. godinu.

Zbog malog separacijskog efekta i relativno velike količine urana u procesu, metoda nije pogodna za postizanje visokih obogaćenja, te stoga, tvrdi se, pruža manje mogućnosti za širenje nuklearnog oružja.

e) *Ostale metode.* Još su neke metode zbog ovog ili onog razloga potencijalno privlačne, ali nisu razvijene znatnije preko laboratorijske demonstracije. Laserska metoda temelji se na selektivnom pobuđenju atoma ili molekula urana laserskim zračenjem, nakon čega se pobuđeni atomi odvajaju električnim ili magnetskim poljima. Postupak načelno omogućuje veoma velik separacijski učinak.

Elektromagnetske metode osnivaju se na razdvajanju ioniziranih izotopa u električnim i magnetskim poljima. I takvim metodama mogao bi se postignuti vrlo visok separacijski efekt.

U tablici 5.19. prikupljeni su najvažniji ekonomsko-tehnički parametri postupaka za obogaćenje urana.

U tablici 5.20. — pregled je instalacija za obogaćenje urana u pogonu, gradnji i pripremi.

5.4.4. Proizvodnja teške vode

Ako se teška voda koristi kao moderator (npr. u kanadskim reaktorima), proizvodnja teške vode sličan je zadatak obogaćenju urana, iako ne ulazi u ciklus goriva. Uspoređivanje ciklusa goriva lakovodnih i teškovodnih reaktora (tj. reaktora s obogaćenim i prirodnim uranom) ne bi bilo potpuno ako se ne bi uzelo u obzir da reaktor s prirodnim uranom i vodenim hlađenjem treba tešku vodu kao moderator. Nužna povezanost upotrebe prirodnog urana i teške vode razlog je da se u prikaz ciklusa goriva uključuje i informacija o proizvodnji teške vode.

Tablica 5.19. Pregled metoda za obogaćenje urana

Podaci o instalaciji	Difuzijska metoda	Mlazni postupak	Južnoafrička aerodinamička metoda	Plinske centrifuge	Kemijska separacija CHEMEX
godišnji minimalan kapacitet za optimalnu ekonomičnost/tona separacijskog rada	9 000	2 500	5 000	1 000	nije poznat
vrijeme konstrukcije/godina	5	3	5	3	nije poznato
specifične investicije ($/kg SR*)	300	120	250	200	nisu poznate
specifični potrošak energije/(kWh/kg SR)	3 000	3 500	3 300	100 ili manje	600

Komparativni tehničko-ekonomski podaci za postupke koji se koriste ili će se uskoro koristiti u industrijskoj primjeni. Međutim, podaci za nedifuzijske metode nisu provjereni na velikim komercijalnim instalacijama.

*SR—separacijski rad

Tablica 5.20. Instalacije za obogaćenje urana u pogonu i izgradnji

Lokacija	Organizacija*	Metoda	Kapacitet 10^6 JSR	
		U pogonu		
SAD				
Oak Ridge	DOE	difuzija	4,9	
Paducah	DOE	difuzija	7,3	
Portsmouth	DOE	difuzija	5,2	
Velika Britanija				
Capenhurst	UKAEA	difuzija	0,4	
Capenhurst	URENCO	centrifuge	0,25	
Francuska				
Pirerrelatte	CEA	difuzija	0,4	
Tricastin	EURODIF	difuzija	10,8	
Holandija				
Almelo	URENCO	centrifuge	0,5	
SSSR				
Sibirija		difuzija	7–10	(ocjena)
Kina		difuzija	?	
		U izgradnji		
SAD				Vjerojatan pogon
povećanje kapaciteta	DOE	difuzija	10,1	1975–85.
Portsmouth	DOE	centrifuge	4,3	1990.
Velika Britanija				
Capenhurst	URENCO	centrifuge	0,75	1983–87.
Nizozemska				
Almelo	URENCO	centrifuge	0,75	1984.
SR Njemačka				
Gronau	URENCO	centrifuge	0,4	1985.
Brazil	NUCLEI	mlazni post.	0,2	1986–88.
Južna Afrika				
Valindaba	UKOR	Helikon	0,2	

*DOE = Department of Energy
UKAEA = United Kingdom Atomic Energy Authority
CEA = Commissariat a L'Energie Atomique
URENCO = Joint Trinational Centrifuge Organisation of FRG, NL and UK
NUCLEI = Nuclebras Enrignecimento Isotopico S.A.
UKOR = Uranium Enrichment Corporation, SAR (JAR)

Svojstva teške vode. Teška voda razlikuje se od obične po tome što se u njoj umjesto atoma običnog vodika nalaze atomi izotopa deuterija. Fizikalna se svojstva malo razlikuju; teška voda vrije na 101,4 °C, a ledi se na 3,8 °C. Njezina je gustoća približno 10 % veća od gustoće obične vode, a relativna molekularna masa 20 umjesto18.

S obzirom na znatno veću relativnu razliku u molekulskim masama nego ako se uspoređuju molekule UF_6 s uranom-238 i uranom-235, separacija teške vode lakša je nego obogaćenje urana. Relativno velike razlike u fizikalnim osobinama načelno omogućuju primjenu više metoda. Nepovoljno je što je teške vode u običnoj vrlo malo, oko 150 dijelova u milijun, odnosno približno jedan dio u 7 000 dijelova. Proces obogaćenja urana počinje s odnosom 1 dio urana-235 prema 140 dijelova urana-238. Međutim, početne sirovine za izdvajanje teške vode ima u neograničenim količinama, a najveći dio jednom proizvedene teške vode ostaje očuvan i nakon završetka rada elektrane i može se upotrijebiti u drugoj elektrani. To je važno jer su troškovi za tešku vodu oko 20 % početnog ulaganja u nuklearnu elektranu. Nuklearna elektrana tipa CANDU snage 600 MW (e) treba 480 tona teške vode, odnosno 0,8 t/MW (e). Tom osnovnom sadržaju teške vode treba dodati godišnje gubitke koji su manji od 1 % ili približno toliko. Jednom proizvedena teška voda ima trajnu vrijednost i zbog buduće upotrebe u fuzijskim uređajima.

Metode separacije teške vode. Budući da je malo teške vode u običnoj vodi, odnosno teškog vodika prema običnom, glavni se problemi pojavljuju u početnoj fazi obogaćivanja kad kroz postupak trebaju proći vrlo velike količine vode. Zato je bitno da je ta faza tehnološki što jednostavnija i da se u njoj ne potroši mnogo energije.

Za početno obogaćivanje postoje samo dva industrijski razvijena postupka. To je tzv. Girdler-sulfidni postupak (GS) što ga primjenjuje Kanada, vodeći proizvođač teške vode i amonijačni postupak što ga u nekoliko instalacija primjenjuje Indija. Za završno obogaćivanje može se primijeniti više metoda npr. elektroliza ili destilacija. Zbog mnogo manjeg protoka materijala, ta faza ne utječe mnogo na ekonomičnost.

Girdler-sulfidni postupak temelji se na izotopnoj izmjeni između sumporovodika i vode. Pri niskim temperaturama deuterij prelazi iz plina u tekućinu, a pri višim iz tekućine u plin. Sumporovodik služi kao prijenosnik. Ekstrahirajući teški vodik iz tekućine pri višoj temperaturi, predaje ga vodi na nižoj temperaturi koja tako postaje obogaćena teškim vodikom. Taj se postupak primjenjuje u Kanadi već više od 30 godina u instalacijama najvećeg kapaciteta.

Više od 90 % teške vode u svijetu proizvodi se takvim postupkom. Tehnološki je jednostavan, visokog je separacijskog faktora, a osnovne sirovine — vode ima neograničeno. Važnost te činjenice postaje jasnija ako se pogledaju karakteristične veličine. Prema kanadskim podacima iz vode se G-S postupkom izdvoji oko 1/7 sadržane teške vode. Instalacija u kojoj se proizvodi jedna tona teške vode na dan, propušta kroz separacijske tornjeve dnevno oko 50 000 tona vode iz koje se izdvaja teška voda.

Amonijački postupak temelji se na izotopnoj izmjeni između vodika i amonijaka. Iako bi takav postupak mogao biti povoljan, kapaciteti su ograničeni kapacitetima za proizvodnju amonijaka. Za proizvodnju 1 tone teške vode na dan bilo bi dnevno potrebno gotovo 6 000 tona amonijaka.

Razvija se i istražuje još nekoliko metoda: izotopna izmjena između vodika i metilamina (koja bi trebala biti jeftinija), izotopna izmjena između vodika i vode, separacija selektivnim laserskim pobuđenjem.

U tablici 5.21. prikazuju se instalacije i kapaciteti raznih metoda separacije, što jasno pokazuje današnju važnost pojedinih metoda.

Tablica 5.21. Instalacije za proizvodnju teške vode u svijetu (bez podataka za SSSR)

Država	Naziv instalacije	Proces	Kapacitet, tona/godina	Početak rada
Argentina	Arroyito	NH_3/H_2 izmjena	250	1985.
Indija	Nangal	elektroliza, destilacija	14	1962.
	Baroda	NH_3/H_2 izmjena	67	1978.
	Tuticorin	NH_3/H_2 izmjena	71	1978.
	Talcher	NH_3/H_2 izmjena	63	1980.
	Kota	G—S*	100	1981.
Kanada	Port Hawkesbury	G—S	400	1970.
	Bruce A	G—S	2×400	1973.
	Glace Bay	G—S	400	1976.
	Bruce B	G—S	2×400	1981.
	La Prade	G—S	2×400	završenje ovisno
	Bruce D	G—S	2×400	o razvoju potreba
Kina		G—S	30	1975.
Norveška	Rjukan	elektroliza	20	1934.
SAD	Savannah River	G—S	190	1952.
Rumunjska		G—S	500	u planu

*Girdler-sulfidni postupak

5.4.5. Izrada goriva

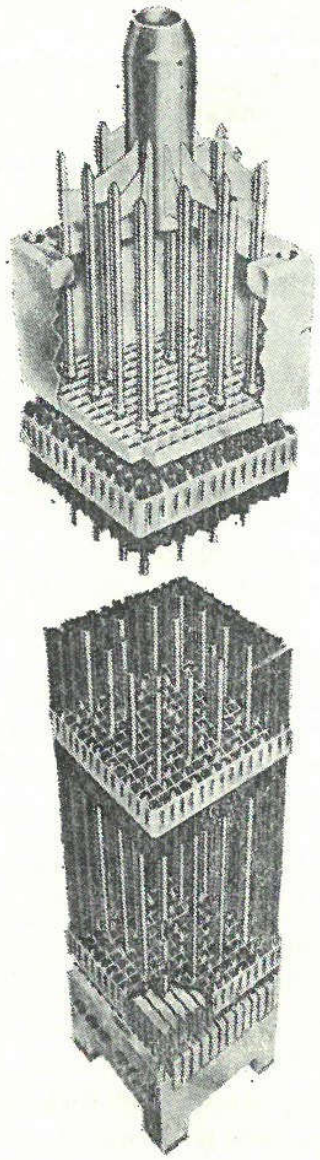
Gorivo za heterogene reaktore. Gotovo svi današnji reaktori heterogeni su, iako je neko vrijeme eksperimentalno radio i homogeni reaktor. U Nizozemskoj se eksperimentira s jednom verzijom homogenog reaktora (vidi 5.3.6).

Heterogenim razmještajem goriva u moderatoru smanjuje se uhvat neutrona u uranu-238, pa se kritičnost postiže s manjim količinama goriva i s prirodnim uranom. Heterogena raspodjela goriva pogoduje također odvođenju topline iz krutog goriva, a kruto gorivo povoljno je i zbog zadržavanja fisijskih proizvoda u gorivu. Upotrijebi li se kao moderator voda ili neka druga tekućina, može ona istodobno poslužiti za odvođenje topline.

Visokotemperaturni reaktori prema rasporedu goriva jesu između današnjih heterogenih i pravih homogenih reaktora. U tih reaktora gorivo — uran-oksid, nalazi se raspoređen u grafitu, ali se u jezgri nalazi i sam grafitni moderator. Budući da su i gorivo i moderator kruti, potrebno je i treće sredstvo za odvođenje topline.

U reaktora hlađenih vodom, koji su za nas osobito važni, gorivo je u obliku uran-oksida, UO_2. Za takve se reaktore UO_2 oblikuje u sitne tablete koje se zatim slažu u veće cjeline, štap goriva i element goriva.

Elementi goriva za lakovodne reaktore tipa PWR. U gotovo svim današnjim reaktorima gorivo se stavlja najprije u tanke cijevi od legure koja apsorbira malo neutrona. Dimenzije su cijevi malene da bi se postiglo bolje odvođenje topline i niža temperatura u središtu goriva. Cijev ispunjena gorivom čini štap goriva. Budući da su malih dimenzija, u reaktoru ima vrlo mnogo takvih štapova npr. u elektrani Krško ~ 25 000. Da bi se olakšalo postavljanje i izmjena goriva u reaktoru, štapovi goriva skupljaju se u čvrstu vezanu cjelinu koja se naziva element goriva. Element goriva reaktora tipa PWR kvadratna je matrica s 15×15, 16×16 ili 17×17 mjesta za štapove goriva. Dio raspoloživih mjesta upotrebljen je za kontrolne štapove.



Slika 5.23. Gorivi elemenat lakovodnog PWR reaktora

Primjeri tipičnog grupiranja štapova goriva u elemente

NE *Krško*, toplinska snaga u parogeneratorima iznosi 1 882 MW. Element goriva jest matrica 16×16, sa 234 štapa goriva. U jezgri se nalazi 121 element goriva s 48,9 t urana s obogaćenjem do 3,3%.

OCONEE, PWR, SAD, toplinska snaga iznosi 2 568 MW. Matrica elementa goriva jest 15×15, sa 208 štapova goriva. U jezgri se nalazi 177 elemenata goriva sa 94,1 t uran-oksida UO_2.

KWU, PWR, SR Njemačka, toplinska snaga 2 920 MW. Matrica: 16×16, 236 štapova goriva, 177 elemenata goriva, 82,1 t urana.

KWU, PWR, toplinska snaga 1990 MW. Matrica: 15×15, 205 štapova goriva, 157 elemenata goriva, 55,7 t urana.

Štapovi goriva; dimenzije i materijali

Zbog toplinskog i ekonomskog optimuma dimenzije štapova goriva prilično su ujednačene u svih proizvođača.

U tablici 5.22. navedene su dimenzije štapova goriva za elektrane glavnih proizvođača PWR elektrana — firmi Westinghouse i *KWU*.

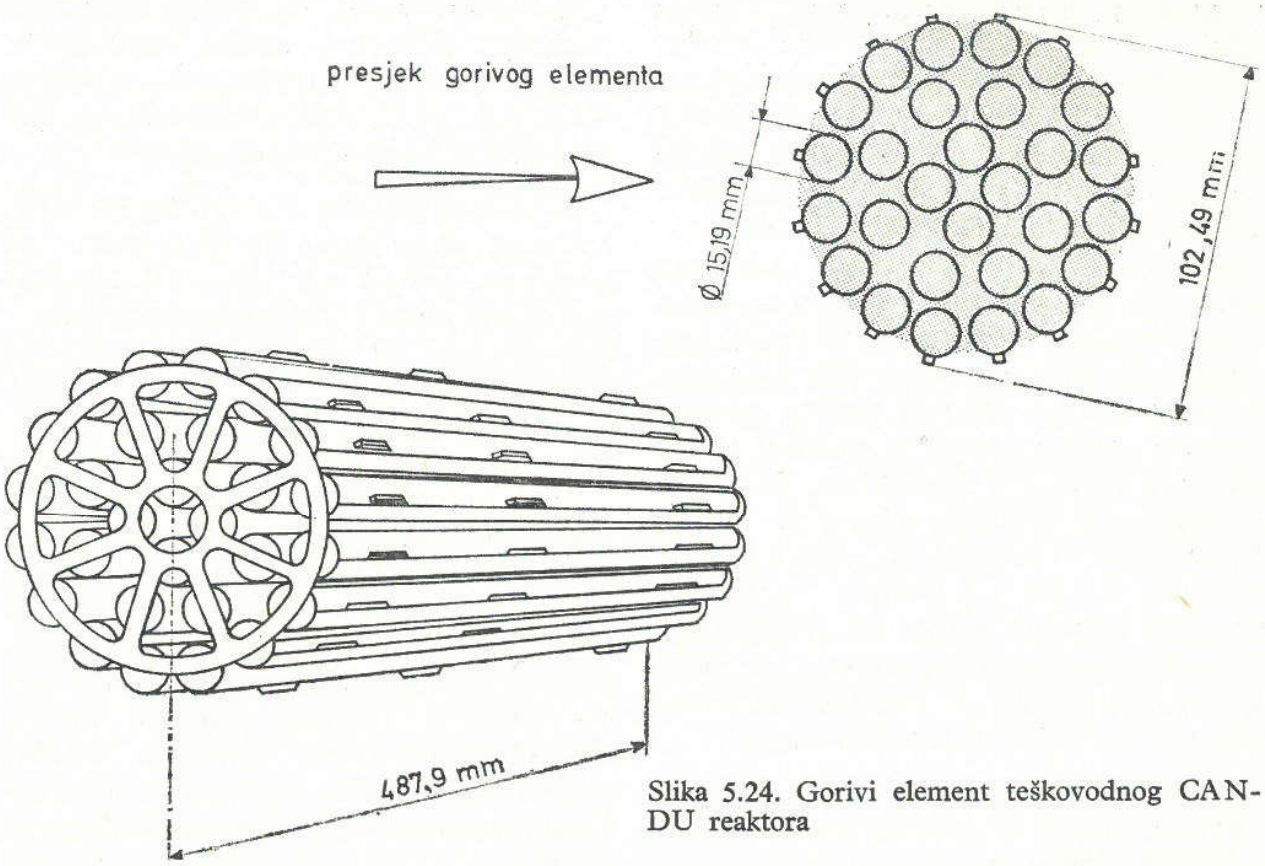
Za NE *Krško* element goriva ima matricu 16×16, sa 235 štapova. Korak rešetke, tj. razmak između sredina susjednih štapova, jest 12,36 mm, dimenzije elemenata goriva 197×197, duljina 4 056 mm. Jedan element sadrži 404 kg urana, a ukupna mu je masa 572 kg.

Jedan štap sadrži približno 1,72 kg urana, a dužina mu je 3 657,6 mm. Materijal košuljice je Zircaloy 4, legura cirkonija, s malom apsorpcijom neutrona, i povoljnim ostalim svojstvima kao što su mehanička svojstva, otpornost na koro-

Tablica 5.22. Dimenzije i materijali štapova goriva za reaktore tipa PWR

Elektrana, projekt, podrijetlo	Promjer tablete	Razmak do košuljice	Debljina košuljice	Vanjski promjer	Obogaćenje svježeg goriva
	mm	mm	mm	mm	%
NE Krško/Westinghouse	8,128	0,1	0,541	9,37	3,3
NE Oconee*, SAD/Westinghouse	9,4	0,089	0,67	10,92	3
Kraftwerkunion (KWU)* (sve snage)	9,1	0,1	0,7	10,7	3,2

Materijali: gorivo — UO_2, košuljica — Zircaloy 4
*Izvor — *Reactor theory and power reactors* ICTP 1980, osim za NE *Krško*



Slika 5.24. Gorivi element teškovodnog CANDU reaktora

ziju i kemijske utjecaje, te otpornost na radijacijsko oštećenje.

Elementi goriva za teškovodne reaktore tipa CANDU. Značajna specifičnost teškovodnog reaktora razvijenog u Kanadi jest trajna izmjena goriva bez zaustavljanja reaktora. Elementi goriva ulaze u tlačne cijevi reaktora s jedne strane, a izlaze na drugoj. To dopušta da budu relativno malih dimenzija. Njihova je dimenzija odabrana tako da se svježe gorivo može i ručno prenašati. Masa elementa goriva reaktora tipa PWR jest 600 kg—700 kg, elemenat goriva za reaktor CANDU dug je ~ 50 cm, sadrži 28 ili 37 štapova i mase je približno 30 kg (sl. 5.24).

Oba tipa elemenata goriva stavljaju se u standardnu tlačnu cijev. Izvedba s debljim štapovima (28) koristi se npr. u elektrani *Pickering*.

Prijelaz na 37 štapova omogućuje povećanje specifične snage, ali uz smanjenje reaktivnosti zbog povećanja apsorpcije u uranu-238, pa je rezultat smanjenje izgora. Izbor je predmet ekonomsko-tehničkog optimiranja.

Karakteristike HWR elementa goriva (projekt GECEL elektrane 600 MW (e) tipa CANDU):

broj štapova u elementu	28
duljina elementa	495 mm
vanjski promjer štapa	15,2 mm
materijal košuljice	Zircaloy 4
debljina košuljice	
duljina štapa	487,9 mm
masa urana u elementu	19,8 kg

U njemačkih teškovodnih reaktora s tlačnom posudom element goriva svežanj je štapova u kružnoj matrici, kao i u reaktora tipa CANDU, ali je duljina elementa goriva slična duljini elementa goriva u reaktora tipa PWR.

5.4.6. Gospodarenje gorivom

Gospodarenje gorivom u reaktoru (In core fuel management) naziva se raspoređivanje i razmještavanje elemenata goriva u jezgri tako da se za vrijeme boravka u reaktoru iz goriva dobije maksimalna energija, a uz ravnomjeran volumni ras-

pored snage u reaktorskoj jezgri. Dva su zahtjeva, pokazuje se, kontradiktorna, pa je zadatak gospodarenja gorivom nalaženje ekonomsko-tehničkog optimuma. Za lakovodni reaktor tipa PWR uzimaju se elementi goriva različitog obogaćenja i raspoređuju u nekoliko zona. Najpovoljnija radijalna raspodjela snage dobiva se kada je na periferiji gorivo najvećeg obogaćenja, a u središtu gorivo najmanjeg obogaćenja. Pri normalnom radu elektrane svake se godine mijenja trećina goriva; svježe se gorivo stavlja u vanjsku zonu, gorivo iz vanjske u međuzonu, gorivo iz međuzone u središte jezgre, a gorivo iz središnje zone izlazi iz reaktora, proboravivši u njemu 3 godine. Suprotnim smjerom kretanja goriva pri izmjenama, od središta prema rubu, dobilo bi se bolje iskorištenje goriva, ali i znatno neravnomjernija radijalna raspodjela snage.

U teškovodnim reaktorima s tlačnim cijevima, gorivo se mijenja svakodnevno, bez zaustavljanja rada reaktora. Svo gorivo istog je obogaćenja, tj. prirodni uran, a povoljna radijalna raspodjela snage i maksimalno iskorištenje goriva postiže se različitom brzinom izmjene goriva ovisno o radijalnom položaju tlačne cijevi prema osi reaktora. Pravilnim i dobrim gospodarenjem smanjuju se kvarovi na gorivu i podiže ekonomski učinak. Prema tome radi se o fazi ciklusa goriva o kojoj ovisi tehnički i ekonomski uspješan pogon nuklearne elektrane [vidi detaljnije u Gr 1979].

5.4.7. Spremanje istrošenog goriva

Gorivo se u reaktoru koristi različito dugo, ovisno o obogaćenju, odnosno tipu reaktora. Iz reaktora PWR (pri normalnim uvjetima rada) godišnje se vadi 1/3 elemenata goriva i zamjenjuje svježima; gorivo boravi u reaktoru 3 godine. U teškovodnim reaktorima gorivo boravi prosječno približno godinu dana. Nakon izlaska iz reaktora gorivo je vrlo intenzivno radioaktivno te se najprije odlaže u duboke bazene u kojima se nalazi ispod više metara vode. Voda ima dvostruku funkciju: služi kao zaštita od radioaktivnog zračenja i kao rashladno sredstvo, budući da intenzivan radioaktivan raspad razvija i znatne količine topline.

U takvim bazenima gorivo može ležati i mnogo dulje nego što je potrebno za hlađenje, ako još nije odlučeno kakav će biti daljnji postupak s istrošenim gorivom. Gorivo koje je odležalo više godina u bazenima može se spremiti u suha spremišta, budući da efikasno vodeno hlađenje dalje nije potrebno. Prednost takvog spremanja bila bi smanjena korozija i manji troškovi. Gorivo se tako može čuvati i više desetljeća, ili do trenutka kada bi, unapređenjem instalacija za preradu goriva, te porastom cijena urana, prerada goriva radi ekstrakcije i iskorištenja urana i fisibilnih nuklida postala ekonomski privlačna. Današnja je situacija u tom pogledu nejasna, te se povećavaju kapaciteti za privremeno odlaganje istrošenog goriva pri nuklearnim elektranama.

Elementi goriva u zavarenim zaštitnim kutijama mogli bi se u suhim spremištima čuvati, kako se ocjenjuje, više od 100 godina.

5.4.8. Prerada istrošenog goriva

Postupci u preradi. Teško je zamisliti varijantu dugoročnog razvoja fisijske energetike, s oplodnim reaktorima ili bez njih u kojoj prerada goriva radi ekstrakcije plutonija ili urana ne bi bila potrebna. Želi li se smanjiti velike količine urana potrebne u direktnom ciklusu, izdvajanje plutonija te preostalih ili proizvedenih izotopa urana neizbježan je korak za gotovo sve tipove reaktora.

Među danas razvijenim komercijalnim reaktorima jedino teškovodni reaktor, uz upotrebu malo obogaćenog urana nudi znatnije smanjenje potrebnih količina urana bez potrebe za preradom goriva (v.sl. 5. 11). No i u teškovodnog reaktora prerada goriva otvara mogućnosti za znatno veće daljnje uštede.

Istrošeno gorivo izvanredno je snažno radioaktivno. Zato prerada mora biti daljinski upravljana i automatizirana. Izdvojeni materijali, plutonij i uran moraju se na kraju dobiti „nuklearno" čisti kako bi se mogli upotrijebiti za izradu goriva. Mora se osigurati da u cjevovodima i reakcijskim bazenima instalacija uređaja za preradu nigdje ne dođe do opasnog nagomilavanja fisibilnog materijala. Zbog veoma visoke radioaktivnosti, održavanje je izuzetno teško, a moraju se koristiti veoma korozivni materijali za otapanje goriva. Zato konstrukcijski materijal mora zadovoljavati veoma teške uvjete — to je i osnovna teškoća u inače dosta jednostavnim postupcima.

Danas su najčešći tzv. vodeni postupci u kojima je prva faza otapanje elemenata goriva u vodenim otopinama anorganskih kiselina. Vodena otopina sadrži nakon otapanja sve sastojke goriva. Jedino se plinoviti proizvodi fisije izdvajaju i odvode. Zatim se obavlja razdvajanje uz pomoć organskih selektivnih otapala, ionskom izmjenom ili taloženjem.

a) *Prerada uran-plutonij oksidnog goriva iz termičkih reaktora.* Najvažniji i najraširenij jest vodeni postupak „Purex", razvijen pedesetih godina. Korišten je u američkim instalacijama u *Hanfordu* i *Savannah*, dakle, o njemu postoji dugogodišnje iskustvo.

Faze odnosno koraci u postupku Purex:

1. štapovi goriva sjeckaju se u komadiće;

2. otapanje u koncentriranoj nitratnoj kiselini; zirkonijske košuljice ostaju neotopljene te se odstranjuju, peru i spremaju kao radioaktivni otpad;

3. uran i plutonij ekstrahiraju se iz vodene otopine s otopinom tributilfosfata, $(n-C_4H_9)_3PO_4$ (kratica TBP) u organskom otapalu.

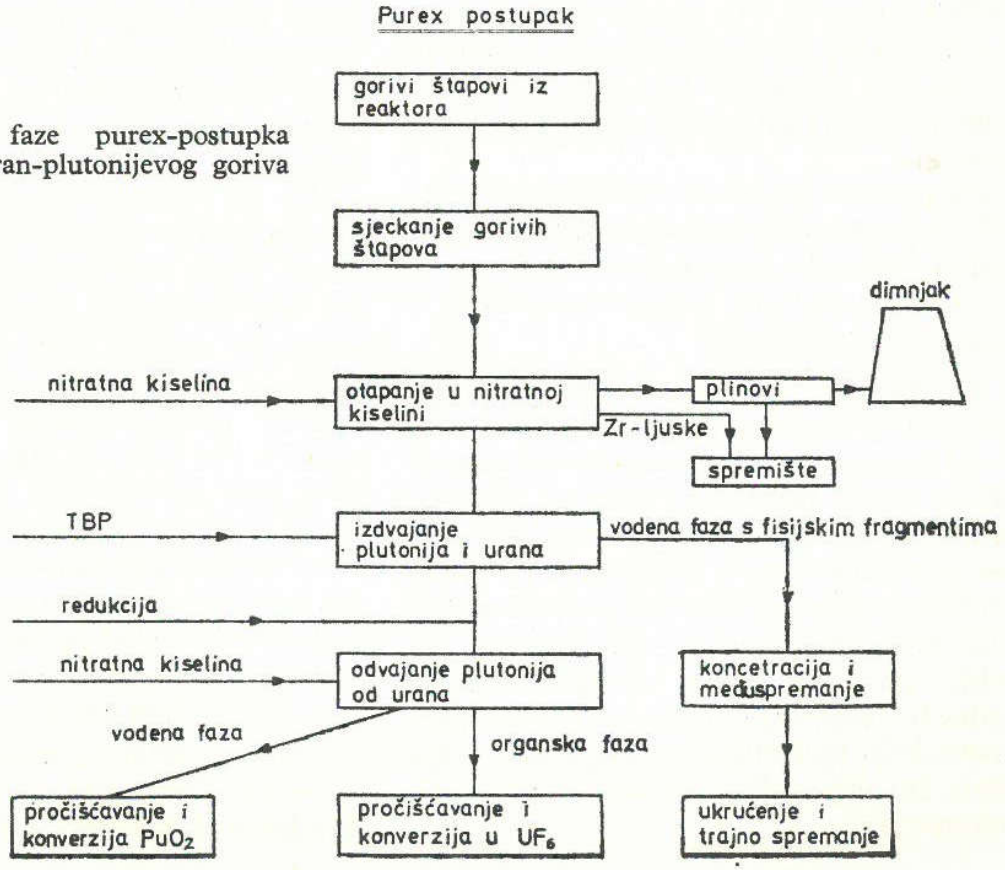
Reakcije

$$UO_2^{++} + 2NO^- + 2TBP \rightleftarrows UO_2(NO_3)_2(TBP)_2$$

i (5.11)

$$Pu^{+++} + 4NO_3^- + 2TBP \rightleftarrows Pu(NO_3)_4(TBP)_2$$

odvijaju se u prisutnosti NO_3^- iona i uzrokuju prijelaz urana i plutonija u otapalo, a fisijski proizvodi ostaju u vodenoj otopini. Plutonij se pretežno ekstrahira kao četverovalentan;



Slika 5.25. Glavne faze purex-postupka prerade oksidnog uran-plutonijevog goriva

4. redukcija plutonija u trovalentno stanje. Pri tom se plutonij vraća u vodenu otopinu nitratne kiseline (svježu, bez fisijskih proizvoda), a uran ostaje u organskom otapalu. Organsko otapalo i vodena otopina razdvajaju se, te se tako razdvajaju uran i plutonij;

5. pročišćavanje uranskog i plutonijskog nitrata sa svježim organskim otapalom i vodenim otopinama nitratne kiseline;

6. konverzija $Pu(NO_3)_4$ u PuO_2 i $UO_2(NO_3)_2$ u UF_6.

Glavne faze postupka Purex shematski su prikazane na slici 5.25.

b) *Prerada goriva koje sadrži torij.* Gorivo koje sadrži torij ne može se na identičan način preraditi u instalaciji Purex za uran-plutonijsko gorivo. Torijev oksid teže se otapa u nitratnoj kiselini, te je potreban dodatak fluorovodične kiseline.

Postoje i teškoće s odvajanjem urana od torija. Teškoće nastaju i s protaktinijem-233 koji ima relativno dugo vrijeme poluraspada — 27,4 dana, te je prije prerade potrebno da gorivo odleži kako bi se protaktinij-233 raspao i prešao u uran-233.

Za oksidna goriva razvijen je postupak Torex, ali iskustvo još nije dovoljno; postupak valja provjeriti u velikim instalacijama.

Za preradu goriva iz visokotemperaturnih reaktora potrebne su dodatne operacije u postupku Torex primjenjivom na gorivo s relativno malim izgaranjem i metalnom košuljicom.

c) *Prerada goriva brzih oplodnih reaktora.* Zbog povećanog postotka plutonija u gorivu, te velike vrijednosti specifičnog izgora postupak Purex ne može se primijeniti bez promjena. Povećani postotak plutonija otežava otapanje u nitratnoj kiselini; ono se olakšava dodavanjem fluorovodične kiseline. S obzirom na velik specifičan izgor i velike količine fisijskih proizvoda, veće su mogućnosti razgradnje tributilfosfata utjecajem zračenja što nepovoljno djeluje na postupak separacije.

Zbog povećane količine plutonija mora biti bolja kontrola i osiguranje od nagomilavanja natkritične količine plutonija u separacijskim uređajima. Modificiranim postupkom Purex uspješno su prerađivane manje količine goriva iz oplodnog reaktora. Međutim, prije izgradnje komercijalne instalacije potrebno je proces provjeriti u poluindustrijskom postrojenju. Nedavno su u Velikoj Britaniji u Dounrayu uspješno prerađene znatnije količine goriva [At 1982], a u Francuskoj intenzivno se radi na preradi goriva iz oplodnih reaktora.

5.5. Odlaganje radioaktivnog otpada

Dugoročno čuvanje, odnosno odlaganje radioaktivnog otpada posljednja je faza ciklusa goriva ali i jedno od najprijepornijih pitanja u vezi s korištenjem fisijske energije. Nužnost nadzora nad radioaktivnim otpadom kroz duga razdoblja, čak stoljećima, za neke je glavni argument protiv korištenja fisijske energije. Pokušajmo situaciju procijeniti objektivno bez instinktivnih otpora pri suočavanju s neuobičajenim okolnostima.

Odmah možemo utvrditi da su količine otpada iz nuklearne elektrane mnogo manje od količina otpada iz elektrane na fosilna goriva. Iz tipičnog reaktora PWR snage 1 000 MW (e) godišnje izlazi oko 30 tona istrošenog goriva. Elektrana iste snage na ugljen troši godišnje 3 do 4 milijuna tona ugljena, a približno trostruka količina ugljik-dioksida izlazi kroz dimnjak, što je oko 500 000 puta veća masa. CO_2 nije otrovan, ali dugoročni učinci na atmosferu mogući su i potencijalno vrlo ozbiljni. Međutim, u fosilnim gorivima ima više ili manje sumpora. U obliku sumpor-dioksida i on izlazi kroz dimnjak, a zatim se širi atmosferom. Sumpor-dioksid oštećuje dišne organe.

Prema procjeni u studiji američke Nacionalne akademije znanosti (National Academy of Sciences — [NA 1975] emisi-

ja iz elektrane snage 1 000 MW (e) na ugljen s 3 % sumpora uzrokuje godišnje 2 do 100 smrtnih slučajeva. Širok raspon procjene posljedica je neodređenosti u relaciji doza—efekat pri djelovanju na čovjeka sumpornih spojeva koji se emitiraju u atmosferu. S pomoću uređaja za smanjivanje sumpora u ugljenu odnosno u emitiranim plinovima taj broj mogao bi se smanjiti tri do pet puta. No i tada, može se zaključiti, učinak na okoliš elektrane na ugljen bit će veći od učinka nuklearne elektrane (detaljnije u 5.6). Količina otpada iz nuklearne elektrane gotovo je milijun puta manja. Ne djeluje na okoliš kemijski nego ionizirajućim zračenjem, za koje je odnos doza—efekat znatno bolje određen. Takvo zračenje može se detektirati i pri vrlo malim intenzitetima.

Mogućnost detekcije, registriranja i vrlo malih intenziteta radioaktivnosti te odgovarajuće vrlo malene količine otpadnog materijala, omogućuju da se radioaktivni otpad spremi na siguran način i da se svaki eventualan poremećaj opazi u ranoj fazi.

Pri radu nuklearne elektrane pojavljuju se i radioaktivnosti izvan goriva, kao posljedica neutronske aktivacije ili sitnih defekata na gorivu. Te se radioaktivnosti trajno kontroliraju i izdvajaju. Međutim, ntenziteti su mnogo manji nego u istrošenom gorivu, te ćemo ovdje promatrati samo odlaganje radioaktivnog otpada iz istrošenog goriva. Ako se to pitanje može riješiti na zadovoljavajući način, neće biti teškoća s daleko manjim pogonskim radioaktivnostima.

5.5.1. Aktivnost istrošenog goriva

S početnim obogaćenjem goriva od 3,3 % i konačnim od 0,8 % u tipičnom reaktoru tipa PWR po toni istrošenog goriva potrošeno je približno 25 kg urana-235. Uz to potrošeno je i približno 24 kg urana-238. U fisiji je proizvedeno oko 35 kg fisijskih proizvoda, oko 9 kg plutonija, 4,6 kg urana-236 i 0,04 kg kirija-244. Aktivnost, odnosno broj raspada u 1 sekundi jedne tone istrošenog goriva, nekoliko dana nakon obustave rada reaktora iznosi približno 10^{18} Bq. Za 10 godina aktivnost se smanji za oko 100 puta, na približno 10^{16} Bq. Odmah nakon obustave rada reaktora vrlo velik doprinos aktivnosti goriva daju kratko živući izotopi, naročito joda, no njihova se aktivnost brzo smanji. Nekoliko mjeseci „hlađenja" goriva na području elektrane u posebnom bazenu prethodi bilo kakvom daljnjem postupku s gorivom.

Hlađenje goriva treba shvatiti i doslovno jer radioaktivni raspad u istrošenom gorivu razvija i znatne količine topline.

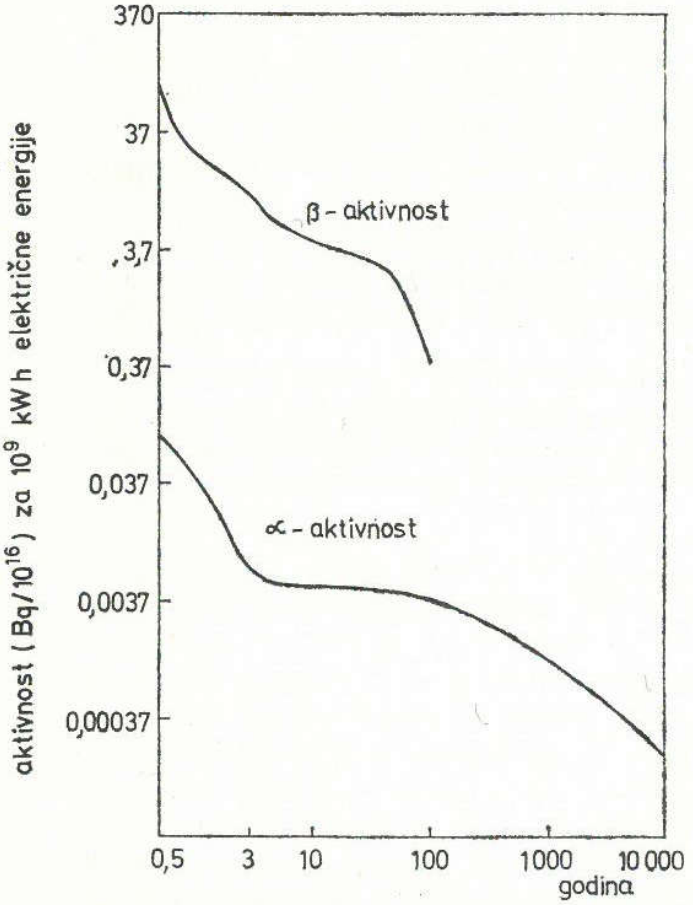
Tablica 5.23. Opadanje aktivnosti reaktorske jezgre reaktora tipa PWR, snage 1 100 MW (e) u toku 10 godina (prema WASH-1250). Pretpostavljeno je da je reaktor prije zaustavljanja radi izmjene goriva radio punom snagom 293 dana, pri gustoći snage 37,5 MW/t. Reaktor sadrži 82 tone goriva, a svježe gorivo jest 3,3 % obogaćeni uran.

Vrijeme nakon obustave rada reaktora/dan	Ukupna aktivnost 10^{16} Bq	Toplinska snaga radioaktivnog raspada/kW
0 (tren prekida rada)	63 820	225 000
1	15 650	17 400
5	8 550	9 720
15	4 920	5 600
30	3 563	4 060
60	2 464	2 350
120	1 517	1 740
210	925	1 100
365	562	659
1 097	192	204
3 653	79	67

Jedan dan iza obustave rada reaktora toplinski učinak radioaktivnog raspada iznosi oko 300 kW/t. Lako je zaključiti da bi se bez hlađenja gorivo zagrijalo na visoku temperaturu.

Nakon 10 godina toplinska snaga radioaktivnog raspada smanjuje se na oko 1 kW/t pa hlađenje više nije problem. Nedvojbeno je da je izgradnja spremišta za istrošeno gorivo vrlo važna ako se u elektrani moraju spremiti veće količine istrošenog goriva, a takva je situacija upravo danas jer se još ne zna ništa sigurno o vremenu prerade goriva. Što se gorivo dulje čuva prije daljnjeg postupka, teškoće će biti manje zbog manje aktivnosti.

Slika 5.26. pokazuje vremensku promjenu radioaktivnosti prema starosti istrošenog goriva elektrane tipa Magnox. Pokazani su odvojeno intenziteti β i α radioaktivnosti. Količine proizvedene radioaktivnosti svedene na istu količinu proizvedene energije pokazuju da je malena ovisnost o tipu termalnog reaktora. To je razumljivo jer ne može biti značajne razlike u broju fisija, pa prema tome ni u nastaloj radioaktivnosti fisijskih fragmenata.



Slika 5.26. Opadanje najvažnijih radioaktivnih komponenata u istrošenom gorivu.
Podaci za goriva elektrane tipa MAGNOX pri 10^9 kWh proizvedene energije (RC 1976)

U tablici 5.24. navedene su aktivnosti i vremena poluraspada radioaktivnih izotopa samo s vremenom poluraspada duljim od jednog sata za reaktor tipa PWR snage 1 000 MW (e).

Tablica 5.24. Aktivnost najvažnijih izotopa ($T^1/_2 > 1$h), nakon zaustavljanja reaktora tipa PWR snage 1 000 MW (e) ako je prosječan izgor goriva 17,6 MW d/kg (prema WASH — 1 400)

Izotop	Vrijeme poluraspada dan, (godina)	Aktivnost/10^{16}Bq
Plemeniti plinovi		
Kr— 85	10,76 godina	2,22
Kr*—75	0,18	96,2
Kr— 87	0,053	192,4
Kr— 88	0,116	281,2
Xe—113	5,3	629
Xe—135	0,38	96,2
Izotopi joda		
I—131	8,05	314,5
I—132	0,1	444
I—133	0,875	629
I—134	0,036	740
I—135	0,28	555
Izotopi telura		
Te— 129	0,048	103,6
Te*—129	34,1	37
Te*—131	1,25	55,5
Te— 132	3,25	444
Izotopi cezija		
Cs—134	2 godine	6,3
Cs—136	12,9	22,2
Cs—137	30 godina	21,5
Hlapivi oksidi		
Mo— 99	2,8	592
Tc— 99	9,25	518
Ru—103	40	370
Ru—105	0,18	215
Ru—106	1 godina	70,3
Rh—105	1,5	215

Alkalni metali

Ba–140	12,8	592
Sr– 89	50,6	407
Sr– 90	27,7	19,2
Sr– 91	0,4	481

Nehlapivi oksidi

Y–90	2,7	19,2
Y–91	59	518
Zr–95	65,5	592
Zr–97	0,7	592
Nb–95	3,5	592
La–140	1,66	592
Ca–141	32,8	592
Ce–143	1,37	555
Ce–144	285	407
Pr–143	13,6	555
Nd–147	11	222
Pm–147	2,65 godina	63
Pm–149	2,2	148
Pu–238	86,4 godina	0,37
Pu–239	24 390 godine	0,037

Pri planiranju kapaciteta za odlaganje radioaktivnosti iz prerađenog istrošenog goriva važne su godišnje količine radioaktivnog otpada. One se dobiju iz godišnjeg protoka goriva kroz reaktor. Za reaktor tipa PWR godišnji je protok 1/3 jezgre, a za reaktore tipa HWR iznosi i više od mase jezgre. No ako se za razne reaktorske sustave količine otpada preračunaju na određenu proizvedenu energiju, ovdje na gigavatgodinu, onda to znači i na približno isti broj fisija, i količine fisijskih produkata malo se razlikuju. Ipak specifičnosti reaktora utječu na relativan udio pojedinih radioaktivnih nuklida.

U tablici 5.25. navode se aktivnosti radioaktivnog otpada po gigavatgodini za lakovodne, brze oplodne i teškovodne reaktore, nakon 10-godišnjeg hlađenja.

Za lakovodne i teškovodne reaktore u prvom stupcu prikazana je ukupna aktivnost goriva. Preradom bi se iskoristio plutonij i uran, pa su aktivnosti otpada iza prerade manje (drugi stupac).

Tablica 5.25. Aktivnost istrošenog goriva (1) i radioaktivnog otpada uz recikliranje plutonija i urana (2) nakon 10-godišnjeg hlađenja, po gigavatgodini proizvedene energije [prema INFCE WG 7]

Izotop	Vrijeme poluraspada	Aktivnost/10^{12}Bq				
		Lakovodni reaktori		FBR U-Pu gorivo	Teškovodni reaktori	
	godina	(1)	(2)		(1)	(2)
Kr-85	10,76	7 400	3 890	3 700	7 400	3 890
Sr-90	28,1	74 000	66 000	36 300	85 100	62 900
Tc-99	210 000	18,5	18,5	16,6	7,8	20
I-129	17 000 000	0,05	0,05	0,03	0,04	
Cs-134	2,05	10 730	12 200	1 147	3 367	6 290
Cs-135	3 000 000	0,3	0,44	1,26	0,14	0,18
Cs-137	30	107 300	107 300	103 600	122 100	122 100
Pm-147	2,62	9 250	8 510	24 050	31 820	23 680
Eu-154	16	5 920	8 140	10 730	2 700	4 810
U-234	250 000	0,96	1,04	0,74	1,9	0,007
U-235	710 000 000	0,02	0,000 2	0,000 03	0,03	0,000 08
U-236	24 000 000	0,36	0,003 7	0,000 09	0,30	0,000 55
U-238	4 500 000 000	0,40	0,044	0,026	2,2	0,092
Np-237	2 100 000	0,48	0,55	0,15	0,13	0,14
Pu-238	89	3 441	81,4	407	333	16,3
Pu-239	24 000	407	6,7	48,1	1 073	5,2
Pu-240	6 800	592	7,4	67	1 406	21,4
Pu-241	14,6	81 400	1 628	4 810	70 300	1 406
Pu-242	380 000	1,85	0,037	0,196	1,15	0,27
Am-241	433	1 776	629	2 850	1 443	2 960
Am-242	152	10	48	130	0,74	4,8
Am-243	7 700	24	104	56	2,33	318
Cm-242	0,45	8,1	41	107	0,63	4,1
Cm-243	32	4,1	11,1	52	0,6	25
Cm-244	18,1	2 257	21 460	1 258	48	32 930

5.5.2. Konačno odlaganje radioaktivnog otpada

Konačno se odlažu kao radioaktivni otpad sastojci goriva koje je prerađeno, tj. goriva iz kojeg su izdvojeni oplodni i fisibilni nuklidi. Odlagati se moraju proizvodi fisije i aktinidi koji nisu izdvojeni s uranom i plutonijem, npr. izotopi neptunija, americija i kirija. Budući da kemijsko izdvajanje urana i plutonija nije potpuno, ostat će i manje količine izotopa tih elemenata.

Nakon desetak godina hlađenja prethodno dominantne aktivnosti fisijskih produkata prazeodija-144, rubidija-106 i cerija-134 bitno su oslabile. U idućim desetljećima biološki su najopasniji cezij-137 i stroncij-90. Budući da je vrijeme poluraspada tih izotopa oko 30 godina, njihova se aktivnost bitno smanji tek za nekoliko stoljeća. Fisijski proizvodi rijetko imaju dulja vremena poluraspada. Iznimke su biološki aktivni tehnecij-99 i jod-129 (vrijeme poluraspada $2{,}1 \cdot 10^5$ godina i $1{,}6 \cdot 10^7$ godina.

Ukupna aktivnost fisijskih proizvoda smanji se za 10^7 u 700 godina [Co 1977]. Nakon toga glavne aktivnosti dolaze od teških elemenata, od americija-243 i plutonija-240, a zatim plutonija-239. Kao što se razabire postoje dvije vremenske skale. Aktivnosti fisijskih proizvoda smanjene su za 10^7 kroz nekoliko stotina godina, a aktivnost plutonija bitno se smanji tek nakon stotina tisuća godina jer su vremena poluraspada tisuću puta dulja.

Dosta je prirodno da se zbog toga pomišlja na izdvajanje teških elemenata iz radioaktivnog otpada. Na slici 5.27. uspoređuje se biološka opasnost konvencionalnog radioaktivnog otpada s opasnošću od otpada iz kojeg su izdvojeni teški elementi i jod-129 [Bl 1973]. Biološka opasnost radioaktivnog otpada može se izraziti količinom vode potrebnom da aktivnost u njoj otopljenog otpada zadovolji propise o dopuštenim koncentracijama za pitku vodu. Istaknute su dvije razine aktivnosti u prirodi: aktivnost uranskog smolinca (sadržaj 60 % urana) i tipične uranske rudače s 0,2 % urana. Ako bi se razvili kemijski postupci za izdvajanje teških elemenata, problem bi se mogao riješiti njihovom transmutacijom u nuklearnom reaktoru. Raspravljalo se o takvim postupcima i ocijenjeno je da su oni mogući. U proteklim godinama promatrane su različite metode permanentnog odlaganja radioaktivnog otpada, a neke su i primijenjene. Možemo ih sumarno navesti i grupirati:

a) odlaganje u oceanima:

— odlaganje u duboke vode,

— odlaganje u oceanske tektonske rovove;

b) odlaganje u geološke formacije na kopnu:

— injektiranjem radioaktivne tekućine u hidrostatski izazvane pukotine,

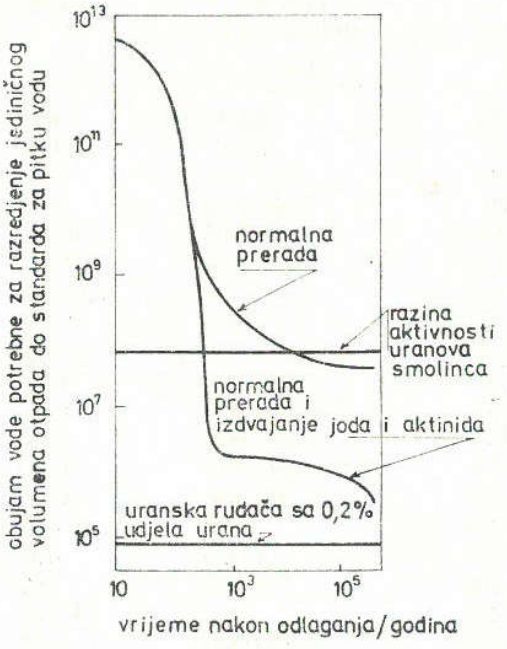
— odlaganje u vrlo duboke bušotine,

— odlaganje u prikladne geološke formacije;

c) odlaganje u antarktički led;

d) izvanzemaljsko odlaganje.

Radioaktivni otpad može se sigurno odlagati u oceanske dubine samo ako se



Slika 5.27. Količina vode za razrađenje otpada do standarda za pitku vodu u relativnim jedinicama, za normalnu preradu i dodatno uklanjanje aktinida (Managing radioactive wastes I.O.Blomeke, I.P. Nichols, M.C. McClain Physics today, August 1973)

može osigurati dovoljna trajnost spremnika u kojem se radioaktivni materijal nalazi. Zbog korozivnosti morske vode metalna posuda nije dobro osiguranje, osim ako je i radioaktivni otpad ukrućen u vodootpornom materijalu. Budući da u vremenu između 100 i 1 000 godina dolazi do izmjene dubinske vode, dugoživući izotopi oslobođeni iz spremnika mogli bi ući u biološki prehrambeni ciklus. U Velikoj Britaniji istražuje se postupak u kojemu bi se ustakljen (vitri ficiran) radioaktivni otpad odlagao u 1 000 m duboke rupe izbušene na oceanskom dnu. Na taj način radioaktivnost ne bi mogla cirkulirati čak i ako bi došlo do otapanja.

Pri odlaganju u oceanske tektonske rovove računa se na poniranje kontinentalnih tektonskih ploča, pa bi, misli se, otpad odložen na mjestima gdje se taj proces odvija bio povučen u unutrašnjost Zemlje. Međutim, taj je proces veoma spor, ploče se kreću brzinom 2 cm do 4 cm godišnje, a pojava i nije dovoljno istražena.

Ideja o odlaganju u antarktičkom ledu privlačna je jer je to područje ogromno, udaljeno, i nenaseljeno. Premda bi se odlaganje provodilo u teškim klimatskim uvjetima, pogodno je to što bi spremnici vlastitom toplinom bušili put kroz led. Međutim, antarktički led nije geološki stara formacija, veći dio nije stariji od 100 000 godina. Nadalje, uvjeti na dnu ledenog pokrova nisu dovoljno poznati. Prosječno jednom u 10 000 godina antarktički led pokazuje ubrzano kretanje. Ali bi spremnici doprli do dna ledenog pokrova, mogli bi tamo stvoriti tekući međusloj i uzrokovati nestabilnosti. To bi se moglo izbjegnuti ako bi se spremnici zadržali na određenoj dubini. U svakom slučaju zasad Međunarodni ugovor o Antarktiku iz 1959. godine ne dopušta njegovo korištenje za odlaganje radioaktivnog otpada.

Izvanzemaljsko odlaganje radioaktivnog otpada moglo bi se primijeniti samo za male količine specijalnih nuklida, joda-129 i aktinida, budući da bi specifični troškovi bili visoki. Postoji i tehnički problem konstruiranja spremnika koji ne bi dopuštali oslobađanje radioaktivnosti ako lansiranje ne bi uspjelo pa bi raketa pala na Zemlju.

Spremanje radioaktivnog otpada u vrlo duboke bušotine, dubine 10 i više km, također je jedna od mogućih i privlačnih metoda. Problem je bušenje rupa potrebne dubine i promjera. Nakon odlaganja otpada bušotina bi se zatrpala, a otpad bi se s vremenom rastopio i spojio s okolnim stijenama. Da se ne bi moralo tako duboko bušiti, odlagati bi se moglo u dovoljno trajne geološke formacije, uz zadovoljavanje dodatnih uvjeta od kojih je najvažniji da nema podzemnih voda. Za to bi bila pogodna ležišta soli, graniti, neki škriljci i karbonati.

5.5.3 Odlaganje radioaktivnog otpada u ležišta soli

Ležišta kamene soli za spremanje radioaktivnog otpada imaju prednosti prema drugim geološkim formacijama; to su osobito:

— većina ležišta soli nalazi se u stabilnim područjima sa sporim tektonskim promjenama; stoga je manja vjerojatnost da bi se prouzročilo kidanje pokrova sedimentnih stijena;

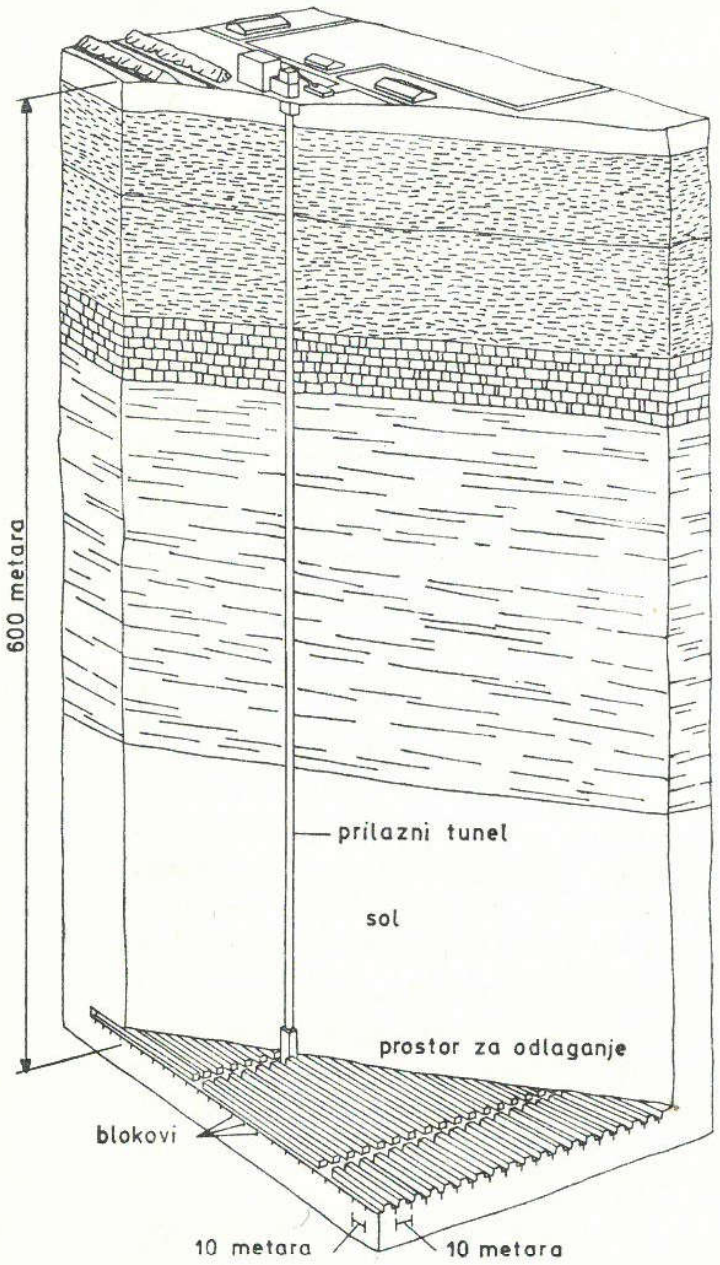
— sol posjeduje sposobnost plastične deformacije; pukotine koje bi iz bilo kojeg razloga nastale u naslagama soli brzo se zatvaraju;

— ležišta soli s povoljnim karakteristikama nađena su u mnogim zemljama;

— u soli se lako buši;

— sol posjeduje visoku toplinsku vodljivost.

O spremanju radioaktivnog otpada u ležišta soli u SAD su najprije obavljena opsežna laboratorijska ispitivanja, a zatim je metoda pokusno primijenjena u jednom rudniku soli u državi Kansas (Corey Salt Company). Rezultati su povoljni, no o lokaciji za odlaganje u velikom opsegu nije odlučeno.



Slika 5.28. Shematski prikaz odlagališta za radioaktivni otpad u geološkoj formaciji soli. U horizontalnim hodnicima razmaknutim 10 m blokovi su raspoređeni na razmacima po 10 m

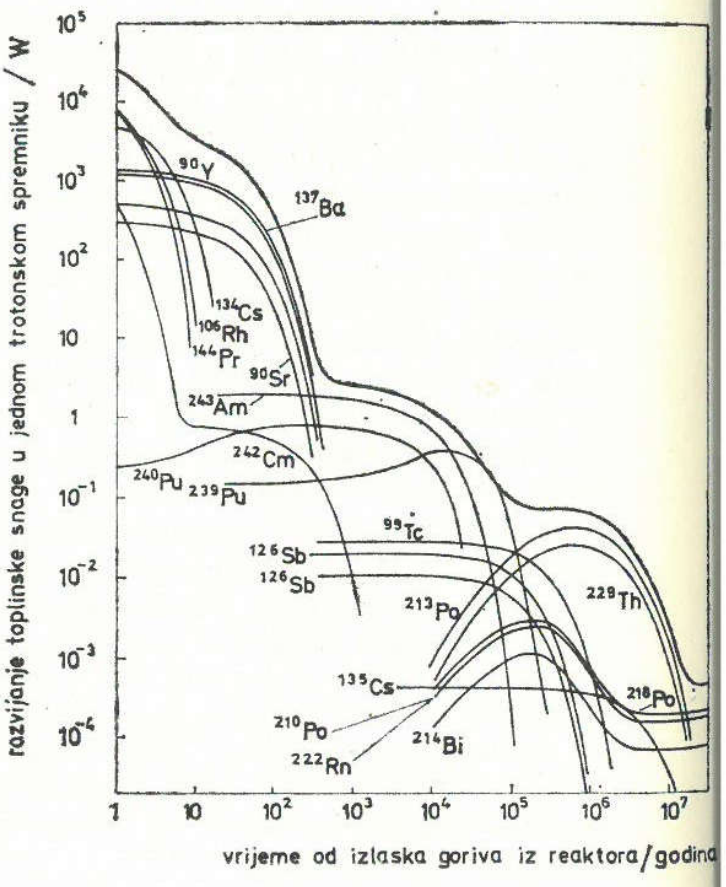
Prema informacijama iz geologije ležišta soli bila su bez kontakta s podzemnim vodama milijunima godina. No, mnogobrojne, katkad neevidentirane, pokusne naftne bušotine, tvrde neki, mogu prekinuti njihovu izolaciju. To je bio jedan od prigovora lokaciji kod Lyonsa u Kansasu.

Prema američkim gledištima i razrađenoj studiji iz sredine 70-ih godina radioaktivni otpad bio bi ustakljen u cilindrične blokove promjera 0,3 m i duljine 3 m. Blok bi sadržavao otpad od prerade oko 3 tone istrošenog goriva. Ustakljeni otpad bio bi još hermetički zatvoren oblogom od nerđajućeg čelika. Cilindrični blokovi raspoređivali bi se u razmaku 10 m. To je potrebno da se ne bi previše povećala temperatura. 10 godina nakon izlaska iz reaktora radioaktivni otpad u jednom bloku razvija toplinu snagom 3,4 kW.

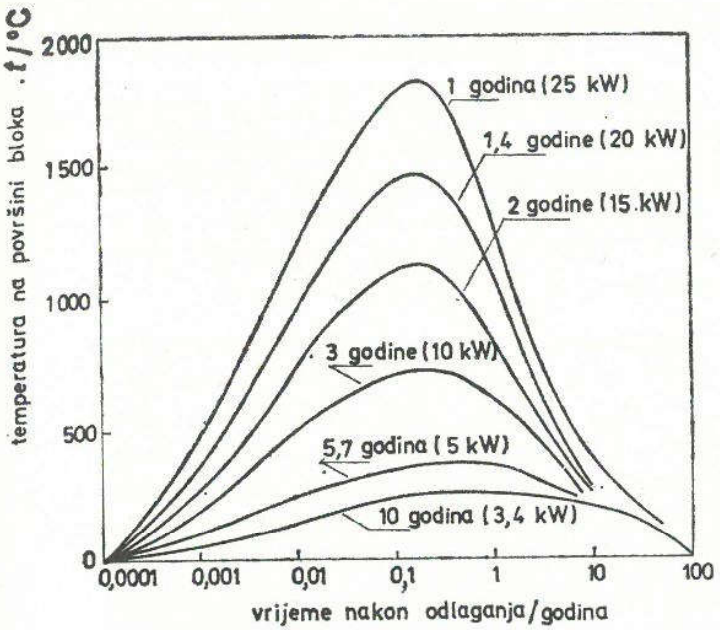
Na slici 5.29. prikazana je toplinska snaga jednog bloka ovisno o vremenu, te doprinos pojedinih nuklida.

Slika 5.30. pokazuje temperaturu na površini bloka ovisno o vremenu „hlađenja" otpada prije deponiranja u stijenu. Pretpostavljena je stijena srednje toplinske vodljivosti (ne sol), te samo jedan blok.

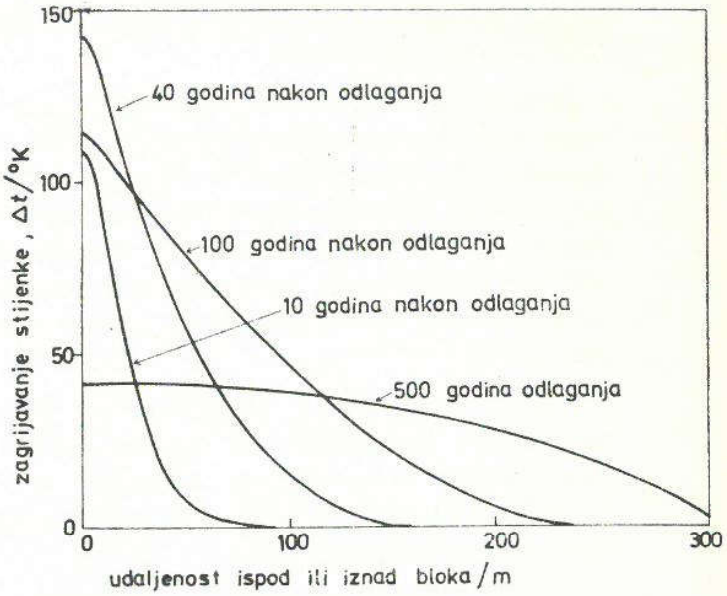
Ako se gorivo hladilo samo jednu godinu prije nego je odloženo, temperatura će se povisiti vrlo mnogo, za 1 900 °C. Staklo



Slika 5.29. Toplina razvijena radioaktivnim raspadom, doprinosi pojedinih nukleida u jednom bloku koji sadrži otpad iz tri tone istrošenog goriva reaktora PWR. Nakon 10 godina hlađenja toplinska snaga po jednom bloku smanjena je na 3,4 kW



Slika 5.30. Temperatura na površini bloka s radioaktivnim otpadom, odloženim u stijeni srednje toplinske vodljivosti, u ovisnosti o vremenu hlađenja goriva koje je prethodilo odlaganju. Važna je temperatura 700 °C kod koje se staklo kristalizira i postaje krhko



Slika 5.31. Zavisnost temperature stijene postavljene iznad i ispod bloka s radioaktivnim otpadom, pohranjenim nakon 10 godišnjeg hlađenja, udaljenosti od bloka i vremena nakon odlaganja. U neposrednoj blizini bloka najviša temperatura dostiže se nakon 40 god.

se kristalizira i postaje krhko već kod 700 °C. Nakon 10-godišnjeg hlađenja porast temperature ne prelazi 250 °C.

Slika 5.31. pokazuje kakvo bi bilo zagrijavanje stijene ispod ili iznad bloka, ovisno o udaljenosti i vremenu nakon odlaganja bloka u stijenu. Temperatura se maksimalno poveća za 140 °C nakon 40 godina. Pri odlaganju u soli, zbog veće toplinske vodljivosti maksimalno povećanje iznosilo bi 85 °C.

Iz obiju slika razabire se nužnost a) hlađenja prije odlaganja u stijenu i b) da razmaci među blokovima budu dovoljno veliki kako ne bi došlo do prevelikog povećanja temperature zbrajanjem temperaturnih polja pojedinih blokova.

5.5.4. Dugoročna sigurnost otpada odloženog u geološkim formacijama

Radioaktivni materijal bio bi pohranjen u stijenama više stotina metara ispod površine. Iako se to čini vrlo sigurnim, potrebno je nešto više određenosti da bi se moglo ocijeniti postoji li mogućnost da aktivnost ipak prodre do površine. Ustakljeni otpad zatvoren je u čelične posude. Trajnost tih posuda ne može biti jako velika, ni dovoljna za razdoblje od 700 godina koliko je potrebno da se bitno smanji aktivnost fisijskih proizvoda. Za osiguranje od radioaktivnosti aktinida i pojedinih fisijskih proizvoda, npr. joda-129 i tehnecija-99, potrebno je znatno dulje vrijeme. Rasprostiranje radioaktivnosti tijekom desetaka tisuća godina određeno je prirodnim uvjetima i putovima. Ono ovisi o prisutnosti ili odsutnosti vode kao prenositelja radioaktivnosti, o topivosti radioaktivnog otpada, propusnosti stijena i zadržavanju radioaktivnog materijala ionskom izmjenom.

Procjene rizika od odloženih radioaktivnosti temelje se na opsežnim laboratorijskim i geološkim istraživanjima.

Američko društvo fizičara (American Physical Society, APS) objavilo je 1977. godine opsežnu studiju o nuklearnim ciklusima goriva i odlaganju radioaktivnog otpada (AP 1977). Nakon promatranja različitih mogućnosti, u izvještaju APS zaključuje se da je u neposrednoj budućnosti odlaganje radioaktivnog otpa-

da u stabilne geološke slojeve jedino prihvatljivo rješenje.

Studija zaključuje da današnje znanje i tehnologija omogućuje da se izabere i izgradi spremište sigurno i od takvih površinskih zbivanja kao što su nuklearne eksplozije ili pad meteora. U studiji je detaljno promotrena mogućnost prijenosa radioaktivnog materijala podzemnim vodama.

Ta je mogućnost identificirana kao najvažnija. Prikazano je kompjutorsko modeliranje izotermičkog sustava podzemnih voda, u kojem je gravitacija dominantni pokretač.

Rezultati ovise o propusnosti stijena. No i pri pretpostavljenoj djelomičnoj propusnosti, u 800 000 godina radioaktivnost ne bi doprla do površine. Očito je da je prijenos radioaktivnog materijala podzemnim vodama spor proces. Podzemne vode iz dubine 500 m doprle bi do površine za 100 do 1 000 godina. Međutim, zbog ionske izmjene prijenos je radioaktivnih izotopa sporiji. Usporenje je oko 100 puta za stroncij-90, oko 1 000 puta za cezij-137, oko 10 000 puta za americij i plutonij, a oko 100 000 puta za radij. U prisutnosti vode za prijenos do površine potrebni su deseci tisuća godina. Ionska izmjena ne zadržava jod-129 i tehnecij-99. Ti izotopi mogli bi stići do površine za vrijeme reda veličine tisuću godina. Međutim, njihova je aktivnost malena, a vrijeme za otapanje ustakljenog otpada znatno je dulje; o realnim procjenama još se raspravlja. Međutim, takve procjene mogle bi biti relevantne ako su prisutne podzemne vode. Studija zaključuje da se u SAD može identificirati niz potencijalnih lokacija s povoljnim hidrološkim karakteristikama, tj. bez vode, odnosno s vjerojatnom odsutnošću podzemnih voda u idućim geološkim razdobljima.

Zaključuje se da se tako može djelotvorno izolirati radioaktivni otpad iz istrošenog goriva u dugim vremenskim razdobljima. Međutim, u studiji se kao buduća, možda i povoljnija varijanta ističe odlaganje u vrlo duboke bušotine.

5.5.5. Kvantitativne procjene rizika

Načinjene su studije u kojima se rizik oslobađanja radioaktivnog materijala i njegova vraćanja na površinu nastoji odrediti kvantitativno. Takav je pregled u IR — 1978, a procjene su kritički promotrene i dotjerane u [Co 1980].

Procjene polaze od pretpostavljenog prodiranja vode u spremište otpada 100 do 1 000 godina poslije odlaganja, otapanja ustakljenog otpada i njegova prijenosa prema površini uz usporavanja kemijskim procesima. Procjene se razlikuju prema pretpostavljenim putovima izotopa do čovjeka, no u svim postoji suglasnost da je ulaz u organizam vodom ili hranom od primarnog značenja. Opasnost od pojedinih izotopa izražena je kao višekratnik količina koje pri unošenju u organizam uzrokuju rak.

U tablici 5.26. prikupljeni su rezultati za najvažnije radioaktivne izotope prisutne u radioaktivnom otpadu.

U trećem stupcu količina radioaktivnih izotopa izražena je kao višekratnik količine koja bi prouzročila rak ako bi se izotopi unijeli u organizam hranom i pićem. S obzirom na vrijeme prijenosa do površine, navedeno u četvrtom stupcu, taj višekratnik jako se smanjuje za stroncij-90, za izotope americija i plutonija.

Za tehnecij-99, i jod-129 pad je aktivnosti malen zbog relativno kratkog vremena prijenosa i vrlo dugih vremena poluraspada. U posljednjem stupcu navedene su kancerogene količine radioaktivnih izotopa koje bi dospjele do površinskih voda. Da bi se dobio broj oboljenja od raka uzrokovan tim radioaktivnostima, treba još procijeniti koliki bi se dio vode koristio u prehrani stanovništva. Prema procjenama izravnog unošenja pićem i neizravnog hranom, moglo bi to biti 1 dio od 10^4 dijelova, iako postoje, naravno, lokalne varijacije.

Ako se 600 kancerogenih količina pomnoži s 10^{-4}, očekuje se 0,06 slučajeva raka za gigavatgodinu proizvedene energije.

Tablica 5.26. Rizik* za prouzročenje raka pojedinim izotopima radioaktivnog otpada, migracijsko vrijeme i vjerojatnost oslobađanja

1 Izotop	2 Vrijeme poluraspada $T_{1/2}$/godina	3 Maksimalan rizik*	Vrijeme** migracije / godina	Oslobođeni radioaktivan otpad / %	Rizik* od radioaktivnosti oslobođenog otpada
^{90}Sr	29	$2 \cdot 10^8$	10^4	0	0
^{241}Am	430	20 000	10^6	0	0
^{243}Am	7 400	3 000	10^6	0	0
^{240}Pu	6 500	1 200	10^6	0	0
^{239}Pu	24 000	600	10^6	0	0
^{237}N	$2{,}1 \cdot 10^6$	50	10^4	100	50
^{229}Th (Np-237)	$2{,}1 \cdot 10^6$	100	10^4	100	100
^{99}Tc	$2{,}1 \cdot 10^5$	150	10^2	100	150
^{129}I	$1{,}6 \cdot 10^7$	100	10^2	100	100
^{226}Ra (U-234)	$2{,}4 \cdot 10^5$	2 000	10^6	5	100
^{226}Ra (U-238)	$4{,}5 \cdot 10^9$	100	10^6	100	100
				Ukupno doza:	600

*Rizik (za pojedine radioaktivne izotope) izražen je kao višekratnik količine izotopa koja bi unesena u organizam bila dovoljna da prouzroči rak. Dan je za gigavatgodinu proizvedene energije.
**Migracijsko vrijeme dobiveno je množenjem faktora usporenja s pretpostavljenim vremenom toka podzemne vode do površine, tj. sa 100 godina.

U [Co 1980] analiziraju se neki koraci u tom lancu procjena. Prema količini radija otopljenog u vodi i količini radija koja se nalazi u ljudskim kostima zaključuje se da je dio koji se unosi u ljudski organizam $1{,}5 \cdot 10^{-5}$, tj. samo 15 % od pretpostavljenog udjela 1 u 10^4 dijelova.

Dvije su primjedbe na pretpostavke o brzini otapanja ustakljenog otpada. Prva se odnosi na materijal spremnika u koji se stavlja ustakljeni otpad. Titan, a osobito olovo mnogo su otporniji na koroziju nego čelik kao obloga oko ustakljenog otpada.

Prema švedskim studijama pri ograničenom dostupu kisika otapanje olovne posude trajalo bi kojih milijun godina odnosno ovisno o prisutnosti karbonata i sulfata i mnogo dulje. Neće biti tehničkih poteškoća, a ni ekonomskih ograničenja da se ustakljeni otpad obloži slojem ili međuslojem olova, ako bude potrebno.

Druga je primjedba o brzini otapanja ustakljenog otpada. Prijašnje studije koristile su podatke iz laboratorijskih mjerenja u kojima je materijal u kontaktu s velikim količinama vode. U takvim uvjetima otapa se oko 1 μm godišnje, manje nego većina stijena u istim uvjetima. Međutim, ako bi se takva brzina korozije odnosno otapanja pretpostavila za prirodne stijene u kojima se nalaze podzemne vode, otopile bi se u tisućljećima. Činjenica je, međutim, da se stijene kroz koje prolazi voda ne otapaju ni za milijune godina. Pita se kakva je razlika prema laboratorijskim uvjetima i što možemo zaključiti o otapanju stakla?

Istaknimo ovo:

a) stijena nije u kontaktu s neograničenom količinom vode, nego s tankim slojem koji se sporo kreće. Proizvodi otapanja ostaju u okolišu te nastaje lokalno zasićenje, stvaraju se novi minerali koji tvore naslage na stijeni, i tako sprečavaju daljnje otapanje;

b) podzemne vode sadrže otopljene silikate što usporava otapanje silikatnih stijena, odnosno stakla;

c) važna je razlika u sadržini kisika. Podzemne vode siromašne su kisikom i općenito lužnate. Svi elementi (u tablici 5.23) osim joda vrlo su slabotopivi u takvom kemijskom okolišu.

Eksperimentima u kojima se pokušalo približiti prirodnim uvjetima [Wh 1981] utvrđene su za *3 do 4 reda veličine* manje brzine otapanja. To se slaže s mjerenjima otapanja stakla koje se doista 15 godina nalazilo u zoni podzemne vode [Me 1976].

No ako je brzina otapanja veoma malena, može se raspravljati o tome bi li ona mogla biti veća za elemente koji se u ustakljenoj masi nalaze u vrlo malim količinama. Eksperimentalni podaci govore da se ne otapaju brže elementi prisutni u vrlo malim količinama. Npr. relativna količina urana otopljenog u podzemnoj vodi prema glavnim elementima ista je kao i u neotopljenoj stijeni, bez obzira na općenito veću topljivost uranovih spojeva te na koncentracije u vodi koje su daleko od zasićenja.

Alternativnu procjenu rizika od otpada učinio je Cohen na temelju procjene brzine površinske erozije [Co 1980]. Polazeći od podataka o brzini erozije tla za Sjevernu Ameriku (45 metara za milijun godina), otpad odložen na 600 m dubine bio bi oslobođen nakon 13 milijuna godina.

U tablici 5.27. prikazan je rezultat takve procjene.

Izuzmu li se uran-238 (budući da je on samo vraćen u zemlju, a nije proizveden u reaktoru) i jod-129 za kojega bi bilo razumnije izravno odlaganje u more, umjesto da mu se na putu do mora pruža prilika da dođe u hranu ili piće — ostaje samo 8 doza. Pomnožimo li ih s 10^{-4} dobiva se 0,008 očekivanih slučajeva raka za proizvedenu gigavatgodinu električne energije. Konačna vrijednost vrlo je malena, oko 80 puta manja od prijašnjih procjena.

U tom čitavom lancu od odlaganja otpada do dolaska na površinu, vrlo je važno usporenje prijenosa kemijskim procesima. Može se pitati postoje li eventualno takvi načini dolaska na površinu u kojima usporenje ne bi djelovalo. Ako bi u području ležišta otpada nastale velike pukotine kroz koje bi se podzemna voda mogla brzo dići na površinu, osnovna bi barijera za širenje radioaktivnosti bili materijali spremnika. Mogućnost nastajanja takvih pukotina ovisi o izboru ležišta i svojstvima stijene. U geološkim formacijama soli pukotine se zatvaraju zbog sposobnosti plastične deformacije.

Potrebno je ocijeniti kolika je mogućnost, odnosno vjerojatnost nastajanja pukotina koje bi omogućile brzi tok podzemnih voda. Ako se takva mogućnost ne bi mogla isključiti na određenoj lokaciji, valjalo bi promotriti da li je poželjno upotrebom zaštitnog sloja iz titana ili olova smanjiti brzinu otapanja toliko, da to samo po sebi bude dovoljno

Tablica 5.27. Procjena rizika od radioaktivnog otpada oslobođenog površinskom erozijom. Količine radioaktivnog otpada izražene su kao višekratnici količina koje bi unošenjem u organizam prouzročile rak.

Izotop	Količine radioaktivnih izotopa izražene karcinogenim količinama			
	u otpadu	oslobođeno u $13 \cdot 10^6$ godina	oslobođeno nakon $13 \cdot 10^6$ godina	ukupno oslobođeno
^{237}Np	50	1,5	1,2	2,7
^{229}Th	100	3	2,4	5,4
^{99}Tc	150	0,5	0	0,5
^{129}I	100	10	55	65
^{226}Ra (^{234}U)	100	0,4	0	0,4
^{226}Ra (^{238}U)	100	13	87	100
svi izotopi	600	28,4	145,6	174
bez joda-129 i urana-238	300	5	3,6	8,6

Pretpostavljena brzina erozije 45 m/10^6godina; otpad spremljen na 600 m dubine.

osiguranje i ako nastanu pukotine u stijeni.

Posebna grupa stručnjaka u Švedskoj imenovana sa zadatkom da procijeni sigurnost gorivog ciklusa (Nuclear Fuel Cycle Study Group) razmatrala je i posljedice izazivanja prodora u području odlagališta za radioaktivni otpad spremljen na dubini 500 m u spremnicima s oblogom olova i titana. Sigurnosna analiza zaključuje [NF 78]: „Za najteži identificirani slučaj, bušenje dubokog bunara za pitku vodu u blizini konačnog odlagališta, izračunato je da bi doza pojedincu mogla porasti maksimalno za 4 mSv u 30 godina, a što bi se dostiglo za 200 000 godina". . . . „Najvjerojatnija doza manja je od jednog postotka ove maksimalne vrijednosti".

Što se efekata na šire stanovništvo tiče, Švedska analiza zaključuje da će dugoročni utjecaji na zdravlje biti zanemarivi. Slični su zaključci niza drugih analiza. Spomenimo samo neke najautoritativnije.

U Međunarodnoj evaluaciji gorivog ciklusa zaključuje se: „Utvrđeno je da je doprinos odlaganja radioaktivnog otpada mogućem budućem ozračenju stanovništva (collective dose commitment) vrlo mali dio ozračenja iz prirodnih izvora i istog je reda kao i doprinos ostalih faza ciklusa goriva". [IN 1980].

Međunarodna agencija za atomsku energiju zaključuje: „Premda su predlagane i istraživane različite koncepcije odlaganja radioaktivnog otpada postoji opća suglasnost da podzemno odlaganje s odgovarajućom mobilizacijom otpada pruža potrebnu sigurnost čovjeku i okolišu od potencijalnog rizika radioaktivnog otpada [IA 81].

5.6. Nuklearna energija i utjecaji na okoliš

5.6.1. Uvod

Ne može se proizvoditi energija — sa svim fazama pripreme goriva, i izgradnje energetskih objekata te konačno pogonom elektrane — bez utjecaja na okolicu i na čovjeka. Učinci su specifični za pojedine izvore, a proporcionalni opsegu proizvodnje energije. I izvori poput vjetrenjača ili solarnih uređaja oštećuju okolicu, iako to, površno gledajući, odmah ne primjećujemo. Čine to neizravno upotrebom velikih količina raznih konstruktivnih materijala, a proizvodnjom tih materijala utječe se na okoliš. To možda nije uočljivo pri izradi instalacija malih snaga, ali postaje ozbiljno ako bi takvi izvori trebali proizvesti značajan udio energije pri kraju stoljeća. Komparativnu analizu raznih izvora energije prema njihovom izravnom i neizravnom djelovanju na okoliš pokušao je načiniti H. Inhaber [In 1978]. To djelovanje izraženo je u izgubljenim radnim danima za jedinicu proizvedene energije. Inhaber promatra zajedno rizik normalnog pogona i akcidenta na temelju današnjih tehnologija, uz relativno visok nuklearni rizik. Rezultat je kvantitativno izražen slijedom energetskih izvora prema djelovanju na okoliš, a ono je mjereno brojem bolovanjem izgubljenih radnih dana za jedinicu proizvedene energije.

Počevši od najvećeg djelovanja na okoliš izvori su ovako poredani: ugljen, nafta, Sunčeva energija (fotovoltaična konverzija), methanol (biomasa), Sunčeva energija (grijanje), Sunčeva energija (toplinska konverzija), vjetar, hidroenergija, oceanska toplinska energija, nuklearna energija, zemni plin.

Ugljen i nafta najviše onečišćuju atmosferu proizvodima izgorijevanja.

Većina nekonvencionalnih izvora iskorištava energiju male površinske gustoće, pa je potrebno mnogo materijala za izradu kolektora, konvertora, vjetrenjača itd. Izrada tih uređaja vezana je s normalnim industrijskim rizicima. Iako se o preciznim kvantitativnim pokazateljima može raspravljati, osnovni se pristup H. Inhabera ne može osporiti. Ne smije se zanemariti da se velike količine upotrebljenih materijala za iskorištavanje difuznih oblika energije proizvode uz određene stope zdravstvenih oštećenja i nesreća na radu.

Tablica 5.28. Učinci proizvodnje energije na zaposlene pri dobivanju potrebnih materijala, konstrukciji, pogonu i održavanju (broj zaposlenih i učinci za količinu energije 10^{18} džula*)

Energetski sustavi	Zaposleni	Smrtni slučajevi		Izgubljeni radni dani	
	10^3 ljudi-godina	po energiji 10^{18} J	na 10^3 ljudi-god.	po energiji 10^{18} J	na 10^3 ljudi-god.
toplina, ravni sunčani kolektori	56–310	16–86	0,28–0,29	41–220	710–730
kemijska goriva:					
biomase	5,6–61	1,3–15	0,23–0,25	3,2–41	570–670
ugljena	20–30	17–25	0,83–0,85	28–42	1 400
nafte	3,5–3,8	1,1–1,2	0,31–0,32	1,8–2,1	510–550
električna energija:					
sunčanih toplinskih konvertora	65–110	15–24	0,22–0,23	44–95	680–860
foto naponskih ćelija	44–120	11–21	0,18–0,23	39–90	750–890
vjetrenjača	41–60	8,8–14	0,21–0,23	26–43	630–720
termoelektrana na ugljen	42	35	0,83	57–58	1 400
nuklearnih elektrana lakovodnog tipa	18	4,7**	0,26	13–14	720–780

*ekvivalentno energiji sadržanoj u ~34 milijuna tona standardnog ugljena, odnosno 31,7 gigavatgodina

**broj smrtnih slučajeva zbog nesreća na reaktorima iznosio bi 1,2/ (10^{18}džul) prema WASH –1400

Prema statistici o nesrećama i ozljedama u različitim industrijama u kojima se proizvode ti materijali i oprema, te na temelju procjena potrebnih količina materijala za konstrukciju i pogon različitih izvora načinili su Holdren i suradnici [Ho 1980] dokumentiranu komparativnu analizu učinaka različitih izvora energije na zaposlene u svim fazama pripreme materijala, konstrukcije i pogona. Za najvažnije materijale (čelik, beton, staklo) te za dobivanje i prijevoz ugljena, nafte i urana — rizici su dobro poznati.

U tablici 5.28. prikazani su rezultati studije Holdrena i suradnika izraženi brojem smrtnih slučajeva i brojem izgubljenih dana zbog bolovanja. U svih se izvora promatra 10^{18} džula proizvedene energije, odnosno 31,7 gigavatgodina.

Učinci na stanovništvo u tom radu kvantitativno se ne prikazuju. To su utjecaji različitih polutanata, osobito pri izgorijevanju ugljena i nafte, ali i pri dobivanju i preradi materijala potrebnih za gradnju izvora energije. Može se očekivati znatan utjecaj onih izvora koji trebaju velike količine materijala. No, postoje i specifični utjecaji određenog izvora. Interesantan primjer je hidroenergija.

Pri iskorištavanju hidroenergije jedan od izvora utjecaja na okolicu jesu velike brane. Velike brane pretvaraju prirodne tokove u umjetne akumulacije. Pri tom često nestaju prirodne ljepote. Onaj tko se prije izgradnje brane kod Bajine Bašte spuštao niz Drinu na splavi ili kajakom, sigurno će to potvrditi. No, ne uništavaju se samo prirodne ljepote, iako i one imaju pored humane i ekonomsku vrijednost. Drukčije je npr. s efektima Asuanske brane na Nilu. Stvorena je ogromna akumulacija u suhom tropskom podneblju. Procjenjuje se da se s površine akumulacije isparava oko 1/4 čitavog protoka rijeke Nila. Jedan dio odlazi u podzemlje i utječe na dizanje razine podzemnih voda nizvodno od brane. Očito da je utjecaj takvog objekta na okolicu i složen i dalekosežan.

Od brana prijete i neposredne opasnosti. Nesreće pri pucanju ili popuštanju brana nisu nipošto rijetkost. Više od 100 brana popustilo je u SAD od 1930. godine do danas. Najteže nesreće u svijetu u zadnja dva desetljeća prikazane su u tablici 5.29.

Tablica 5.29. Katastrofalna popuštanja brana

Godina	Hidroelektrane	Ljudske žrtve
1981.	Gopinathapura, Indija	250
1979.	Morvi, Indija	više od 3 000
1977.	Tetan, SAD	9–11
1968.	Vaiont, Italija	2 600–3 000
1967.	Koyna, Indija	180
1961.	Kijev (Babi Jar), SSSR	145
1960.	Oros, Brazil	1 000
1959.	Frejus, Francuska	421
1959.	Vega de Tera, Španjolska	123–150
1959.	Bhakra, Indija	10

Prilikom potresa u San Fernandu, Kalifornija, 1971. gotovo je popustila zemljana brana Van Norman. Akumulacija je bila upola puna. Stručnjaci misle da bi brana popustila da je akumulacija bila puna i da bi žrtava bilo i do stotinu tisuća, dakle, bila bi to velika katastrofa.

U WASH-1 400 procjenjuje se da je vjerojatnost popuštanja velike brane reda 10^{-4}/godina s 50 % vjerojatnosti da broj žrtava bude 10 000 ili više. Ako je prosječna veličina hidroelektrana 200 MW i raspoloživost 0,5 bilo bi oko 150 žrtava za 10^{18} J proizvedene energije.

Pri proizvodnji energije iz fosilnih goriva, opasnosti, loši utjecaji i oštećenja okoliša nastaju najprije u proizvodnji goriva i pri prijevozu do termoelektrane. Nesreće u rudnicima ugljena svake godine odnose stotine života, a učestale nesreće velikih tankera pri prijevozu nafte ozbiljno oštećuju i ugrožavaju život u morima. Pri izgorijevanju u elektranama nastaje niz štetnih plinova. Najopasnija je emisija sumpor-dioksida (SO_2) jer i ugljen i nafta sadrže nekoliko postotaka sumpora.

U jako indstrijaliziranom evropskim području tzv. kisela kiša kojom se na vegetaciju talože sumporni spojevi postala je jedan od najkrupnijih ekoloških problema. Široka šumska prostranstva zajedno s faunom nalaze se u ozbiljnoj opasnosti. U SR Njemačkoj navodi se postojanje oštećenja u jednoj trećini šumskih područja.

U tablici 5.30. prema studiji Američkog medicinskog društva (American Medical

Tablica 5.30. Usporedba efekata na zdravlje ljudi glavnih ciklusa goriva u proizvodnji električne energije u SAD 1975. godine*

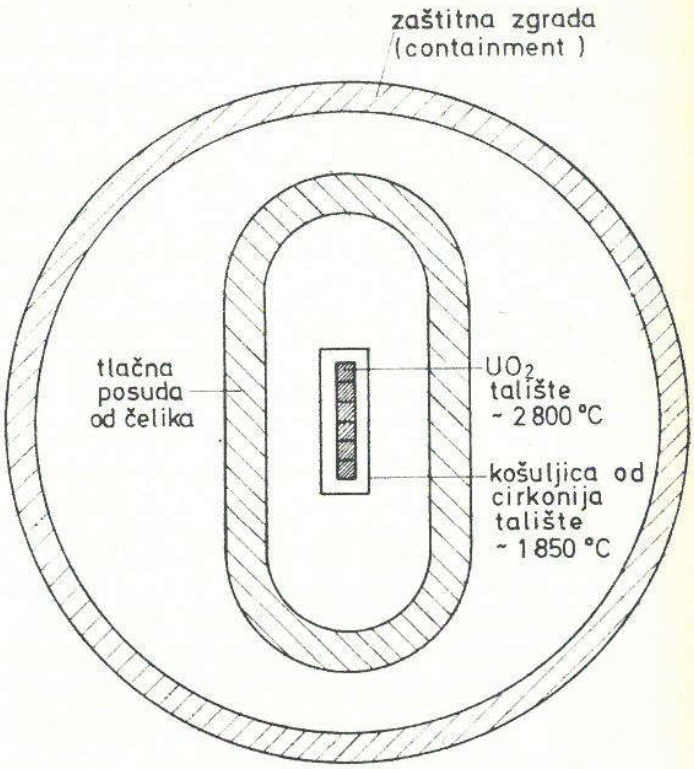
Gorivo	Energija 10^9kW h	Ekvivalentan broj 1 000 MW(e) elektrana, uz raspoloživost 0,75	Procjena smrtnih slučajeva		Procijenjen broj zdravstvenih oštećenja
			Zaposleni	Stanovništvo	
ugljen	844	128	69–1 024	2 250–53 000**	3 300–20 000
nafta	292	44	6–57	44–4 400**	530–4 100
plin	297	45	3–13	–	180–1 080
nuklearno	168	26	0,9–25	0,3–4	100–340
ukupno	1 601	243	79–1 119	2 294–57 400	4 140–25 000

*Izvor: American Medical Association Report C (A – 78), 1978.
**Utjecaj na stanovništvo na bazi epidemioloških studija i procjena emisije čestica i kemijskih zagađivača

Association) navedene su procjene broja smrtnih slučajeva i zdravstvenih oštećenja zbog proizvodnje energije u SAD 1975. godine za zaposlene i za stanovništvo. Procjene se temelje na statističkim odnosima između doza i efekata, s linearnom ekstrapolacijom na male doze. Iako nuklearna energija sudjeluje s malo više od 10% u proizvodnji električne energije, udio u broju žrtava (odnosno zdravstvenog oštećenja) mnogo je manji nego za klasične energetske izvore. Iznosi 1 %—2 % za osoblje zaposleno u proizvodnji energije, a manje od 0,1 % za stanovništvo; dakle, za proizvodnju iste količine energije utjecaj je 5 do 10 puta manji na profesionalno osoblje, a oko 100 puta manji na stanovništvo izvan energetskih instalacija. Međutim, takvi odnosi karakteristični su za rad nuklearnih elektrana dosada, bez teških kvarova u kojima bi bilo i gubitaka života. U javnoj raspravi pita se upravo o vjerojatnosti teških kvarova i njihovim posljedicama.

Specifičnost fisijske nuklearne elektrane jest vrlo velika radioaktivnost nuklearnog goriva, te opasnost koju bi prouzročilo širenje tog radioaktivnog materijala u okoliš. No, daljnja specifičnost nuklearne elektrane koja omogućuje da se to spriječi jest u tome što za oslobađanje energije fisijom ne treba kontakta goriva s okolicom, a za izgorijevanje fosilnih goriva potreban je kisik iz atmosfere.

Nuklearno se gorivo najprije proizvodi u fizički i kemijski stabilnom spoju, najčešće UO_2, iz kojeg se radioaktivni izotopi teško izdvajaju jer je talište uran-oksida oko 2 860 °C. Taj se materijal zatim zatvara u nepropusnu metalnu košuljicu. Slijedeća barijera za prolaz radioaktivnosti jest reaktorska posuda u kojoj se nalazi gorivo. Na kraju se čitav reaktor s rashladnim krugom zatvara u veliku nepropusnu posudu ili zgradu, što je prepreka širenju radioaktivnih tvari u okoliš pri gotovo svim zamislivim nenormalnostima u kojima bi radioaktivnost bila oslobođena iz goriva i reaktorske posude.



Slika 5.32. Barijere širenju fisijskih produkata iz reaktorskog goriva

Zbog dugogodišnjeg iskustva pri upotrebi zračenja u medicinske svrhe, ono je jedan od najbolje istraženih činitelja čovjekove okolice. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (International Commission on Radiation Protection, ICRP) osnovana je još 1928. godine. Na temelju preporuka IRCP donose se nacionalni propisi i preporuke za upotrebu radioaktivnog zračenja ili izlaganje takvu zračenju.

Biološki efekti zračenja

Pri prolazu kroz materijal odnosno tkivo nabijene čestice i elektromagnetsko zračenje djeluju na elektrone i obavljaju ionizaciju otkidajući ih od atoma i molekula za koje su vezani. Tako djeluju i neutroni zbog nabijenih čestica i elektromagnetskog zračenja iz nuklearnih reakcija koje izazivaju u materijalu. Iako i brze nabijene čestice mogu prouzročiti nuklearne reakcije, one mnogo više troše svoju energiju na atomsku i molekularnu ionizaciju.

Mjera za biološke efekte zračenja jest količina energije potrošena odnosno apsorbirana u jedinici mase nekog tijela.

Omjer $\Delta E/\Delta m$ — gde je ΔE energija apsorbirana u masi Δm — naziva se dozom zračenja. Jedinica za dozu, odnosno apsorbiranu dozu jest grej (grey, Gy).

Doza zračenja iznosi 1 grej ako energija apsorbirana u 1 kg materijala ili tkiva iznosi 1 džul. Biološki efekti zračenja ne ovise samo o apsorbiranoj energiji u jedinici mase, nego i o vrsti zračenja.

Ovisnost bioloških efekata zračenja o vrsti zračenja karakterizira se faktorom relativne biološke efektivnosti zračenja — FBE (tablica 5.31). Množenjem apsorbirane doze zračenja s FBE dobiva se ekvivalentna doza zračenja. Jedinica za ekvivalentnu dozu jest sivert (Sv), (Sievert). U novijoj literaturi FBE naziva se faktor modifikacije ili faktor kvalitete Q.

Veza između ekvivalentne i apsorbirane doze dana je relacijom

$$\text{ekvivalentna doza} = \text{FBE} \cdot \text{apsorbirana doza} \qquad (5.12)$$

Ekvivalentna doza omogućuje uporedbu i zbrajanje učinaka različitih vrsta zračenja, ili zračenja iste vrste ali različitih energija, pri određivanju ukupnog biološkog efekta.

Tablica 5.31. Faktori biološke aktivnosti*

Zračenje	FBE
X-zrake, gama-zrake, elektroni	1
termički neutroni	1—3
brzi neutroni, protoni, jednostruko nabijene teže čestice	10
α — čestice, višestruko nabijene čestice	20

*preporuka ICRP;
ICRP 26, Annals of the ICRP, 1977, No. 1, No. 3

Ozračenje u okolišu nuklearne elektrane u normalnom pogonu ili pri kvaru najviše dolazi od beta- i gama-zračenja, pa FBE iznosi jedinicu.

Određivanje odnosa između primljene doze zračenja i učinka tog zračenja predmet je dugogodišnjih istraživanja.

Najautoritativnije procjene pripremaju međunarodne grupe stručnjaka: Komitet za efekte atomskog zračenja Ujedinjenih naroda (UN Scientific Committe on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR), Međunarodna komisije za zaštitu od zračenja (International Commission for Radiological Protection, ICRP), odnosno nacionalne grupe: Komitet za biološke efekte zračenja Američke akademije znanosti (National Academy of Sciences Committee on Biological Effects of Ionising Radiation, BEIR), Nacionalni savjet za zaštitu od zračenja (National Radiation Protection Board, NRPB) u Velikoj Britaniji i druge.

Odnos doza—efekt usklađuju se povremeno prema istraživanjima i novim rezultatima Posljednji izvještaj UNSCEAR jest iz 1977. godine, a zadnji izvještaj BEIR iz 1980. godine.

Biološki efekti zračenja mogu se pojaviti na ozračenom pojedincu, kao i u potomstvu ozračenog pojedinca ako se oštetio nasljedni mehanizam. Prve učinke nazivamo somatskima, a druge genetskim efektima zračenja. Somatski efekti mogu biti rani i kasni. Kasni somatski efekti i genetski efekti slučajni su odnosno stohastički. Pri određenom ozračenju postoji određena vjerojatnost pojave kasnih somatskih ili genetskih posljedica, npr. raznih oblika raka ili leukemije. Rani somatski efekti nisu stohastičke prirode; oni nastupaju u oblicima ovisnim o primljenim dozama. Zbog svoje prirode i ranog nastupanja nestohastički somatski efekti dobro su istraženi i poznati.

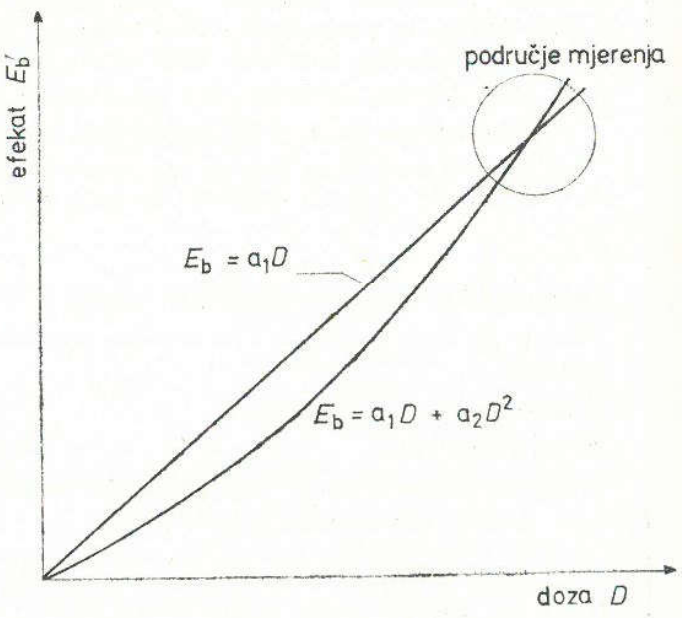
Npr. veće doze od 0,25 Sv uzrokuju promjenu krvne slike, doze od 2 do 3 Sv izazivaju probavne smetnje i radijacijsku bolest. Smrt je moguća u odsustvu terapije. Doza 4 Sv izaziva smrt u 50 % slučajeva, a doza 6 Sv 100 %, osim uz posebno liječenje. Pri dozama 8 Sv

smatra se da je smrtnost 100 % i pored liječenja.

S obzirom na kasnu pojavu stohastičkih učinaka i budući da se ne razlikuju od pojava raka izazvanih drugim uzrocima, određivanje kasnih somatskih i genetskih učinaka zračenja mnogo je teže. Stohastički učinci relativno velikih doza dobro su poznati prema upotrebi zračenja u medicini i prema promatranju učinaka na stanovništvu ozračenom prilikom atomskih eksplozija u Japanu. Međutim, postoje dvojbe o učincima malih doza. Pod malim dozama misli se na doze male prema prirodnom zračenju iz okoliša kojemu smo trajno izloženi. Učinke malih doza zračenja vrlo je teško utvrditi zbog neizbježnih većih istovrsnih učinaka drugih uzroka. Uobičajeno je da se učinci malih doza utvrđuju na temelju linearne ekstrapolacije prema vezi između doze—učinka za veće doze. To je tzv. linearna hipoteza. Postupno prevladava mišljenje da ona precjenjuje učinke malih doza zračenja niske gustoće ionizacije, tj. učinka beta i gama zračenja, ali je do sada korištena kao sigurnija gornja granica za moguće učinke.

U BEIR III (posljednjem izvještaju BEIR) koristi se linearno-kvadratična ovisnost doza—učinak kao odraz novijih istraživanja o utjecaju zračenja na organizme.

Karakteristika linearne ovisnosti između doze i učinka jest da su posljedice određene doze iste ako se ona dijeli na različit broj ljudi, tj. posljedice ozračenja jednog milijuna ljudi s individualnom dozom 10 mSv jednake su posljedicama ozračenja 100 000 ljudi dozom 100 mSv. Stoga se pri primjeni linearne hidoteze može govoriti o kolektivnoj dozi koja se dobiva kao zbroj svih individualnih doza, a posljedice ozračenja skupa pojedinaca mogu se odrediti iz kolektivne doze skupa. Kolektivna doza katkada se izražava jedinicom čovjek—sievert (man-sievert).



Slika 5.33. Linearna i linearno-kvadratična veza između doze D i biološkog efekta nuklearnog zračenja E_b

Različiti tjelesni organi različito su osjetljivi na ozračenje. Najveći je biološki učinak ozračenja reproduktivnih organa, a najmanji kostiju. Ako organizam nije ozračen jednoliko (tako da je svaki organ izložen istoj ekvivalentnoj dozi) valja paziti na to pri određivanju ukupnog učinka ozračenja organizma. Ozračenje nije jednoliko ako je ozračenje male prodornosti, odnosno ako je ozračenje nastalo od radioaktivnosti koje se nalaze u tijelu, a one se iz fiziološko-metaboličkih razloga skupljaju u određenim organima, npr. jod u štitnoj žlijezdi, stroncij u kostima itd. U takvim se slučajevima uvodi efektivna ekvivalentna doza, kao jednolika doza za čitav organizam koja bi imala isti biološki učinak.

Tablica 5.32. Kasni somatski učinci zračenja

Izvještaj	Smrti od raka u milijun stanovnika pri ekvivalentnoj dozi 10 m Sv
BEIR III (1980)	67–226
BEIR I (1972)	115–621
UNSCEAR (1977)	100
ICRP (1977)	125

Smrtnost od raka prikazana je za milijun stanovnika ozračenih ekvivalentnom dozom 10 mSv, odnosno integralnom dozom od 10 000 Sv. Podatak o smrtnosti u izvještaju BEIR III temelji se na linearno-kvadratičnoj ovisnosti doza–učinak. Odgovarajuće brojke za linearnu vezu bile bi 158 do 601, a za čistu kvadratičnu 10 do 28. Komitet BEIR sastavljen od 22 ugledna radiologa u izvještaju BEIR III također izražava mišljenje da nije jasno kod zračenja niske gustoće ionizacije imaju li ekvivalentne doze oko 1 mSv na godinu uopće štetnog učinka. U drugu ruku jednako je teško i dokazati postojanje praga ispod kojeg nema štetnog efekta. Privid praga mogao bi nastati produženjem latentnog perioda za pojavu raka pri malim dozama. Eventualni kasni somatski učinak takvog ozračenja maskiran je drugim utjecajima koji uzrokuju iste učinke. Komitet se također osvrnuo na tzv. Mancuso studiju [Ma 1977] u kojoj je nedavno izražena bojazan da se učinci malih doza potcjenjuju. U studiji su zaključci izvođeni prema analizi broja slučajeva raka u skupini radnika u SAD (Hanford Works, Richland) koji su primali manje doze zračenja. Izneseno je mnogo prigovora studiji, osobito statističkoj interpretaciji podataka. BEIR komitet zaključuje da ta studija, i još neke sa sličnim tvrdnjama nisu pouzdan materijal za procjenu rizika od zračenja.

U tablici 5.33. prikazani su genetski učinci zračenja brojem genetskih nenormalnosti očekivanih u milijun živorođene djece zbog ozračenja roditelja dozom 10 m Sv prije začeća.

Tablica 5.33. Genetski učinci zračenja

Izvještaj	Broj nenormalnosti u 10^6 porođaja zbog ozračenja roditelja ekvivalentnom dozom 10 mSv	
	Prva generacija nakon ozračenja	Ekvilibrij pri ozračenju niza generacija
BEIR III (1980)	5–65	60–1 100
BEIR I (1972)	12–200	60–1 500
UNSCEAR (1977)	63	185
ICRP (1977)	50	200

Drugi stupac prikazuje ekvilibrij (koji se postiže za 5 do 10 generacija za najvažnije učinke) pri ozračivanju uzastopnih generacija ekvivalentnom dozom 10 mSv.

Da bi se u tom kontekstu nešto preciznije odredio pojam genetskih nenormalnosti navedimo da ih je prema upotrebljenim kriterijima bilo oko 100 000 od 10^6 živorođene djece.

Specifičnost opasnosti od radioaktivnog zračenja jest i u tome što se zračenje ne može neposredno osjetiti. Zračenje se otkriva posebnim aparatima, a podatke iz kojih se zaključuje postoji li opasnost ili ne većina ljudi teško razumije. Strah od radioaktivnog zračenja postaje stoga katkad i iracionalan. Javnost je zbunjena i suprotnim izjavama stručnjaka, osobito zato što se ona često iznose bez jasnih polaznih pretpostavki, i što je katkad evidentno da i stručnjaci nisu imuni od apriornih gledišta, odnosno, želje za jeftinom popularnošću.

Dugogodišnja istraživanja pokazuju (v. tabl. 5.32) da ozračenje pojedinaca dozom 10 mSv rezultira s vjerojatnošću oko 10^{-4} za smrtni ishod bolesti od raka u godinama nakon ozračenja.

Utjecaji nuklearne elektrane na okoliš mogu se konkretno i kvantitativno promotriti u odnosu na ove preporuke.

Na osnovu utvrđenih veza između doze i efekta zračenja daju se i preporuke o maksimalnim dozvoljenim dozama za radnike koji rade sa zračenjem, te ostalo stanovništvo. Prema preporuci Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP 26, Annals of ICRP, 1977) iziznosi, ovih doza za organe različite osjetljivosti na zračenje prikazani su u tablici 5.33.a.

Tablica 5.33a. Maksimalne dozvoljene godišnje doze za radnike izložene zračenju, preporuka Međnarodne komisije za zaštitu od zračenja ICRP.

Organ ili tkivo	Doza
koštana srž, reproduktivni organi	50 mSv
koža, kosti, štitna žlijzda	300 mSv
ruke, šake, stopala i zglobovi	750 mSv
drugi organi	150 mSv

Doze za stanovništvo su 1/30 ovih vrijednosti, a doza po pojedincu može dosezati 1/10 vrijednosti doze profesionalno zračenju izloženih radnika.

U normalnom pogonu reaktora emisija radioaktivnosti tolika je da se u blizini elektrane prima ekvivalentna doza zračenja od oko 10 μSv do 20 μSv na godinu — što iznosi oko 1 % do 2 % prirodnog zračenja, kojem smo uvijek i svugdje izloženi. Posljedice prema odnosu doza—učinak nisu mjerljive. To može biti jasnije ako navedemo posljedice doza do 4 Sv istraživane na preživjelim stanovnicima Hirošime i Nagasakija. Kod 83 000 stanovnika praćenih kroz period 1950—1974. procijenjeno je u tom periodu 67 [Be 77] dodatnih slučajeva smrti od leukemije. Očito da efekte hiljadu puta manjih doza nije moguće odvojiti od daleko većih smrtnosti iz drugih uzroka. Druga dodatna zračenja koja su posljedica ljudskih aktivnosti većinom su značajnija. Da drugi zasad neidentificirani uzroci i uvjeti imaju daleko veći utjecaj na smrtnost nego zračenje na nivou koji je mali dio prirodnog, pokazuje analiza smrtnosti od raka u američkim federalnim državama. Za prirodno zračenje doza varira od 1000 μSv do 2500 μSv godišnje. Najveće prirodno zračenje imaju rastućim redom države Nebraska, Idaho, Montana, Utah, Novi Meksiko, Južna Dakota, Wyoming i Kolorado, i godišnja doza prelazi 2500 μSv. Istovremeno, u tim je državama učestalost smrti od raka ispod američkog prosjeka. Iz toga, dakako, ne treba zaključiti da ozračenje smanjuje smrtnost od raka, ali treba uvidjeti da su za učestalost smrti od raka bitniji drugi zasad nepoznati faktori.

Uporno uvjeravanje u sigurnost nuklearne elektrane može prouzročiti nepovjerenje. Nuklearna energija neće i ne treba biti prihvaćena na temelju tvrdnji da ne postoji nikakav rizik, nego na temelju poznavanja i prihvaćanja određenog rizika koji se ne može izbjegnuti ako želimo osigurati dovoljno energije za privredne aktivnosti i građansku upotrebu. Zato je potrebno taj rizik izraziti kvantitativno i usporediti ga s rizicima alternativnih energetskih izvora.

Dakako, postoje i gledišta prema kojima proizvodnju energije treba smanjiti. Ona su često povezana s općom kritikom visoko industrijaliziranog društva koje troši mnogo energije. Takvi prijedlozi mogu biti opravdani za niz vrlo razvijenih zemalja, ali bi ih bilo sasvim neumjesno prenositi u zemlje u kojima je potrošak energije po stanovniku manji barem 10 puta. Uostalom, nije umjesno uživati sve prednosti života u industrijaliziranom društvu uz istodoban superioran intelektualan stav prema njegovim vrijednostima. Većina ljudi ne želi biti gladna i bolesna i umrijeti prije vremena. Industrijalizacija omogućuje da se povoljni uvjeti života malog broja povlaštenih prošire na većinu. Opća kritika industrijaliziranog društva ne brine se za nepovlaštenu većinu.

5.6.2. Razvoj javne rasprave o učincima na okoliš energije fisije

Onaj tko trajnije prati razvoj rasprave o sigurnosti nuklearnih elektrana uočava stalnu promjenu tema koje se nalaze u žarištu rasprava. To odražava veću informiranost i dizanje razine javne rasprave u kojoj javnost i neovisne institucije ulaze u sve detaljnija tehnička pitanja, ali i objektivno pomicanje težišta problema paralelno s razvojem nuklearne tehnologije i regulative. Ne treba potcijeniti doprinos tom razvoju dan putem javnih rasprava, koje se osobito intenzivno vode u SAD i u Evropi.

Rasprave o nuklearnoj sigurnosti u svijetu najčešće su s većim ili manjim zakašnjenjem odjek rasprava iz SAD. To je razumljivo jer se nuklearna energija najviše primjenjuje u SAD. Tempo razvoja tamo je najbrži; u pogonu se nalazi oko 80 velikih energetskih reaktora, te skoro isto toliko u gradnji.

Paralelno s tehničkim razvojem razvijena je i regulativa. Američki postupak izdavanja dozvola za gradnju i pogon nuklearnih elektrana predviđa javne rasprave u raznim fazama [npr. Kn 1975]. Takva, sasvim sigurno pozitivna, zakonska situacija omogućuje utjecaj javnosti. To obvezuje državne institucije odgovorne za razvoj i regulativu te nuklearne institucije da bolje informiraju javnost i uvažavaju mišljenje javnosti. Nedvojbeno je i u nas potrebno moći odgovoriti na različita pitanja i prigovore nuklearnoj energiji, pa i na takva koja su izvan relativno uskih tehničko-ekonomskih okvira. Zbog važnih posljedica uvođenja nuklearne energije to je posebno dužnost onih koji su za taj razvoj odgovorni. Rasprava o nuklearnoj energetici bit će življa kako budu napredovale gradnje nuklearnih elektrana. Tako je bilo i u drugim evropskim zemljama. Sigurno je također, da se mišljenje i odlučivanje javnosti i društvenih organizacija još manje može isključiti u našem samoupravnom sistemu.

U interesu, kako elektroprivrede tako i državne regulative, uključenje javnosti u odlučivanje o nuklearnoj energetici treba što prije tako ozakoniti, kako bi se rasprava usmjerila i razvila na onu pozitivnu i konstruktivnu razinu koja može svima biti od koristi.

Ne prikazujući detaljno razvoj rasprava može se istaknuti najvažnije u raspravama prošlih godina. Intenzivnija rasprava započela je 60-ih godina. Najvažnije teme bile su:

a) učinci emisije radioaktivnosti u normalnom pogonu nuklearne elektrane;

b) toplinski učinci, odnosno toplinsko zagađenje

c) povezanost interesa regulative i razvoja nuklearne energije na štetu sigurnosti.

Rasprava o emisiji u normalnom pogonu usmjerila se na to da li učinke zračenja treba računati s linearnom hipotezom, prema kojoj nema praga intenziteta ispod kojeg zračenje ne bi uzrokovalo učinak, ili su pak učinci doza raspoređenih na velike vremenske intervale manji. U tu, na trenutke i emocionalnu raspravu, u kojoj se npr. pokazivalo genetske defekte, nakaznosti uzrokovane ili navodno uzrokovane zračenjem, uključili su se i stručnjaci, Gofman i Tamplin, te Sternglas. Gofman i Tamplin argumentirali su da je previsoka od ICRP preporučena granična godišnja vrijednost 1 700 μSv. No, kad je tadašnja Američka atomska komisija 1971. godine donijela odluku da se nuklearne elektrane trebaju projektirati tako da doza na granici elektrane ne prelazi 50 μSv, ova je tema rasprave otpala.

Veoma je malo onih koji su danas spremni o tome raspravljati što je sasvim razumljivo kad se taj iznos usporedi s dozama uvijek prisutnih prirodnih izvora oko 1 500 μSv na godinu. Pokazalo se da tehnički nije teško ostvariti taj zahtjev pa su rasprave o emisiji zračenja u normalnom pogonu postale bespredmetne. Kritičarima ranijih, znatno viših, dopuštenih vrijednosti pripada ipak zasluga za poticaj projektantima nuklearnih elektrana da iskoriste tehničke mogućnosti za sma-

njenja u skladu s principom „as low as readily achievable". Da li su pri tom njihove procjene učinka zračenja bile dobre ili nisu, nije više važno.

Rasprava o toplinskim učincima, odnosno o toplinskom zagađenju polazila je od činjenice da današnji termički reaktori imaju nešto lošiji toplinski stupanj djelovanja od konvencionalnih termoelektrana, i da se pojavljuju u jedinicama veoma velike snage, pa vrlo velike količine otpadne topline predaju okolišu. No ta tema nije nikada mogla pokrenuti javnost kao prethodna; toplinsko zagađenje može možda nauditi vodenim organizmima i ribama, ali se teško može povezati s neposrednim ljudskim žrtvama. U sklopu šire rasprave o izvorima energije i njihovom utjecaju na okoliš ta je tema izgubila značaj prigovora nuklearnoj energiji. Pokazalo se da fosilna goriva (jedina ozbiljna alternativa u idućih tridesetak godina) emisijom čestica i plinova kratkoročno i dugoročno mnogo jače onečišćuju okoliš.

Nedvojbeno je da i na toplinske učinke valja paziti. Dugoročno i oni su fizikalna granica za korištenje energije [Kn 1975]. Lokalni toplinski učinci i ne moraju uvijek biti nepovoljni. U nekim slučajevima iskorišteni su ili smanjeni s pomoću rashladnih tornjeva. Pri porastu cijene nafte takvo tehničko rješenje ne utječe bitno na ekonomičnost elektrane.

U intenzivnoj raspravi u početku 70-ih godina o povezanosti, odnosno mogućoj povezanosti interesa regulative i razvoja nuklearne energije, kritičari su tvrdili da objedinjavanje obiju funkcija unutar jurisdikcije i djelokruga Američke atomske komisije ne garantira neovisnost regulative, odnosno nuklearnog zakonodavstva. Takva organizacijska struktura, prema kritičarima, ne isključuje mogućnost podređenosti te regulative interesima razvoja nuklearne energetike, dakle, ne isključuje mogućnost kompromisa na štetu sigurnosti nuklearnih objekata.

Rasprava je bila veoma široka i imala međunarodnog odjeka [vidi npr. Kn 1975]. Njeno je razrješenje uslijedilo kada su dvije funkcije Američke atomske komisije razdvojene siječnja 1975. godine i Američka atomska komisija prestala postojati. Njezinu odgovornost za razvoj nuklearne energetike preuzela je nova organizacija za razvoj energetike ERDA (Energy Research and Development Agency), a regulatorne funkcije u energetici preuzela je također nova organizacija — Komisija za nuklearno zakonodavstvo, NRC (Nuclear Regulatory Commission).

Tako je i ta tema stavljena zapravo ad acta — javnost je zadovoljena jednom ne previše složenom reorganizacijom. Teme koje i dalje ostaju na dnevnom redu rasprave o nuklearnoj energiji, odnosno koje prevladavaju jesu:

— opasnost od teških reaktorskih kvarova,
— opasnost od radioaktivnog otpada,
— opasnost od plutonija.

Probleme oko radioaktivnog otpada već smo promatrali kao nedvojbeno značajno i aktualno pitanje. Vidjeli smo, kao prvo, da danas postoje pouzdani načini da se radioaktivni otpad privremeno spremi barem za nekoliko desetljeća. To omogućuje da se bez vremenskog tjesnaca rješavaju preostali problemi, odnosno da se nađe i izabere optimalan način konačnog odlaganja radioaktivnog otpada.

Opasnosti od teških radioaktivnih kvarova i opasnosti od plutonija još su predmet žive rasprave. Međutim, te opasnosti javljaju se pri nenormalnim okolnostima i njihov značaj ovisi o vjerojatnosti pojave takvih okolnosti. No prije promatranja nenormalnih okolnosti pogledajmo učinke na okoliš pri normalnom pogonu.

5.6.3. Učinci na okoliš pri normalnom pogonu nuklearne elektrane

Prema preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja tablica 5.33.a) dodatna doza koja proizlazi iz upotrebe zračenja i nuklearne energije ne bi trebala biti veća od 5 mSv godišnje, odnosno 1,7 mSv u godišnjem prosjeku za stanovništvo. Za nuklearne elektrane

nacionalni su propisi različiti. Nuklearne elektrane projektiraju se tako da je ozračenje na granici elektrane mnogo manje od vrijednosti koju ICRP preporučuje kao granicu. To je u skladu s dodatnom preporukom ICRP da se ozračenje snizi koliko je to razumno izvedivo („As Low As Readily Achievable"), tzv. ALARA princip. U SAD se na temelju tog principa od 1971. godine primjenjuje propis koji dozu na granici nuklearne elektrane ograničuje na samo 50 μSv. Udaljavanjem od elektrane doza naglo pada, pa je na udaljenosti od 10 km smanjena za više od deset puta. Da bismo bolje shvatili koliko je malo ozračenje unutar granica te preporuke, korisno ga je usporediti s ozračenjem od prirodnih izvora kojemu smo neizbježno izloženi uvijek i na svakom mjestu.

Za ekvivalentnu dozu primljenu od prirodnih izvora možemo navesti samo tipične vrijednosti jer postoje velike lokalne razlike. Zračenje dolazi iz svemira, iz tla, te od radioaktivnosti prirodnih radio-izotopa u našem tijelu. Intenzitet kozmičkih zraka zbog apsorpcije u atmosferi najmanji je na morskoj razini, 350 μSv godišnje, a na visini 3 000 m iznosi do 2 500 μSv godišnje.

Najvažnija prirodna radioaktivnost u našem tijelu potječe od kalija-40, od kojega primamo ekvivalentnu dozu oko 250 μSv godišnje.

Zračenje tla vrlo je različito; od oko 250 μSv godišnje čak do 100 puta viših vrijednosti na nekim mjestima. Tako visoke vrijednosti ipak su iznimne, pa se kao tipična vrijednost može uzeti doza 500 μSv godišnje.

Zbroj je prema tome tipično oko 1 250 μSv na godinu (tablica 5.34), i povećava se za 200 μSv do 300 μSv živimo li na visini 500 m, a za one koji žive na visini 1 500 m povećanje je oko 700 μSv godišnje.

Uz ozračenje prirodnim radioaktivnostima ozračeni smo i zbog raznih aktivnosti čovjeka. Neke od njih nedvojbeno su opravdane, npr. medicinske, a druge, npr. nuklearne eksplozije, nisu.

Tablica 5.34. Tipična struktura doza primljenih prirodnim zračenjem

Zračenje		godišnja doza/μSv
kozmičke zrake		500
interna radioaktivnost tijela		250
radioaktivnost tla		500
prirodno zračenje	ukupno	1 250

U tablici 5.35. pregled je ukupnog ozračenja u Velikoj Britaniji prema podacima za 1978. godinu.

Tablica 5.35. Ozračenje stanovništva u Velikoj Britaniji godine 1978.*

Izvor zračenja	Ekvivalentna doza/μSv	Udio/%
prirodno zračenje	960	74
medicinsko ozračenje	300	23
nuklearne eksplozije	20	1,5
radioaktivni otpad	2	0,2
profesionalno ozračenje	7	0,5
ručni satovi s fluorescentnim brojkama	2	0,2
avionski letovi	6	0,5

*[At 1978]

U nizu zemalja, Japanu, Švedskoj, SAD, medicinskom upotrebom zračenja dobiva se i do tri puta veća prosječna godišnja doza nego u Velikoj Britaniji.

Nuklearne elektrane dodaju ovim dozama sasvim neznatne iznose manje no što su dnevne varijacije u intenzitetu kozmičkih zraka, znatno manje od razlike koja se dobije boravkom u zidanom zdanju umjesto boravkom u drvenom. Već na granici nuklearne elektrane ekvivalentne doze manje su od propisanog iznosa 50 μSv/godina, a još je manji prosjek u širem području. U opsežnoj studiji Američkog fizikalnog društva [APS 1978], kao i detaljnim studijama Američke regulatorne komisije [NR 1976] i

Komiteta Ujedinjenih naroda za učinke ionizirajućeg zračenja [UN 1978], procjenjuju se prosječne ekvivalentne doze iz emisija u normalnom pogonu nuklearnih elektrana i pripadnih instalacija za preradu goriva.

Ako bi se cjelokupna svjetska električna energija proizvodila nuklearnim elektranama prosječno ozračenje bilo bi oko 20 mikrosiverta na godinu; najveći bi dio dolazio od prerade goriva, a samo desetina ove vrijednosti od pogona nuklearnih elektrana. Na visini 10 000 m intenzitet kozmičkog zračenja tolik je da rezultira dozom oko 10 μSv/h. Dakle, za jedan sat leta mlaznim avionom na srednjoj relaciji primili bismo toliko ozračenja koliko i od pogona svih tih nuklearnih elektrana u godinu dana [UN79].

Iz podataka s tablice 5.35. razabire se da bi smanjenjem za samo 1% ozračenja koje nastaje primjenom ionizirajućeg zračenja u medicini smanjili dozu za veći iznos od ukupne doze uzrokovane proizvodnjom nuklearne energije krajem stoljeća. Mnogi medicinski stručnjaci misle da su mogućnosti za smanjenje ozračenja u medicinskim uslugama daleko veće.

5.6.4. Opasnost od plutonija

Kad se govori o štetnosti plutonija, misli se na dvije opasnosti koje se katkad ne razdvajaju dovoljno, iako su potpuno neovisne. Jedna opasnost jest plutonij kao radioaktivan materijal i njegovo djelovanje u organizmu, a druga je opasnost plutonij kao fisibilni nuklid koji može poslužiti u vojne ili terorističke svrhe. Ta druga opasnost danas je manje tehničko, a više političko pitanje koje je bilo predmet mnogih međunarodnih rasprava. Međunarodne aspekte nuklearne energije, uključivši i opasnost od plutonija, promotrit ćemo odvojeno, kako bi se mogao bolje shvatiti razvoj i utjecaj međunarodnih odnosa na nuklearnu energetiku. Ovdje ćemo promotriti opasnost od radioaktivnosti plutonija. U raspravi o toksičnosti plutonija postoje i ekstremna shvaćanja, npr. da je plutonij „najotrovnija tvar poznata čovjeku". Plutonij je najopasniji ako se udahne i dospije u pluća. Ako su čestice plutonij-oksid PuO_2 veličine 0,5 μm — 5 μm, oko 5 % dospjet će u krvotok, zatim u kosti i jetra, gdje će ostati 70, odnosno 35 godina [ICRP, publikacija 19]. Tvrdnja poput gore navedene o ekstremnoj toksičnosti plutonija temelji se na:

a) tzv. hipotezi „vruće čestice", i

b) pretpostavci da će sav plutonij biti raspršen i inhaliran.

Prema tzv. hipotezi „vruće čestice" koju su iznjeli Tamplin i Cockran [Ta 1974] visoka lokalna gustoća doze koju uzrokuju čestice plutonija ima znatno veće posljedice nego ako je ista doza raspodijeljena ravnomjerno u čitavom tjelesnom organu.

Hipotezu „vruće čestice" ispitala su i odbacila mnoga najuglednija stručna tijela u nizu zemalja, npr. Medical Research Council [MR 1975] i National Radiation Protection Board [NR 1974] u Velikoj Britaniji, zatim Akademija nauka (NAS), Nuclear Regulatory Council i Komisija za atomsku energiju (USAEC, Wash-1320) u SAD, te implicitno i Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP). Nalazi tih stručnih tijela temelje se na mnogo činjenica i analiza dugogodišnjeg istraživačkog rada. Ovdje ne možemo iznositi detalje, odnosno činjenice s kojima je teorija u kontradikciji. Navedimo samo jedan istaknuti primjer: 25 radnika udisalo je u laboratorijima Los Alamosa (SAD) plutonij pred više od 35 godina u vrijeme kad se još nije dovoljno pazilo na opasnosti koje postoje. Prema teoriji „vruće čestice" svaki od njih trebao je do 1978. godine dobiti oko 200 puta rak na plućima. Međutim, nitko nije obolio [Co 1978].

Za drugu pretpostavku, tj. maksimalnu disperziju plutonija, realno možemo računati da će prosječno samo nekoliko dijelova od milijun biti udahnuto. U takvim uvjetima (te bez hipoteze „vruće čestice") raspršenje jednog kilograma plutonija u gradskom području moglo bi

prouzročiti oko 40 smrtnih slučajeva. Iz svih nuklearnih elektrana u pogonu dopušteno je emitirati ukupno manje od tri grama plutonija (tablica 5.36).

Tablica 5.36. Propisane granice emisije radioaktivnosti iz nuklearne elektrane i instalacija ciklusa goriva po gigavatgodini proizvedene energije (od 1. XII 1979) (SAD)

Radioizotop	Aktivnost	Masa
	Bq	g
^{239}Pu + drugi α-emiteri, $T_{1/2} > 1$ god.	$1{,}85 \cdot 10^{7}$	$7{,}3 \cdot 10^{-3}$
^{85}Kr*	$1{,}85 \cdot 10^{15}$	300
^{129}I	$1{,}85 \cdot 10^{8}$	50

*Primijenit će se za aktivnosti proizvedene nakon 1.1.1983.

Koliko je to malo može se dobro shvatiti ako se usporedi s masom oko 5 000 kg plutonija dosad izbačenog u atmosferu prilikom testiranja atomskih bombi. Bar dva puta umjetni sateliti vratili su se i izgorjeli u zemaljskoj atmosferi oslobađajući kilograme plutonija iz svojih pogonskih ćelija, a to je već tisuću puta više nego što emitiraju nuklearne elektrane.

Čini se da nisu suviše znanstveno objektivni stručnjaci koje zabrinjava reaktorski plutonij, a ne mnogo veće količine iz pokusnih eksplozija atomskih bombi.

5.6.5. Reaktorski kvarovi i s njima povezani učinci na okoliš

Reaktorski kvarovi mogu biti klasificirani u događaje umjerene učestalosti, pri kojima emisija ne prelazi propise za normalan pogon, zatim događaje male učestalosti pri kojima se mogu osloboditi manje količine radioaktivnog materijala u okoliš nuklearne elektrane, te konačno događaje vrlo male vjerojatnosti s potencijalno teškim posljedicama u okolišu. Takvi, posljednje navedeni događaji, bili su u središtu pozornosti javnosti, iako ih njihov prosječan učinak, izražen umnoškom vjerojatnosti događaja i posljedice pojedinačnog događaja, ne stavlja na prvo mjesto.

Rasprava o vjerojatnostima i učincima velikih kvarova odražava, bar dijelom, instinktivni strah od velikih nesreća, bez obzira na to kako malena bila njihova vjerojatnost. Ne otklanja taj strah račun koji pokazuje da u duljem vremenskom **prosjeku** proizvodnja nuklearne energije, **uključujući i teške kvarove,** uzrokuje manje žrtava nego korištenje fosilnih goriva. Javnost traži ne samo malu prosječnu vjerojatnost nego i smanjenje posljedica najtežeg kvara, ma kako on bio nevjerojatan.

Budući da su fisijski proizvodi vezani najprije u uran-oksidu, materijalu s veoma visokim talištem, te da bi trebali proći tri barijere — košuljicu, reaktorsku posudu i zaštitnu zgradu — da bi prodrli u okoliš, morao bi istodobno zatajiti niz sigurnosnih sustava. Ako bi to bili neovisni događaji, ukupna vjerojatnost za istovremeno otkazivanje bit će izražena umnoškom vjerojatnosti za otkazivanje pojedinih sustava. Ukupna vjerojatnost bit će u takvim uvjetima vrlo mala. Talenje goriva, kao polazna točka u pretpostavci za takav incident, može nastati ako bi zbog nekog razloga izostalo hlađenje jezgre ili ako bi naglo porasla snaga znatno iznad projektnih vrijednosti.

Za razliku od konvencionalnih termoelektrana u fisijskim elektranama snaga u reaktorima može za kratko vrijeme porasti i nekoliko puta iznad normale, poraste li nekontrolirano reaktivnost. Rast snage potrebno je zaustaviti brzo, prije no što se oštete gorivo ili drugi dijelovi reaktora. Osiguranje se postiže najprije takvom konstrukcijom reaktora da posjeduje svojstvo samoregulacije, tj. da porast snage automatski kroz inherentne fizikalne procese smanjuje višak reaktivnosti, a zatim još i s pomoću dodatnih kontrolnih i sigurnosnih sustava.

Nuklearne elektrane posjeduju višestruke, predovoljne, (redundantne) sigurnosne sustave koji osiguravaju gašenje reaktora i hlađenje jezgre u normalnim uvjetima i pri različitim mogućim kvaro-

vima, odnosno nenormalnostima. Među najtežim kvarovima reaktora tipa PWR jest gubitak rashladne tekućine u primarnom krugu jer radioaktivni fisijski proizvodi nastavljaju razvijati toplinu u gorivu (oko 3% od pune snage 5 minuta nakon obustave rada reaktora). U tom tipu reaktora element goriva koji se ne hladi pregrijao bi se u vremenu kraćem od minute, stoga je posebno važan sigurnosni sustav za hlađenje jezgre u nuždi (Emergency Core Cooling System, ECCS).

Zamislivi su ipak sljedovi i koincidencije kvarova zbog kojih bi zakazao taj sustav pa i nastalo taljenje reaktorske jezgre, barem u nekih reaktorskih tipova. Detaljne probabilističke tehničke analize (tzv. Rasmussenov izvještaj, 1974, WASH-1400) pokazuju da se tada mora ostvariti čitav niz dodatnih nepovoljnih okolnosti da bi nastala opasna emisija radioaktivnosti u okoliš, pa je vjerojatnost takvog događaja izvanredno malena, a prosječan utjecaj kvarova neznatan prema utjecaju normalnog pogona.

U diskusijama oko posljedica teških kvarova posebnu važnost ima sustav za hlađenje jezgre u nuždi (ECCS). Procjene posljedica, a pogotovo vjerojatnosti kvara, zavise o pretpostavkama o djelotvornosti tog sustava.

Detaljnija rasprava u javnosti o sustavu za hlađenje jezgre u nuždi počinje izvještajem tzv. Ergenove komisije iz 1967. (Emergency Core Cooling, 1967), u kojem se preporučuju istraživanja potrebna za realniju ocjenu efikasnosti sustava. Da su takva istraživanja doista bila potrebna postalo je jasno kad su objavljeni rezultati dobiveni 1971. u eksperimentalnoj simulaciji reaktorskog kvara (Semiscale Blowdown and Emergency Core Cooling Project). Na eksperimentalnim uređajima mogao se simulirati prekid cijevi najvećeg presjeka u primarnom rashladnom krugu reaktora tipa PWR. Rezultati su bili neočekivani i vrlo nepovoljni; voda ubrizgavana iz sustava za hlađenje jezgre u nuždi bila je iz reaktora izbačena kao i primarna rashladna voda. Bez obzira što su **naknadno** nađena prihvatljiva objašnjenja za takav rezultat eksperimenata (neadekvatan prostorni raspored, samo jedan rashladni krug itd.), ostala je neugodna činjenica da se sve to spoznalo tek nakon eksperimenata. Dotadašnje predodžbe o fizikalnim procesima pri kvaru i analitičke metode njihova proračuna nisu bile adekvatne. Nije realno pretpostavljena brzina vraćanja razine vode u tlačnoj posudi. Prema projektima brzina dizanja razine tekućina trebala je biti oko 25 cm/s. Pažljivije kasnije analize pokazale su da će ta brzina biti samo oko 2,5 cm/s. Posljedice su značajne za sve reaktore tipa PWR.

Eksperimenti iz 1971. godine pojačali su i javnu raspravu o propisima za sustav za hlađenje jezgre u nuždi pa su ti propisi promijenjeni. Najprije je Američka atomska komisija propisala nove privremene kriterije (ECCS Interrim Acceptance Criteria, June 29, 1971), a zatim su — nakon duge i opsežne rasprave u kojoj su osim predstavnika Američke komisije i nuklearne industrije sudjelovali i predstavnici javnosti i neovisnih institucija — revidirani i ti kriteriji (Acceptance Criteria for ECCS, December 28, 1973). Vrlo se opsežno raspravljalo (preko 20 000 stranica teksta) o teoretskom i eksperimentalnom poznavanju tog problema. Za neke aspekte rada sustava utvrđeno je da su adekvatni s obzirom na propisane projektne zahtjeve (Acceptance Criteria), ali za niz mjesta utvrđeno je da nisu adekvatni, osobito u analitičkim modelima i numeričkim metodama, u uvažavanju učinka zapreka protjecanju vode kroz zagrijane kanale jezgre kao i učinka preraspodjele protoka vode pri deformacijama jezgre.

Uočeni problemi i teškoće potaknuli su opsežna istraživanja. Ubrzana je izgradnja eksperimentalnog reaktora toplinske snage 55 MW za ispitivanje ponašanja reaktora pri gubitku rashladne tekućine (Loss of Fluid Test — LOFT). Eksperimenti koji su započeli 1978. godine mnogo se bolje slažu s procjenama na temelju usavršenih i razvijenih računskih programa.

Ipak bit će potrebno razjasniti da li su ekstrapolacije za današnje komercijalne reaktore toplinske snage 3 000 MW dovoljno sigurne.

5.6.6. Rasmussenov izvještaj; studija vjerojatnosti reaktorskih kvarova

U jeku rasprave o kriterijima za ECCS (1972), a vjerojatno njom i potaknuta, Američka atomska komisija inicira izradu studije o vjerojatnostima i posljedicama teških reaktorskih kvarova. S tom zadaćom sastavljena je komisija suradnika Američke atomske komisije i neovisnih savjetnika, pod vodstvom prof. N. C. Rasmussena, šefa Odjela za nuklearno inženjerstvo na uglednom Institutu za tehnologiju u Cambridgeu Massachusetts, SAD (MIT). Rezultate rada komisija je objavila potkraj 1974. u preliminarnom obliku, te pozvala javnost i institucije da iznesu primjedbe. Pošto su primjedbe promotrene izrađen je konačni izvještaj potkraj 1975. godine. Izvještaj, označen kao WASH-1400, vrlo je opsežan, ima više od 2 600 stranica teksta i rezultat je više od 70 ljudi × godina rada (radnih godina) komisije.

Izvještaj WASH-1400 odnosi se na lakovodne reaktore s ključajućom vodom i vodom pod tlakom (BWR i PWR) u nuklearnoj elektrani, ali ne i na instalacije za izradu i preradu goriva. Izvještaj je razmatrao reaktore s tehnološkim karakteristikama komercijalnih reaktora tog tipa, snage 800 MW (e)-1 000 MW (e), u američkim meteorološkim, demografskim i drugim uvjetima.

Konkretno, studija se temeljila na reaktoru tipa PWR *SURRY I* snage 788 MW (e) i na reaktoru tipa BWR *Peach Bottom II* snage 1 065 MW (e), kao referentnim instalacijama. Studija je nastojala indentificirati i probabilistički odrediti sve početne događaje u elektrani koji mogu uzrokovati štetne posljedice za stanovništvo u užem i širem okolišu.

Budući da postoji niz pasivnih i aktivnih sigurnosnih sustava, razvoj od početnog događaja do emisije radioaktivnosti slijed je događaja u kojima mora istodobno zatajiti niz reaktorskih dijelova i sigurnosnih sustava. U izvještaju su analizirani različiti mogući putovi od inicirajućeg događaja do posljedice u okolišu. Na temelju procjene vjerojatnosti zatajivanja pojedinih dijelova i sustava u slijedu događaja, određivala se vjerojatnost posljedice odnosno djelovanja na okoliš.

Razmatraju se također i sljedovi kvarova u kojima zatajivanja nisu nezavisna, jer su izazvana nekim zajedničkim početnim događajem. Primjer bi bio recimo pad aviona na nuklearnu elektranu sa probijanjem zaštitne zgrade i izazivanjem loma primarnog rashladnog sistema, ili težak potres. Dakako da je nakon pretpostavke takvog inicirajućeg događaja razvoj kvara do teških posljedica znatno vjerojatniji. Međutim, ukupna vjerojatnost takvog slijeda zbivanja počinje sa vjerojatnošću samog inicirajućeg događaja, kao dodatnog faktora. Što se navedenog primjera tiče, zaštitna zgrada projektirana je za takav incident, pa je vrlo malena vjerojatnost da pad aviona izazove pretpostavljene incidente, čak i pri namjernom rušenju aviona.

Različiti početni događaji koji uzrokuju određene posljedice, pridonoseći ukupnoj vjerojatnosti te posljedice, poput neke vrste pritoka čine tzv. „drvo kvarova" (fault tree). Pojedini početni događaji sa svojim vjerojatnostima čine grane drveta, a deblo je konačan akcident. Svaka grana slijed je kvarova određenih reaktorskih dijelova odnosno sustava. Za kvarove ventila, pumpi, sklopki i slično vjerojatnost je poznata iz općeg industrijskog iskustva, pa se takve vrijednosti mogu upotrijebiti. Druge specifične kvarove treba istraživati da bi se dobili potrebni podaci.

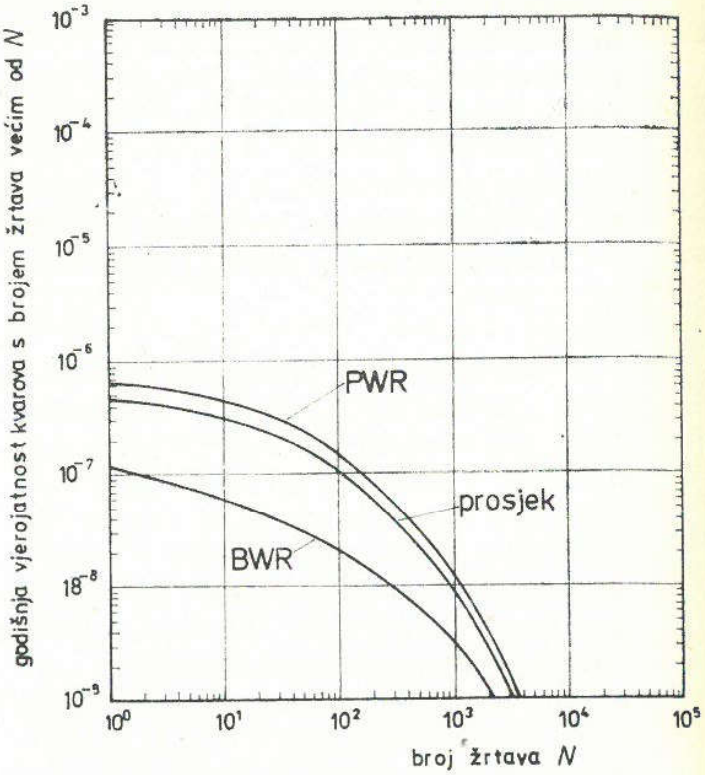
Početni, inicirajući kvarovi općenito su razvrstani u dvije klase. U jednoj su kvarovi pri kojima se gubi tekućina iz primarnog rashladnog kruga, a u drugoj

takvi koji aktiviraju isključenje rada reaktora (Shut down).

Metoda rada komisije nije nova. Bila je korištena i razvijena za potrebe vojnih i svemirskih istraživanja, no u WASH-1400 prvi put je primijenjena za procjenu sigurnosti nuklearnog reaktora. Prema ocjeni stručnjaka u tom području, studija predstavlja razvoj metode probabilističke procjene pouzdanosti sustava i značajan korak naprijed k realnoj procjeni opasnosti od nuklearne elektrane [detaljniji prikaz metodologije vidi npr. u He 1981]. Točnost rezultata određena je poznavanjem vjerojatnosti zatajenja dijelova i sustava te drugih odlučujućih činitelja u razvoju od početnog događaja do emisije radioaktivnosti. Prema dosadašnjem iskustvu s reaktorskim komponentama, a i prema općem industrijskom iskustvu tipično je područje statističke neodređenosti oko 3 puta ispod i iznad „najbolje procjene". Krajnji rezultati izvještaja imaju područje statističke neodređenosti oko 20 puta iznad i ispod najbolje procjene. Iako stručnjaci ocjenjuju da je komisija dala značajniji, odnosno trajniji doprinos metodologiji, u javnosti su mnogo više odjeka imale apsolutne vrijednosti koje je komisija prezentirala.

O tim ćemo procjenama još govoriti. Vrijedan rezultat koji se iz procjena ne razabire jest da je sustavna analiza utvrdila određene dijelove i sustave koji osobito utječu na vjerojatnost kvarova, pa prema tome pruža smjernice konstruktorima za poboljšanje sigurnosti.

S osobitom pozornošću primljen je rezultat analize da je vjerojatnost talenja jezgre zbog zatajivanja ECCS-a veća nego što se ranije pretpostavljalo. No, kao kompenzacija, utvrđeno je da bi i posljedica takvog kvara u najvećem broju slučajeva bila ograničena na sam nuklearni objekt. Povećana vjerojatnost talenja jezgre rezultat je nalaza komisije da osim loma cijevi velikog presjeka i niz drugih kvarova može uzrokovati takve posljedice. Uzevši u račun čitav spektar početnih događaja dobivena je za talenje jezgre vjerojatnost $5 \cdot 10^{-5}$ (1 prema 20 000 u reaktor-godini). Međutim, samo bi



Slika 5.34. Vjerojatnost udesa s brojem žrtava (akutni slučajevi) većim od x, prema WASH-1400

svako deseto talenje jezgre, prema analizama Rasmussenove komisije, uzrokovalo veću emisiju radioaktivnosti u okoliš elektrane. Dakle, vjerojatnost takve emisije jest manja od 10^{-5}. Da bi emitirana radioaktivnost bila u specifičnim vremenskim prilikama još i prenesena u gusto naseljena područja u kojima može uzrokovati velik broj ljudskih žrtava, potreban je stjecaj okolnosti koji vjerojatnost za takav razvoj još znatno smanjuje. Prema Rasmussenovom izvještaju vjerojatnost takvog katastrofalnog akcidenta jest 1 u 10^9.

U tablici 5.37. navedene su akutne posljedice (neposredne žrtve) reaktorskih akcidenata rastuće težine. Lijevo su vjerojatnosti kvara s topljenjem jezgre u 100 reaktora. Samo u 2 od 100 000 taljenja jezgre očekuje se stjecaj okolnosti koji bi uzrokovao broj žrtava procijenjen u posljednjem retku tablice.

Kao broj neposrednih žrtava naveden je broj smrtnih slučajeva koji se očekuje u nekoliko tjedana nakon akcidenta, tj. navedene su, dakle, vjerojatnosti za rane žrtve, bez uključenja kasnih somatskih učinaka.

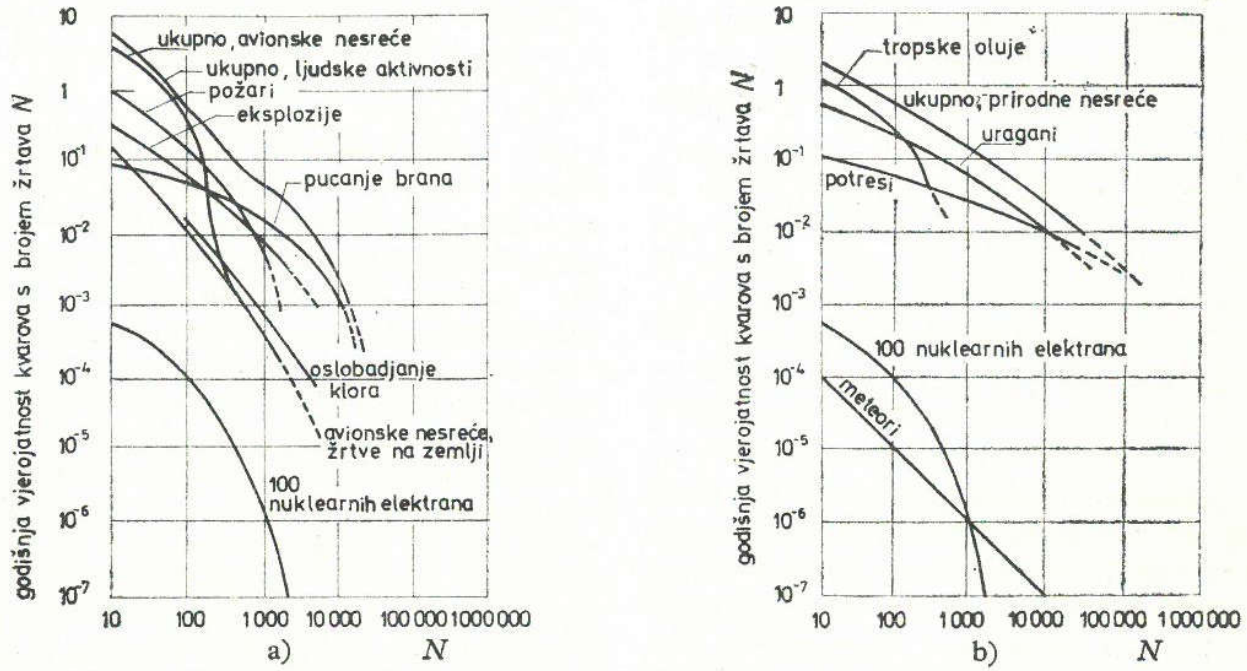
Tablica 5.37. Procjene neposrednih posljedica teških kvarova za sto nuklearnih elektrana prema WASH-1400

Vjerojatnost akcidenta	Broj neposrednih žrtava
1 u 170 godina	0
1 u 10 000 godina	70
1 u 100 000 godina	450
1 u 1 000 000 godina	1 208
1 u 10 000 000 godina	2 300

time prestale, ali se otada raspravlja na višoj i egzaktnijoj razini. U tom razdoblju raspravljanja o reaktorskoj sigurnosti objavljena je i studija Američkog fizikalnog društva (American Physical Society, APS)

5.6.7. Izvještaj studijske grupe Američkog fizikalnog društva o nuklearnoj sigurnosti

U početku 1974. godine Američko fizikalno društvo (APS) osnovalo je po-



Slika 5.35. a) Učestalost nesreća iz različitih ljudskih aktivnosti s više od N žrtava uspoređena s učestalošću nesreća pri pogonu 100 nuklearnih elektrana.

b) Učestalost elementarnih nesreća s više od N žrtava, uspoređena sa učestalošću nesreća pri pogonu 100 nuklearnih elektrana.

Na slici 5.35. vjerojatnosti i posljedice teških nuklearnih kvarova uspoređene su s vjerojatnostima i žrtvama nesreća koje su posljedica ljudske aktivnosti te s elementarnim nesrećama.

Studija WASH-1400 objavljena je u preliminarnom obliku da bi niz institucija i javnost mogli izraziti svoje mišljenje i primjedbe. Nakon analize prikupljenih brojnih i opsežnih primjedbi (više od 3 000 stranica) u konačnom obliku izvještaj je objavljen 1975. godine. Rasprave o teškim reaktorskim incidentima nisu

sebnu grupu za studij sigurnosti lakovodnih reaktora. Predsjednik grupe bio je prof. H. W. Lewis s Kalifornijskog sveučilišta. Nakon godine dana rada, aprila 1975, podnijela je grupa izvještaj savjetu APS kroz revizijski odbor trojice uglednih fizičara (Wolfgang Panofsky, Hans Bethe i Victor Weisskopf).

Uz Rasmussenov izvještaj, izvještaj grupe APS najznačajniji je doprinos razjašnjavanju statusa sigurnosti nuklearne elektrane. Grupa APS radila je potpuno neovisno o državnim institu-

cijama. Njezin je rad također bio neovisan o radu Rasmussenove grupe, a budući da su obje grupe radile gotovo istodobno mogu se obaviti kritičke usporedbe i ocjene. Izvještaj grupe APS objavljen je u Reviews of Modern Physics [APS 1975].

U tekstu revizijskog odbora govori se najprije o opsegu studije i navodi pet osnovnih tema rasprave, tj.:

1. utjecaj elektrane na okoliš u normalnom pogonu,
2. opasnost od kvarova i njihove posljedice,
3. opasnost od sabotaže,
4. sigurnost prijevoza, spremanja i odlaganja radioaktivnog otpada,
5. diverzija nuklearnog goriva za vojnu upotrebu.

Ističe se da je grupa promatrala 1, 2. i 3, odnosno 2. i 3. temu polazeći od stajališta da su učinci na okoliš od nuklearne elektrane u normalnom pogonu mnogo manji od učinaka elektrane iste snage na fosilna goriva.

Revizijski odbor s tim u vezi iznosi svoje stajalište:

„Društvo je naviklo da pogon elektrana na ugljen i naftu uzrokuje štete, opasnosti za zdravlje i brojne gubitke ljudskih života Nasuprot tome, nikad nije bilo značajnije nesreće pri nuklearnom reaktoru, i, osim u rudara u uranskim rudnicima u ranim godinama, nije bilo štete za zdravlje. Zagađenje zraka i vode bilo je zanemarivo u usporedbi s konvencionalnim elektranama slične snage."

Izvještaj se zapravo usredotočuje na točku 2. O točki 3, tj. o opasnosti od sabotaže, u izvještaju se zaključuje da sabotaža može pridonijeti vjerojatnosti teškog kvara, no neće bitno pridonijeti opsegu posljedica. Teme točke 4. i 5. predmet su za buduće rasprave.

Revizijski odbor APS objašnjava shvaćanje grupe o opasnosti od teških kvarova, ograđujući se od ekstremnih stajališta u raspravi o nuklearnoj energiji:

„Upravo zato što dosad nije bilo nikakvog iskustva s ozbiljnim kvarovima, procjena vjerojatnosti i posljedica pokazuje znatnije neodređenosti. Javno mišljenje polariziralo se u, prema našem mišljenju, uglavnom iracionalnoj raspravi, u kojoj protivnici nuklearnih reaktora traže garanciju apsolutne sigurnosti, a zagovornici često prepuštaju odluke stručnjacima. Uvjereni smo da ovaj izvještaj može pridonijeti dizanju razine rasprave."

Iako ostali zaključci izvještaja nisu i ne mogu biti jednako određeni, ipak se u njemu ne nalaze razlozi za nepovjerenje u nuklearni program iz kojeg bi slijedio prijedlog za eventualnu reviziju. Istodobno je dosta detaljno objašnjeno da je potrebno intenzivnije teorijsko i eksperimentalno istraživanje nuklearne sigurnosti:

„U studiji nismo našli razloge za ozbiljniju kratkoročnu zabrinutost (short-range concern) glede opasnosti od akcidenata na lakovodnim reaktorima. Iako se sada ne mogu potpuno kvantitativno procijeniti svi važni aspekti sigurnosti reaktora i njegovog ponašanja u nenormalnim okolnostima, uvjereni smo da će se u idućoj raspravi postignuti znatno bolje kvantitativne procjene, a zatim i bolja sigurnost ako se pojača istraživanje reaktorske sigurnosti, a rezultati primijene. S obzirom na ozbiljne potencijalne posljedice veće emisije radioaktivnosti i već postojeće tehnološke mogućnosti koje mogu pridonijeti sigurnosti, mislimo da je potrebno trajno poboljšavati sigurnost lakovodnih reaktora i tako ublažavati posljedice mogućih akcidenata. Naše su preporuke usmjerene prema tom cilju."

Da bi se bolje shvatio izvještaj grupe APS valja znati da je objavljen u jeku veoma oštre kampanje protiv nuklearne energije koju su vodile grupe ne možda brojne, ali sigurno glasne i vješte u iskorištavanju javnih rasprava obvezatnih u američkoj regulativi pri izdavanju dozvola za pogon i gradnju nuklearnih elektrana.

Takve grupe imaju stručnjake i organizatore, jedan od njih je poznati Ralph Nader, a proklamirani je cilj kampanje obustava gradnje nuklearnih elektrana. Znalačkim korištenjem proceduralnih prava uspjeli su u nizu slučajeva znatno od-

goditi izdavanje dozvola za gradnju i pogon.

U navedenim citatima, i u cijelom izvještaju, grupa APS za reaktorsku sigurnost utvrđuje da je potrebno intenzivirati istraživanja relevantna za sigurnost, te o tome daje i konkretne prijedloge, ali **ne predlaže ni usporenje nuklearnog programa,** a kamoli njegovu obustavu.

Premda se ne može napraviti iole detaljniji prikaz izvještaja zbog namjene i opsega ovog teksta, ne bi bilo korektno ne istaknuti neke razlike prema Rasmussenovu izvještaju. Izvještaj APS i Rasmussenov izvještaj znatno se razlikuju opsegom i detaljnošću. Grupa APS nije mogla analizirati sve sekvence mogućih kvarova. Jedan od teških kvarova koji je grupa promatrala detaljno jest prsnuće reaktorske tlačne posude. Grupa je našla da materijali i postupci osiguravaju znatan faktor sigurnosti i zaključuje da taj kvar ne doprinosi značajno iniciranju akcidenata. No, taj status zavisi o detaljnoj kontroli kvalitete. Detaljnim promatranjem mogućnosti kvarova na primarnom cjevovodu došlo se do sličnih zaključaka.

Poznati slučajevi napuknuća ili kvarova na ventilima uzrokovani su lošom izradom ili konstrukcijom, ali i demonstriraju efikasnost sigurnosnih sustava u otkrivanju kvarova prije no što su se razvili do velikih dimenzija. Nađeni defekti pokazuju da je potrebno da regulativna tijela poboljšavaju tehnike kontrole i inspekcije. Dalje, u vezi s regulativom, grupa APS izražava rezervu prema konceptu tzv. projektnog kvara koji se primjenjuje u analizama ponašanja sigurnosnih sustava. Grupa misli da se prenaglašavanjem projektnog kvara mogu zanemariti drugi mogući kvarovi, kako u projektiranju i konstrukciji, tako i u potupku dozvola i pogona.

Kao što je već istaknuto opseg rada grupe APS bio je znatno manji nego Rasmussenove komisije, pa nisu mogli promatrati sve sekvence koje mogu uzrokovati teški kvar i tako dobiti vlastitu, neovisnu procjenu vjerojatnosti. No, polazeći od procjena vjerojatnosti teškog kvara, danih u WASH-1400, te istih pretpostavki o emisiji radioaktivnosti, grupa APS dobiva druge rezultate u procjeni posljedica, veće za red veličine.

U Rasmussenovom izvještaju za promatrani referentni slučaj teškog kvara navodi se 300 smrtnih slučajeva zbog djelovanja zračenja.

Za isti kvar procjena grupe APS navodi 5 500 smrtnih slučajeva (preračunato na prosječnu gustoću stanovništva od 165 na četvornu milju, odnosno 60/km^2). Iako je vjerojatnost referentnog kvara veoma malena (1 u 200 000 po reaktor-godini u WASH-1400) razlika je velika i potrebno je utvrditi kako je nastala.

Posljedice teškog kvara. Razlika između dviju procjena posljedica za isti referentni kvar, za kojeg se u izvještaju APS polazi od iste vjerojatnosti kao i u WASH-1400, nastaje zbog metodoloških razlika. U WASH-1400 navedene su *neposredne* žrtve, a u izvještaju APS uključeni su i *kasni* učinci. Takvi su učinci dvovrsni. Prvo, APS procjenjuje da će od kasnih somatskih učinaka relativno visokih doza koje su primile osobe u blizini reaktora biti od 1 100 do 5 600 žrtava, a geometrijska je sredina vrijednost 2 500.

Drugo, u procjeni APS uključene su posljedice ozračenja malim dozama brojnog stanovništva u širokom području oko nuklearne elektrane, područja promjera od 30 km do 800 km.

Rasmussenova grupa procjenjuje posljedice za stanovništvo unutar zone u kojoj aktivnost prelazi iznos propisan za evakuaciju stanovništva. Pretpostavlja da će se evakuacija doista obaviti i stanovništvo tako primiti jednodnevnu dozu prije evakuacije. Pretpostavka o evakuaciji nije sporna jer područje nije veliko. (Granica evakuacijske zone određena je na primjer za radioizotop cezij-137 kontaminacijom na razini aktivnosti $3{,}7 \cdot 10^6$ Bq/m^2.)

Drugo povećanje procjene u izvještaju APS nastaje zbog obuhvaćanja pučanstva **izvan** tako određenog evakuacijskog

područja. Glavni su učinci radioizotopa cezija-137 i cezija-134. Njihova su vremena poluraspada 30 godina odnosno 2 godine, pa zemljište ostaje kontaminirano desetljećima nakon akcidenta. Doza kojom se računa u izvještaju APS dobiva se integracijom malih aktivnosti na velikom području izvan evakuacijske zone.

Vremenski, doza je integrirana do beskonačnosti. Za cezij-137 koji i daje najveći dio doza, to je praktički nekoliko puta po 30 godina. Iako se najveći dio doze prima u 30 godina nakon nesreće, za izvještaj se računalo s vremenskim integralom do beskonačnosti, dakle i s ozračenjem generacija koje tek treba da se rode i žive u kontaminiranom području da bi tu bile ozračene.

Moglo bi se, naravno postaviti pitanje o proširenju evakuacijskog područja, odnosno o sniženju granične evakuacijske kontaminacije. Autori izvještaja APS misle da valja primijeniti analizu rizika i dobitaka, odnosno prihvatiti dodatni rizik prema alternativi materijalnog oštećenja zbog napuštanja područja.

Brojka od 5 500 smrtnih slučajeva od raka (pri gustoći stanovništva 60/km^2), dobiva se na temelju pretpostavke da će stanovništvo **izabrati dodatni rizik** pri suočenju s materijalnim gubicima. To i nije iznenađujuće jer se broj žrtava raspoređuje u nekoliko desetljeća u području s velikim brojem stanovnika. Grupa APS opravdava svoju pretpostavku podatkom o tom riziku. Za pojedinca u kontaminiranom području dodatna vjerojatnost za dobivanje raka bila bi 1 u 1 000. Vjerojatnost dobivanja raka zbog drugih uzroka u SAD iznosi 200 u 1 000, i prema tome riziku doista nije značajan dodatak od 1 u 1 000, odnosno pola posto na postojeći rizik. Kao što se vidi razlika dviju procjena ne nastaje zbog različite biološko-tehničke analize učinaka zračenja. Uključenje smrtnih slučajeva raspoređenih u nekoliko desetljeća u učinak teškog kvara mijenja uobičajeno shvaćanje prema kojem se težina nesreće, prirodne ili uzrokovane ljudskom aktivnošću, ocjenjuje prema akutnim učincima neposredno nakon događaja. U komuniciranju s javnošću, a izvještaj APS upućen je javnosti, valja se držati uobičajenih shvaćanja, bez obzira na to što mislimo o racionalnosti takva shvaćanja. Različiti osvrti na izvještaj APS u kojima se rezultati uspoređuju s rezultatima Rasmussenova izvještaja pokazuju da podatak nije shvaćen onako kako bi trebalo prema kontekstu proračuna. Može se prigovoriti izvještaju APS da je ostavio nepotrebnu nejasnoću.

Ako se promatraju samo neposredni kratkoročni uzroci, tzv. akutni učinci, tada izvještaj APS ne osporava nalaze u WASH-1400. Međutim, ako tražimo da se u učinke nesreće uključe sve posljedice, bez obzira kad one nastupaju, tada bi valjalo jednako proračunavati i za ostale izvore energije.

Nije ovdje mjesto za usporedne analize. Ako bi prema procjeni grupe APS dugoročno ukupno bilo između 6 500 i 10 500 žrtava za referentni akcident s vjerojatnošću od 1 u 200 000, tada bi zbog akcidenata pogon 100 nuklearnih elektrana prouzročio gubitak 3 do 5 života godišnje [Be 1975]. Ne računajući uopće učinke plinova i čestica koje emitiraju elektrane na fosilna goriva, nego uspoređujući samo taj broj s godišnjim gubicima života u rudnicima, dobiva se već potpuni narazmjer. 100 nuklearnih elektrana zamjenjuje termoelektrane koje godišnje utroše oko 300 milijuna tona ugljena. Statističke stope rudničkih nesreća različite su u svakoj zemlji, no ne može se izbjegnuti neugodan zaključak da se pri proizvodnji toliko ugljena godišnje izgubi nekoliko stotina života.

Statistike o nesrećama u našim ugljenokopima pokazuju u prosjeku gubitak jednog života za iskop milijun tona standardnog ugljena.

Nedvojbeno je da nuklearna elektrana kao zamjena za termoelektranu na ugljen spašava ljudske živote.

Kakvo se objašnjenje onda može naći za prihvaćanje rizika koji je prouzročen pogonom elektrane na ugljen, a ne prihvaćanje nuklearnog rizika? Nadajmo se

ne samo u tome što je rudnički rizik ograničen na rudare, a ne i na korisnike njihova proizvoda!

5.6.8. Revizija izvještaja WASH-1400

Izradu izvještaja WASH-1400 inicirala je Američka komisija za nuklearnu energiju (USAEC), a završen je u jurisdikciji Američke regulatorne komisije (USNRC) nakon podjele komisije za nuklearnu energiju. Nakon opsežnih rasprava i polemika o rezultatima u WASH-1400, Regulatorna komisija (USNRC) imenovala je revizijsku grupu koju je vodio prof. H. W. Lewis s Kalifornijskog sveučilišta. Revizijska grupa dobila je zadatak da ocijeni ograničenja i rezultate u WASH-1400, te da pomogne regulatornoj komisiji pri utvrđivanju probabilističke metodologije za procjenu opasnosti u regulatornim postupcima. Prof. H. W. Lewis, kao predsjednik revizijske grupe u izvještaju Kongresnom potkomitetu 26. II 1979. iznosi zaključak grupe o WASH-1400 [At 1979]:

„Zaključili smo, prvo, da je WASH-1400 savjestan i korektan pokušaj da se kvantificiraju vjerojatnosti i posljedice reaktorskih kvarova. Iako cilj nije potpuno postignut, to je najbolji izvor informacija o toj tematici. Utvrdili smo da je metodologija ispravna, premda je primjena nesavršena zbog više razloga; npr. zbog nedovoljne kvantifikacije kvarova iniciranih zajedničkim događajima, neadekvatnih podataka, neadekvatnih statističkih metoda.

Našli smo niz mjesta gdje su vjerojatnosti potcijenjene, kao i druga gdje su prema našem mišljenju precijenjene, *ne videći da li bi jedna ili druga odstupanja prevagnula*. Međutim, bilo nam je jasno da faktor greške naveden u izvještaju uvelike potcjenjuje neodređenosti računa. Naš je zaključak stoga da su računi mnogo manje sigurni nego što je prikazao izvještaj, i ja vjerujem da se i Norm Rasmussen s time bar djelomično slaže.

Važno je naglastiti, da to ne znači da su reaktori sigurniji ili manje sigurni nego u njihovom izvještaju, nego samo da smo mi manje sigurni u zaključke."

U izvještaju prof. Lewis iznosi i svoja osobna gledanja na opasnosti od nuklearne elektrane. Ona su značajna jer ih izražava neovisni stručnjak koji je predsjedao i radnoj grupi APS i revizijskoj grupi (a kojeg je dnevnik Washington Post okarakterizirao kao „heroja anti-nuklearnog kulta").

Prof. Lewis kaže:

„Moram reći da se izjašnjavam u prilog nuklearne energije. Za to ima niz razloga; općenito vjerujem da su opasnosti malene; ali da mogućnost krupnih i dosad nepoznatih događaja plaši javnost i dovodi do precjenjivanja opasnosti. Dokazani rizici kopanja ugljena, rizici rata zbog nafte, opadanja u ekonomiji, svi su teži. Od tri pitanja u nuklearnoj raspravi: proliferacija, odlaganje otpada i sigurnost; za prvo mislim da nije rješivo ali se može kontrolirati, za drugo mislim da je rješivo na tehnički trivijalan način, ali nije riješeno, a za treće da je u mnogo boljem stanju nego prva dva. O sigurnosti moje je osobno shvaćanje da u WASH-1400 konzervatine procjene pretežu nekonzervativne i da, osobito, neuzimanje u obzir konstruktivnih ljudskih intervencija pri kvarovima preteže sve ostale".

5.6.9. Druge studije nuklearne sigurnosti

Detaljnije smo opisali nastanak i neke rezultate Rasmussenova izvještaja i raspravu o njemu, budući da je to bio pionirski pothvat u studiju nuklearne sigurnosti. Na mnogim mjestima i dalje se teorijski i eksperimentalno istražuje nuklearna sigurnost.

U američkom državnom energetskom institutu EPRI (Electric Power Research Institute) pokušavaju se točnije odrediti polazne postavke potrebne za procjenu posljedica reaktorskog kvara i tako dobiti realističnije procjene [EP 1979]. Analizirajući kvantitativne učinke u nizu detaljnih primjera dobivaju se gornje granice

neodređenosti u numeričkim procjenama rizika koje su praktički identične s onima u Rasmussenovu izvještaju. Izvještaj EPRI ne prihvaća gledište Lewisove revizijske komisije da su neodređenosti ocjena u WASH-1400 znatno potcijenjene.

U studiji iz istog instituta [Le 1981] uspoređuju se neodređenosti u procjenama vjerojatnosti za taljenje jezgre prema studiji WASH-1400 s dosadašnjim iskustvom pogona lakovodnih raektora. Na temelju podataka o pogonu i nezgodama na lakovodnim reaktorima u SAD, u svijetu i u američkoj ratnoj mornarici načinjena je statistička analiza. Studija WASH-1400 za taljenje reaktorske jezgre utvrđuje vjerojatnost 1 u 20 000. Na temelju činjenice da do 1980. godine nije bilo ni jednog slučaja, u studiji [Le 1981] zaključuje se da procjene vjerojatnosti za taljenje jezgre prema WASH-1400 ne potcjenjuju ni srednju vrijednost ni gornju granicu tog rizika.

Teške kvarove u reaktoru tipa PWR s gubitkom rashladne tekućine koji bi uzrokovali ili bi mogli uzrokovati taljenje reaktorske jezgre analizirao je B. L. Cohen [Co 1982] prema fizikalnim procesima koji se pri tom zbivaju.

Pažljivo promatrajući oslobađanje topline iz fisijskih proizvoda i kemijske reakcije cirkonija s vodom, te odvođenje topline raznim putovima i procesima, Cohen zaključuje da su pretpostavke u WASH-1400 o taljenju jezgre pesimistične, i da to potvrđuje stanovište autora WASH-1400 da u procjenama općenito čine konzervativne pretpostavke.

Njemačka studija nuklearne sigurnosti. Njemačku studiju nuklearne sigurnosti iniciralo je Ministarstvo za znanost i tehnologiju Savezne Republike Njemačke 1976. godine. Izrada i vođenje studije povjerena je Društvu za nuklearnu sigurnost (Gesellschaft für Reaktorsicherheit, GRS) kao glavnom nositelju projekta.

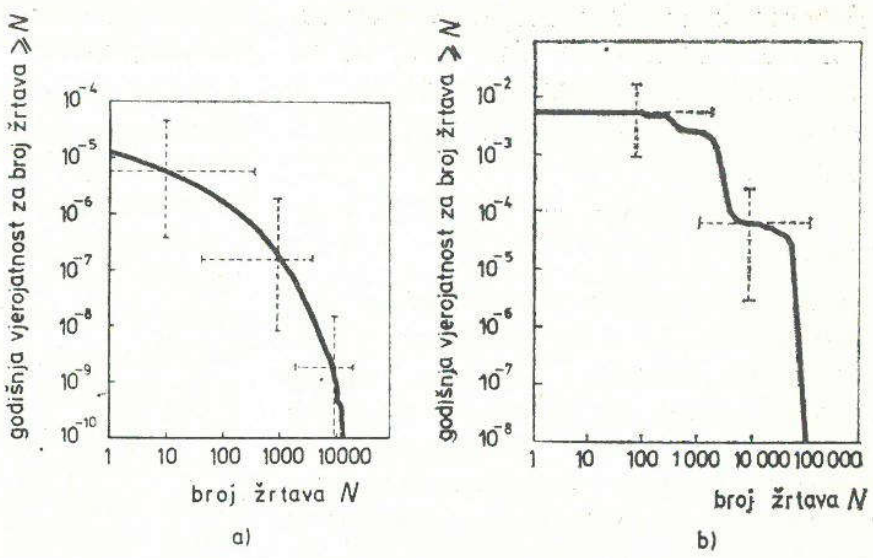
Odgovoran za znanstvenu koordinaciju i vođenje čitave studije bio je prof. A. Birkhofer sa Sveučilišta u Münchenu. Zadatak studije bio je da se u probabilističkoj metodi razvijenoj u američkoj studiji WASH-1400 uvaže specifičnosti njemačkih prilika. U procjeni vjerojatnosti određenih kvarova u njemačkoj studiji polazi se od njemačke referentne elektrane (Biblis A, — reaktor tipa PWR, električna snaga 1 300 MW) s razlikama u sigurnosnim sustavima i njihovim funkcijama. Posljedice se procjenjuju prema njemačkim specifičnostima, a to su npr. znatno veća gustoća stanovništva, različiti klimatski i drugi uvjeti okoliša. Promatrane su i uzete u obzir sve lokacije nuklearnih elektrana (19) u Saveznoj Republici, s ukupno 25 reaktora snage veće od 600 MW (e). Izvještaj, odnosno njegova faza A, završen je 1979. godine. U toj su fazi osim specifičnih karakteristika njemačkih elektrana i njemačkih lokacija, preuzete glavne pretpostavke studije WASH-1400. Razlika postoji u procjeni kasnih učinaka zračenja. U njemačkoj studiji korištena je linearna relacija između doze i učinka, što prema relaciji u američkoj studiji udvostručuje broj žrtava [GRS 1979].

Izrađuje se faza B sigurnosne studije na temelju novih istraživanja i tehnoloških poboljšanja i novih rezultata u fizici i kemiji oslobađanja fisijskih proizvoda što bi trebalo omogućiti realističniju procjenu posljedica reaktorskih nesreća.

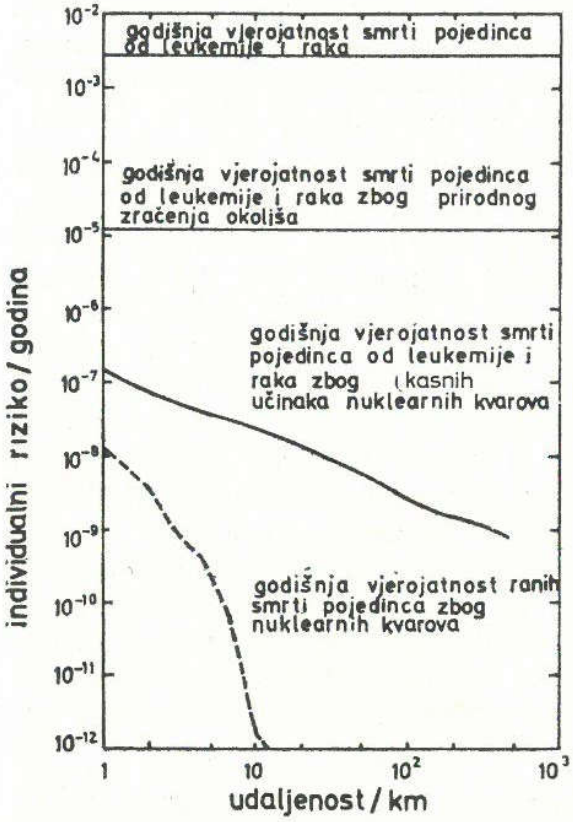
Osim razumljivih razlika zbog odstupanja i poboljšanja ulaznih podataka, rezultati njemačke studije nisu značajnije različiti prema WASH-1400, odnosno, unutar neodređenosti procjena rezultata studije se ne razlikuju.

Rezultati njemačke studije reaktorske sigurnosti prikazani su na slici 5.36. Prikazana je vjerojatnost nesreće s određenim brojem žrtava, kao funkcija tog broja. Dijagram a) prikazuje neposredne žrtve, a dijagram b) kasne smrti od raka i leukemije. U dijagram su unesene granice koje pokazuju intervale u kojima procjena vrijedi s 90% pouzdanosti.

Na slici 5.37. prikazan je individualan rizik od ranih i kasnih učinaka nuklearne elektrane ovisno o udaljenosti pojedinca od nuklearne elektrane. U dijagram su uneseni i rizik za dobivanje leukemije i



Slika 5.36. Rezultati njemačke studije sigurnosti
a) neposredne žrtve b) zakašnjele smrti od raka i leukemije.
U dijagrame su unesene granice 90% sigurnosti procjene.



Slika 5.37. Rizici smrti uslijed akutnih i poznih efekata ozračenja ovisno o udaljenosti nuklearne elektrane, prema njemačkoj studiji nuklearne sigurnosti

raka od svih uzroka, te rizik za dobivanje leukemije i raka od prirodnog zračenja okoliša. I prema potonjem riziku, rizik od rada nuklearne elektrane mnogo je manji, a odnos individualnog rizika od rada elektrane prema riziku od prirodnog zračenja pokazuje odnos ozračenja zbog rada nuklearne elektrane prema ozračenju od prirodnih izvora.

U tablici 5.38. rizik pojedinca u blizini nuklearne elektrane uspoređuje se s rizicima pojedinih aktivnosti, odnosno zanimanja. Nuklearni rizik naveden je iz njemačke studije sigurnosti.

Tablica 5.38. Godišnji rizik izražen kao broj smrtnih slučajeva u milijun stanovnika godišnje. (Nuklearni rizik na temelju njemačke studije nuklearne sigurnosti za stanovništvo u okolišu nuklearne elektrane)

Uzrok rizika	Rizik* (broj smrtnih slučajeva na milijun, godišnje)
zaposlenje (prosjek)	130
zaposlenje u rudarstvu	540
zaposlenje u zdravstvenoj službi	40
kućanstvo i slobodno vrijeme	230
promet (75 minuta dnevno)	240
letenje (1 sat tjedno)	50
privatno letenje (1 sat tjedno)	1 000
udar groma	0,6
strujni udar	4
rak i leukemija, od svih uzroka	2 700
nuklearne elektrane	
akutno ozračenje (rane smrti)	0,01
kasni učinci, smrt zbog raka ili leukemije	0,2

*Nenuklearni rizici prema [Li 1974]

Poboljšanje procjene posljedica kvarova. U procjeni reaktorske sigurnosti mogu se razlikovati dvije različite faze

a) procjena vjerojatnosti zbivanja određenog kvara i

b) procjena posljedica ako bi se kvar dogodio.

Znatan trud uložen je prijašnjih godina u probabilističku metodologiju procjene vjerojatnosti kvara. U novije vrijeme stručnjaci misle da pri procjeni rizika primarni izvor neodređenosti više ne potječe iz procjene vjerojatnosti kvara, nego iz procjena posljedica određenog kvara. Novijim istraživanjima želi se utvrditi realističnije procjenjivanje posljedica kvara, što je vrlo važno za prihvaćanje nuklearne energije u javnosti. Nesreće s velikim brojem žrtava nisu prihvatljive bez obzira na izvanredno malu vjerojatnost. Vrlo odlučna za procjenu posljedica teškog kvara jest pretpostavka o aktivnosti koja se oslobađa pri taljenju reaktorske jezgre. Nedovoljna određenost uzrokovala je konzervativne procjene. U WASH-1400 pretpostavlja se visok stupanj oslobađanja hlapivih sastojaka — ksenona, joda, cezija i telura.

Kritički se raspravljalo o tim pitanjima na specijalnoj sjednici Međunarodne konferencije Američkog i Evropskog nuklearnog društva 1980. godine, te u Američkoj komisiji za nuklearnu regulativu (Nuclear Regulatory Commission). Levenson i Rahn u [Le 1981] analizirali su događaje u kojima je na kontroliran način prouzročeno taljenje jezgre, te nesreću na malom vojnom reaktoru SL-1 1961. godine. SL-1 bio je reaktor s ključajućom vodom, snage 3 MW(e), bez nepropusne zaštitne zgrade. Taljenje jezgre nastalo je prilikom naglog izvlačenja kontrolnog štapa pri održavanju. Premda je rastopljeni dio jezgre sadržavao 19% svih fisijskih proizvoda, manje od 0,1% neplinovitih fisijskih proizvoda dospjelo je u atmosferu tokom dva dana nakon nesreće.

Iz kontaminacije okoliša zaključeno je da je oslobođeno joda-131 aktivnosti $60 \cdot 10^{10}$ Bq od ukupne aktivnosti oko $80\,000 \cdot 10^{10}$ Bq, a još manji dio cezija-137 i stroncija-90.

Pri kvaru elektrane TMI u ožujku 1979. oslobođeno je u okoliš joda-131 aktivnosti $50 \cdot 10^{10}$ Bq, što je samo desetmilijunti dio sadržaja joda-131 u jezgri reaktora, a istodobno je oslobođeno oko 2% plemenitih plinova, što svjedoči da su jako oštećeni elementi goriva.

U dva slučaja — na reaktoru SPERT-1 1962. godine i na reaktoru SNAPTRAN, 1963. godine — u kojima je taljenje jezgre izazvano namjerno oslobođen je znatno manji dio fisijskih proizvoda nego što se očekivalo, a jod se nalazio samo u reaktorskoj vodi. Tako mali dio joda-131 oslobodio se u atmosferu zbog nastajanja i kondenzacije aerosola te kondenzacije joda na hladnijim površinama već nedaleko od rastopljenog goriva.

Ponašanje i oslobađanje joda pri nesrećama u vodom hlađenim reaktorima istraživali su odnosno analizirali nedavno Campbell i suradnici [Ca 1981]. Njihov je zaključak da se jod u gorivu nalazi u obliku jodida, najvjerojatnije kao cezijev jodid, a ne u elementarnom obliku. Najizravnije na to ukazuju eksperimenti [Lo 1980] u kojima su fisijski proizvodi hlapivi pri temperaturama između 1 100 °C i 1 200 °C isprani iz ozračenog goriva i provedeni kroz zlatom obloženi kondenzator uz postupni pad temperature do 200 °C. Tu su se na temperaturi znatno višoj od temperature na kojoj elementarni jod sublimira (184 °C) kondenzirali gotovo svi izotopi cezija i joda.

Zaključuje se da se jod nalazi u obliku jodida, najvjerojatnije kao cezijev jodid. Dakako, nije još sigurno da u kasnijim fazama elementarni jod neće nastati reakcijama u ambijentu primarnog sustava i prostora zaštitne zgrade. Iako se to još mora istražiti, prema Campbellu i suradnicima uvjeti za to bili bi izrazito neplauzibilni, a mogli bi se i isključiti prikladnim preinakama.

Kontaktom jodida s vodom u zaštitnoj zgradi nastala bi stabilna otopina. Da bi se jodid pretvorio u elementarni jod potreban bi bio kontakt s atmosferskim

kisikom prije kontakta s vodom, i to za cezijev jodid pri temperaturama između 700 °C i 800 °C.

Da nisu postojali uvjeti za nastajanje elementarnog joda pokazuje pregled reaktorskih nesreća i eksperimenata u kojima je namjerno prouzročeno oštećenje odnosno taljenje goriva [Mo 1981]. Uvijek kad je u reaktorskom sustavu bila voda, oslobođenje joda bilo je veoma ograničeno i sporo. Ni u jednom slučaju nije u 3 dana oslobođeno više od 0,5% joda. Te činjenice Morewitz [Mo 1981] objašnjava najprije oslobađanjem joda u obliku cezijeva jodida koji je lako topiv u vodi. Postoje samo spori kemijski procesi za oslobađanje hlapivog joda iz vodene otopine. Nastajanje cezijeva jodida Morewitz objašnjuje fizikalno prihvatljivim tumačenjem. Fisijom nastaje oko 10 puta više cezija nego joda. Oba su elementa hlapivi pa migriraju prema hladnijim dijelovima goriva gdje se spajaju u cezijev jodid.

Oslobađanje malog dijela aktivnosti joda Morewitz tumači postupkom stvaranja i aglomeracije aerosola koji nastaju kondenzacijom isparenih fisijskih proizvoda. U prisutnosti zasićene vodene pare aerosoli postaju kondenzacijska središta, raste im masa i njihovo je taloženje ubrzano. U nesreći na elektrani TMI-1 iz jezgre se oslobodilo 30% joda, od toga se u plinovitom obliku u reaktorskoj zaštitnoj zgradi našlo samo 0,6%, a u pomoćnoj zgradi samo 10^{-4}%, a odatle je samo 10^{-5}% bilo oslobođeno u atmosferu. Prema tim i drugim analizama, te prema eksperimentima sve se jasnije može zaključiti da su procjene o oslobađanju joda bile u WASH-1400 previše pesimističke zbog dvaju iznesenih razloga; u analizi se nije pazilo na važne fizikalne procese aglomeracije aerosola i kondenzacije pare na njima, te na stvarne kemijske oblike fisijskih proizvoda. Isto se može prigovoriti i njemačkoj sigurnosnoj studiji. Obje studije prema novim istraživanjima znatno precjenjuju doze nakon nesreće i emisije radioaktivnosti. Prema doprinosu joda-131 ozračenju stanovništva u prvim tjednima nakon teškog reaktorskog kvara, značilo bi to bitno smanjenje u procjenama učinaka takvih kvarova. Levenson ističe [Le 1981] da bi smanjenje emisije joda samo za 20 puta jako promijenilo procjene o broju žrtava. Ozrači li se 2 000 ljudi dozom od 5 Sve, bit će 1 000 neposrednih žrtava. Ozračenje 20 puta manjom dozom od 0,25 Sv neće uopće prouzročiti neposredne žrtve. Kasni učinci zbog ozračenja stanovništva pri nesreći ili od ozračenja iz tla (radioaktivnostima joda prenesenog aerosolima) smanjili bi se toliko koliko je smanjena emisija. Zbog toga bi se morale drastično smanjiti procjene u izvještaju APS.

Svibnja 1982. objavljeni su rezultati njemačkih istraživanja oslobađanja joda obavljenih u Nuklearnom istraživačkom centru Karlsruhe [Kö 1982]. Prema tim nalazima emisija joda u kvarovima s talenjem jezgre mnogo je manja nego što je pretpostavljeno u Njemačkoj studiji sigurnosti, pa ta studija daleko precjenjuje posljedice kvara. Na temelju toliko smanjene emisije ne bi pri kvarovima s taljenjem jezgre uopće bilo neposrednih žrtava. Kasni učinci bili bi pak smanjeni za više od sto puta. U toku su nova istraživanja u Centru Karlsruhe u kojima se taljenjem više stotina kg goriva simuliraju uvjeti kvara. Takva istraživanja ne obavljaju se naravno samo u SAD i SR Njemačkoj, a rezultati biti će od velike važnosti.

U nizu zemalja u kojima se razvija ili se aktivno usvaja nuklearna tehnologija u toku su opsežna istraživanja nuklearne sigurnosti. Zbog znatnih troškova i zajedničkog interesa programi se sve više povezuju i internacionaliziraju. Istraživanja se koordiniraju unutar EEZ i dodatno povezuju s istraživanjima u SAD i Japanu. Čini se da se nešto slično odvija i u zemljama SEV-a. Uređaja kojima se testiraju pojedine komponente ili gorivo ima dosta, ali nema mnogo instalacija u kojima se mogu obavljati integralni eksperimenti, tj. ispitivati ponašanje čitave elektrane pri nesreći. Te su instalacije najkompleksnije i najskuplje. Nuklearni uređaj za istraživanje ponašanja sustava za proizvodnju pare pri gubitku rashladne tekućine u reaktoru tipa PWR

jest američki *LOFT*. Nuklearni je dio uređaja reaktor snage 50 MW(t). Za istu svrhu izgrađene su instalacije u kojima se nuklearna toplina simulira električkim grijačima. To su uređaj PKL u SR Njemačkoj za ispitivanje reaktora tipa PWR s 4 rashladna kruga, uređaji ROSA III i ROSA IV u Japanu za ispitivanje BWR, odnosno reaktora tipa PWR, te instalacija LOBI u istraživačkom centru ISPRA u Italiji. U Kanadi (eksperimentalni uređaji R4, R12 i R14) i Japanu istražuje se sigurnost reaktora s tlačnim cijevima i teškom vodom kao moderatorom. Nakon analiza sigurnosti u Americi i Njemačkoj ti se uređaji više koriste za istraživanje manjih kvarova. Analize su pokazale da manji kvarovi s gubitkom rashladne tekućine zbog mnogo veće učestalosti daju znatno veći doprinos vjerojatnosti talenja jezgre nego teški inicijalni lomovi.

Vrlo su važna istraživanja fizičkih i kemijskih procesa pri oslobađanju fisijskih proizvoda i njihovom širenju u okoliš.

Na instalaciji *Marviken* (Švedska) priprema se međunarodni program ispitivanja goriva.

Eksperimentalno se istražuju oni dijelovi i sustavi za koje je probabilističkom teorijskom analizom utvrđeno da bi zatajivanjem s najvećim vjerojatnostima prouzročili teške kvarove. Procjenjuje se da se za ispitivanje nuklearne sigurnosti u Zapadnim zemljama troši godišnje više od 500 milijuna dolara. Može se očekivati da će se u idućim godinama s pomoću istraživanja poboljšati nuklearna sigurnost smanjenjem vjerojatnosti teškog kvara, i smanjenjem posljedica koje teški kvarovi mogu prouzročiti u okolišu. U procjenama vjerojatnosti kvarova i njihovih posljedica mogu se očekivati realističnije i određenije vrijednosti. Već dosadašnji rezultati ukazuju na zaključak da teški kvarovi vodom hlađenih reaktora neće imati ozbiljnih utjecaja na okolno stanovništvo.

Nuklearna regulativa u našoj zemlji. O nuklearnoj regulativi i sigurnosti nije se u razdoblju nakon prestanka rada SKNE dovoljno brinulo te nas je gradnja NE *Krško* zatekla nespremne organizacijski i kadrovski, a i bez potrebne zakonske regulative.

Ne postoje profesionalni stručno specijalizirani upravni organi prijeko potrebni pri izdavanju dozvole za gradnju nuklearne elektrane te pri izdavanju pogonske dozvole. U postupku izdavanja dozvole za gradnju svakako su potrebne detaljne i kompleksne sigurnosne provjere projekata objekata i instalacija. Taj se rad ne može zamijeniti radom na sjednicama, bez obzira kako reprezentativne bile komisije, niti uslugama institucija za koje to nije ni obveza, ni primaran i trajan posao. Praćenje i inspekcija provođenja gradnje u skladu s izdanim odobrenjima traži također opsežnu i stručnu inspekcijsku službu, kakva također još nije osnovana. Očito je da u mnogim organizacijama i tijelima još nema pravog razumijevanja problema. Budući da nisu razrađeni vlastiti nuklearni sigurnosni propisi i standardi, za NE Krško traženo je da mora zadovoljiti sigurnosne propise u zemlji isporučitelja, tj. u SAD. Međutim, mogućnosti vlastite provjere sigurnosnih procjena isporučitelja još su vrlo ograničene i tek se razvijaju. Usvajaju se kompleksni računski programi za analizu nenormalnih pogonskih stanja nuklearne elektrane i njihovih potencijalnih utjecaja na okoliš.

Na temelju iskustva pri izgradnji NE *Krško* razvija se i regulativa. U prosincu 1976. u Saveznoj skupštini donesen je Zakon o zaštiti od ionizirajućeg zračenja. Novi nuklearni zakon, čije donošenje predstoji, treba mnogo određenije definirati postupke i uvjete pri gradnji i pogonu nuklearnih elektrana. Na temelju tog zakona vjerojatno će se osnovati adekvatna regulativna tijela i inspekcije.

Značajan korak naprijed u razvoju naše regulative jest Savezni propis iz 1979. godine koji obvezuje na usvajanje dijelova nuklearnih standarda i preporuka koje razrađuje i priprema Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE). Završetkom tog opsežnog posla (1985. godine) u kojem sudjeluju brojni stručnjaci u nuklearnoj sigurnosti iz niza zemalja te niz međunarodnih organizacija, bit će

stvoren cjelovit sustav preporuka, postupaka i standarda u nuklearnoj regulativi. Preporuke i standardi detaljno će obuhvatiti područja regulatorne i kontrolne organizacije, lokacija, projekata i pogona nuklearnih elektrana, kontrolu kvalitete itd.

U sustav će biti ugrađena iskustva u nuklearnoj regulativi niza nuklearnih zemalja te usaglašavanje proizvođača, izvoznika i korisnika nuklearnih elektrana. Sustav postupaka, propisa i standarda u nuklearnoj sigurnosti MAAE pružit će zemljama koje ulaze u nuklearnu energetiku adekvatnu i razvijenu nuklearnu regulativu.

Nesumnjivo bi najracionalniji pristup za našu zemlju bio da se maksimalno iskoristi taj sustav i ogromno međunarodno iskustvo na kojem se on bazira.

5.6.10. Nesreća u elektrani „Otok tri milje"

U nuklearnoj elektrani *Otok tri milje* (Three Miles Island, TMI) kod Harrisburga u SAD na reaktoru PWR tipa, snage 900 MW(e), dogodio se 28. III 1979. teški kvar. Nakon četiri dana nejasnoća i pometnje, situacija je došla pod kontrolu. Iako je učinak na okoliš bio malen, materijalna je šteta na elektrani bila ogromna — reaktor je onesposobljen za rad, barem za nekoliko godina. Iako zbog opsega učinka na okoliš pri kvaru na TMI, nije potrebna revizija zaključaka iz probabilističkih analiza, ipak je taj kvar pokazao niz slabosti u pristupu reaktorskoj sigurnosti. Specijalna stručna tijela analizirala su taj kvar i utvrdila mjere koje bi trebalo poduzeti da bi se spriječilo ponavljanje takve nesreće.

Dva tjedna nakon akcidenta predsjednik Carter imenovao je komisiju, (tzv. Kemenyjeva komisija prema predsjedniku I. G. Kemeny-ju) koja je trebala akcident detaljno ispitati i analizirati te donijeti odgovarajuće preporuke.

U izvještaju predsjedniku Carteru komisija je utvrdila opseg djelovanja na okoliš. Prema izvještaju, doza zračenja za osobe unutar pola milje bila je 1 mSv, a manje od 1 μSv na 20 milja.

Ukupna kolektivna ekvivalentna doza za stanovništvo u krugu polumjera 50 milja ($\sim$ 80 km) s 2 166 000 ljudi procijenjena je na 35,5 Sv, što na temelju relacije doza-učinak uzrokuje približno 0,7 slučajeva raka (Ka 82). Dakle, to je sasvim neznatan učinak koji se i ne može utvrditi (prema statistici o učestalosti ove bolesti u SAD u tom istom stanovništvu zbog razloga koji nemaju ništa zajedničko sa zračenjem, ukupno će oboljeti od raka oko 325 000).

Prema tome utjecaji na okoliš od nesreće na TMI bili su primarno u psihičkom opterećenju okolnih stanovnika. Istodobno, zbog goleme materijalne štete ponavljanje takvog kvara nije dopustivo. To je bio razlog za prilično oštre ocjene i preporuke u izvještaju komisije.

Relativno neznatan kvar razvio se u ozbiljno oštećenje goriva kombinacijom pogrešne indikacije razine vode u tlačniku i pogrešne reakcije operatora koji je sat nakon početka nenormalnosti isključio glavnu cirkulacijsku pumpu. Prestalo je hlađenje, gorivo je ostalo bez vode i pregrijalo se tako da su košuljice goriva bile oko 90% oštećene. Kad je pumpa ponovo stavljena u pogon, nastala je reakcija vode s pregrijanim cirkonijem uz razvoj vodika.

Komisija kritizira dotadašnji prilaz sigurnosti koji se previše koncentrirao na najteži projektni kvar — s implicitnim shvaćanjem da se za lakše kvarove ne treba zabrinjavati ako je težak kvar pod kontrolom.

„Pri kvarovima u kojima se lome cijevi velikog presjeka potrebna je vrlo brza reakcija, koja se stoga izvodi automatski. Manji kvarovi razvijaju se mnogo sporije pa njihova kontrola može ovisiti o odgovarajućoj akciji posade. Tragedija nuklearne elektrane MTI bila je u tome što su manji kvarovi od onih koji su detaljno proučavani zbunili svojim učincima osoblje koje je pokušavalo obuzdati kvar. Potencijalno beznačajan kvar razvio se u TMI u kvar s

teškim oštećenjem reaktora. Budući da se takve kombinacije manjih kvarova mogu očekivati mnogo češće nego najteži lomovi, moraju se opsežno i temeljito analizirati. Uz to operatori i nadzorno osoblje mora temeljito razumjeti rad elektrana da bi mogli reagirati na kombinacije malih kvarova."

Međutim komisija nije svu odgovornost prebacila na operatore elektrane. Niz propusta pripisan je kompaniji odgovornoj za pogon elektrane, npr.: neadekvatno obučavanje operatora, nejasnoće u pogonskim postupcima, neprihvaćanje pouka iz prijašnjih kvarova, neadekvatnosti u izvedbi komandne prostorije.

Kemenyjeva komisija podnijela je predsjedniku Carteru niz preporuka za nuklearnu regulativu i Regulatornu komisiju, kojoj bi glavna djelatnost trebala biti osiguranje sigurnosti. Dane su preporuke i nuklearnoj industriji i kompanijama koje koriste elektrane, kako bi mogle djelotvornije intervenirati pri kvarovima i bolje pripremiti operatore.

Komisija je utvrdila da nisu adekvatni planovi za postupke pri ugroženosti okolnog stanovništva i pri obavještavanju javnosti u izvanrednim situacijama, te je i o tome iznijela preporuke. Komisija je također podnijela i niz preporuka za tehnička poboljšanja.

Predsjednik Carter 7. XII 1979. objavljuje da se slaže s duhom i intencijom preporuka komisije, te da će nastojati provesti one preporuke koje su u okviru njegovih ovlasti, tražeći i od Regulatorne komisije i nuklearne industrije da postupe prema preporukama. Istodobno se američki predsjednik odlučno izjasnio za nuklearnu energiju:

„Nuklearna energija jest opcija koju moramo držati otvorenom." te

„Svaki vlastiti izvor energije, uključivši i nuklearnu energiju, jest dragocjen želimo li osloboditi našu zemlju od prevelike ovisnosti o nestabilnim izvorima skupe uvozne nafte. Ne možemo si dopustiti luksuz napuštanja nuklearne energije ili stavljanje duljih moratorija za njihovu daljnju upotrebu."

Neposredno nakon izvještaja Kemenyjeve komisije počelo je provođenje pojedinih preporuka. Tako nuklearna industrija osniva Institut za pogon nuklearnih elektrana (Institut of Nuclear Power Operations, INPO) i Centar za analizu nuklearne sigurnosti (Nuclear Safety Analysis Center, NSAC). Pogonski institut INPO analizirat će pogonska iskustva postojećih reaktora, kako bi se osiguralo da se ta iskustva prenesu pogonskom osoblju. Osnovna zadaća INPO bit će podizanje razine školovanja pogonskog osoblja i kvalitete upravljanja elektranama.

Nesreću u TMI imala je i širok međunarodni odjek. Iako se neke od preporuka odnose na američki sustav regulative, niz preporuka imao je opći značaj pa je utjecao na različite mjere zaštite.

Predložena je i međunarodna evaluacija nuklearne sigurnosti, analogno prema međunarodnoj evaluaciji ciklusa goriva. Prijedlog je 1979. godine podnio tadašnji njemački kancelar Schmidt na zajedničkoj konferenciji Foratoma i Evropskog nuklearnog društva u Hamburgu.

Zaključno o nuklearnoj sigurnosti

Rasprava u javnosti o reaktorskoj sigurnosti razvija se od početka 70-ih godina. Značajna etapa bila je studija WASH-1400 koja je uvela probabilističku metodologiju i detaljnu analizu. Utvrđivanjem dijelova i sustava koji relativno mnogo doprinose riziku poboljšana je sigurnosti. Probabilistička metodologija ima i ograničenja. Informacije o pouzdanosti pojedinih dijelova imaju vrlo široke granice pogreške. Pita se kolika je pouzdanost tih dijelova u uvjetima za koje nema prethodnog iskustva, te možemo li biti sigurni da su u analizu uključeni svi inicirajući događaji.

U budućnosti je sve manje vjerojatno da se u analizu ne uključe neki početni događaji. Metoda treba više odnosno određenije obuhvatiti i pozitivne i negativne učinke ljudske intervencije (primjer za negativne jest incident na elektrani TMI u SAD), odnosno treba utvrditi mjesta na kojima neadekvatna reakcija osoblja može biti inicirajući događaj.

Analizom vjerojatnosti zatajivanja dijelova i cijelih sustava te sekvencija kvarova koji mogu uzrokovati konačnu tešku nesreću identificiraju se oni dijelovi i sustavi koji razvoju kvara doprinose s najvećim vjerojatnostima. Na temelju probabilističkih analiza slijedile su brojne preporuke za modifikaciju takvih dijelova i sustava, kako bi se smanjile vjerojatnosti velikog kvara. Nuklearna sigurnost istražuje se trajno, pa se na temelju rezultata poboljšava sigurnost i razumijevanje problema.

Probabilistički pristup razvio se iz nastojanja da se opasnost kvara na kompleksnom sustavu odredi što realnije. Bio je to napredak prema prijašnjem pristupu u kojem se propisao „najteži projektni kvar" (maximum credible accident, MCA) za koji su se projektirali sigurnosni sustavi. Takvim se pristupom još teži, zamislivi kvarovi od „najtežeg projektnog" nisu uzimali u obzir (kao nevjerojatni) pa se analitički nije procijenila njihova vjerojatnost. Osim toga zbog usredotočenja na najteži projektni kvar može se potcijeniti učinak manjih, ali mnogo vjerojatnijih kvarova.

Probabilistički pristup omogućuje da se propišu sigurnosni kriteriji koji obuhvaćaju sve kvarove, od učestalih do vrlo rijetkih. U Velikoj Britaniji predlaže se projektni kriterij za nuklearne elektrane tako da rizik smrti neposredno nakon kvara ne bude veći od 10^{-6} godišnje, i od $5 \cdot 10^{-5}$ zbog naknadnih učinaka [Gr 1978].

Za usporedbu ilustrativno je pogledati neke godišnje vjerojatnosti nesreća u tablici 5.39. Navedeni su podaci za Veliku Britaniju. Nesreće o kojima se u javnosti manje brine vjerojatnije su barem 100 puta od nesreće uzrokovane nuklearnom elektranom.

Tablica 5.39. Godišnja vjerojatnost smrti pojedinca zbog raznih uzroka u Velikoj Britaniji [At 1972]

sve nesreće	$8 \cdot 10^{-4}$
prometne nesreće	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$
padovi u kući, sve dobi	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$
0—45 godina	$0{,}4 \cdot 10^{-4}$
45—65 godina	$3{,}6 \cdot 10^{-4}$
stariji od 75 godina	$2{,}6 \cdot 10^{-3}$
leukemija, prirodni uzroci	$5 \cdot 10^{-5}$
rak štitne žlijezde, prirodni uzroci	10^{-6}
udar groma	$5 \cdot 10^{-7}$

Nuklearni rizik može se usporediti npr. s rizikom pri vožnji automobilom ili željeznicom. U Velikoj Britaniji prvi iznosi godišnje $1{,}22 \cdot 10^{-4}$, a drugi $3{,}3 \cdot 10^{-6}$. Ako bi se netko želio udaljiti iz blizine nuklearne elektrane koja uzrokuje rizik od smrti iznosa 10^{-6}/godina, pa je zbog toga produžio svoje putovanje kolima, onda bi već produženje vožnje za 0,5 km dnevno bila veća dodatna opasnost nego živjeti uz nuklearnu elektranu.

Pokušajmo odrediti rizik od smrti za pojedinca koji je uzrokovan proizvodnjom električne energije raznim tipovima elektrana. Procjene žrtava među zaposlenima u svim fazama pripreme materijala, gradnje, pogona i održavanja za niz energetskih izvora prikazane su u tablici 5.28. No za niz izvora postoje i učinci na stanovništvo koji mogu biti veći od učinaka na zaposlene. Procjena ukupnog rizika treba obuhvatiti i jedne i druge učinke. Za najvažnije razvijene izvore to je načinjeno u nizu studija, kao što su npr. GESMO iz 1976. [GE 1976], MITRE izvještaj iz 1977, izvještaj komisije Ujedinjenih naroda UNSCEAR iz 1977 [UN 1977], Nacionalnog centra za analizu energetskih sustava u Brookhavenu u SAD (NCAES).

Kakav je nuklearni rizik?

Najprije stradaju ljudi zaposleni u svim fazama izgradnje i pogonu elektrane. Taj se broj može vidjeti u tablici 3.28. (Holdren i suradnici). Prikazano za gigavatgodinu broj žrtava iznosi 0,5—1.

Kolektivne doze zračenja za zaposlene prema spomenutim studijama u granicama su između 10 i 40 siverta. Daljnji doprinos nuklearnom riziku jesu somatski i genetski učinci od zračenja stanovništva. Nesreće s oslobađanjem radioaktivnosti, prema WASH-1400 uzrokuju kolektivnu dozu od 3 siverta po gigavatgodini proizvedene energije (Sv/GWa). Učinci normalnog pogona nuklearnih elektrana i svih instalacija ciklusa goriva procijenjeni su u spomenutim studijama, kao i studiji Američkog fizikalnog društva za cikluse goriva [APS 1978] u intervalu od 5 do 25 Sv/gigavatgodina. Detaljna analiza komisije Ujedinjenih naroda za učinke zračenja u izvještaju iz 1977. godine daje 23 siverta po gigavatgodini. Pochin [Po 1980] sumira kolektivnu dozu za stanovništvo u granicama 5—25 Sv/GWa i dozu za zaposlene od 10

do 40 Sv/GWa na ukupno ozračenje kolektivnom dozom 50 Sv/GWa. Procjenjujući somatske učinke s 1,25 smrti od raka za 100 Sv, a genetske s 0,8 smrti za 100 Sv, i uzevši sve genetske učinke kao smrtne slučajeve, nastaje ukupno 1 smrtni slučaj za 50 Sv kolektivne doze koja se dobiva proizvodnjom energije 1 gigavatgodina (GWa). Zajedno s nesrećama zaposlenih ukupno imamo 2 smrtna slučaja za gigavatgodinu. Jedna gigavatgodina ili 9 TWh sada podmiruje potrebe 4 do 5 milijuna stanovnika, ili buduće potrebe za oko 2 milijuna ljudi. Nuklearni rizik prema tome iznosio bi tada 2 žrtve godišnje u 2 milijuna stanovnika, odnosno 10^{-6} na godinu.

Rizik pri proizvodnji energije iz ugljena sastoji se najprije iz dosta velikog rizika pri nesrećama zaposlenih u rudnicima, zatim rizika pri prijevozu ugljena, te gradnji i pogonu elektrana. Procjenjuju se oko tri žrtve po gigavatgodini proizvedene energije [Po 1980], a isto toliko smrtnih slučajeva zbog plućnih bolesti rudara. Procjene učinaka na stanovništvo zbog emisije čestica i plinova pri izgorijevanju ugljena kreću se još u širokim granicama, iako nešto manjim nego prijašnjih godina. NCAES daje procjenu od 5 do 40 žrtava za gigavatgodinu, a u MITRE izvještaju navodi se 2 do 25 žrtava po gigavatgodini za moderne termoelektrane.

Uzevši 10 žrtava kao srednju vrijednost zajedno s žrtvama među zaposlenima dobiva se oko 15 žrtava za gigavatgodinu proizvedene energije. Za naftu učinci emisije procijenjeni su približno toliko ili malo manje, uz slične neodređenosti. Stopa nesreća u zaposlenih jest manja, iako nesreće na tankerima, platformama za bušenje i naftnim terminalima nisu zanemarive. Nema rudarskih bolesti, te se procjenjuje da je ukupno 10 žrtava za gigavatgodinu (Pochin).

Za hidroenergiju broj nesreća zaposlenih procijenjen je na analogan način, polazeći od statističkih podataka o nesrećama u pojedinim aktivnostima, te prema opsegu tih aktivnosti u gradnji i pogonu hidroelektrane. Rizik za stanovništvo procjenjuje se prema podacima o poginulima pri pucanju brana. Ukupno se dobiva 3 do 5,5 žrtava za gigavatgodinu.

Rezultati su prikupljeni u tablici 5.40. koja za 4 energetska izvora navodi broj smrtnih slučajeva za GWa proizvedene električne energije. Prikazane su srednje vrijednosti i granice procjena. Iako u tablici nema obnovljivih izvora energije, određena usporedba ipak se može napraviti. Množenjem s faktorom 10 dobiva se količina proizvedene energije kao u tablici 5.28, koja navodi žrtve samo među zaposlenima za 10^{18} J proizvedene toplinske energije. Na primjer 20 žrtava među zaposlenima i stanovništvom pri proizvodnji 10^{18} J toplinske energije nuklearnim elektranama povoljno je usporedi li se s brojem žrtava samo među zaposlenima ako je izvor sunčana energija ili vjetar (prema tablici 5.28). Neposredni učinci na stanovništvo nastali pogonom tih izvora vjerojatno će biti neznatni ili maleni. No, moraju postojati znatni neizravni učinci zbog emisije industrijskih zagađivača upotrebom velikih količina materijala i energije u izgradnji uređaja. Pri proizvodnji čelika koristi se ugljen, a energija pri proizvodnji svih ostalih materijala i konstrukcija dobiva se najvećim dijelom od ugljena i nafte. Budući da su potrebne relativno vrlo velike količine materijala i energije, i neizravni utjecaji na stanovništvo moraju biti znatni.

Tablica 5.40. Procjena broja smrtnih slučajeva u proizvodnji gigavatgodine električne energije (nesreće i oboljenja)

Izvor energije	Smrtni slučajevi			
	zaposleni	stanovništvo	ukupno	granica procjene
ugljen	~6	~10	~15	8–40
nafta	1–2	~10	~10	4–35
hidroenergija	2–4	1–1,6	~4	3–5,5
nuklearna energija	~1,5	~0,5	~2	1–3[b]

[a] Prema Pochinu [Po 1980].
[b] Na temelju granica procjene doza za stanovništvo u studijama UNSCEAR 1977, APS 1978, GESMO 1976, UN Environment programme, Part II, Nucler Energy, 1979.

Svrha takvih usporedbi nije dokazivanje da je nuklearna energija sigurniji izvor od drugih, nego da se pokaže kako se uvođenju nuklearne energije ne može prigovarati zbog utjecaja na okoliš. Za samo malo izvora, npr. za zemni plin, može se tvrditi da su prema tom kriteriju povoljniji. Usporedbama se želi pokazati da je podjela izvora energije na „čiste" i „prljave" — u kojoj su sunce, vjetar i valovi čisti, a nuklearna energija i ugljen prljavi — zapravo besmislica

jer se ne temelji na činjenicama. Takva rasprava krivo je usmjerena. Iako je učinak ugljena na okoliš najveći, mi bez ugljena ne možemo. Zato moramo razvijati postupke i tehnologije s pomoću kojih bi se njegov utjecaj na okoliš smanjio. Tako će se ujedno smanjiti i neizravni utjecaji na okoliš sunčanih i drugih obnovljivih izvora koji koriste difuzne oblike energije.

Nuklearna fisijska energija već sad pokazuje povoljne karakteristike prema učincima na okoliš pa bi taj izvor energije morao smanjiti ovisnost o ugljenu i nafti. Sunčana energija (ili npr. energija vjetra) ima privlačnih karakteristika, koje su i promotrene u četvrtom dijelu pa je njihov doprinos proizvodnji energije, dakako, poželjan.

Međutim, valja paziti da ih se ne propagira krivim razlozima. Ako bismo njihovo uvođenje i razvoj temeljili samo na tome da su „čisti" izvori, mogli bi ostali kriteriji za procjenu povoljnosti energetskih izvora biti zanemareni. Budući da objektivno prosuđivanje nije jednostavno i da su za to potrebni kvantitativni pokazatelji, pa i pažljive studije, javnost je često bila neosnovano uznemirivana opasnostima od nuklearne energije. Izvještaji „istraživača" željnih popularnosti o učincima zračenja objavljivani su ispod krupnih naslova, npr. poput tvrdnje notornog dr Sternglasa o porastu smrtnosti novorođenih u američkoj državi Pensilvaniji nakon nesreće u elektrani „Otok tri milje" [St 1981]. Nisu tako objavljivana ozbiljna službena istraživanja koja su otkrila i pokazala njegovu neznanstvenu konstrukciju i pogrešnu interpretaciju podataka [Da 1981].

Usporedbe učinaka različitih izvora energije trebaju potaknuti i razumno postavljanje sigurnosnih kriterija za nuklearne elektrane. Oni su vrlo strogi. Mogu se još dalje postrožiti i zadovoljiti. Tehničkih zapreka za to nema, kao što nema ni tehničkih zapreka da se npr. potpuno ukloni emisija sumpornih plinova pri izgorijevanju ugljena ili nafte. Međutim, takvi zahtjevi imaju i ekonomsku cijenu. Nije dovoljno reći da ljudski život nema cijene, ili nešto slično, ma kako to moglo plemenito i humano zvučati u prvi tren, odnosno izazvati aplauz. Sredstva su ograničena, pa ih i sa gledišta humanosti treba ulagati tamo gdje je učinak najveći, a u poboljšanju sigurnosti tamo gdje će učinak na smanjenje broja žrtava biti najveći. Motreći tako čini se da nova ulaganja u nuklearnu sigurnost ne bi imala opravdanja. Zanimljivi su podaci koje o tome daje Cohen, a navedeni su u tablici 5.41.

U analizi [Co 1980] je istraživana potrebna visina ulaganja u raznim aktivnostima koja bi povećala sigurnost toliko da bi se spasio jedan ljudski život.

Tablica 5.41. Potrebna ulaganja u razne aktivnosti da bi se spasio jedan ljudski život (dolari 1975)

Medicinska briga i pregledi	
rak na plućima	70 000
rak dojke	80 000
kontrola tlaka	75 000
dijaliza bubrega	200 000
Promet	
poboljšanja na upravljačkom stupu osobnih kola	100 000
helikopteri za prvu pomoć	65 000
cestovni znakovi i opomene	34 000
smanjenje opasnosti klizanja osobnih kola	42 000
Razno	
cijepljenje u Indoneziji	100
pomoć u hrani (Afrika)	5 300
uklanjanje sumpora iz ugljena za elektrane	500 000
Aktivnosti povezane sa zračenjem	
rendgenski pregledi u medicini (poboljšanje)	3 600
reaktorska sigurnost	7 000 000
kontrola emisije nuklearne elektrane*	10 000 000
kontrola emisije joda-131*	100 000 000

*Na temelju uputstva američke NRC da u skladu sa ALARA principom treba ići u redukciju emisije zračenja do troškova 1 000 $ za smanjenje kolektivne radioaktivne doze stanovništva za 10 mSv-čovjek.

Vidljivo je da bi potrebno ulaganje bilo izrazito najviše u nuklearnim aktivnostima jer je za njh već postignut vrlo visok sigurnosni standard. Citirajmo komentar Cohena:

„... *čini se da je teško moralno opravdati razlike. Moglo bi se čak tvrditi da je veoma nemoralno potrošiti sto milijuna dolara da bi se izbjegao gubitak jednog života zbog emisije joda-131, ako se istim sredstvima može spasiti 2 000 života ulože li se ona u programe poboljšanja medicinske službe ili sigurnosti prometa za koje nema dovoljno sredstava.*"

Možda se ne moramo složiti sa sudom prema kojem se pretjerivanje u zahtjevima za nuklearnu sigurnost naziva nemoralnim. Ono je vjerojatno dijelom iracionalno, a dijelom se temelji na nepoznavanju stvari i na utjecaju antinuklearnih grupa. Očito je da valja bolje upoznavati javnost s pravim odnosima i činjenicama.

Kad rezultati probabilističkih procjena postanu i određeniji i nesporni, vjerojatno će se više istraživati ekonomski učinci kvarova koji manje utječu na okolicu, ali uzrokuju veće štete. Može se zaključiti da je nuklearna elektrana neznatna opasnost za okoliš. Ona manje oštećuje okoliš od gotovo svih alternativa, pa njezino uvođenje doprinosi smanjenju oštećenja okoliša. Osobito onečišćuje okoliš ugljen, alternativa koja će biti veoma važna u idućim desetljećima. Međutim, valja naglasiti da malen utjecaj na okoliš i sigurnost nije inherentno svojstvo energije fisije. Naprotiv, nuklearna elektrana sadrži vrlo opasne radioaktivne materijale, a njezine povoljne sigurnosne karakteristike rezultat su posebne pažnje pri proizvodnji nuklearne energije. Visok stupanj sigurnosti osigurava se složenim sigurnosnim sustavima, redundancijom komponenata kritičnih za sigurnost, detaljnom regulativom, visokim stupnjem stručnosti osoblja u nuklearnoj elektrani itd.

U zemljama koje uvode nuklearnu energiju osnivaju se institucije koje studiraju sigurnost nuklearnih elektrana, prate i naziru njihov rad. Dozvole za gradnju i pogon nuklearnih elektrana izdaju se tek nakon detaljnih i iscrpnih analiza mogućih djelovanja na okoliš (konačan sigurnosni izvještaj za NE *Krško*, a koji je uvjet za dobivanje odobrenja za pogon, obuhvaća više tisuća stranica). Današnji stupanj nuklearne sigurnosti postignut je dugogodišnjim trajnim razvojem koji se temelji na iskustvu pogona, povoljnom i nepovoljnom. Nova iskustva i dalje doprinose razvoju nuklearne sigurnosti. Dakle, nemamo objektivnog razloga da bi sigurnosna pitanja nuklearnih elektrana mogla ili trebala biti zapreka za razvoj fisijske nuklearne energije. Ako je za SAD nuklearna energija izvor kojega se oni ne mogu odreći, da parafraziramo američkog predsjednika, to pogotovo vrijedi za druge zemlje mnogo siromašnije u alternativnim izvorima. No, razvoj mora biti praćen djelotvornim oblicima osiguranja i kontrole nuklearne sigurnosti, kao prijeko potrebnog sastavnog dijela uspješnog iskorištavanja fisijske nuklearne energije.

5.7. Uran, potrebe i zalihe

5.7.1. Potrebne količine urana

Procjene potrebnih količina urana ovise o pretpostavljenoj dinamici izgradnje nuklearnih elektrana i o pretpostavljenom uvođenju reaktora s boljim iskorištenjem urana. Pregled potreba ovdje prikazan temelji se na kanadskoj studiji za Svjetsku energetsku konferenciju (World Energy Conference, WEC) objavljenoj 1978. godine i prihvaćenoj kao osnovni dokumenat za INFCE (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation), međunarodni skup stručnjaka koji je tokom 1978. i 1979. godine detaljno promatrao niz ključnih elemenata u razvoju nuklearne energetike, napose one povezane s gorivom.

U procjeni potrebnih količina urana polazi se od prognoze o porastu potrošnje električne energije, također izrađene za WEC uz pretpostavku porasta 4,2% godišnje u zemljama OECD-a, i 6,9% u zemljama u razvoju. Procjena se temelji na pretpostavci razvoja nuklearnih elektrana do sudjelovanja s 50% u proizvodnji električne energije, a s uvođenjem u mrežu kad instalirana snaga neke zemlje pređe 5 000 MW(e).

U tablici 5.42. prikazan je razvoj za zemlje OECD (Sjeverna Amerika, Zapadna Evropa, Australija, Novi Zeland, Japan) i ostala područja (Latinska Amerika, Srednji istok i sjeverna Afrika, Afrika južno od Sahare, istočna Azija, južna Azija), izuzevši zemlje SEV-a i NR Kinu.

Tablica 5.42. Projekcija izgradnje nuklearnih instalacija u svijetu — prema WEC 1978.

Područje	Instalirana snaga /GW (e) 1975.g	1985.g	2000.g	2020.g
OECD	68	247	955	2 423
ostali	1	23	186	100
ukupno	69	270	1 141	3 423

U tablici 5.43. ta je procjena uspoređena s projekcijom Agencije za nuklearnu energiju OECD-a (Nuclear Energy Agency, NEA) i s prognozom grupe WAES (Workshop on Alternate Energy Strategies). Dosta široki rasponi procjena odražavaju neodređenosti u procjeni razvoja nuklearne energetike. Procjene u sklopu INFCE kretale su se od 850 GW(e) do 1 200 GW(e) za 2000. godinu i 1 800 GW(e) do 3 900 GW(e) za 2025. godinu.

Tablica 5.43. Usporedba projekcija razvoja nuklearnih elektrana

Godina	Projekcija instalirane snage /GW (e) WEC	NEA	WAES	INFCE	MIPSA
1985.	270	278–368	291–412		)
2000.	1 141	1 000–1 890	913–1 772	850–1 200	do 1 600
2020.	3 423	—	—		do 7 000
2025.	—	2 157–6 650	—	1 800–3 900	

Na temelju dinamike izgradnje nuklearnih elektrana pretpostavljene od WEC određene su potrebne količine urana za dvije dugoročne strategije (tablica 5.44).

Tablica 5.44. Kumulativne količine urana za predviđene nuklearne elektrane do godine 2020.

Pretpostavljena nuklearna strategija	OECD*	Ostali**	Ukupno svijet
A uran za termičke reaktore bez recikliranja/10^6t	13,0	4,8	17,8
B uran uz uvođenje FBR/10^6t	7,0	4,8	11,8

*Sjeverna Amerika, Zapadna Evropa, Australija, Novi Zeland, Japan

**Bez zemalja SEV-a i NR Kine

Prema prvoj varijanti (A) koristili bi se termički (lakovodni) reaktori bez recikliranja. Prema drugoj varijanti (B) nakon termičkih (lakovodnih reaktora) gradili bi se oplodni reaktori s pretpostavljenim vremenom udvostručenja od 24 godine. Pretpostavlja se njihovo uvođenje u Sjevernoj Americi 1993. godine, u Zapadnoj Evropi 1987. i u Japanu 2000. godine.

Kumulativne potrebe urana navedene su u milijunima tona. Kumulativne potrebe do određene godine uključuju uran potreban za 30-godišnji radni vijek uz raspoloživost 0,7 za elektrane stavljene u pogon do te godine.

U materijalima INFCE znatno je razrađeniji pregled potrebnih količina urana za različite reaktorske strategije. Međutim prema kakvoj će strategiji uistinu teći razvoj ne može se odrediti.

Prema sadašnjim izgledima nuklearni programi u području OECD ostvarivat će se usporeno pa će se tako smanjiti i problemi opskrbe uranom. Nakon incidenta na elektrani *TMI* 1979. godine u nizu zemalja OECD došlo je do usporavanja i zastoja u narudžbama novih nuklearnih elektrana. U tome se ističu SAD i SR Njemačka, no sve je jasnija diferencijacija između zemalja za koje je nuklearni program nezamjenjiv, kao Japan ili Francuska i onih koje još imaju

obilje konvencionalnih izvora. U svakom slučaju efekti usporavanja u nuklearnom programu održavat će se do 2000. godine u izgradnji nuklearnih kapaciteta u području OECD-a ispod procjena na tablici 5.43, dok će se efekat smanjenih potreba za uranom osjećati još znatno duže, naravno.

Točnije procjene smanjenja nuklearnog programa i nove dugoročnije prognoze još predstoje.

Na osnovi tablice 5.4.b. i tendencija koje se iz nje razabiru (smanjenja narudžbi elektrana u jednom dijelu zapadnih zemalja, i intenziviranje nuklearnog razvoja u Istočnoj Evropi i SSSR-u) može se za 2000. godinu postaviti granice procjene instalirane snage između 450 i 550 GW(e). Period iza 2000. godine mnogo je neizvjesniji.

S obzirom da je vrijeme od donošenja odluka do pogona nuklearne elektrane dugo, 10 godina, pa i više, jasno je da se stanje sredinom 80-tih godina mora bitno odraziti na 2000. godinu. Čak i za ubrzani tempo stavljanja nuklearnih elektrana u pogon iza 2000. godine količine urana prema tablici 5.44. vjerojatno su znatno predimenzionirane. Smanjenje nuklearnih programa nije samo efekat TMI nesreće, nego i općih svjetskih ekonomskih kretanja koja su posebno neugodna za zemlje u razvoju. Takva smanjenja i odlaganja ne bi bila povoljna za niz zemalja u razvoju bez vlastitih fosilnih goriva jer bi njihovom razvoju upravo nuklearna energija mogla bitno doprinijeti. Jugoslaviji je dugoročno potrebno nekoliko desetaka tisuća tona urana, znatno više nego što ima u vlastitim izvorima, pa je osiguranje dobave urana jedno od najvažnijih pitanja dugoročnog razvoja fisijske energije u našoj zemlji.

Ocjenjujući objektivne okolnosti treba očekivati da će zemlje Zapadne Evrope i Japan morati pojačati razvoj nuklearne energije. Također će biti manje problema pri prihvaćanju nuklearnih elektrana jer će se objasniti i poboljšati sigurnost, a cijena alternativa postat će previsoka. Razvoj nuklearne energije u SSSR-u i zemljama SEV-a već pruža drukčiju sliku. Relativno manjeg opsega u početku, program razvoja nuklearne energije postaje sve impresivniji jer ne prolazi kroz krize poput onih u koje su ti programi ušli na Zapadu. Intenzivan nuklearni razvoj mogao bi SSSR pretvoriti u jednog od najvažnijih izvoznika energije već na prelazu stoljeća. Taj program obuhvaća gradnju serije elektrana u zemljama SEV-a. Nije isključeno da će potkraj 80-ih godina taj program biti zanimljiv i za zemlje u razvoju.

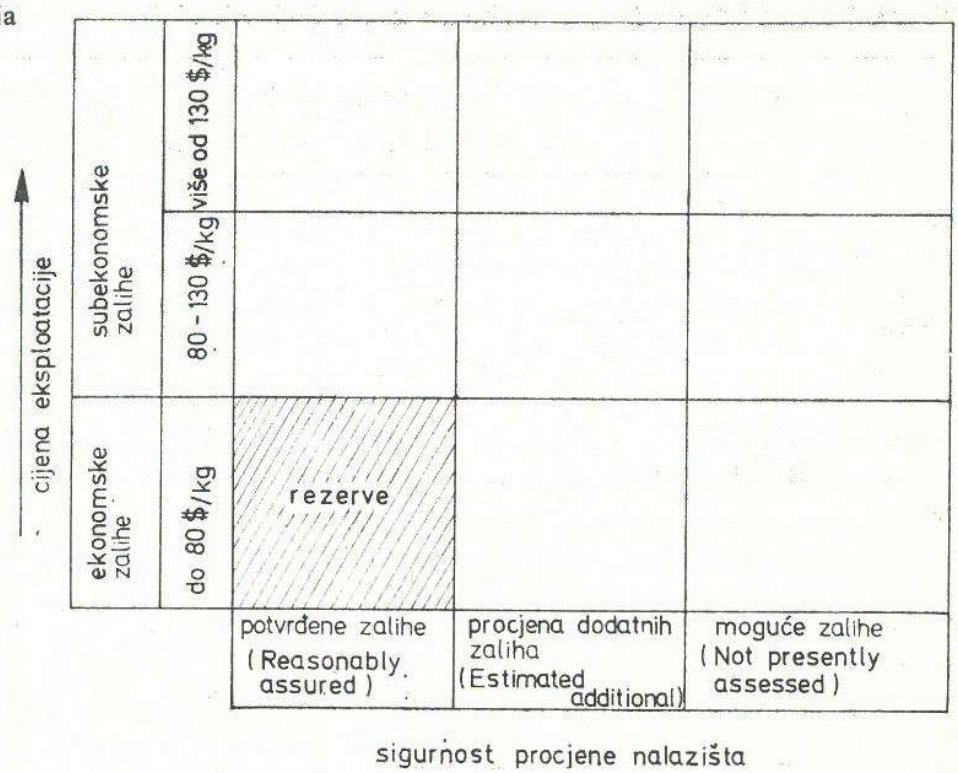
5.7.2. Rezerve fisijskog goriva

Iako se lančana reakcija može održavati s fisijom urana-235, plutonija-239 ili urana-233, jedino se uran-235 nalazi u prirodi kao sastavni dio elementa urana, a plutonij-239 i uran-233 sekundarni su fisijski materijali koji nastaju u reaktorima apsorpcijom neutrona u uranu-238 i toriju-232. Inicijalne lančane reakcije za te pretvorbe mogu se dobiti samo s uranom-235, pa je količina tog izotopa, odnosno količina prirodnog urana odlučujuća za procjenu potencijala energije fisije. Elemenat torij sadrži samo jedan izotop torija-232 koji nije fisibilan te se njime ne može uspostaviti lančana reakcija. No pretvorbom u uran-233 on postaje značajan fisibilni materijal.

Kad se govori o rezervama fisijskog goriva misli se stoga ponajprije na rezerve urana, koje se istražuju osobito pozorno. Rezerve, torija istraživane su dosad mnogo manje jer se njegovo korištenje u reaktorima tek priprema, pa su i informacije o rezervama torija nepotpunije. Misli se, međutim, da bi prema fizikalnim i kemijskim svojstvima torija u Zemljinoj kori trebalo biti podjednako torija i urana.

Kao elemenat uran je vrlo raširen, ali su koncentracije malene i troškovi izdvajanja veliki. Stoga se u međunarodnim publikacijama zalihe prema troškovima izdvajanja i ispitanosti ležišta klasificiraju u ekonomske kategorije prema cijeni izdvajanja do 80 $/kg odnosno 130 $/kg

Slika 5.38. Klasifikacija zaliha urana



(1978. godine), te u potvrđene i dodatne zalihe prema stupnju istraženosti. Rezervama se nazivaju ekonomski iskoristive utvrđene zalihe; u sadašnjim uvjetima to je uran po cijeni izdvajanja do 80 $/kg (1978. godina).

Prema klasifikaciji koju koristi MAAE i EEZ (sl. 5.38) naziv potvrđene zalihe (Resonably assured resources) koristi se za uran u poznatim mineralnim ležištima, takve veličine, klase i konfiguracije da se može današnjom rudarskom i prerađivačkom tehnologijom izdvojiti uz navedene troškove proizvodnje. Procjena količine i klase temelji se na ispitivanju uzoraka i mjerenju ležišta te poznavanju karakteristika ležišta. Potvrđene zalihe karakterizirane su visokim stupnjem sigurnosti procjene.

Naziv dodatne zalihe (Estimated additional resources) rabi se za uran čije se nalaženje *očekuje* na temelju geoloških činjenica

a) u blizini istraženih ležišta,

b) u slabo istraženim ležištima,

c) u još neotkrivenim ležištima na temelju geoloških karakteristika.

Stupanj sigurnosti nalaženja tih zaliha niži je nego za potvrđene rezerve.

Moguće zalihe jesu takve o postojanju kojih se zaključuje posredno, na temelju općih geoloških činjenica.

U tablici 5.45. prikazane su potvrđene i dodatne zalihe urana koji se može izdvojiti uz cijenu do 130 $/kg (1978. godine) prema studiji OECD/IAAE: World Uranium Potential, 1978. godine.

U sklopu istovrsne klasifikacije navedene su i zalihe urana u Jugoslaviji. Budući da je za jednu elektranu snage 1 000 MW(e) u njezinom radnom vijeku potrebno oko 5.000 tona, jasno je da je razvoj nuklearne energije u nas znatno ovisan o uvozu, bez obzira na to što neka područja naše zemlje još nisu dovoljno istražena te je otkrivanje novih zaliha moguće i vjerojatno. Prema geološkim karakteristikama naših krajeva ne mogu se očekivati novi nalazi velikog opsega. Glavna nalazišta u našoj zemlji jesu Žirovski vrh (SR Slovenija) Zletovska reka (SR Makedonija) i Bukulja (SR Srbija).

Podaci u tablici 5.45. nisu konačni jer se prospekcija urana trajno odvija i količine u svim kategorijama stalno rastu. Utvrđene količine u prvoj kategoriji približno su udvostručene u razdoblju od 1970. do 1980. godine. U tablicu nisu

Tablica 5.45. Utvrđene i dodatne zalihe urana (EEZ/MAAE 1977)

Država	Utvrđene zalihe/10^3t		Dodatne zalihe/10^3t	
	do 80 $/kg	80–130 $/kg	do 80 $/kg	80–130 $/kg
Alžir	28	0	50	0
Argentina	17,8	24	0	0
Australija	289	7	44	5
Austrija	1,8	0	0	0
Bolivija	0	0	0	0,5
Brazil	18,2	0	8,2	0
Kanada	167	15	392	264
Centralno-afrička Republika	8	0	3	0
Čile	0	0	5,1	0
Danska	0	5,8	0	8,7
Finska	1,3	1,9	0	0
Francuska	37	14,8	24,1	20,0
Gabon	20	0	5	5
SR Njemačka	1,5	0,5	3	0,5
Indija	29,8	0	23,7	0
Italija	1,2	0	1	0
Japan	7,7	0	0	0
Koreja	0	3	0	0
Madagaskar	0	0	0	0
Meksiko	4,7	0	2,4	0
Niger	160	0	53	0
Filipini	0,3	0	0	0
Portugal	6,8	1,5	0,9	0
Somalija	0	6,2	0	3,4
Južnoafrička Republika	306	42	34	38
Španjolska	6,8	0	8,5	0
Švedska	1	300	3	0
Turska	4,1	0	0	0
Velika Britanija	0	0	0	7,4
SAD	523	120	838	215
Zair	1,8	0	1,7	0
Jugoslavija	4,5	2	5	15,5
ukupno	1 650	540	1 510	590

Nisu uključene zemlje SEV-a i NR Kine

uključena npr. znatna nova nalazišta u Brazilu i u Australiji, koja se još procjenjuju, a imaju stotine tisuća tona urana. Konačno, o količinama urana u zemljama SEV-a i NR Kini može se zasad samo nagađati. Budući da su površine tih zemalja vrlo velike, vjerojatno postoje i odgovarajuće velike količine urana, iako je sadašnji stupanj istraženosti znatno manji nego u SAD, ili u nekim drugim zemljama navedenim u tablici 5.45.

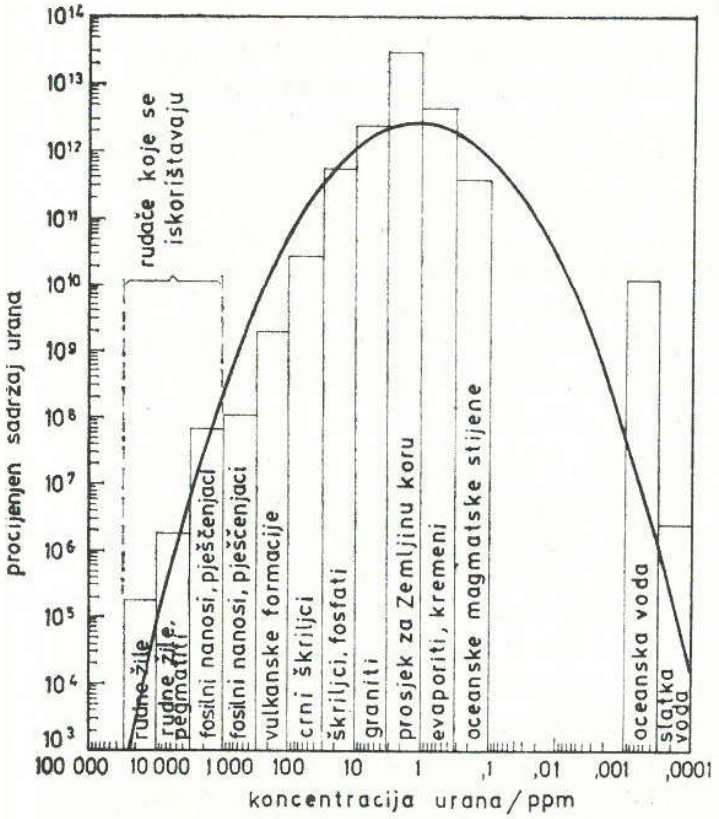
Moguće zalihe. Nove poglede na zalihe urana iznose američki geolozi K. S. Deffeyes i I. D. Mac Gregor [De 1980] na temelju istraživanja i analize nalazišta urana u svijetu, detaljno u SAD.

Polazeći od pretpostavke da uran iz Zemlje dolazi u površinski sloj Zemljine

kore s određenom srednjom koncentracijom, i da su ležišta sekundarne pojave koje se stvaraju nakon procesa erozije primarnih stijena, oni zaključuju da za nastajanje ležišta s većom koncentracijom od prosječne trebaju biti ispunjeni određeni uvjeti, tj. stjecaj niza povoljnih okolnosti. Ako se pojedinačnoj pojavi tih uvjeta pripiše određena vjerojatnost, umnožak tih vjerojatnosti odredit će vjerojatnost istodobnog ispunjavanja svih uvjeta, odnosno pojavu bogatog nalazišta.

Na temelju takvog zaključivanja može se očekivati tipična zvonolika statistička raspodjela oko srednje koncentracije urana u rudi. Ne postoji potvrđena geološka teorija iz koje bi se moglo, zaključiti o takvoj raspodjeli, no ovi američki geolozi uzeli su je kao radnu hipotezu za analizu velikog broja nalazišta urana u SAD i u svijetu.

Bitna značajka zvonolike raspodjele jest njezina širina, odnosno strmina strana raspodjele koja daje porast količine minerala s padajućim odstupanjem od srednje vrijednosti.



Slika 5.39. Raspodjela uranskih zaliha po geološkim formacijama odnosno rezervoarima, prema De 1980

Na slici 5.39. prikazana je raspodjela urana prema raznim osnovnim geološkim formacijama odnosno rezervoarima urana. Danas se iskorištavaju ležišta s koncentracijama višim od 1 000 ppm. S 10 puta nižom koncentracijom postojale bi 300 puta veće količine urana. Taj vrlo značajan odnos provjeren je analizom podataka o iskopu i koncentraciji urana u mnogo američkih rudnika urana u proteklim godinama. Tako se izgleda potvrđuje, smatraju Deffeyes i Mac Gregor, ono što se dosad samo pretpostavljalo, tj. da urana druge kategorije treba biti znatno više nego urana prve kategorije. Takva su nalazišta bila zanemarena kao neinteresantna u potrazi za bogatijima. Važno je, međutim, znati da bi se veće količine u toj kategoriji mogle očekivati, ako se ova teorija dvojice geologa i dokaže. Treba reći da ima istaknutih geologa koji ovu teoriju osporavaju.

Procjene mogućih količina urana posredne su i stoga povezane s znatnim neodređenostima. Metode s pomoću kojih se utvrđuju različite su.

U Americi je Harris [Ha 1979] pošao od omjera utvrđenih količina urana po cijeni 40 $ kg (1975) i mogućih količina u SAD. Na temelju pretpostavke da taj omjer vrijedi općenito, i polazeći od poznatih jednako klasificiranih rezervi urana u svijetu, on je odredio moguće rezerve za svijet, odnosno za svijet bez zemalja SEV-a i Kine, za koje podaci o uranskim rezervama nisu poznati. Rezultat procjene jest 11 400 000 tona urana po cijeni do 80 $/kg, odnosno 15 200 000 tona po cijeni do 130 $ /kg. U drugoj metodi pretpostavlja se da je gustoća raspodjele urana u velikim područjima podjednaka. Na temelju gustoće urana u istraženim dijelovima svijeta zaključuje se da su ukupne količine, uključivši i zemlje SEV-a i Kinu, 20 900 000 tona do 80 $/kg i 27 700 000 tona do 130 $/kg.

U zajedničkoj studiji MAAE i EEZ procijenjene su i svjetske moguće rezerve na temelju procjene za uža područja;

po cijeni do 130 $/kg bilo bi između 10 i 22 milijuna tona urana.

MIPSA (Međunarodni Institut za Primjenjenu sistemsku analizu) procjenjuje moguće svjetske rezerve na 24,5 milijuna tona. Procjena se bazira na analizi američkih rezervi i pretpostavci da je globalna gustoća raspodjele urana jednaka američkoj.

Podzemno ispiranje urana. Uz razvoj procjena količina urana u siromašnijim rudama, odnosno u kategoriji cijena od 80 $/kg do 130 $/kg veoma je važan i razvoj metoda iskorištavanja siromašnijih ruda. Od početka 60-ih godina u SAD razvija se tehnologija podzemnog ispiranja urana iz pješčenjačkih ležišta u kojima se uran nalazi intersticijalno nataložen. Takva se ležišta formiraju kada uran otopljen u podzemnoj vodi naiđe na reducirajuću kemijsku sredinu, pa iz U^{6+} stanja, u kojem je topiv u vodi, prijeđe u U^{4+} valentno stanje u kojem je netopiv. Princip podzemnog ispiranja urana jest u tome da se uvođenjem oksidirajućih sredstava u ležište iz netopivog U^{4+} valentnog stanja vrati u topivo U^{6+} valentno stanje. Ispiranje se vrši pumpanjem vode u kojoj su otopljena sredstva za oksidaciju u uransko ležište. Izlaznom bušotinom voda s otopljenim uranom izlazi na površinu, gdje se uran izdvaja procesom ionske izmjene.

Prema američkim analizama troškovi dobivanja urana na ovaj način niži su. Metoda je posebno u prednosti pri niskim koncentracijama urana u rudi, i pri relativno malim ležištima.

I investicije su znatno niže. Procjenjuje se da bi pri godišnjoj proizvodnji 250 tona urana bile 3 do 4 puta manje nego pri dobivanju urana konvencionalnim rudarskim tehnikama. Uz to daleko su manji i učinci na okoliš; umjesto vrlo velikih količina rude koje izlaze na površinu, gdje se lome, melju i prerađuju, na površinu izlazi otopljeni uran.

Podzemnim ispiranjem dobijeno je u 1978. godini oko 6% proizvedenog urana, porast na 13% očekuje se do 1987. godine.

Metoda može biti veoma privlačna za zemlje koje ne posjeduju velika nalazišta s relativno bogatim rudama. Njena veća primjena, osim što bi omogućila iskorištavanje urana druge kategorije, prebacila bi dio uranskih zaliha iz druge u prvu kategoriju. Činjenica da su vodeće nuklearne zemlje istovremeno i zemlje bogate uranom vjerojatno je uvjetovala da ovoj tehnologiji dobivanja urana dosada nije bila posvećena prevelika pažnja.

Nekonvencionalni potencijalni izvori urana. Za razliku od minerala koji su konvencionalni, tj. koji se komercijalno prerađuju radi dobivanja urana, postoje i takvi iz kojih se uran može dobiti kao nusproizvod. U konvencionalnih minerala koncentracija urana mora biti dovoljna da troškovi proizvodnje ne prijeđu 130 $/kg. Granica je najčešće između 200 ppm i 300 ppm urana (ppm — dijelova u milijun). Međutim, u nekonvencionalnih izvora troškovi proizvodnje ne pokrivaju se samo uranom i moguće je ekonomsko izdvajanje i pri nižim koncentracijama. U većini fosfatnih stijena morskog podrijekla uran se nalazi u koncentraciji od 50 ppm do 130 ppm, te se može izdvajati pri proizvodnji fosfatne kiseline. Misli se da se u nešto više od 10^{10} tona procijenjenih svjetskih rezervi fosfata (P_2O_5) nalazi oko 15 milijuna tona urana (INFCE, WG-I), iako su takve procjene zasad vrlo neprecizne. Budući da je svjetska proizvodnja fosfatne kiseline više od 30 milijuna tona godišnje, teoretska godišnja proizvodnja urana bila bi malo više od 7 000 t.

U SAD i nizu drugih zemalja grade se ili pripremaju instalacije za izdvajanje urana iz fosfata. U SAD računaju da će proizvesti ukupno 74 000 tona do 2000. godine kad bi godišnja proizvodnja iznosila 5 000 t. Tipičan odnos jest oko 250 tona urana na milijun tona proizvedene fosfatne kiseline. Male koncentracije urana nalaze se i uz bakar u nekim tipovima nalazišta. Taj izvor, međutim, nije tako interesantan kao fosfati.

U našoj zemlji priprema se izdvajanje urana iz fosfata u tvornici fosfatnog

gnojiva u Kutini. Godišnje bi se dobilo više desetaka tona urana.

Uljni škriljci uz organske tvari sadrže i različite koncentracije urana. Poznato ležište Chattanooga (Tennessee, SAD) sadrži oko 60 grama urana i oko 40 litara mineralnog ulja u toni. Procjenjuje se da su rezerve urana koncentracije 60 ppm — 80 ppm oko 3,6 milijuna tona i još toliko s koncentracijom 25 ppm — 60 ppm.

Škriljci s vrlo visokom koncentracijom urana od 250 ppm do 320 ppm nalaze se u Švedskoj (Billingen). Iz škriljca s tolikom koncentracijom moglo bi se dobiti oko 300 000 tona urana, dok je ukupna količina oko milijun tona.

Ugljen prosječno sadrži samo oko 1 ppm urana, ali znatno veće koncentracije mogu se pojaviti u pojedinim ležištima. Povećane koncentracije urana nalaze se u više ležišta lignita u SAD, u Španjolskoj i Kanadi.

Morska je voda mnogo godina promatrana i spominjana kao konačni izvor urana. Razlog za to su neiscrpne količine osnovne sirovine, pa i odgovarajuća velika količina urana koja se procjenjuje na oko 4 milijarde tona. Međutim, koncentracija urana u moru jest samo 0,003 ppm.

Premda se ovaj izvor kroz niz godina smatrao vrlo dalekom mogućnošću, posljednjih su godina ostvareni znatni napretci. Tvrdi se da bi se uran iz mora mogao dobiti i po cijeni ispod 400 $/kg.

Zbog intenzivnog razvoja nuklearne energetike u početku 70-ih godina postavljeno je pitanje uranskih zaliha kao jedno od mogućih ograničenja. Na temelju ekstrapolacija iz tog razdoblja koje su predviđale vrlo mnogo nuklearnih elektrana potkraj stoljeća, situacija se činila dosta ozbiljnom, ako se ne bi predvidjelo ubrzano uvođenje reaktora sa znatno boljim iskorištenjem urana.

U drugoj polovici 70-ih godina bio je znatno usporen razvoj nuklearne energetike, ali je ubrzano istraživanje novih ležišta urana i razvoj iskorištavanja nekonvencionalnih izvora urana.

Godine 1978. bilo je utvrđenih i dodatnih količina urana po cijeni nižoj od 80 $/kg ukupno više od 3 milijuna tona. Ako u kategoriji cijena od 80 $ do 130 $, odredimo količine na temelju argumenata Deffeyesa i MacGregora, situacija je znatno povoljnija.

Ako bismo pretpostavili da je prosječna koncentracija urana u toj kategoriji upola manja, onda bi količine urana trebale biti barem pet puta veće nego u kategoriji s cijenom do 80 $/kg. Naravno, tek u idućim godinama može se očekivati ekonomski interes za detaljnije istraživanje i eksploatiranje takvih ležišta. U međuvremenu možemo s manje zabrinutosti promatrati opskrbu uranom do razvoja fuzije i sunčane energije, odnosno do boljeg iskorištenja energije urana u oplodnim reaktorima.

Ako još promatramo i obrazložene procjene mogućih rezervi može se zaključiti da većih teškoća u opskrbi uranom i bez ulaženja u gorivne cikluse s preradom goriva ne bismo trebali očekivati idućih 2 do 3 desetljeća.

5.8. Ekonomski aspekti fisijskih nuklearnih elektrana

5.8.1. Uvod

Pri odlučivanju o izboru energetskog izvora, varijanata jednog tipa izvora, između ponuda na natječaju — ekonomičnost instalacije odnosno elektrane jedan je od najvažnijih elemenata. Dakako, važni su i drugi činitelji koji se temelje na usvojenoj energetskoj dugoročnoj strategiji ili pak na usvojenim općim privrednim pravcima razvoja. Na odluke mogu utjecati međunarodni i međudržavni odnosi, učinci na okoliš itd. Premda takvi činitelji mogu biti i sigurno jesu veoma važni neće se moći lako kvantitativno odrediti. Poželjno je stoga da se oni elementi za odlučivanje koji se mogu kvantitativno odrediti doista tako i obrade kao polazna točka za promatranja koja

prelaze tehničko-ekonomsko područje. Ako se pak takvim promatranjem ne može opredijeliti u izboru varijante, onda ekonomske usporedbe postaju odlučujuće. Ne misli se, naravno, da je ekonomska procjena jednostavna. Ona se može svesti na relativno jednostavan račun cijene energije. Međutim, ulaganja u energetske objekte znatan su dio ukupnih industrijskih ulaganja te je osim same cijene energije vrlo važno i to kako će se ulaganja u energetske objekte odraziti na čitav industrijski i privredni razvoj. Analiza koja bi dala odgovor na to pitanje postaje veoma kompleksna, ona zapravo promatra cjelinu privrednog razvoja u uvjetima ograničenja investicija tražeći optimalnu ravnotežu ulaganja u energetske objekte i proizvodnu industriju, te također optimalnu dinamiku ulaganja. Pojednostavnjen račun cijene energije izdvaja energetski objekt iz cijelog sustava i zanemaruje bitne povezanosti. Ipak, i ta informacija dopunjena analizom ulaganja određena je podloga za ekonomske usporedbe, u najmanju ruku dotle dok cjelovitija analiza nije raspoloživa.

Cijena energije na mjestu potrošnje sastoji se ponajprije od tri glavna udjela: troškova proizvodnje, troškova prijenosa i troškova raspodjele. Troškovi prijenosa i raspodjele na prvi pogled ne ovise o tipu energetskog izvora. Međutim, lokacija energetskog objekta može biti određena tipom elektrane, pa će to utjecati na troškove prijenosa. To je očigledno za hidroelektrane. No, ni termoelektrane na ugljen ne mogu se locirati prema potrebi potrošnje nego je njihov smještaj primarno određen lokacijom rudnika. Postoje također specifični kriteriji za lociranje nuklearnih elektrana, što se može odraziti na troškovima prijenosa. U prosječnim situacijama najviši su troškovi proizvodnje energije, oko 60% udjela u ukupnoj cijeni energije na mjestu potrošnje. Dakako, odstupanja u konkretnim slučajevima mogu biti znatna.

Troškovi proizvodnje energije mogu se podijeliti u investicijske troškove, troškove za goriva, te troškove za pogon i održavanje. U hidroelektrana ili sunčanih elektrana nema troškova za gorivo. Za sunčane elektrane mogli bi se smanjiti troškovi prijenosa (tipično 10%—15%) gradnjom više manjih elektrana u blizini potrošača. Učinak bi ipak bio smanjen zbog toga što su specifične investicije manjih instalacija redovno veće. No, u neposrednoj budućnosti zanimljive su zapravo samo usporedbe između nuklearnih elektrana i elektrana na fosilna goriva; hidroenergetski su izvori ili iskorišteni ili će se ubrzo iskoristiti, a s pomoću sunčane energije još se ne mogu proizvoditi velike količine električne energije.

Elementi određivanja cijene nuklearne energije

Račun cijene energije obuhvaća mnoštvo tehničkih i ekonomsko financijskih podataka o gradnji, pogonu i održavanju, o otplatama, o nabavci goriva te postupcima s gorivom prije i nakon upotrebe itd., što rezultira u velikoj kompleksnosti.

Ipak je poželjno i korisno u vrlo pojednostavnjenom obliku pokazati najvažnije ovisnosti. Godišnji troškovi proizvodnje energije u nuklearnoj elektrani jesu:

a) investicijski troškovi T_i. Dobiju se tako da se ukupne investicije (uključivo kamati) I dijele na radni vijek R elektrane pa iznose $T_i = \frac{I}{R}$,

b) troškovi goriva T_g. Sastoje se od godišnjih troškova za svježe gorivo G_s umanjenih za vrijednost utrošenog goriva G_i koje sadrži ponovo upotrebive nuklide (Pu-239, U-235, U-238 i druge). Ovaj je dio dosta neodređen, u prvom redu zbog neodređenosti u cijeni prerade goriva. Troškovi za gorivo ovise o iskorištenju elektrane, pa će pri raspoloživosti a iznositi godišnje $T_g = a\,(G_s - G_i)$, gdje su G_s i G_i godišnje vrijednosti pri raspoloživosti $a=1$,

c) troškovi održavanja i pogona T_o. Ovaj je dio troškova, kao i investicijski, neovisan o iskorištenju elektrane.

Ukupni godišnji troškovi T iznose:

$$T=\frac{I}{R}+T_o+a\,(G_s-G_i)$$

Ako je snaga elektrane P, godišnja (8760 h) proizvodnja energije u kilovatsatima iznosi $E=a\cdot P\cdot 8760$ h, a cijena za kilovatsat energije C je $C=\frac{T}{E}$, odnosno

$$C=\frac{I/R+T_o+a\,(G_s-G_i)}{a\cdot P\cdot 8760\text{ h}}$$

Da bi se bolje sagledale ovisnosti razdvojimo desnu stranu u dio koji ovisi o raspoloživosti a od dijela koji o njoj ne ovisi:

$$C=\frac{I}{a\cdot P\cdot R\cdot 8\,760\text{ h}}+\frac{T_o}{a\cdot P\cdot 8760\text{ h}}+\frac{G_s-G_i}{P\cdot 8\,760\text{ h}}$$

Najvažniji je po svom udjelu u cijeni energije prvi član. On je inverzno zavisan o raspoloživosti a i radnom vijeku R. U raspoloživosti pojedinih tipova reaktora ima dosta razlika (tablica 5.5), dok se radni vijek obično uzima 30 godina, no vjerojatno je da će on za reaktore s tlačnim cijevima (izmjenjivim) biti duži nego za reaktore s tlačnim posudama.

Omjer I/R, tj. specifične investicije opadaju sa snagom elektrane (sl. 5.40), ali ako je porast snage popraćen smanjenom raspoloživošću a, što je bio slučaj u nekih tipova reaktora, ukupan efekat povećanja snage ne mora biti povoljan.

5.8.2. Cijena energije

Pri računu cijene energije primjenjuju se uobičajene ekonomske metode preračunavanja svih troškova na isto vrijeme, obično na početak pogona. To znači da je za točan račun potrebno poznavati dinamiku ulaganja i otplate, te amortizacijske i kamatne stope. Preračunom investicijskih troškova ti se podaci mogu odrediti prilično sigurno ili su već određeni kupoprodajnim i kreditnim ugovorima. Međutim pri procjeni troškova za gorivo postoje mnoge neodređenosti budući da se ne može točnije odrediti buduće kretanje cijena urana i usluga ciklusa goriva. Srednja cijena jedinične količine proizvedene energije kroz radni vijek elektrane dobit će se podjelom ukupnih troškova preračunatih na vrijeme početka pogona s ukupnom količinom proizvedene energije:

$$\textit{prosječna cijena} = \frac{\textit{ukupni aktualizirani troškovi}}{\textit{ukupno proizvedena energija}} \qquad (5.13)$$

Prosječna godišnja cijena se računa kada su poznati godišnji troškovi i godišnja proizvodnja energije.

U određivanju ukupne proizvedene energije da bi se izračunala srednja cijena energije prema (5.13), postoje i metodološke razlike i neodređenosti u pretpostavci o raspoloživosti elektrane.

Raspoloživošću elektrane naziva se ovdje omjer proizvedene energije u nekom razdoblju prema količini energije koja bi bila proizvedena u tom razdoblju neprekidnim radom pri normalnoj snazi. Raspoloživosti se mijenjaju ovisno o tipu elektrane, stjecanju iskustva u pogonu, poboljšanjem tehničkih karakteristika itd. Neodređenosti u budućem razvoju ne dopuštaju veliku točnost, ali dobro argumentirane procjene bolje su od postupka da se različitim tipovima elektrana ili reaktora pridjele isti faktori raspoloživosti. Tako npr. je faktor raspoloživosti reaktora PWR barem za 15% niži od faktora raspoloživosti za reaktor HWR (CANDU) (tablica 5.5), što se dakako izravno odražava u količini pro-

izvedene energije. Ima nadalje razloga da se pretpostavi da će radni vijek elektrana tipa CANDU biti duži; zbog izmjenljivosti tlačnih cijevi. Pri određivanju ukupno proizvedene energije mogući su različiti metodološki prilazi. Većinom se aktualizacija primjenjuje samo na troškove, a energija se jednako vrednuje bez obzira na to kad je proizvedena. U novije vrijeme se aktualizacija primjenjuje i na proizvedenu energiju. Čini se da za takav postupak postoje dobri razlozi. Nedvojbeno je da je određena količina energije proizvedena ranije vrednija od iste količine proizvedene kasnije. Da bi se ranije proizvodilo potrebno je ranije investirati, pa bismo mogli zaključiti da bi istu stopu koja se primjenjuje na investicije valjalo primijeniti i na aktualizaciju proizvedene energije. U međunarodno povezanim elektroenergetskim sustavima energija se kupuje i prodaje i može se izraziti novčanom vrijednošću pa se u aktualizaciji mogu i trebaju upotrijebiti i odgovarajuće stope. Naravno da je vrijednost energije u elektroenergetskom sustavu vrlo složena funkcija čitavog sustava. Čini se ipak da je aktualizacija proizvedene energije, iako bi se o stopi za aktualizaciju moglo raspravljati, ekonomski korektan pristup. Takav je pristup npr. upotrebljen u uputama MAAE za ekonomsku ocjenu ponuda za nuklearne elektrane (EE 1976.) U tablici 5.46. prema uputi MAAE prikazan je primjer aktualizacije, a ona se izražava aktualiziranim faktorom raspoloživosti. Stopa kojom se obavlja aktualizacija jest 8%. Ukupna aktualizirana proizvodnja energije za 30 godina dobiva se množenjem nominalne neto snage s kumulativnim aktualiziranim faktorom raspoloživosti. Srednja cijena energije za radni vijek elektrane bila bi prema takvoj metodologiji određena relacijom:

$$\textit{srednja cijena} = \frac{\textit{ukupni aktualizirani trošk.}}{\textit{ukupna aktualizirana proizvedena energija}} \qquad (5.14)$$

gdje je

aktualizirana proizvedena energija = nominalna snaga × kumulativan aktualizirani faktor raspoloživosti.

Tablica 5.46. Ukupna proizvedena energija aktualizirana na vrijeme priključka elektrane u mrežu*

Godina pogona	Faktor raspoloživosti	Aktualizirani faktor raspoloživosti
1	0,600	0,577
2	0,650	0,579
3	0,700	0,578
4	0,750	0,573
5	0,750	0,531
6	0,750	0,481
7	0,750	0,455
8	0,750	0,421
9	0,750	0,390
10	0,750	0,361
11	0,750	0,334
12	0,750	0,310
13	0,750	0,287
14	0,750	0,265
15	0,750	0,246
16	0,730	0,221
17	0,710	0,199
18	0,690	0,179
19	0,670	0,161
20	0,650	0,145
21	0,630	0,130
22	0,610	0,117
23	0,590	0,104
24	0,570	0,093
25	0,550	0,083
26	0,530	0,074
27	0,510	0,066
28	0,490	0,059
29	0,470	0,052
30	0,450	0,046
zbroj aktualizirane raspoloživosti za 30 godina		8,127

*Za gornji primjer, i neto snagu 1 000 MW (e) aktualizirana ukupna proizvedena energija u 30 godina iznosila bi 8 127 megavatgodina odnosno 71 192 TWh. Razabire se da je za ekonomičnost elektrane vrlo važno kako ona radi prvih 10 godina.

5.8.3. Investicije

Pri promatranju ekonomičnosti fisijske nuklearne elektrane i konvencionalne termoelektrane na ugljen ili naftu uočavaju se dvije bitne razlike koje proizlaze iz tehničkih svojstava: investicijski troškovi za nuklearne elektrane općenito su primjetno veći nego za konvencionalne, ali je udio troškova za nuklearno gorivo znatno niži.

Budući da su približno jednaki troškovi za reaktor i troškovi za kotao i ložište klasične termoelektrane, a također i troškovi za turbo-agregate, dodatni kontrolni i sigurnosni sustavi nuklearne elektrane povećavaju investicije po jediničnoj snazi. Cijena tih dodatnih sustava raste dosta sporije od porasta snage, pa se višak investicija relativno smanjuje porastom snage elektrane. To je stimuliralo nagli razvoj nuklearnih elektrana sve većih snaga, sve do 1 300 MW (e).

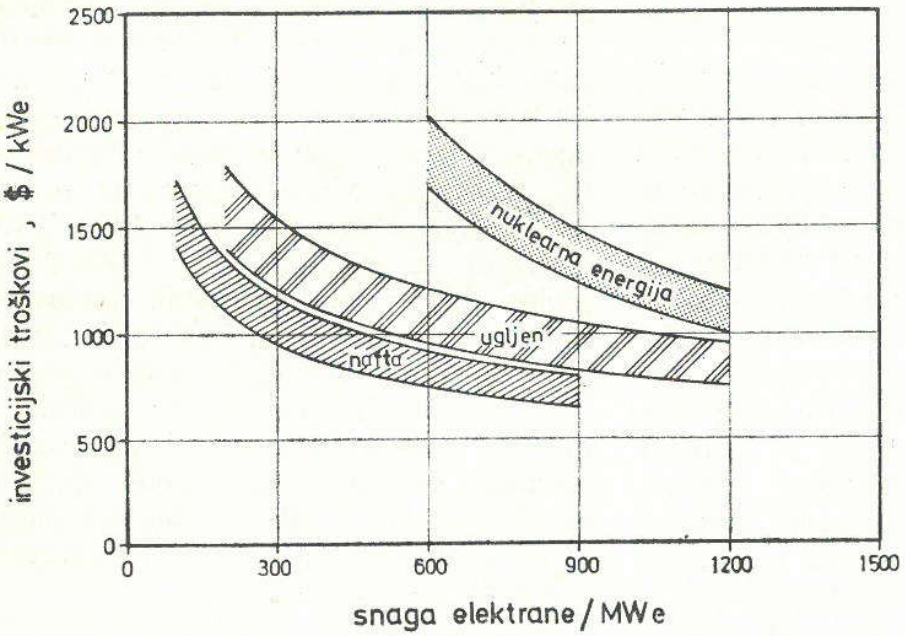
Ukupni troškovi investicije na složen način ovise o nizu elemenata, npr. o seizmičnosti lokacije, o načinu hlađenja, gradnji više elektrana i drugih instalacija na istoj lokaciji, zato brojke bez takvih specifikacija ne kazuju mnogo. Na temelju liste elektrana koje su građene prema ugovoru tipa „ključ u ruke" (Report of the NEPSG, Mitre Report), te prema američkoj službenoj studiji (WASH-1345) dobivena je procjena oko 1 000 $/kW (dolar 1985) za lakovodnu nuklearnu elektranu snage 2·1150 MW (e) s rashladnim tornjevima, koja bi ušla u pogon 1985. godine. Pretpostavlja se „u svakom pogledu povoljna lokacija". Autori studije ocjenjuju grešku od 15% ispod do 25% iznad procjene. S više određenosti mogu se usporediti konvencionalna i nuklearna elektrana na istoj lokaciji.

U tablici 5.47. navedeni su rezultati takvih studija, odnosno procjena, te rezultati za određene lokacije. Kao što se razabire rezultati bitno ovise o tome da li je potrebno smanjiti emisiju sumpor-dioksida (SO_2). U tom slučaju investicijski troškovi za termoelektrane na ugljen bili bi manji za samo 16%—18% jer dodavanje posebnih uređaja za eli-

Tablica 5.47. Procjene investicija elektrana na ugljen prema nuklearnim elektranama (ulaz u pogon o sredini 80-ih godina*)

	Relativne investicije za	
	ugljen s visokim postotkom sumpora; uređaji za čišćenje	ugljen s niskim postotkom sumpora
Elektrana i kompanija		
Pilgrim 2 (Boston Edison)	0,82	
Milstone 3 (Northeast Utilities)	1,01	0,93
Yadkin (Duke Power)	0,82	
Cherokee (Duke Power)	0,82	
Callaway (Union Electric)	0,81	0,67
Projektne studije		
Bechtel	0,83	0,74
Ebasco	0,91	0,69
Commonwealth Edison	1,00	0,70
Westinghouse	0,83	0,71
Službena procjena		
WASH-1345	0,84	0,64

*Mitre report



Slika 5.40. Investicijski troškovi za elektrane na naftu i ugalj i nuklearne elektrane zavisno o snazi elektrane. (Podaci u dolarima SAD, 1980.)

minaciju sumpora znatno povećava investicije.

Na slici 5.40. uspoređuju se investicijski troškovi za nuklearne elektrane i elektrane na ugljen i naftu ovisno o snazi elektrane [MAAE 1982]. Investicijski troškovi ne uključuju kamate za vrijeme gradnje, kao ni eskalaciju i kamate na ekskalaciju. Naznačene su granice procjene.

5.8.4. Troškovi za gorivo

Iako cijene svih energetskih sirovina rastu, cijene fosilnih goriva rasle su u posljednjem desetljeću izvanredno brzo i znatno brže od cijena nuklearnog goriva. Za nuklearne elektrane valja troškovima za nabavku urana još dodati troškove izrade elemenata goriva, ovisno o tipu elektrane i troškove obogaćenja urana te druge troškove ciklusa goriva uključivši i troškove odlaganja radioaktivnog otpada. Ipak su troškovi za goriva za nuklearne elektrane znatno niži nego za elektrane na naftu. Lokalno proizveden ugljen može biti mnogo povoljnija energetska sirovina od nafte, međutim, porast cijena nafte pratio je i porast cijena ugljena, pa je tako u posljednjem desetljeću razvoj davao prednost nuklearnim elektranama.

U tablici 5.48.b prema podacima iz Odjela za ekonomske studije MAAE [Be 1982] uspoređeni su troškovi za nuklearne elektrane i elektrane na fosilna goriva. Troškovi za nuklearno gorivo za lakovodne (LWR) i teškovodne reaktore (HWR) određeni su prema ovim pretpostavkama (tablica 5.48.a):

Tablica 5.48a. Pretpostavke MAAE za proračun troškova goriva lakovodnih i teškovodnih reaktora

	Raspon troškova/$	Izabrana vrijednost/$
cijena urana $/kg U_3O_8	48–120	88
konverzija u UF_6 $/kg U	4–6	5
obogaćenje $/JSR	120–200	160
izrada goriva, LWR $/kg	150–200	175
izrada goriva, HWR $/kg	80–100	85
prijevoz $/kg	10–20	15
istrošeno gorivo, spremanje, prerada, odlaganje otpada $/kg	300–500	400

Pretpostavlja se da je raspoloživost 0,7 i srednja stopa amortizacije 10%. Za ugljen se pretpostavlja da je raspon cijena od 30 $/t do 40 $/t za ugljen kod rudnika, a od 50 $/t do 90$/t kad se prevozi do elektrane. Za naftu je uzet raspon cijena od 30 $/barel do 50 $/barel.

Tablica 5.48b. Komparacija troškova goriva nuklearnih elektrana (LWR i HWR) s troškovima goriva termoelektrana na ugljen i naftu

Elektrana	Troškovi za gorivo mills*/kWh
nuklearna, LWR	10
nuklearna, HWR	6
termoelektrana na naftu, s cijenom	
30 $ barel	44
40 $/barel	58
50 $/barel	72
termoelektrana na ugljen, s cijenom	
30 $/t	12
60 $/t	24
90 $/t	36

1 mills = 0,001 $

Na temelju takvih troškova za goriva, te odnosa investicijskih troškova dobiva se tipična struktura cijene proizvedene električne energije prikazana u tablici 5.49.

Tablica 5.49. Tipična struktura cijene energije proizvedene u nuklearnim elektranama i elektranama na fosilna goriva (1982)

	Nuklearne	Naftne	Ugljen
Investicije	70–80%	20–25%	45–55%
Gorivo	15–25%	70–75%	35–50%
Pogon i održavanje	5%	5%	5–10%
Ukupno	100%	100%	100%

5.8.5. Usporedba cijene energije u elektranama u pogonu

Podaci o troškovima elektrana u pogonu obrađeni su prema istoj metodologiji uglavnom samo ako jedna elektroprivredna grupacija ili poduzeće posjeduje i upotrebljava različite tipove elektrana.

U tablici 5.50. prikazana je struktura cijene energije proizvedene u nuklearnim i konvencionalnim elektranama u Velikoj Britaniji u godinama 1974/75. [Hu 1978]. Iako brojke o cijenama proizvedene energije dobivaju pravi smisao tek u sklopu metodologije kojom su računate, ipak su relativni odnosi o njoj manje zavisni. Interesantni su s te točke gledišta podaci za elektrane u Velikoj Britaniji od 1971/72. do 1977/78. Ti su podaci (tablica 5.51) značajni jer je Velika Britanija zemlja u kojoj su nuklearne elektrane vrlo rano započele s komercijalnim pogonom. Nadalje, relativno visoki investicijski troš-

Tablica 5.50. Struktura cijene proizvedene energije u nuklearnim elektranama i elektranama na ugljen i naftu u Velikoj Britaniji u godini 1974/75.

Troškovi	Nuklearne elektrane	Elektrane na ugljen	Elektrane na naftu
troškovi goriva (p*/kW h)	0,13	0,55	0,71
ostali troškovi pogona	0,09	0,07	0,05
investicijski troškovi	0,26	0,12	0,12
	0,48	0,74	0,88

*p=0,01 £ (engl. funta)

Tablica 5.51. Cijena proizvedene energije u elektranama izgrađenim u 12 prethodnih godina (bez troškova za prijenos i raspodjelu i bez odračunavanja inflacije)

Razdoblje	Cijena energije/ (p*/kW h)		
	Nuklearna elektrana	Elektrana na ugljen	Elektrana na naftu
1971/72.	0,43	0,43	0,39
1972/73.	0,48	0,49	0,40
1973/74.	0,52	0,53	0,55
1974/75.	0,58	0,74	0,88
1975/76.	0,67	0,97	1,09
1976/77.	0,69	1,07	1,27
1977/78.	0,76	1,23	1,42

*p=0,01 £ (engleska funta)

kovi nuklearnih elektrana građenih u Velikoj Britaniji (tipa Magnox) trebali bi dati relativne odnose nešto manje povoljne za nuklearne elektrane nego kasnije razvijeni reaktori hlađeni vodom.

Premda su troškovi za gorivo rasli za sve tipove elektrana, to je najmanje utjecalo na porast cijene energije proizvedene u nuklearnim elektranama jer je udio troškova goriva manji. Visok porast cijena fosilnih goriva nakon 1978. godine još je povećao razlike.

Za američke prilike i lakovodne reaktore vrlo su zanimljivi podaci kompanije Commonwealth Edison [Co 1981], koja opskrbljuje električnom energijom područje Chicaga i najvećeg dijela sjevernog Illinoisa. Kompanija ima oko 10% američkih nuklearnih elektrana, a i jedan je od najvećih korisnika ugljena za termo-

Tablica 5.52. Cijena električne energije na pragu elektrane, proizvedene u elektranama[d] kompanije Commonwealth Edison (za 1980. godinu)

	Troškovi/ (mills*/kW h)				
	za gorivo	za pogon i održavanje	sve investicije i otplate pri pogonskoj raspoloživosti	ukupni	preračunati na raspoloživost 60 %
Nuklearne elektrane sve u sustavu	5,6	4,1	8,7	18,4	18,1
6 velikih jedinica[a]	5,6	4,0	8,4	18,0	18,2
Ugljen					
sve u sustavu	22,4	3,9	10,5	36,8	33,8
6 velikih jedinica[b]	21,2	3,5	11,4	36,1	33,7
Nafta					
sve u sustavu	65,2	3,2	24,7	93,1	75,7
5 velikih jedinica[c]	70,8	2,3	27,4	100,5	78,7

[a] Dresden 2 i 3 Quad Cities 1 i 2, Zion 1 i 2

[b] Ioliet 7 i 8, Kincaid 1 i 2, Powerton 5 i 6

[c] Collins 1, 2, 3, 4 i 5

[d] radni vijek svih elektrana isti, 35 godina

*1 mills=0,001 $

elektrane. Iako se termoelektrane nalaze u području ležišta ugljena u Illinoisu, taj ugljen sadrži velik udio sumpora, pa se najveći dio dovozi iz većih udaljenosti. Zato je cijena ugljena približno u sredini između donje i gornje granice. Cijene nafte nisu značajno ovisne o lokaciji. U analizi se promatra 17 velikih elektrana koje je kompanija stavila u pogon nakon 1964. godine. To je 6 nuklearnih elektrana: Dresden 2 i 3, Quad Cities 1 i 2, Zion 1 i 2; 6 termoelektrana na ugljen: Joliet 7 i 8, Kincaid 1 i 2, Powerton 5 i 6, te 5 termoelektrana na naftu: Collins 1, 2, 3, 4 i 5.

Srednja godišnja proizvodnja u razdoblju 1976—1980. bila je za nuklearne 61,8%, za elektrane na ugljen 45,1%, a za elektrane na naftu 22,5%. Za osnovnu proizvodnju korištene su primarno nuklearne elektrane. U proračunu cijena energije napravljenom prema jedinstvenoj metodologiji uzeta je za sva tri tipa elektrana ista raspoloživost — 60%.

U tablici 5.52. prikazana je struktura troškova za tri grupe elektrana; u predzadnjem su stupcu troškovi pri stvarnim pogonskim raspoloživostima, a zadnji stupac daje ih preračunate na istu raspoloživost (60%).

Tablica 5.53. prikazuje za iste skupine elektrana kretanje cijene energije u razdoblju od 1976. do 1980. godine. Razabire se povećanje ekonomske prednosti nuklearnih elektrana.

Premda analiza pokazuje jasnu ekonomsku prednost nuklearnih elektrana, u zaključku analize nema optimizma: „Pooštrenja i zadržavanja u izdavanju odobrenja za gradnju i pogon mogu znatno utjecati na cijenu energije" i dalje: „Posebno su nepovoljne neodre-

Tablica 5.53. Cijene električne energije iz 6 velikih nuklearnih elektrana i 6 velikih termoelektrana na ugljen kompanije Commonwealth Edison u razdoblju 1976—1980. godine* (mills/kW h)

	Troškovi/ (mills/kW h)		
	za gorivo	ukupni	preračunati na raspoloživost 60 %
1976.			
nuklearne elektrane	5,0	15,7	Nema
elektrane na ugljen	8,0	18,0	podataka
prednost nuklearnih	3,0	2,3	
1977.			
nuklearne elektrane	4,5	14,1	14,2
elektrane na ugljen	10,1	20,9	19,0
prednost nuklearnih	5,6	6,8	4,8
1978.			
nuklearne elektrane	4,7	13,6	15,1
elektrane na ugljen	14,0	25,3	22,7
prednost nuklearnih	9,3	11,7	7,6
1979.			
nuklearne elektrane	5,2	16,9	16,8
elektrane na ugljen	18,0	30,2	27,3
prednost nuklearnih	12,8	13,3	10,5
1980.			
nuklearne elektrane	5,6	18,0	18,2
elektrane na ugljen	21,2	36,1	33,7
prednost nuklearnih	15,6	18,1	15,5

*Velike termoelektrane na naftu ušle su u pogon tek 1979. godine.

đenosti u regulativi, pa se ne može sa sigurnošću predvidjeti kada nuklearna elektrana može ući u pogon. Te neodređenosti čine nuklearni izbor riskantnim. U djelatnosti koja je vrlo podložna propisima, mora postojati povjerenje u budući razvoj tih propisa. Energetske kompanije i nuklearna industrija u SAD izgubile su to povjerenje".

Gotovo slični problemi javljaju se i s velikim elektranama na ugljen. Na kraju se zaključuje:

„Možemo biti gotovo sigurni da nove nuklearne jedinice neće biti naručene dok se ne obnovi povjerenje investitora i uprava. Isto tako možemo biti sigurni da će odziv u zemlji na potrebu da se elektrane na naftu zamijene s elektranama na ugljen biti sporiji nego što se očekivalo."

Budući tehnološki razvoj može odnose donekle izmijeniti. Na primjer cijena ugljena mogla bi biti znatno niža ako bi se transportirao ugljenovodima. No, naravno, moguć je i daljnji razvoj nuklearnih elektrana. Nijedan od dvaju izvora nema takve ekonomske prednosti da bi istisnuo drugi. Opća usporedba nije moguća jer su cijene ugljena jako ovisne o kvaliteti, uvjetima dobivanja, cijeni prijevoza itd.

Međutim, izneseni podaci za Veliku Britaniju za jedan dio SAD pokazuju nedvojbeno da u nekim područjima nuklearna energija ima ekonomsku prednost nad ugljenom.

Najmanje što možemo reći jest da u nuklearnoj energiji fisije imamo izvor s kojim možemo smanjiti preveliku dugoročnu ovisnost o ugljenu bez ekonomske štete. Postoji dovoljno mjesta i uvjeta u kojima nuklearna energija ima ekonomsku prednost pred ugljenom, ako se to i ne bi moglo općenito tvrditi.

Drukčije je s naftom; nafta više ne može biti energetska sirovina za podmirivanje osnovnih energetskih potreba. Njezina se upotreba mora ograničiti na specijalne uvjete u kojima ima posebne dodatne prednosti, kao npr. za vršna opterećenja u energetskom sustavu, i dakako, u prijevozu gdje je barem zasad gotovo nezamjenljiva.

5.8.6. Ekonomičnost uvođenja oplodnih reaktora

U toku proteklih godina nuklearna energija prolazila je uspone i padove. Bez obzira na objektivnu situaciju koja nalaže nizu zemalja, osobito u Evropi te Japanu da hitno traže zamjenu za tekuća goriva, opozicije korištenju nuklearne energije uspjele su znatno usporiti razvoj.

Usporenje razvoja, iako u suprotnosti s objektivnim potrebama, utječe na dugoročan razvoj fisijske energetike. U početnim planovima intenzivnog razvoja nuklearne energetike vrlo su važni bili oplodni reaktori, i to brzi oplodni reaktori. Intenzivnim nuklearnim razvojem već bi u sredini osamdesetih godina nastala kriza opskrbljivanja uranom. Rano uvođenje brzih oplodnih reaktora riješilo bi taj problem i osiguralo perspektivu nuklearnoj fisijskoj energiji za neodređeno vrijeme.

Prema pretpostavljenoj visokoj stopi porasta snage nuklearnih elektrana, vrijeme udvostručenja fisibilnog inventara bila je jedna od najvažnijih karakteristika budućih oplodnih reaktora. Termički oplodni reaktori ne bi mogli zadovoljiti takav razvoj te nisu ulazili u te rane dugoročne strategije.

U početku 80-ih godina izmjenjene su praktički sve postavke prema kojima je u dugoročnom razvoju brzi oplodni reaktor trebao zauzimati središnje mjesto.

Znatno je usporena izgradnja nuklearnih elektrana dok su znatno povišene procjene o zalihama urana. Uvođenje oplodnih reaktora postat će nužno nakon 2000. godine. Tada, međutim, brzi oplodni reaktori neće biti jedina mogućnost; usporeni porast izgradnje nuklearnih elek-

trana omogućit će uključenje i termičkih oplodnih reaktora. No, nakon razdoblja od 2000. godine do 2020. godine brzim oplodnim reaktorima može ozbiljno konkurirati fisijsko-fuzijski sustav koji će proizvoditi fisibilne nuklide za korištenje u termičkim reaktorima. Brzi oplodni reaktor prestaje biti neophodan sastavni dio dugoročnih planova razvoja fisijske energetike — u novim uvjetima on je jedna od mogućnosti. To znači da se pri izboru treba primijeniti ekonomsko-tehnička procjena i da brzi oplodni reaktor može postati dugoročna perspektiva tek ako bude imao prednost na temelju tih kriterija. Kakve će biti procjene preuranjeno je tvrditi. To ovisi o rezultatima i karakteristikama velikih oplodnih reaktora koji se grade (npr. *Super-Phenix*), a i o razvoju fuzijskih uređaja. Oba pravca razvoja bit će znatno više određena u drugoj polovici osamdesetih godina. Može se dogoditi da u promijenjenim uvjetima termički oplodni reaktori budu ekonomski povoljnije rješenje. Danas dostupne preliminarne procjene pokazuju da bi visoki investicijski troškovi mogli odgoditi ekonomski osnovano uvođenje brzih oplodnih reaktora daleko nakon godine 2000, pa čak i sasvim isključiti. Njihovo uvođenje nakon godine 2020. praktički je isključenje, osim ako bude ozbiljnih teškoća s fuzijskim sustavima i s razvojem ostalih mogućnosti.

Na temelju dosadašnjih iskustava u razvoju brzih oplodnih reaktora nema dvojbe da se takav tehnički pouzdan reaktor može razviti. Međutim, brzi oplodni reaktor tehnički je i tehnološki složeniji od današnjih termičkih reaktora, zato su potrebni znatno veći investicijski troškovi. Istina je da su troškovi za gorivo vrlo maleni, ali to ne vrijedj za čitav ciklus goriva u koji se mora uključiti i prerada goriva. Prerada goriva radi ekstrakcije plutonija neizostavan je dio rada oplodnog reaktora. Brzi oplodni reaktori proizvodit će jeftiniju energiju od termičkih reaktora tek ako smanjenje troškova goriva pokrije povećane investicijske troškove i obvezatne troškove prerade. Teško je te odnose kvantitativno izraziti jer je teško procijeniti investicijske troškove za brzo oplodne reaktore, a i troškove prerade. Ipak, budući da je to izuzetno važno, korisno je bar pokušati dobiti grubu predodžbu o odnosima. Prvi element procjene jesu investicije, odnosno relativne investicije za brzi oplodni reaktor prema investicijama za današnje termičke reaktore.

Nominalne relativne investicije. Starije procjene relativnih investicija za brze oplodne reaktore prema investicijama za termičke reaktore previše su optimistične. Tako npr. procjena iz 1975. godine [EI 1975] računa s povećanjem 22% prema lakovodnim reaktorima. To se predviđanje kritički promatra u Mitre izvještaju [NP 1977].

Detaljnija komparativna analiza načinjena je u studiji: Comparative capital costs for the prototype large breeder reactor [Sc 1977]. Ta se studija temelji na tri neovisne studije investicijskih troškova za veliki oplodni reaktor (snage 930—1 150 MW (e)) što su ih načinile tri projektne grupe: Atomic International — Burns and Roe, Westinghouse — Stone and Webster, General Electric-Bechtel.

U komparativnoj studiji zaključuje se da bi investicijski troškovi bili 2 500 $/kW (e) (dolari 1977), to jest više od dva puta veći za oplodni reaktor nego za lakovodni reaktor. Procjene se odnose na prototip, te su vjerojatna i očekuju se smanjenja u slijedećim gradnjama. Zahtijevaju se tehnička pojednostavnjenja radi smanjenja troškova. Studije pružaju određeni temelj za procjenu odnosa komercijalnih oplodnih reaktora prema komercijalnim lakovodnim reaktorima. Opći su zaključci [Sc 1977]:

a) Na temelju usporedbi sustava, opreme i komponenata u sustavu za proizvodnju pare (NSSS) treba očekivati da će taj sustav za brzi oplodni reaktor stajati 2 do 3 puta više nego za lakovodni reaktor.

b) Sličnom je analizom utvrđeno da bi za ostali dio elektrane (Balance of

plant, BOP) troškovi bili 1,2 do 1,3 puta veći za brzi oplodni nego za lakovodni reaktor.

c) Za lakovodni reaktor odnos troškova za preostali dio elektrane i za sustav za proizvodnju pare jest 85% prema 15%.

Prema odvojenim faktorima povećanja troškova — između 1,2 i 1,3 za prvi dio, te 2 do 3 za drugi dio — dobiva se faktor 1,3 do 1,6 za odnos ukupnih investicijskih troškova za brzi oplodni reaktor prema troškovima za lakovodni reaktor.

Možemo promotriti i teškovodne reaktore kanadskog tipa. O relativnim investicijskim troškovima za teškovodne prema troškovima za lakovodne reaktore, (točnije HWR (CANDU) prema PWR) dosta se raspravljalo. Vjerojatno je da su investicije za teškovodni reaktor za 10%—15% veće od investicija za PWR. Zajedno s troškovima za tešku vodu investicije su oko 25%—30% veće od investicija za reaktor tipa PWR [La 1980].

Efektivne relativne investicije. Usporedba nominalnih specifičnih investicija korektna je samo ako je raspoloživost, odnosno godišnja proizvedena energija jednaka.

Raspoloživosti termalnih reaktora pokazuju znatne razlike, najviše su vrijednosti u teškovodnih reaktora, a dosta zaostaju u reaktora PWR tipa. Raspoloživost se sporo povećavala za reaktor tipa PWR, a isto će tako biti i za brze oplodne reaktore FBR jer su kompliciraniji.

U razdoblju od 1995. godine — 2010. godine brzi oplodni reaktori će se uspoređivati s već uhodanim i razvijenim termičkim reaktorima. Za teškovodne reaktore velike snage raspoloživost 0,8 već je gotovo postignuta. Za reaktore tipa PWR nakon 1995. godine realno je računati s raspoloživošću od 0,7. Današnje vrijednosti dosta su niže.

Oko 2000. godine bit će razdoblje prve generacije velikih oplodnih reaktora i nije realno, na temelju iskustava s reaktorima LWR tipa, očekivati faktor raspoloživosti veći od 0,6. Iako postoji veliki broj elektrana i mnogo godina iskustva, kumulativna raspoloživost za PWR elektrane bila je u 1980. godini tek oko 56% (tabl. 5.5).

Efektivne investicije dobit ćemo ako preračunamo investicijske troškove na stvarnu, a ne nominalno proizvedenu energiju. Želimo li obaviti takvu usporedbu valja uvažiti različite raspoloživosti za različite tipove raektora.

To se može načiniti uspoređujući elektrane s istom godišnjom proizvodnjom energije.

U tablici 5.54. navedene su efektivne relativne investicije, odnosno relativne investicije za elektrane s istom godišnjom proizvodnjom energije. Kao referentna uzeta je PWR elektrana snage 1 000 MW (e) s faktorom raspoloživosti 0,7.

Efektivne specifične investicije za FBR veće su od investicija za PWR barem 50%. Ako bi, ilustracije i određenosti radi, uzeli da su specifične investicije za reaktor tipa PWR oko 1 000 $/kW (e),

Tablica 5.54. Efektivne specifične investicije za HWR, PWR i FBR elektranu s istom godišnjom proizvodnjom energije

Elektrana	Snaga MW (e)	Faktor raspoloživosti	Nominalne relativne investicije	Relativne investicije za istu godišnju proizvodnju
HWR	875	0,8	1,3	1,137
PWR	1 000	0,7	1	1
FBR	1 166	0,6	1,3—1,6	1,51—1,87

razlika od 50% za 1 000 MW (e) elektranu iznosi 500 milijuna dolara. Godišnja otplatna stopa na uložene investicije jest 10% i više. Računajući s 10%, povećani godišnji investicijski troškovi za oplodni reaktor iznose 50 milijuna dolara.

Ekonomska usporedba. Ako bismo taj višak investicijskih troškova stavili na raspolaganje za nabavku urana za termički reaktor, dobili bismo približnu predodžbu o cijeni urana koju se može platiti za elektranu s termičkim reaktorom pa da zbroj investicijskih troškova i troškova urana ne bude veći od investicijskih troškova za elektranu s oplodnim reaktorom. Pri raspoloživosti 0,7 elektrana PWR tipa troši godišnje oko 140 t prirodnog urana, pa bi granična cijena urana bila viša od 300 $/kg. Dakako, ta je procjena previše pojednostavnjena. Pokušajmo je malo poboljšati. U sva tri tipa reaktora postoje troškovi za izradu goriva; pretpostavimo da su jednaki za sva tri tipa. Aproksimacija je u prilog oplodnom reaktoru jer je proizvodnja plutonijskog goriva ipak nešto skuplja. Zanemarit ćemo također razlike koje nastaju pri preračunavanju investicija na određeni vremenski trenutak. Pretpostavit ćemo i jednake pogonske troškove, što je također aproksimacija u korist oplodnog reaktora.

Velike stavke koje ne možemo zanemariti jer se ne pojavljuju podjednako u sva tri reaktora jesu troškovi obogaćenja za reaktore tipa PWR i troškovi prerade goriva za oplodni reaktor.

Naravno, ako bismo reciklirali plutonij za reaktor tipa PWR, onda bi i za to postojali troškovi prerade, ali i smanjenje potrošnje urana. Detaljnije analize [npr. GE 76] pokazuju da nema velike razlike između dodatnih troškova i uštede, tj. da je ekonomski učinak recikliranja malen za reaktor PWR, pa prema tome možemo uspoređivati brzi oplodni reaktor samo s lakovodnim PWR bez prerade goriva.

Neodređenosti postoje i za cijene obogaćenja, a pogotovo prerade. Danas se računa s cijenom obogaćenja u rasponu od 80$ do 100 $ po jedinici separacijskog rada. Usvojimo li za procjenu 90 $ po JSR pa koristimo podatke o potrebnom separacijskom radu iz tablice 5.17. dobivaju se pri raspoloživosti 0,7 godišnji troškovi obogaćenja približno 10 milijuna dolara (110 000 JSR·90 $/JSR=9,9·10^6$). Cijene prerade neizvjesne su i za obično U—Pu oksidno gorivo iz termičkih reaktora, a pogotovo za gorivo oplodnih reaktora. Samo je dio goriva iz oplodnog reaktora s relativno visokim postotkom plutonija i fisijskih proizvoda — godišnja količina goriva za reaktor snage 1 166 MW (e) pri raspoloživosti 0,6 približno je 11 tona. Ostalo gorivo za preradu iz omotača sadrži malo plutonija i fisijskih proizvoda, a godišnja količina goriva za isti reaktor i istu raspoloživost iznosi približno 16 t (tab. 5.16). Za ovu procjenu može se uzeti da je prosječna cijena jednaka cijeni za obično oksidno gorivo iz lakovodnih reaktora. O ekonomičnosti prerade takvog goriva postoji niz studija. Studija MAAE [RN 1977] i izvještaj INFCE prema detaljnosti obrade i sastavu suradnika najobjektivnije su.

U studiju MAAE o regionalnim središtima za ciklus goriva, polazeći od 12,5% kamata na investicije (fixed charge) te kapaciteta instalacija 1 000 t godišnje, dobiva se cijena prerade oko 350 $/kg (dolari 1977).

Slična cijena utvrđena je i u izvještaju INFCE, ali pri nižem kapacitetu instalacije za oko 300 t godišnje. Iako veći kapaciteti instalacija omogućuju manje troškove prerade, valja znati da i troškovi prerade značajno ovise o raspoloživosti instalacije te da se za veće instalacije treba očekivati manja raspoloživost. Smanjenje cijene prerade u velikim instalacijama nije sigurno, barem ne toliko koliko bi bilo pri istoj raspoloživosti.

S cijenom prerade 350 $/kg godišnji troškovi prerade goriva oplodnog reaktora bili bi 9,5 milijuna dolara (27 000 kg i prerada po 350 $/kg).

Budući da je to malo prema dodatnim godišnjim troškovima za povećanu in-

vesticiju, jasno je da je za ekonomsku usporedbu najvažniji faktor viška investicija za oplodni reaktor. Dakle, u ovoj približnoj procjeni neće se detaljnije promatrati parametri o kojima može ovisiti i ovisi cijena prerade goriva.

Granična cijena urana. Zbog usporedbe zgodno je rezultate izraziti graničnom cijenom urana.

Graničnom cijenom urana nazivamo cijenu urana za termalni reaktor pri kojoj se troškovi nabave urana za pogon termalnog reaktora izjednačuju s viškom troškova oplodnog reaktora. Termalni reaktor proizvodi tada energiju po istoj cijeni kao i brzi oplodni reaktor.

Uz pretpostavke i aproksimacije koje su prethodno obrazložene, godišnji višak troškova za oplodni reaktor prema troškovima za lakovodni reaktor može se izraziti:

$$\text{višak troškova FBR} - \text{PWR} = \text{god. stopa na višak investicija} + \text{troškovi za preradu} - \text{troškovi za obogaćenje} \quad (5.15)$$

Pri usporedbi s teškovodnim reaktorom izostaje zadnji član.

Računajući sa specifičnim investicijama za PWR elektranu 1 000 $/kW (e) koja ulazi u pogon osamdesetih godina te s efektivnim relativnim investicijama prema tablici 5.46, višak investicija za oplodni reaktor ekvivalentan u proizvodnji energije PWR elektrani snage 1 000 MW (e) s raspoloživošću 0,7 kreće se u granicama od 500 do 870 milijuna dolara. Uz stopu 10% (fixed charge) na investicije, godišnji troškovi iz viška investicija iznose od 50 do 87 milijuna dolara. Zajedno s troškovima prerade (9,5 milijuna dolara) i troškovima obogaćenja (9,9 milijuna dolara) višak troškova kreće se u granicama od

$(50+9{,}5-9{,}9)\,10^6\,\$ = 49{,}6$ milijuna dolara

do

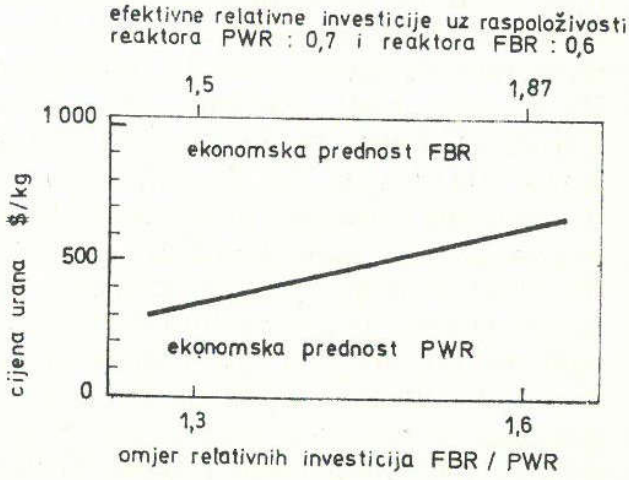
$(87+9{,}5-9{,}9)10^6\,\$ = 86{,}4$ milijuna dolara.

Pri faktoru raspoloživosti 0,7 tipična elektrana PWR tipa snage 1 000 MW(e) troši godišnje približno 140 000 kilograma urana. U povoljnom slučaju nižeg omjera efektivnih investicijskih omjera, granična cijena urana iznosi

$$\textit{granična cijena urana} = \frac{49{,}6\cdot 10^6\,\$}{140\,000\ \text{kg}} = 354\ \$/\text{kg}.$$

U nepovoljnom slučaju dobiva se

$$\textit{granična cijena urana} = \frac{86{,}4\cdot 10^6\,\$}{140\,000\ \text{kg}} = 617\ \$/\text{kg}.$$



Slika 5.41. Granična cijena urana pri korištenju u reaktoru PWR sa specifičnom investicijom 1 000 $/lkW(e)

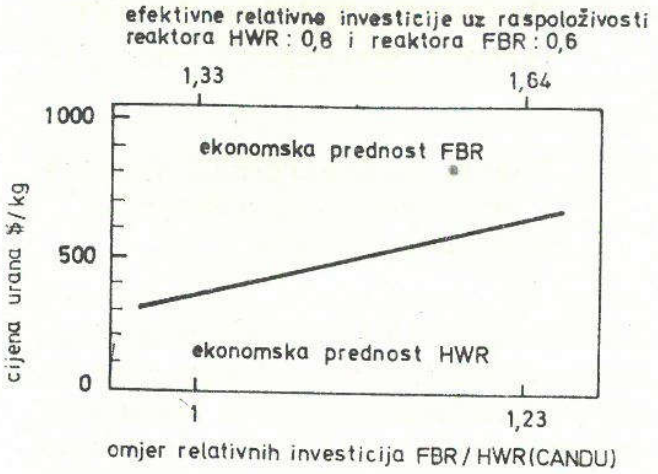
Na slici 5.41. vrijednosti su granične cijene za međuvrijednosti faktora efektivnih relativnih investicija.

Pri usporedbi oplodnog reaktora s teškovodnim reaktorom višak troškova kreće se između $(33+9{,}5)\cdot 10^6\,\$ = 42{,}5$ milijuna dolara i $(64+9{,}5)\cdot 10^6\,\$ = 73{,}5$ milijuna dolara.

Budući da je godišnja potrošnja urana približno 120 000 kg, granične cijene urana za teškovodni reaktor iznose:

$$\textit{povoljna granična cijena} = \frac{42{,}5\cdot 10^6\,\$}{120\,000\ \text{kg}} = 354\ \$/\text{kg},$$

$$\textit{nepovoljna granična cijena} = \frac{73{,}5\cdot 10^6\,\$}{120\,000\ \text{kg}} = 612\ \$/\text{kg}.$$



Slika 5.42. Granična cijena urana pri korištenju u elektrani HWR sa specifičnom investicijom 1 300 $/kW(e)

Dijagram 5.42. daje vrijednost granične cijene urana za međuvrijednosti efektivnih relativnih investicija.

Dobivene vrijednosti praktički se ne razlikuju od vrijednosti za elektrane PWR tipa.

Rezultati vrijede za specifične investicije od 1 000 $/kW(e) za reaktor PWR i od 1 300 $/kW(e) za HWR (CANDU) reaktore, te uz specificirane troškove obogaćenja i prerade. Pri inflacijskom porastu tih stavaka, krajnji rezultat jest porast granične cijene, budući da je višak investicija najveći doprinos u tom iznosu.

Ekonomske procjene uvođenja brzih oplodnih reaktora mogu se sažeto ovako prikazati:

a) Granične cijene urana uglavnom ovise o relativnim investicijama i o pretpostavljenim raspoloživostima, odnosno rasponima raspoloživosti.

b) Pojednostavnjenja pri procjeni, izjednačenja pogonskih troškova i troškova za izradu goriva, idu u korist oplodnog reaktora. Izostavljanje aktualizacije troškova također ide u korist oplodnog reaktora za koji su veće rane investicije, dok su troškovi goriva za termičke reaktore raspoređeni na 30 godina nakon ulaska u pogon.

c) Iako se naravno može i mora računati s porastom raspoloživosti brzih oplodnih reaktora iznad pretpostavljene vrijednosti 0,6, to isto vrijedi i za pretpostavljene raspoloživosti termičkih reaktora, osobito za raspoloživost 0,7 za reaktore PWR.

Znatno smanjenje raspona raspoloživosti, a to je bitno za usporedbu ekonomičnosti, može se očekivati tek kad se reaktori približe svojim maksimalnim pogonskim vrijednostima.

d) Granična cijena urana za oba termalna reaktora mnogo je viša od današnje tržišne cijene urana u čitavom rasponu pretpostavljenog omjera investicijskih troškova 1,3 — 1,6. Budući da i donja vrijednost omjera investicija (1,3) daje visoku graničnu cijenu oko 350 $/kg urana, ekonomskoj bi se kompetitivnosti brzog oplodnog reaktora moglo približiti tek kombinacijom vrlo povoljnog investicijskog omjera i znatno manjeg raspona raspoloživosti od onih koji bi se mogli postignuti u doglednoj budućnosti.

5.8.7. Uvođenje termičkih oplodnih reaktora

Što možemo na kraju kazati o termičkim oplodnim reaktorima? Ako se pretpostavi da će se oni temeljiti na danas razvijenim termičkim reaktorima, bili bi to ponajprije lakovodni i teškovodni reaktori s uran-torijevim ciklusom goriva (poglavlje 5.3). Za teškovodni termički oplodni reaktor investicijski troškovi trebali bi biti podjednaki kao i za teškovodni termički reaktor; osnovna je razlika u ciklusu goriva. Može se očekivati da investicije za lakovodni termički oplodni reaktor, s promjenljivim prostornim rasporedom jezgre, neće biti znatno više od investicija za termičke reaktore PWR tipa, a vjerojatno će se približiti investicijama za teškovodni reaktor.

Prema tome u ekonomskom uspoređivanju termičkih oplodnih reaktora s termičkim reaktorima konverterima bitno je usporediti smanjenja troškova za goriva s povećanim troškovima prerade. U najgrubljoj aproksimaciji izjednačenje ovih

troškova daje već navedenu graničnu cijenu urana. Pri graničnoj cijeni urana ušteda na gorivu jest jednaka dodatnim troškovima za gorivo. Kako se povećanje troškova goriva izjednačuje samo s dodatnim troškovima prerade, a ne sa zbrojem dodatnih troškova prerade i viška investicija kao za brzi oplodni reaktor, za uvođenje termičkih oplodnih reaktora mora granična cijena urana biti znatno niža.

Termički oplodni reaktori temelje se na već razvijenijoj tehnologiji, a ne i bitno drukčijoj tehnologiji kao npr. brzi oplodni reaktori za koje su potrebna velika dodatna ulaganja u razvoj proizvodnje pojedinih dijelova i opreme. I bez detaljnije analize, koju svakako valja načiniti, jasno je da u novim uvjetima, kad se uvođenju oplodnih reaktora postavljaju oštri ekonomski kriteriji, termički oplodni reaktori mogu imati prednost pred brzim oplodnim reaktorima. To posebno važi za industrijski manje snažne zemlje, za koje je velika prednost ako se tehnologija oplodnog reaktora temelji na tehnologiji termičkog reaktora jer omogućuje najracionalnije ulaganje sredstava i napora.

Dakako ako se razvije proizvodnja umjetnih fisibilnih nuklida u fisijsko-fuzijskim uređajima ili akceleratorima tada će biti moguće birati između razvoja oplodnih reaktora ili nastavka gradnje termičkih reaktora koristeći umjetno proizvedene fisibilne nuklide. O ekonomičnosti tog izbora zasad je preuranjeno govoriti. No, ipak i o toj mogućnosti valja misliti jer ona potkrepljuje gledište da brze oplodne reaktore više ne možemo smatrati jedinom dugoročnom perspektivom fisijske energije. Potpuno je otvoreno pitanje da li će njihov razvoj biti najpovoljnija dugoročna strategija.

5.9. Međunarodni i politički aspekti nuklearne energije

5.9.1. Razvoj međunarodnih ugovora i ograničenja iskorištavanja nuklearne energije

Više nego bilo koja nova tehnologija dosad, razvoj fisijske nuklearne tehnologije podložan je nizu kontrola i restrikcija na temelju raznih međunarodnih ugovora i djelatnošću različitih organizacija. To je shvatljivo kad se pogleda razvoj energije fisije od početka; prva primjena bila je vojna; bombe na Hirošimu i Nagasaki 6. i 9. VIII 1945. okončale su rat s Japanom. I nakon toga kontrolirano oslobađanje energije fisije u reaktorima koristi se najprije za pogon vojnih plovnih objekata. Novi izvor energije od kojeg s punim pravom mnogo očekuje velik dio čovječanstva siromašan konvencionalnim izvorima energije, počeo je razvoj u vrlo nepovoljnim međunarodnim uvjetima. Dvije osnovne činjenice od početka do danas ograničuju razvoj energije fisije:

a) ogromna razarajuća snaga nuklearne energije, zloupotrijebi li se u vojne svrhe,

b) blokovska podijeljenost svijeta.

Također otežavajuća okolnost za razvoj energije fisije jest složenost nove tehnologije pa su nositelji razvoja mogle biti samo velike industrijske odnosno najveće industrijske zemlje. Iznimka je Kanada. Nositelji nuklearnog razvoja bili su zapravo SAD i SSSR, dakle, protagonisti blokovske podijeljenosti. To je bilo vrlo nepovoljno za niz zemalja u razvoju koje su željele koristiti nuklearnu energiju, ali i ostati izvan blokovskih utjecaja. Budući da velike nuklearne zemlje nisu napredovale u nuklearnom razoružanju, postalo je važno kontrolirati razvoj energije fisije. Postupno su se uvodila sve veća ograničenja i kontrole, a nuklearna energija razvijala se uglavnom u zemljama koje već raspolažu obiljem drugih izvora energije. Kada i kako će ta energija pomoći zemljama u razvoju koje žele ostati ne-

svrstane još nije jasno. I 40 godina nakon ostvarenja lančane reakcije vojna primjena još prevladava. Ravnoteža dviju nuklearnih sila temelji se na zastrašujućem principu prema kojem svaka od njih treba raspolagati s tolikim potencijalom da bi — ako bi je iznenadno napala suprotna strana — još mogla prouzročiti neprihvatljiva razaranja u protivnika. Za takvu strategiju zastrašivanja vojni stratezi traže desetine tisuća atomskih bombi i nuklearne zemlje zaista ih posjeduju. Tako je zemljama izvan blokova u tim uvjetima otežan razvoj fisijske energije, iako u sukobu ne bi mogle ostati pošteđene od uništavanja. Neki značajni događaji u razvoju korištenja i kontrole fisijske energije mogu se istaknuti.

Lilienthal-Baruchov plan 1946. Godine 1946. SAD predlažu u OUN da nuklearnu tehnologiju kontrolira međunarodna organizacija.

Neposredno nakon atomskih eksplozija nad Japanom i završetka rata svjetska javnost nije sumnjala u to da se atomska energija ubuduće smije koristiti samo za miroljubive svrhe. To je izraženo u tzv. Vašingtonskoj deklaraciji 15. XI 1945. predsjednika SAD te predsjednika vlada Velike Britanije i Kanade, tj. zemalja koje su surađivale u konstrukciji prvih atomskih bombi. Za provođenje te deklaracije vlada SAD osnovala je savjetodavno tijelo koje je vodio dr Oppenheimer. Izvještaj i prijedlog savjetodavnog tijela, poznat kao Lilienthalov izvještaj, postao je osnova američkog prijedloga koji je u Organizaciji Ujedinjenih naroda iznio američki delegat Bernard Baruch 14. VI 1946. Prijedlog je predviđao stvaranje Međunarodne organizacije za atomsku energiju (International Atomic Development Authority — IADA) u sklopu UN. Ta bi organizacija obavljala najveći dio aktivnosti ciklusa goriva u instalacijama koje bi gradila i posjedovala. Nacionalne nuklearne organizacije mogle bi graditi energetske reaktore, za koje bi dobivale gorivo od IADA i vraćale ga nakon upotrebe. IADA bi i sama gradila i posjedovala nuklearne elektrane koje bi prodavale energiju zemlji u kojoj su izgrađene. Nema dvojbe da bi IADA bila međunarodna organizacija s vrlo velikom međunarodnom administracijom, ogromnim investicijskim sredstvima, organizacija bez presedana koja bi prema mišljenju P. Noel-Bakera [Ba 1960] dala UN vrlo velik prestiž i autoritet. S obzirom da je plan podnesen 1946. godine, kad su SAD imale nuklearni monopol (SSSR je aktivirao atomsku bombu 1949. godine), planu se ne može pripisati usko nacionalno gledanje. Trka u nuklearnom naoružanju bila bi zaustavljena prije no što je počela. Na žalost, reakcija druge strane bila je negativna. Prevladalo je nepovjerenje i nesigurnost. Bojazan da bi u IADA dominirala tehnološka i financijska snaga SAD, nije bila bez temelja 1946. godine nakon teških ratnih razaranja koje je pretrpio SSSR. Koji su sve razlozi bili za takav stav teško je danas precizno kazati bez analize suvremene međunarodne situacije i političkih odnosa. Ostaje činjenica da je umjesto u jedan ogroman međunarodni pothvat koji bi svakako djelovao objedinjavajuće, svijet krenuo u blokovsku podijeljenost. Detaljno je prikazan taj razvoj i razvoj trke u nuklearnom naoružanju u knjizi The Arms Race, Noel-Bakera, dobitnika Nobelove nagrade za mir za 1959. godinu.

Atomi za mir (Atoms for Peace) 1953. Budući da nije prihvaćen Lilienthal-Baruchov plan iz 1946. godine, nuklearna energija razvija se uglavnom za vojne primjene. Raskorak između takve situacije i onog što se od nuklearne energije očekivalo postaje sve očitiji. „Atoms for Peace" bila je inicijativa američkog predsjednika Eisenhowera da se korištenje nuklearne energije proširi izvan kruga zemalja posjednika nuklearnog oružja. Na prvoj Konferenciji o miroljubivoj upotrebi atomske energije u Ženevi 1955. godine, SAD i druge zemlje stavljaju na raspolaganje dotad nedostupna znanja iz nuklearne znanosti i tehnologije.

MAAE 1956. U nastavku pozitivne klime nakon Ženevske konferencije Ujedi-

njeni narodi osnivaju posebnu organizaciju, Međunarodnu agenciju za atomsku energiju MAAE (International Atomic Energy Agency, IAEA), koja treba pomagati i poticati mirnodopsku upotrebu nuklearne energije. No, budući da se nuklearna tehnologija u to vrijeme već širi, svakako u jakim industrijskim zemljama — Velikoj Britaniji, Francuskoj, SR Njemačkoj, inicijativa se može shvatiti i kao pokušaj da takvo širenje ne ostane sasvim nekontrolirano. Premda je u statutu MAAE primarno pomaganje i poticanje miroljubivog korištenja atomske energije, on predviđa kontrolne i inspekcijske mjere koje bi trebale spriječiti razvoj vojne upotrebe.

Ugovor o neširenju nuklearnog oružja (Non Proliferation Treaty, NPT) 1968. Povoljna atmosfera za mirnodopski razvoj nuklearne energije nakon 1953. (Atoms for Peace) i osnivanja MAAE, mijenja se zaoštravanjem trke u nuklearnom naoružanju. SAD i SSSR aktivirali su fuzijske eksplozivne uređaje 1952. godine, Velika Britanija 1957, NR Kina 1967, Francuska 1968, a razvijaju se još destruktivnija oružja. Velike nuklearne zemlje sada žele jače kontrolirati nenuklearne zemlje. To se odražava u Ugovoru o neširenju nuklearnog oružja iz 1968. godine (stupio na snagu 1970). Inicijatori su ugovora nuklearne sile, a u njemu su osobito naglašene kontrole i ograničenja za zemlje bez nuklearnog oružja. Ugovor obvezuje nenuklearne zemlje na ograničenja u usvajanju nuklearne tehnologije, a nuklearne zemlje da učine ozbiljne napore za nuklearno razoružanje. Želeći i vjerujući u takav napredak, više od stotinu zemalja, među njima i Jugoslavija, potpisalo je taj ugovor. Napredak u razoružanju izostao je pa taj ugovor postaje sve više neravnopravan.

Londonski klub 1975. Oko sredine 70-ih godina zaoštravaju se pitanja u vezi sa širenjem i kontrolom nuklearne tehnologije. Zaoštravanje se neposredno povezuje s nuklearnom eksplozijom u Indiji 1974. godine, te sporazumima koje su Francuska i SR Njemačka 1975. i 1976. godine potpisale s Republikom Korejom, Pakistanom i Brazilom. Sporazumima je predviđena izgradnja instalacija za obogaćenje i preradu goriva pa su postali predmet kontroverzije. Međutim, do zaoštravanja je moralo doći jer nuklearne sile nisu ispunjavale svoj dio obveza iz Ugovora o neširenju nuklearnog oružja, a željele su i dalje osigurati kontrolu nad razvojem nuklearne tehnologije. Od 1975. do 1978. godine dogovaraju se zemlje izvoznice nuklearne tehnologije (danas ih je 16) o dodatnim ograničenjima za izvoz nuklearnih tehnologija. Skupina tih zemalja poznata je kao Londonski klub (London Club of Suppliers); osim SSSR-a i SAD to su Velika Britanija, SR Njemačka, Japan i Francuska kao vodeći članovi. Godine 1978. klub je preko MAAE objavio „Smjernice" o uvjetima pod kojim se odobrava izvoz nuklearnih tehnologija i instalacija. Te Smjernice načinjene su bez sudjelovanja nenuklearnih zemalja i zemalja u razvoju. „Smjernicama" je uveden novi pojam „osjetljivih" tehnologija da bi se izvoz takvih tehnologija strože kontrolirao.

Primjenom „Smjernica" jednostrano su prekinuti ugovori o isporuci nuklearne opreme i sa zemljama koje su potpisale Ugovor o neširenju nuklearnog oružja.

Američki zakon o neširenju nuklearnog oružja (Nuclear Nonproliferation Act, NNPA) 1978. Američki predsjednik Carter travnja 1977. godine izlaže potrebu da se zakoči recikliranje plutonija i uvede moratorij za uvođenje brzih oplodnih reaktora. Istovremeno predlaže međunarodnu studiju o ciklusu goriva radi izbora reaktora i ciklusa goriva najpovoljnijih za neširenje nuklearnog oružja. U ožujku 1978. nova orijentacija SAD ozakonjena je Zakonom o neširenju nuklearnog oružja, NNPA (Nuclear Nonproliferation Act).

Bez čekanja na rezultate međunarodne studije tim se zakonom što ga je donio američki Kongres propisuju dodatna ograničenja detaljno i znatno strože nego u „Smjernicama" Londonskog kluba.

NNPA traži reviziju svih ranije sklopljenih ugovora, uključivši i ugovore s MAAE i Euroatomom. Američka orijentacija izražena tim zakonom izazvala je otpor među onim nuklearnim zemljama koje za razliku od SAD nemaju velike rezerve urana i za koje su prerada goriva te recikliranje plutonija i oplodni reaktori od znatno veće važnosti. U tom sukobu interesa nuklearnih zemalja međunarodna studija trebala je naći rješenja koja ne bi kočila razvoj nuklearne energije, a kontrolirala bi širenje nuklearnog oružja.

5.9.2. Međunarodna procjena ciklusa goriva, INFCE 1978—80.

Međunarodna procjena ciklusa goriva (International Fuel Cycle Evaluation, INFCE) pokrenuta inicijativom predsjednika Cartera i NNPA, odvijala se dvije godine sudjelovanjem više stotina stručnjaka iz 46 zemalja. Konačan izvještaj podnesen je u veljači 1980. INFCE je bila tijelo znatno šireg sastava od Londonskog kluba te se u tom skupu moglo izraziti i gledište uvoznika nuklearne tehnologije i opreme. Budući da su Amerikanci nastojali dokazati da je njihovo gledište o nekorištenju plutonija tehnički i ekonomski opravdano, te da su raspravljali s drukčijim gledištima ostalih nuklearnih zemalja, interesi i gledišta zemalja u razvoju nisu bili u prvom planu. Rasprava o širenju nuklearnog oružja dominirala je radom u INFCE. Međutim, nisu nađena tehnička rješenja bez upotrebe plutonija, koja bi bila sigurna s obzirom na proliferaciju, a također i omogućila dugoročnu perspektivu fisijskoj energiji.

INFCE nije mogao uspjeti kao pokušaj da se za zapravo političke probleme nađe tehničko rješenje.

Treba se ipak nadati da su dvogodišnje rasprave u sklopu INFCE poboljšale razumijevanje između velikih nuklearnih zemalja i zemalja koje žele razvijati nuklearnu energiju. Izrađeni su opsežni tehnički materijali koji na izjednačen način uspoređuju reaktorske sustave i cikluse goriva, promatrajući sve faze, a osobito pozorno obogaćenje i preradu. U sklopu INFCE radilo je osam grupa, a svaka je izradila iscrpan izvještaj.

Neki od glavnih zaključaka o najvažnijim pitanjima mogu se istaknuti:

Zalihe urana. Rast nuklearne energetike u sklopu studije INFCE prognoziran je u širokom rasponu od 850 GW(e) do 1 200 GW(e) u 2000. godini i 1 800 GW(e) do 3 900 GW(e) u 2025. godini za zemlje izvan područja planskih ekonomija. Na temelju procjene dugoročnog razvoja zaliha urana (uključivši i danas spekulativne zalihe, zaključuje se da će trebati značajno poboljšati termičke i oplodne reaktore ubrzo nakon godine 2000, ako se nuklearna energetika bude razvijala prema gornjoj granici prognoza. Ako razvoj bude približno na donjoj granici, zalihe urana dostajat će do godine 2025. I u tom slučaju razvoj reaktorskih tehnologija pridonijet će sigurnosti opskrbe uranom. Unaprijediti se može tehnologija bez prerade goriva, pa bi se tako moglo uštedjeti od 10 % do 15 % u lakovodnih reaktora i oko 30 % u teškovodnih. Veće uštede moguće su s uran-torijevim ciklusima goriva, ali takvi ciklusi neće biti raspoloživi prije 2000. godine. Upotreba brzih oplodnih reaktora s povoljnim faktorima oplodnje mogla bi nuklearni razvoj praktički osloboditi ograničenja što ih uzrokuje dobava urana.

Recikliranje plutonija. Malo je vjerojatno da će se ostvariti značajnije ekonomske prednosti pri recikliranju plutonija u lakovodnim reaktorima. No ako bi se investicijski troškovi i troškovi ciklusa goriva brzih oplodnih reaktora mogli dovoljno smanjiti, tada bi plutonij bio najpogodniji za upotrebu u brzim oplodnim reaktorima. Zaključuje se da se ni jednom ciklusu goriva ne može pridijeliti prednost u svim situacijama, specifičnim za pojedine zemlje.

Tehnologija ciklusa goriva. Kapaciteti za obogaćivanje urana u pogonu i gradnji

dovoljni su do 1990. godine, a s planiranima do 1995. godine. Tehnologija dobivanja teške vode razvijena je, a osnovna sirovina je obična voda. Utvrđeno je da sve zemlje računaju s preradom goriva u bližoj ili daljoj budućnosti no ne nužno u vlastitim instalacijama. Osnovna je tehnologija prerade razvijena, osim za preradu većih razmjera goriva iz brzih oplodnih reaktora. Zaključuje se da za odlaganje radioaktivnog otpada niske i srednje aktivnosti postoje iskušane metode, dok se za vrlo aktivan otpad neke pretpostavke mogu provjeriti samo u izgrađenim odlagalištima. Odlaganje radioaktivnog otpada iz bilo kojeg ciklusa goriva može se izvršiti s visokim stupnjem sigurnosti.

Dostupnost nuklearne tehnologije i usluga. Zaključuje se da će razvoj dodatnih izvora urana i nove instalacije za obogaćenje omogućiti širi izbor zemljama korisnicama. Opskrbljivanje bi se moglo popraviti i načiniti pouzdanijim s pomoću međunarodnih institucija (npr. Banka za nuklearno gorivo — International Nuclear Fuel Bank). Osnovni problem, ističe se, su mogućnosti državnih intervencija u komercijalne tokove, s pomoću raznih ograničenja za izvoz nuklearnih materijala ili opreme. Nesigurnosti bi mogle nepovoljno utjecati na razvoj nuklearne energije. Izjednačene, konzistentne i predvidive primjene uvozno-izvoznih kontrola u skladu s jasno određenim kriterijima pridonijele bi uklanjanju nesigurnosti. "Ako bilateralni ugovori ograničuju preradu goriva ili transfer tehnologije trećoj zemlji, kriteriji trebaju biti jasno utvrđeni prije sklapanja dugoročnih ugovora o dobavi goriva."

Smanjenje opasnosti od širenja nuklearnog oružja. Širenje nuklearnog oružja primarno je politički, a ne tehnički problem. Budući da INFCE nije trebao promatrati političke aspekte, raspravljalo se uglavnom o tome koliko bi zloupotrebe ciklusa goriva mogle pomoći političkoj odluci da se načini nuklearno oružje. Međunarodni sporazumi i ugovori koji trebaju sprečavati zloupotrebe već postoje — Međunarodna agencija za atomsku energiju, zatim Ugovor o neširenju nuklearnog oružja i Ugovor o zabrani nuklearnog oružja u Latinskoj Americi (Tlatelolco Ugovor).

Zloupotreba instalacija ciklusa goriva nije ni najlakši ni najdjelotvorniji put da se nabavi materijal za nuklearno oružje. Ali ako postoje instalacije u kojima se takvi materijali prerađuju i s njima radi, u nekim uvjetima zloupotreba bi mogla biti put do materijala za nuklearna oružja. Nakon tih općih tvrdnji raspravljalo se o osjetljivosti pojedinih faza ciklusa goriva za eventualne zloupotrebe. Opasnost od širenja nuklearnog oružja inherentna je procesu obogaćenja urana, te je zbog smanjenja opasnosti poželjno ograničiti broj tih instalacija. Za termičke reaktore adekvatna otpornost prema zloupotrebi širenja nuklearnog oružja postoji za cikluse goriva bez prerade, uz odgovarajuću kontrolu pri obogaćenju, izradi goriva te odlaganju istrošenog goriva. Za reaktore s prirodnim uranom, samo posljednja od te tri faze omogućuje eventualne zloupotrebe. Pri uran-torij ciklusu goriva u kojem bi se koristio visoko obogaćeni uran kontrolne mjere bile bi osobito važne.

Prerada goriva osjetljiva je faza ciklusa goriva s obzirom na mogućnost zloupotrebe, no kada se promatraju podfaze u procesu prerade, onda se razabire da osjetljivost ovisi o tome da li se radi o diverziji, kada bi prijevoz bio najslabije mjesto. Izrada elemenata goriva bila bi najslabije mjesto ako bi državni organi izdvajali gorivo na prikriven način, a ako bi to radili neprikriveno skladište plutonija bilo bi najosjetljivije mjesto. Ne procjenjuje se da bi faze spremanja radioaktivnog otpada ili istrošenog goriva trebale zabrinjavati, dijelom zbog visoke aktivnosti otpada, a dijelom zbog relativno jednostavne kontrole ulaza ili otkrivanja diverzije u geološkim odlagalištima.

U raspravi o tehničkim mjerama koje bi mogle otežati zloupotrebe, ističe se da bi takve mjere mogle smanjiti opasnost izdvajanja bez znanja državnih organa, ali bi slabo mogle utjecati na izdvajanje

koje se temelji na odlukama državnih organa i prema tome na širenje nuklearnog oružja. Više treba očekivati od međunarodne nuklearne suradnje. Istaknuto je da postoji komplementarnost između osiguranja dobave nuklearnih usluga i osiguranja od širenja nuklearnog oružja. Spominju se kao pogodni za obje svrhe razni oblici suradnje, razne mogućnosti pojedinih faza ciklusa goriva.

Posebne potrebe zemalja u razvoju. Prema načinu na koji je inicirana INFCE, u njoj nisu bili središnji problemi zemalja u razvoju. One su ipak mogle iznijeti svoja shvaćanja u široj raspravi. Utvrđeno je da bi MAAE mogla više pomoći zemljama u razvoju, ne samo u pripremnim fazama za gradnju elektrane nego i u fazama pogona i ciklusa goriva. Zemlje u razvoju misle da bilateralni ugovori između razvijenih zemalja i zemalja u razvoju treba da zadovolje određene kriterije u pogledu potrebe zemalja u razvoju i ometanja mirnodopskog razvoja nuklearne energije kontrolnim mjerama. Da bi se pomoglo zemljama u razvoju međunarodni sporazumi mogli bi regulirati i stimulirati:

a) sigurnost dobave goriva i teške vode,

b) sudjelovanje u specifičnim aktivnostima ciklusa goriva,

c) organiziranje specijalnih programa za nuklearne kadrove,

d) raspoloživost sredstava za nuklearne programe u međunarodnim novčanim organizacijama.

Osnivanje Međunarodnog centra za tehnologiju (International Technology Centre) pod okriljem MAAE moglo bi pridonijeti prijenosu praktičnih znanja potrebnih u nuklearnoj tehnologiji.

5.9.3. Prilike nakon Međunarodne procjene ciklusa goriva (INFCE)

Situacija nakon studije INFCE kompleksna je a ocjena ovisi o stajalištu. Amerikanci su prije studije INFCE uveli pojam „osjetljivih tehnologija", misleći ponajprije na preradu goriva i upotrebu plutonija. Amerika se odlukama Carterove administracije i sama odriče te tehnologije, zaustavlja razvoj oplodnih reaktora, a pokretanjem INFCE pokušava uvjeriti druge zemlje da je takva odluka i ekonomsko-tehnički utemeljena. U tome ne uspijevaju. Zemlje kao Francuska, SR Njemačka i Japan nemaju urana i drugih energetskih zaliha pa ne mogu prihvatiti ono što si SAD mogu dozvoliti. Te države tvrde da je širenje nuklearnog oružja ponajprije političko pitanje, i da se stoga tehničkim mjerama ne može riješiti.

U takvoj situaciji američko gledište mijenja se u shvaćanje da „problem nije u osjetljivim tehnologijama nego u osjetljivim zemljama" [Wi 1979]. Pitanje je kako i prema kojim bi se međunarodnim kriterijima zemlje mogle tako klasificirati, osim prema blokovskoj pripadnosti.

Zemlje u razvoju ne mogu biti zadovoljne s nametanjem ograničenja koja koče razvoj nuklearne energetike, bez obzira da li su ona obrazložena osjetljivošću tehnologije ili drugim argumentima. Budući da su neispunjavanjem obveza iz Ugovora o neširenju nuklearnog oružja, NPT velike nuklearne sile izgubile moralno pravo da traže pridržavanje ugovornih ograničenja od drugih zemalja potpisnica, one razvijaju prisile, kartele i jednostrana ograničenja. Tome se mogu oduprijeti i odupiru se industrijski snažne zemlje, Japan, Francuska ili SR Njemačka, sposobne da i same razviju „osjetljive tehnologije". Međutim zemlje u razvoju ostaju u nepovoljnom položaju. One su principijelno protiv toga da se umjesto napretka u nuklearnom razoružanju pooštrava kontrola i uvode ograničenja u miroljubivoj upotrebi nuklearne energije. Osnovni problem današnjice jest opasnost od ogromnog nuklearnog naoružanja dviju supersila. Ako uspješna kontrola širenja nuklearnog oružja olakšava da se takvo stanje trajno održava i razvija, pitanje je da li zemlje u razvoju trebaju i dalje biti spremne da prihvaćaju tako neravnopravan ugovor kao što je Ugovor o neširenju nuklearnog oružja.

Nuklearna energija može znatno pridonijeti da se premosti razvojni raskorak. No, za to je potrebno i istinsko nastojanje velikih sila u tom pravcu. Jasno je da bez napretka prema nuklearnom razoružanju takvu promjenu klime ne treba očekivati. Prikazan razvoj ograničenja za nuklearnu energetiku pokazuje da se **nuklearno naoružanje i široko miroljubivo korištenje nuklearne energije međusobno isključuju.** Iako Ujedinjeni narodi i niz drugih organizacija, te mnoge istaknute osobe javnog života tvrde da je jaz između bogatih i siromašnih jedan od osnovnih problema ili upravo osnovni problem današnjice, kratkovidni i kratkoročni interesi koče akcije kojima bi se te razlike smanjile.

Svijet s nesmanjenim nuklearnim naoružanjem i s rastućim raskorakom između razvijenih i nerazvijenih stalno je na rubu katastrofe.

Literatura

[Ap 78] Report to the American Physical Society of a Study Group on Nuclear Fuel Cycles and Waste Management, Rev. Mod. Physics 50, (1978) 1

[At 79] *US Reactor Safety Study Reviewed*, Editorial: Atom, May (1979) 120

[At 82] *Fast Reactor Fuel Cycle*, Editorial: Atom, January (1982) 7

[Ba 60] Noel-Baker, P.: *The Arms Race*, John Calder Ltd London, 1960.

[Be 75] Bethe, H. A.: *No fundamental change in situation*, Bull. Atomic Scientists, Sept. (1975)

[Be 77] Beebe, G. W., H., Kato, C. E., Lund: *Mortality Experience of Atomic Bomb Survivors*, 1950—74. Hiroshima, Japan: Radiation Effects Research Foundation RERF TRI 77, 1977.

[Bi 81] Birkhofer, A.: *Risk Studies for Nuclear Power Plants-Merit and Limitations*, Proc. IIASA /IFAC Symposium on Modelling of Large Scale Energy Systems, 1980, Pergamon Press Oxford, 1981.

[Ca 81] Campbell, D. O., A. P., Malinauskas, W. R., Stratton: *The Chemical Behaviour of Fission Product Iodine in Light Water Reactor Accidents*, Nuclear Technology, May (1981) 111

[Co 77] Cohen, B. L.: *High Level Radioactive Wastes from Light Water Reactors*, Rev. Mod. Phys. Vol. 49, Jan. (1977) 1

[Co 78] Cohen, B. L.: *Health Risks of Nuclear Power*, The Physics Teacher, Nov. (1978) 526

[Co 80] Cohen, B. L.: *Society's Valuation of Life Saving in Radiation Protection and other Contexts*, Health Physics, Vol. 38, Jan. (1980) 33

[Co 81] Corey, G. R.: *An Economic Comparison of Nuclear, Coal and Oil-fired Electric Generation in the Chicago Area*, Annual Review of Energy, Vol. 6, (1981) 417

[Co 82] Cohen, B. L.: *Physics of Reactor Meltdown Accident*, Nuclear Science and Engineering 80, (1982) 47

[Da 81] Daglish, J.: *„Secret" fallout*, Atom, Oct. (1981) 266

[De 80] Deffeyes, K. S., I. D., MacGregor: *World Uranium Resources*, Scientific American, Jan. (1980) 50

[EE 76] *Economics Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants*, A Guide book, IAEA, Vienna, 1976.

[EI 75] *Environmental Impact Statement U. S. LMFBR Program*, ERDA — 1535, December 1975.

[EP 79] *Comparison of EPRI and Lewis Committee Review of Reactor Safety Study*, EPRI-NP--1130, (1979)

[GE 76] *Final Generic Environmental Statement on the Use of Recycle Plutonium in Mixed Oxide Fuel in Light Water Cooled Reactors*, NUREG — 0002, 1976.

[Gr 79] Graves, H. W.: *Nuclear fuel management*, John Wiley, London, 1979.

[Gr 78] Griffiths, R. F.: *Reactor Accidents and Environment*, Atom, December (1978) 314

[Ha 79] Harris, P., De Verle: *World Uranium Resources*, Annual Review of Energy, Vol. (1979) 403

[Ho 80] Holdren, J. P., G., Morris, J., Mintzer: *Environmental Aspects of Renewable Energy Sources*, Annual Review of Energy, Vol. 5, (1890) 241

[Hu 78] Hunt, H., G., Betteridge: *The Economics of Nuclear Power*, Atom, December (1978) 326

[IA 78] *Status and prospects of thermal breeders and their effect on fuel utilisation*, Report by consultans, IAEA, Vienna, 1978.

[IA 81] *Underground Disposal of Radioactive Wastes, Basic Guidance*, Safety Series No 54, IAEA, Vienna, 1981.

[In 78] Inhaber, H.: *Risk of Energy Production*, Atomic Energy Control Board of Canada 1119, Ottawa, 1978.

[Ka 82] Kato, W. Y.: *TMI — 2 and Reactor Safety*, Operational physics of power reactors, ICTP 1982.

[Ke 82] Kehoe, R. B., D., Aston: *URENCO — The expanding enricher*, Nuclear Europe 9, (1982) 11

[La 80] Lakota, L., V., Knapp, V., Nastasić, V., Štambuk, B., Burdukalo, M., Horvatić: *Uporedba teškovodnih PHWR i tlakovodnih PWR reaktora nuklearnih elektrana*, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1980.

[La 83] Lakota, J., V., Knapp: *Usporedba teškovodnih PHWR i tlakovodnih PWE reaktora nuklearnih elektrana.* Dio II, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1983.

[Le 81] Lellouche, G. S.: *EPRI Wash — 1400: A Comparison of Experience and Prediction*, Nuclear Technology, Vol. 53, May (1981) 231

[Le 81] Levenson, M.: *A perspective*, Nuclear technology, May (1981) 97

[Le 81] Levenson, M., F., Rahn: *Realistic Estimates of Consequences of Nuclear Accidents*, Nuclear technology, May (1981) 99

[Lo 80] Lorenz, R. A., et al.: *Fission Product Release from Hightly Irradiated LWR Fuel*, NUREG/CR-0722, Oak Ridge Nat. Lab., 1980.
[Ma 77] Mancuso, T. F., A., Stewart, G., Kneale: *Radiation exposures of Hanford workers dying from cancer and other causes*, Health Physics 33, (1977) 369
[MA 78] *Status and prospect of thermal breeders and their effect on fuel utilisation*, Report by consultants, IAEA 1978. (Limited distribution)
[Mo 81] Morewitz, H. A.: *Fission product and aerosol behaviour following degraded core accident*, Nuclear Technology, May (1981) 120
[MR 75] British Medical Research Council: *The Toxicity of Plutonium*, HMSO, London, 1975.
[NEI 80] Nowles, L. R.: *Nuclear Stations Achievements*, Nuclear Engineering International, Sept. (1980)
[NF 78] *Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High-Level Reprocessing Waste*, Vols I i IV, Kärn — Bränsle — Säkerhet, Nuclear Fuel Safety Group, Stockholm, 1978.
[NP 77] *Nuclear Power Issues and Choices*, Nuclear Energy Policy Study Group, Mitre report, Ballinger, Cambridge, Massachusetts, 1977.
[NR 74] U K National Radiological Protection Board: Report R — 29 and Bulletin No. 8, 1974.
[Po 80] Pochin, E. E.: *Biological Risks Involved in Power Production*, Physics in Technology, Vol. 11 (1980) 93
[Ra 75] Rasmussen, N. C.: *The Safety Study and Its Feedback*, Bulletin of Atomic Scientists, Sept. (1975) 9
[Ra 81] Rasmussen, N. C.: *The Application of Probabilistic Risk Assessment Techniques to Energy Technologies*, Annual Review of Energy, Vol. 6 (1961) 123
[RN 77] *Regional Nuclear Fuel Cycle Centres*, Vol. I, Summary, Report of the IAEA Study Project, IAEA, Vienna, 1977.
[Sa 80] Sahin, S., J., Ligou: *The Effect of the Spontaneous Fission of Plutonium*-240 *on the Enery Release in Nuclear Explosive*, Nuclear Technology, Vol. 50, No. 1 (1980).
[Sc 77] Scarboraugh, I. C.: *Comparative costs for Prototype Large Breeder Reactor*, American Nuclear Society Winter Meeting San Francisco, California, Nov. 27-Dec. 2 1977.
[St 81] Sternglass, E.: *Secret Fallout*, Mc Graw Hill, New York, 1981.
[Ta 74] Tamplin, A. R., T. B., Cochran: Report, Natural Resources Defense Council, 1974.
[UN 77] United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, *Sources and Effects of Ionising Radiation*, New York, 1977.
[UN 79] *The Environmental Impacts of Production and Use of Energy*, Part II. Nuclear Energy, United Nations Environment Programme Report of the Executive Director, Nairobi, 1979.
[WASH 1250] *The Safety of Nuclear Power Reactors and Related Facilities*, USAEC, 1973.
[WASH 1400] *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants*, USAEC, 1974 (Draft), final report 1975.
[Wi 79] Willrich, M.: *A Workable International Nuclear Energy Regime*, Washington Quartely, Spring (1979)

Opća literatura iz područja fisijske energetike

Popović, D.: *Nuklearna energetika*, Naučna knjiga, Beograd, 1978.
Požar, H.: *Osnove energetike, I i II*, Školska knjiga, 1976. i 1978.
Duderstadt, J. J., L. J., Hamilton: *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley, London, 1976.
Lamarsh, I. R.: *Nuclear Reactor Theory and Power Reactors*, 13. February — 10 March 1978, Trieste, International Centre for Theoretical Physics, 1980.
Glastone, S., A., Sesonke: *Nuclear Reactor Engineering*, Van Nostrand Reinhold, III Ed., New York, 1981.
Weisman, I., Ed.: *Elements of Nuclear Reactor Design*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1977.
Smidt, D.: *Reaktortechnik*, G. Braun, Karlsruhe, 1976.
Graves, H. W.: *Nuclear Fuel Management*, John Wiley, London 1979.
Villani, S. Ed.: *Uranium Enrichment*, Springer Verlag, Berlin, 1979.
Farmer, F. R.: *Nuclear Reactor Safety*, Academic Press, New York, 1977.
Lewis, E. E.: *Nuclear Power Reactor Safety*, John Wiley, London, 1977.
Smidt, D.: *Reaktor-Sicherheitstechnik*, Springer Verlag, Berlin 1979.
Cohen, B. L: *Before it's to late*, Plenum Press, 1983.

6. Nuklearna fuzija

Namjena je ovog dijela da prikaže razvoj fuzije te fizikalne i tehnološke probleme koji se sada istražuju, a značajni su za realniju procjenu perspektive nuklearne fuzije. Napori u istraživanjima fuzije dugotrajni su i intenzivni, što je potpuno razumljivo s obzirom na perspektivu koja se otvara. Perspektiva nuklearne fuzije veoma je lijepo bila izražena riječima Homi Bhabhea — poznatog fizičara i začetnika indijskog fisijskog energetskog razvoja — u predsjedničkom govoru na prvoj Ženevskoj konferenciji o mirolјubivoj upotrebi atomske energije 1955. godine:

„Tehnički su problemi golemi, ali valja se sjetiti da još nije prošlo ni 15 godina od prvog oslobađanja atomske energije u reaktoru što ga je načinio Fermi. Usuđujem se pretskazati da će se u iduća dva desetljeća naći metode za oslobađanje energije fuzije na kontrolirani način. Kad se to postigne, energetski problemi svijeta bit će doista riješeni zauvijek jer će gorivo biti neiscrpno kao što je to teški vodik iz oceana."

Na četvrtoj Ženevskoj konferenciji 1971. godine Glen Seaborg, nobelovac i predsjednik Američke atomske komisije (kao predsjednik konferencije) procijenio je da će se prognoza iz 1955. godine ispuniti ako ne do 1975. godine, gotovo sigurno prije 1980.

Da li će se prognoza o kontroliranoj fuziji ostvariti prije 1990. vrlo je važno za procjenu razdoblja u kojem bi se moglo očekivati korištenje energije fuzije u elektranama.

Dakako, postizanje uvjeta za kontroliranu fuziju nije isto što i izgradnja tehnički i ekonomski prihvatljive elektrane. To neizostavno početno razdoblje u razvoju energije fuzije može se usporediti sa stanjem u kojem je fisija bila iza 1942. godine, kada je u Chicagu prvi put uspostavljena kontrolirana lančana reakcija. Još su dva desetljeća trebala za razvoj tehnički i ekonomski prihvatljivih nuklearnih elektrana. Tehnološki problemi fuzijskih elektrana mogli bi biti još mnogo ozbiljniji. Ocjenjujući da će se uvjeti za fuziju ostvariti do 1980. godine, Glen Seaborg zaključio je da se fuzijske elektrane velike snage i ekonomske kompetitivnosti ne mogu očekivati mnogo prije kraja stoljeća.

6.1. Fizikalne osnove

6.1.1. Fuzijske reakcije i njihovi intenziteti

Nuklearnu fuziju možemo usporediti s procesom gorenja, tj. spajanjem kemijski slabije vezanih atoma ili molekula u jače vezane molekule. U nuklearnoj fuziji slabo vezane lake jezgre spajaju se u teže u kojima je prosječna nukleonska energija vezanja povećana. Rezultat je oslobađanje energije u procesu. Najvažnije reakcije fuzije jesu reakcije među jezgrama deuterija ${}^{2}_{1}\mathrm{H}, (\mathrm{D})$ i tricija ${}^{3}_{1}\mathrm{H}, (\mathrm{T})$ s pozitivnim Q vrijednostima reakcije.

$$\mathrm{D}+\mathrm{D}\rightarrow{}^{3}\mathrm{He}+\mathrm{n}; \qquad Q=3{,}27\ \mathrm{MeV} \qquad (6.1)$$

$$\mathrm{D}+\mathrm{D}\rightarrow\mathrm{T}+\mathrm{p}; \qquad Q=4{,}03\ \mathrm{MeV} \qquad (6.2)$$

$$\mathrm{D}+\mathrm{T}\rightarrow{}^{4}\mathrm{He}+\mathrm{n}; \qquad Q=17{,}6\ \mathrm{MeV} \qquad (6.3)$$

Ako je kinetička energija čestica koje započinju reakciju malena, onda Q vrijednost predstavlja kinetičku energiju čestica nakon reakcije.

U (D, T) reakciji u takvom slučaju kinetičke energije neutrona i jezgre ${}^{4}\mathrm{He}$ iznose 14,1 MeV i 3,5 MeV.

Osim navedenih, mnogo je i drugih nuklearnih reakcija u kojima se nakon faze spajanja dviju jezgara oslobađa energija. Spomenute reakcije najvažnije su prema današnjim gledištima o ostvarivanju fuzije jer bi se one najprije mogle upotrijebiti za dobivanje energije fuzije. Osnovni je problem u tome što je potrebno uložiti energiju da bi fuzija uopće otpočela, tj. da bi se svladale odbojne sile među jezgrama. Razumljivo je da je

taj problem sve izraženiji što su jezgre teže, pa se zasad istražuje fuzija najlakših jezgara.

Izotop vodika — tricij radioaktivan je nuklid ($T_{1/2}=12{,}3$ godina) kojeg ne nalazimo u prirodi, pa su za fuziju važne i reakcije u kojima se proizvodi tricij. Od takvih su najinteresantnije reakcije na izotopima litija:

$$^6\mathrm{Li}+\mathrm{n}\rightarrow\mathrm{T}+^4\mathrm{He} \qquad Q=4{,}76\ \mathrm{MeV} \qquad (6.4)$$

$$^7\mathrm{Li}+\mathrm{n}\rightarrow\mathrm{T}+^4\mathrm{He}+\mathrm{n}\ Q=-2{,}47\ \mathrm{MeV} \qquad (6.5)$$

Teški vodik — deuterij, s masenim brojem dva — koji ulazi u sve reakcije fuzije nalazi se u prirodnom vodiku kao izotopni sastojak jednim dijelom u sedam tisuća dijelova.

Navedene (i druge) reakcije fuzije ostvarene su i detaljno istraživane s pomoću akceleratora čestica u nuklearnim laboratorijima.

No, energija se ne može dobivati na takav način. Akcelerator je prilično nedjelotvoran uređaj ako se usporedi energija potrošena na njegov pogon s s energijom dobivenih ubrzanih čestica. Zatim, najveći dio ubrzanih čestica troši svoju energiju na atomske procese bez nuklearnih reakcija. To i jest osnovni fizikalni razlog zbog kojeg se akceleratorom ne može ostvariti pozitivna energijska bilanca.

Način odvijanja fuzije u unutrašnjosti zvijezda putokaz je za ostvarenje takve pozitivne bilance. Pri temperaturama više desetaka milijuna kelvina materija je potpuno ionizirana — energija se ne troši na atomska pobuđenja ili ionizacije, a kinetička energija toplinskog gibanja dovoljna je za svladavanje odbojne sile među lakim jezgrama. Toplinska energija potrebna za zagrijavanje do tako visokih temperatura nije velika prema dobitku energije. Oslobađanje energije fuzije i pozitivna bilanca ostvarene su i u zemaljskim uvjetima, na nekontroliran način, pri eksploziji hidrogenske bombe. Potrebno inicijalno zagrijavanje postignuto je fisijskom nuklearnom eksplozijom.

Sasvim je drukčiji problem postignuti potrebne temperature na kontroliran način — u fuzijskom uređaju. Temperatura viša od 10 000 K bila je svojevrsno dostignuće u laboratoriju prije ne tako mnogo godina ali je otada napredak bio izvanredan.

Zadnjih se godina gotovo rutinski postižu milijunske temperature u plinskoj plazmi, tj. neutralnoj smjesi pozitivnih i negativnih iona. No, premda je visoka temperatura nužan uvjet za odvijanje fuzije, to nije i dovoljno da se postigne pozitivna energijska bilanca. Osim dobitka energije iz odvijanja reakcije, plinska plazma gubi energiju na nekoliko načina. Da bi energetska bilanca bila pozitivna potrebno je da se određena temperatura održava dovoljno dugo pri dovoljno velikoj gustoći plazme.

Pogledajmo najprije o čemu ovisi dobitak energije fuzijom. O procesu fuzije u plazmi odlučuju vjerojatnosti za nuklearne reakcije između para deutron-triton (D, T), odnosno deutron-deutron (D, D), koje izražene udarnim presjekom za fuziju σ_f imaju oblik [vidi npr. Ka 1975]:

$$\sigma_f=\sigma_0\frac{K^2}{E}\mathrm{e}^{-\frac{K}{\sqrt{E}}} \qquad (6.6)$$

gdje je E energija relativnog gibanja čestica.

Gledajući na klasičan način lako je odrediti potrebnu energiju da bi se dvije nabijene čestice dovele u kontakt. Za dva izotopa vodika ta energija iznosi 0,28 MeV. Drugim riječima, 0,28 MeV čini energetski prag, odnosno potencijalnu barijeru za fuzijsku reakciju. Ni zvjezdane temperature, od stotina milijuna kelvina nisu dovoljne da bi se svladala ta potencijalna barijera. No, fuzija se na tim temperaturama ipak odvija. Objašnjenje je u valnoj mehanici, u kojoj postoji vjerojatnost prolaza kroz barijeru potencijalne energije, iako energije klasično gledajući nisu dovoljne. Vjerojatnost reakcije bitno je određena vjerojatnošću prolaza kroz potencijalnu barijeru.

U gornjoj relaciji za fuzijski udarni presjek, eksponencijalni faktor izražava vjerojatnost „tuneliranja" kroz potencijalnu barijeru među reaktantima te raste s energijom. Parametar K malo se mijenja s tipom reakcije. Ako se energija E izrazi jedinicom elektronvolt (eV), vrijednosti parametara K i σ_0 jesu

za (D, D) reakciju

$K=1\,448\ (\mathrm{eV})^{1/2}$ $\sigma_0=0{,}14\cdot 10^{-28}\ \mathrm{m}^{-2}$

za (D, T) reakciju

$K=1\,404\ (\mathrm{eV})^{1/2}$ $\sigma_0=11\cdot 10^{-28}\ \mathrm{m}^{-2}$.

Udarni presjeci za dvije reakcije fuzije prikazani su na slici 6.1. Razabire se da je vjerojatnost (D, T) reakcije veća za dva reda veličine od vjerojatnosti (D, D) reakcije. To su razlike u iznosima σ_0, što je određeno nuklearnim svojstvima jezgara deuterija i tricija, odnosno jezgara koje se dobiju fuzijom. To ujedno objašnjuje zašto se (D, T) reakcijom nastoji postignuti fuzija, iako bi se (D, D) reakcija mogla činiti povoljnijom jer ne treba tricija.

Polazeći od udarnih presjeka σ_f možemo izračunati broj fuzija u jediničnom volumenu miješane plazme koja se sastoji od iona tricija i deuterija. Ako su N_1 i N_2 brojevi jezgara u jedinici volumena, σ_f udarni presjek za fuziju, a v relativna brzina deutrona i tritona — brzina reakcije (odnosno broj reakcija u jedinici vremena i u jedinici volumena) bit će $R=N_1N_2\,\sigma_f v$. Pri postojanju određene raspodjele brzina gibanja dviju vrsta čestica, te njom određene raspodjele relativnih brzina trebat će integrirati po relativnoj brzini, odnosno u relaciju staviti odgovarajuću srednju vrijednost umnoška $\sigma_f v$, tj.

$$R=N_1\,N_2\,\overline{\sigma_f v}. \tag{6.7}$$

Uzme li se fuzijski udarni presjek dan relacijom (6.6), te Maxwell-Boltzmannova statistička raspodjela brzina, dobiva se ovisnost prosječne vrijednosti $\overline{\sigma_f v}$ o temperaturi prikazana na slici 6.2. Izrazi koji se dobivaju za brzinu reakcije fuzije izraženu jedinicom 1/s cm³ jesu

(D, D) reakcija:

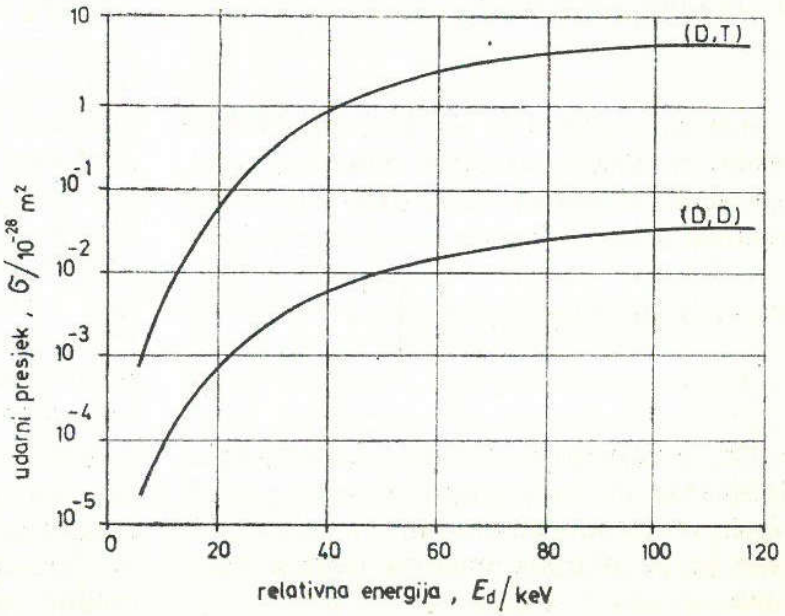
$$R=2{,}3\cdot 10^{-14}\,N_{\mathrm{D}}^2\left(\frac{1}{kT}\right)^{2/3}\mathrm{e}^{-18{,}8/(kT)^{1/3}} \tag{6.8}$$

(D, T) reakcija:

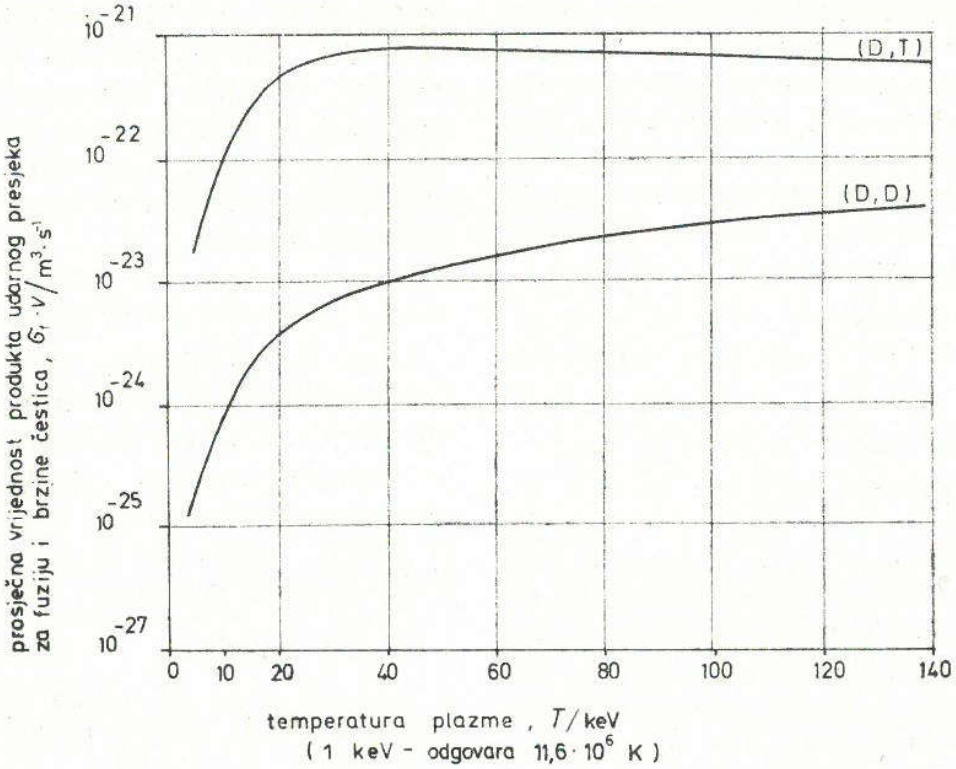
$$R=3{,}7\cdot 10^{-12}\,N_{\mathrm{D}}N_{\mathrm{T}}\left(\frac{1}{kT}\right)^{2/3}\mathrm{e}^{-20/(kT)^{1/3}} \tag{6.9}$$

[Detalje vidi npr. u Ka 1975.]

U fizici plazme uobičajeno je temperaturu izraziti prosječnom energijom čestica. Ona iznosi 1 eV pri temperaturi 11 600 K. Energija 1 keV odgovara približno temperaturi 10 milijuna kelvina.



Slika 6.1. Udarni presjeci za (D, T) i (D, D) reakciju kao funkcije relativne energije čestica



Slika 6.2. Prosječna vrijednost umnoška $\sigma_f v$ ovisno o temperaturi plazme

U relacijama (6.8) do (6.10) kT je u keV.

Iako maksimum za (D, T) reakciju leži u području oko 50 keV do 60 keV, odnosno na temperaturi od 500 do 600 milijuna kelvina, slika 6.2. pokazuje da i sa znatno nižom temperaturom (100 milijuna kelvina) vrijednost $\sigma_f v$ nije previše smanjena. Ako energija fuzije oslobođena u jednoj reakciji iznosi E_f, snaga koja se razvija u jedinici volumena iznosi

$$P = E_f \cdot R$$

odnosno, stavimo li da je energija koja ostaje u plazmi energija alfa-čestice, tj. 3,5 MeV, koristeći izraz (6.4) dobivamo gustoću snage izraženu jedinicom W/cm³.

$$P_{D,T} = 2 \cdot 10^{-24} N_D \cdot N_T \left(\frac{1}{kT}\right)^{2/3} e^{-20/(kT)^{1/3}} \qquad (6.10)$$

Pri temperaturi 10 keV ($kT = 10$ keV) dobivamo gustoću snage $P_{D,T} = 6 \cdot 10^{-29} N_D N_T$, odnosno stavimo li $N_D = N_T = N/2$ gdje je N ukupna gustoća čestica izražena u cm^{-3} slijedi

$$P_{D,T} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-29} N^2. \qquad (6.11)$$

Za gustoću snage izraženu jedinicom MW/m³ dobiva se (za broj čestica N u kubičnom metru

$$P_{D,T} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-41} N^2 \qquad (6.12)$$

Zbog ekonomsko-tehničkih razloga gustoća snage mora biti unutar određenih granica (1 MW/m³ — 30 MW/m³). Premale vrijednosti uzrokuju prevelike investicijske troškove, a prevelike preopterećenje zidova posude u kojoj bi se fuzija odvijala. Time se postavljaju određene granice i gustoći plazme. Zahtjev za gustoćom plazme treba uskladiti i s potrebom dosizanja visoke temperature. Krene li se od normalnih gustoća (za plin pri temperaturi 20 °C i tlaku 0,1 MPa broj čestica u jediničnom volumenu iznosi približno $3 \cdot 10^{25}$ m^{-3}) zagrijavanje na desetke milijuna kelvina vodi do fantastično visokih tlakova.

Alternativno, zagrijavanje se mora početi na plazmi dovoljno niske gustoće i tlaka (oko 10^{-5} bar, odnosno 1 Pa) da bi konačan tlak zagrijane plazme bio unutar granica tehničke prihvatljivosti.

Na sreću, ako se s početnim tlakom 1 Pa odnosno s odgovarajućom brojnosnom gustoćom čestica N oko $3 \cdot 10^{20}$ m^{-3} izračuna gustoća snage, dobiva se prihvatljiva vrijednost reda MW/m^3. Dakako, takvo ograničenje neće postojati ako je volumen plazme koja se zagrijava vrlo malen prema volumenu reakcijske komore. Tada se može početi zagrijavati i od normalnih gustoća. Naravno, ekspanzija plazme ne može se spriječiti zbog ogromnih tlakova prouzročenih zagrijavanjem. Ekspanzija je ograničena samo mehaničkom inercijom čestica.

U takvom slučaju govori se stoga o „inercijalnom" ograničenju plazme. Fuzijski uređaj radio bi nužno ciklički, u sekvencijama: zagrijavanje, ekspanzija, vraćanje u početno stanje.

Zagrijavanje plazme mora se obaviti u vremenu kratkom prema vremenu ekspanzije plazme. Promatra se niz načina zagrijavanja, no, sada se najintenzivnije istražuje zagrijavanje s laserima.

Kad su gustoće male, ekspanzija zagrijane plazme može se zadržati magnetskim poljem. To je tzv. magnetsko ograničenje plazme. Oba se tipa ograničenja mogu okarakterizirati vremenom ograničenja plazme τ. Postizanje uvjeta za fuziju ovisi o umnošku gustoće plazme i vremena ograničenja $N\tau$.

6.1.2. Samoodržanje fuzije

Pogledajmo odnose nešto kvantitativnije. Ako se plazma inicijalno zagrije tako da započne fuzija, fuzija će se dalje održavati iako se energija ne dovodi izvana — ako dobitak energija fuzijom bar kompenzira gubitak energije.

Pretpostavimo li (D, T) reakciju, zagrijavanje plazme bit će posljedica apsorpcije alfa-čestica energije Eα.

Od ukupne energije fuzije koja iznosi 17,6 MeV alfa-čestice dobiva 3,5 MeV. Taj dio zagrijava plazmu, a ostatak odlazi iz plazme kao kinetička energija neutrona. Najveći gubici energije iz zagrijane plazme jesu zakočno zračenje elektrona te difuzija čestica plazme. Fuzijski dobitak energije P_F i gubitak energije zakočnim zračenjem P_{ZZ} proporcionalni su broju sudara, dakle — kvadratu gustoće, pored ovisnosti o temperaturi.

Brzina gubljenja energije difuzijom P_D karakterizira se vremenom τ_E, vremenom ograničenja energije u plazmi.

Ukupna toplinska energija plazme $3NkT$ (ioni i elektroni) gubi se za vrijeme τ_E, pa je brzina gubljenja energije prikazana izrazom

$$P_D = \frac{3\,NkT}{\tau_E} \qquad (6.13)$$

Ako energija fuzije bar nadoknađuje gubitke difuzijom i zakočnim zračenjem, tj. ako je

$$P_F \geqslant P_{ZZ} + \frac{3\,NkT}{\tau_E} \qquad (6.14)$$

ispunjen je osnovni uvjet za samoodržanje fuzije.

U sudarima elektrona s jezgrama deuterija ili tricija radijacijsko gubljenje energije maleno je prema energiji fuzije, što se razabire iz približne nerelativističke relacije za snagu zakočnog zračenja (izraženo jedinicom MW/m^3) deuterijsko-tricijske plazme

$$P_{ZZ} = 2{,}14 \cdot 10^{-42} T_e^2 N_e N_i Z_i^2 \qquad (6.15)$$

u kojoj je T_e energija elektrona (keV), N_e i N_i brojnost elektrona, odnosno iona, a Z_i naboj iona na kojima se elektroni raspršuju.

Za brojnosti $N_e = N_i = 10^{20}$ m^{-3} i temperaturu $T_e = 16$ keV snaga je zakočnog zračenja $P_{ZZ} \approx 8 \cdot 10^{-2}$ MW/m^3, što je malo prema fuzijskoj snazi pri tim gustoćama i temperaturama. Situacija se, međutim, mijenja ako su u plazmi prisutne nečistoće, čestice visokog rednog broja jer intenzitet zakočnog zračenja raste s kvadratom rednog broja. Sadrži li plazma samo 1% primjesnih iona rednog broja $Z_i = 50$ povećava se gustoća snage zakočnog zračenja za 25 puta. Zbog takve osjetljivosti na nečistoće u plazmi postoje

ozbiljni tehnički problemi za buduće fuzijske elektrane.

Pišemo li $N_i = N_e = N/2$, te uvrstimo izraz za fuzijsku snagu P_F bilanca energije postaje

$$E\alpha \cdot \frac{N^2}{4} \overline{\sigma_f v} \geqslant F(T) N^2 + \frac{3NkT}{\tau_E} \qquad (6.16)$$

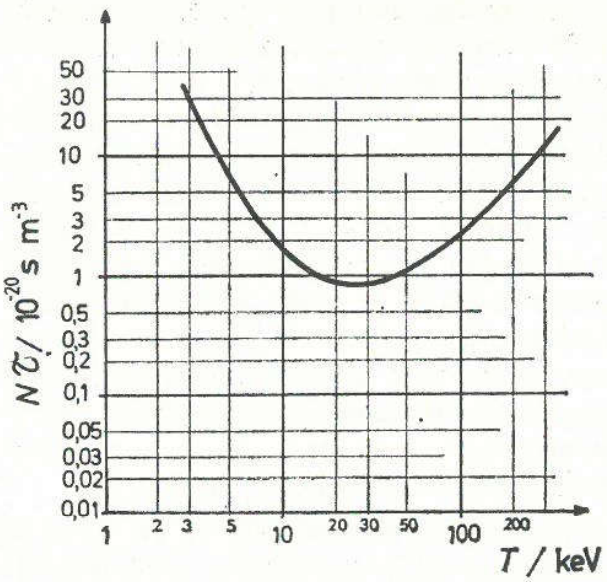
Funkcija F sadrži udarni presjek za zakočno zračenje odnosno temperaturnu ovisnost prema relaciji (6.15). Taj se uvjet najčešće piše u obliku u kojem je istaknut umnožak gustoće plazme i vremena τ_E. Slijedi

$$N\tau_E \geqslant \frac{3kT}{\frac{E\alpha}{4} \cdot \overline{\sigma_f v} - F(T)} \qquad (6.17)$$

U takvom obliku taj je uvjet poznat kao Lawsonov kriterij. S relacijama (6.7) i (6.9) za fuzijsku snagu i zakočno zračenje može se izračunati vrijednost umnoška $N\tau_E$ ovisno o temperaturi.

U energijskoj bilanci pretpostavljeno je da se gubici energije nadoknađuju energijom alfa-čestice koja se zaustavlja u plazmi. No, budući da veći dio energije odnosi neutron, ostaje višak energije koji se može iskoristiti. Nešto blaži uvjet za samoodržanje pri kojem nema viška energije, trebao bi biti izveden uz pretpostavku da se energija neutrona iskorištava za grijanje plazme. Za uočavanje bitnih ovisnosti to nije važno. Slika 6.3. prikazuje ovisnost umnoška $N\tau_E$ o temperaturi plazme. Pri inercijskom ograničenju plazme, tj. pri zagrijavanju guste plazme ne može se zanemariti recirkuliranje energije, zbog niske djelotvornosti uređaja za zagrijavanje plazme. Uvjet za pozitivnu energetsku bilancu ipak ima sličan oblik, a vrijeme τ_E određeno je ekspanzijom zagrijane plazme do gustoće pri kojoj prestaje fuzija.

Za (D, T) reakciju umnožak $N\tau_E$ ima minimum pri temperaturi oko 20 keV i vrijednosti oko 10^{20} s/m^3. Prema nižim temperaturama umnožak raste zbog opadanja udarnog presjeka za fuziju; pri višim raste zbog linearnog rasta



Slika 6.3. Temperaturna ovisnost Lawsonovog umnoška za (D, T) reakciju

gubitka energije difuzijom s temperaturom (brojnik) i usporenja rasta udarnog presjeka (nazivnik). Iz uvjetne jednadžbe razabire se također važnost postizanja dovoljne gustoće. Neto dobivena energija (fuzijska energija — zakočno zračenje) raste s kvadratom gustoće, a difuzijski je gubitak linearno proporcionalan gustoći.

Pri detaljnijem promatranju proizvodnje i potrošnje energije u fuzijskoj elektrani, proizvodnja energije u plazmi karakterizira se tzv. faktorom pojačanja Q koji je definiran kao omjer ukupno oslobođene energije u plazmi i u omotaču E_f te energije dovedene za zagrijavanje plazme E_{ul}

$$Q = \frac{\textit{energija oslobođena u fuziji } (E_f)}{\textit{energija dovedena plazmi } (E_{ul})} \qquad (6.18)$$

Osnovna bilanca — u kojoj je toplinska energija fuzije, pretvorena u električnu s toplinskom efikasnošću η_T, dovoljna za zagrijavanje plazme (efikasnost η_g) — može se pisati

$$(E_f + E_{ul})\eta_T = \frac{E_{ul}}{\eta_g}$$

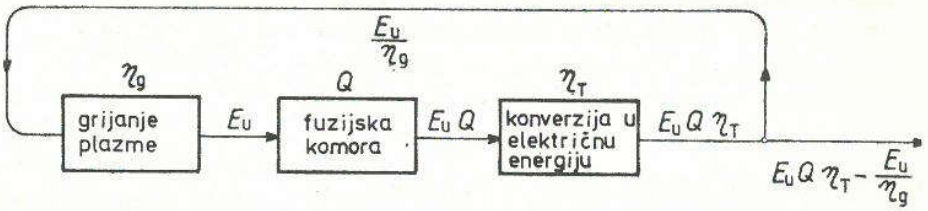
odnosno

$$(Q E_{ul} + E_{ul})\eta_T = \frac{E_{ul}}{\eta_g}$$

odakle slijedi $Q_s = \frac{1}{\eta_T \eta_g} - 1$ kao granična vrijednost koja upravo omogućuje samoodržanje fuzije.

Uzevši da je $\eta_T = 1/3$, a $\eta_g = 3/4$ (što su maksimalne vrijednosti), razabire se da je najmanja vrijednost faktora Q koja upravo omogućuje rad elektrane jednaka približno 3.

Za određene načine grijanja plazme treba računati s manjim, pa i znatno manjim vrijednostima η_g.



Slika 6.4. Shematski prikaz toka energije kroz glavne komponente fuzijskog sustava

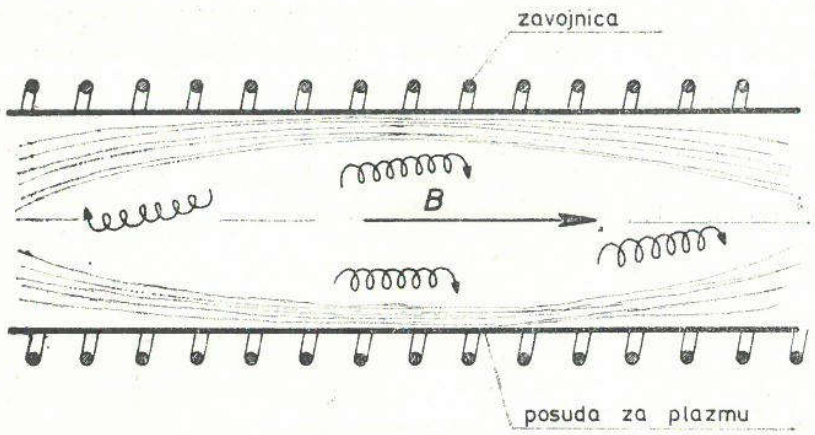
Na slici 6.4. prikazan je tok energije kroz osnovne komponente fuzijskog sustava. Granična vrijednost faktora pojačanja Q_s bitno ovisi o efikasnosti sustava za grijanje plazme, tj. o η_g, a efikasnost toplinske pretvorbe η_T bit će određena konvencionalnim promatranjem i tehnikom kakva se koristi u termoelektranama i fisijskim nuklearnim elektranama.

Zbog boljeg razumijevanja problema koji se pojavljuju pri postizanju fuzijskih uvjeta istaknimo određene razlike prema fisiji. U fisijskom reaktoru zbog održavanja lančane reakcije potrebna je određena količina goriva — kritična masa. S manjim količinama goriva fisija se ne može održavati. S druge strane Lawsonov uvjet za samoodržanje fuzije ne propisuje ukupnu masu, nego samo gustoću plazme, odnosno umnožak gustoće i vremena ograničenja, te se čini da nema ograničenja za masu, kao pri fisiji i da se fuzija može održavati s po volji malim masama. Međutim, to je tako samo načelno, odnosno u prikazu uvjeta Lawsonovim kriterijem. Pri magnetskom ograničenju plazme vrijeme τ_E ovisi o linearnim dimenzijama sustava, pa se povećanjem linearnih dimenzija sustava produžuje vrijeme τ_E, bez promjene ostalih parametara plazme. Kad samoodržanje fuzije još nije postignuto, prirodno je da se teži iskoristiti ta mogućnost, gradeći uređaje većih dimenzija. Naravno da se time ne bi smjelo zaobići rješavanje fizikalnih problema pri postizanju veće gustoće plazme, pogotovo dok još nije jasno da li su takve mogućnosti iscrpljene. U međuvremenu, dok i ako se u tom smjeru ne načini znatan napredak, za projektne studije fuzijskih uređaja s magnetskim ograničenjem plazme bit će karakteristične njihove velike dimenzije, a time i velike snage, tj. fuzijski uvjeti u njima postižu se povećanjem dimenzija uređaja. Iako to nije posljedica takvih fizikalnih zahtjeva kao pri fisiji, praktične su posljedice slične. Takva se razmatranja ne odnose na inercijalno ograničenje plazme.

6.2. Magnetsko ograničenje plazme

6.2.1. Fizikalna razmatranja

Najjednostavnije magnetsko ograničenje plazme može se zamisliti s plazmom na osi cilindričkog magnetskog polja (sl. 6.5). S obzirom na potpunu ionizaciju plazme i njezinu visoku električnu vodljivost, magnetsko polje pokreće dijamagnetske struje u plazmi. Struje u plazmi smanjuju u njoj polje i potiskuju ga iz nje. U ekstremnom slučaju, kad je dijamagnetska susceptibilnost $X_m = -1$, magnetsko polje ne prodire u plazmu. Magnetske silnice obilaze plazmu, a pritom polje vrši pritisak numerički jednak gu-



Slika 6.5. Načelo ograničenja plazme magnetskim poljem ravne zavojnice

stoći energije polja: $\frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$. Korisno je zamisliti silnice magnetskog polja kao zategnute elastične niti koje nastoje da se skrate i komprimiraju plazmu, a plazma nastoji ekspandirati protiv barijere magnetskih silnica. Na taj se način tlak plazme prenosi preko magnetskog polja, bez djelovanja na stijenke posude, na izvore magnetskog polja, tj. na zavojnice i njihovu mehaničku noseću strukturu. Pri magnetskoj indukciji $B=1$ T tlak magnetskog polja iznosi $\frac{1}{8\pi}10^7$ Pa, (~4 bar).

Dijamagnetizam u plinskoj plazmi

Dijamagnetizam je vrsta magnetizma koja nastaje pokretanjem induciranih struja zbog djelovanja vanjskog magnetskog polja na materijal. Pokrenute makroskopske vrtložne struje brzo se ugase trošenjem energije na omskom otporu, a ostaju teći samo struje na raziniatoma. Rezultirajuće je polje slabo, pa je dijamagnetizam slabo uočljiva, iako raširena vrsta magnetizma. Zapravo, dijamagnetski doprinos postoji u svakom materijalu jer je posljedica općeg zakona indukcije. Proizvedeno polje suprotno je vanjskom, što znači negativnu vrijednost magnetske susceptibilnosti. Polje atomskih induciranih struja ne dosiže ni tisućinku vrijednosti vanjskog polja. Drukčiji su odnosi u supravodičima i u plinskoj plazmi. U supravodičima makroskopske struje teku bez otpora, pa inducirano polje poništava vanjsko, a dijamagnetska susceptibilnost $\varkappa_m$ dosiže vrijednost -1.

U plinskoj plazmi nema atoma pa ni atomskog dijamagnetizma. Međutim, kružno odnosno spiralno gibanje iona zbog vanjskog polja proizvodi magnetsko polje orijentirano suprotno vanjskom. Prema odnosu ovog polja prema vanjskome i prema vrijednosti susceptibilnosti plinska plazma zauzima raspon između normalnih materijala i supravodiča. Ekstremnoj situaciji — kad je $\varkappa_m=-1$, tj. vanjsko polje je poništeno magnetskim poljem kružnih gibanja — odgovara vrijednost parametra $\beta=1$.

Pokušajmo procijeniti kolika magnetska polja trebamo u fuzijskom uređaju.

Iz krivulja koje pokazuju vrijednosti $\overline{\sigma_f v}$ kao funkciju temperature (sl. 6.2) razabire se da je potrebna temperatura oko 10 keV, odnosno oko 10^8 K. Koristeći izraz za fuzijsku snagu, pri toj temperaturi $P_F \sim 1{,}5 \cdot 10^{-41} N^2$ MW/m^3 možemo odrediti gustoću plazme za odabranu gustoću snage. Ekonomski poželjne i tehnički prihvatljive vrijednosti preklapaju se u području između 1 MW/m^3 i 10 MW/m^3. Osnovno tehničko ograničenje proizlazi iz opterećenja prve stijenke fuzijske komore. Prema današnjim procjenama nije nerealno opterećenje prve stijenke oko 5 MW/m^2. Pri gustoći plazme oko $5 \cdot 10^{20}$ m^{-3} (što je gustoća za oko 10^5 puta manja od gustoće zraka pri normalnom tlaku) gustoća je snage od 4 MW/m^3 do 5 MW/m^3, tj. unutar granica različitih projektnih stu-

dija fuzijskih reaktora. Pri normalnim temperaturama tlak plazme bio bi toliko niži od atmosferskoga. Pri temperaturi 10^8 K faktor povećanja jest oko $3 \cdot 10^5$, pa su tlakovi zagrijane plazme nekoliko bara. Na prvi pogled to je povoljno jer bi se s relativno dostupnim magnetskim poljima mogli postignuti takvi tlakovi na plazmu. Međutim, polje vrši puni pritisak na plazmu samo ako u nju ne prodire, tj. ako je ona savršeni dijamagnetik. To se općenito ne događa, iako se određenim prostornim rasporedom polja plazme može tome približiti. Za magnetsko ograničenje plazme potrebno je, prema tome, snažnije polje no što daje jednostavna usporedba tlaka polja i tlaka plazme. Plazma ograničena u cilindru također pokazuje aksijalne nestabilnosti pri kojima malene početne nesimetrije ili oscilacije plazme oko osi cilindra izbacuju stupac plazme s osi cilindra i dovode je u dodir sa stijenkama. Stabilnost se poboljšava s tlakom polja većim od tlaka plazme.

Odnos tlaka polja potrebnog za ograničenje plazme i tlaka plazme izražava se faktorom β,

$$P_P = \beta P_M,$$

gdje su P_P i P_M tlak plazme odnosno tlak polja.

Faktor β je manji od jedan a ovisi o tipu magnetskog ograničenja. Prema njegovoj vrijednosti govori se o uređajima s visokim odnosno niskim β vrijednostima. Za neke rasporede polja β je manji od 0,1, pa su potrebna magnetska polja indukcije reda nekoliko tesla, što zahtijeva supravodičke magnete. No, i sa supravodičkim magnetima polja indukcije veće od 10 T veliki su problem među ostalim i zbog golemih mehaničkih naprezanja. Ako je maksimalna vrijednost indukcije B_{maks} određena, npr. raspoloživim supravodičkim materijalima, tlak plazme P_P može se dalje povećati samo povećanjem faktora β

$$P_P = \beta \frac{B_{maks}^2}{2\mu_0}. \qquad (6.19)$$

S obzirom da vrijedi relacija $P_P = 3NkT$, pri danoj indukciji i temperaturi gustoća plazme izravno je proporcionalna faktoru β, što pokazuje da je važno postignuti što veće vrijednosti faktora β. Faktor β možemo shvatiti i kao veličinu koja pokazuje koliko je racionalno iskorišteno magnetsko polje, zato je bitan za ekonomičnost fuzijskog uređaja.

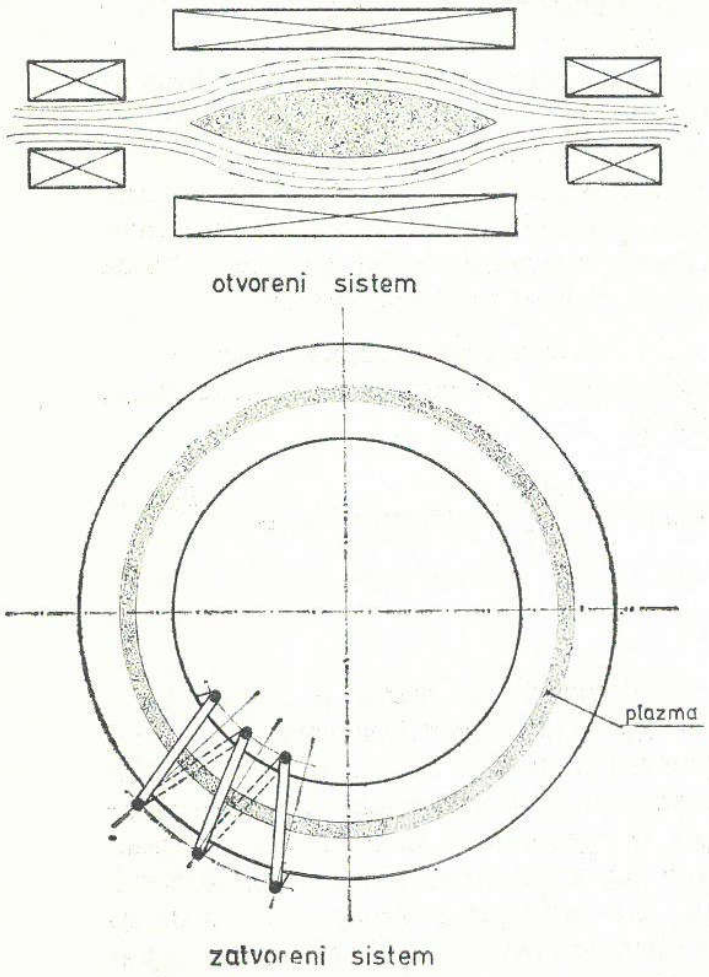
Za maksimalnu gustoću plazme pri maksimalnoj vrijednosti indukcije B_{maks} slijedi

$$N_{maks} = \beta \frac{B_{maks}^2}{6\,kT\mu_0} \text{ odnosno } N_{maks} \propto \frac{\beta B_{maks}^2}{T}. \qquad (6.20)$$

S obzirom da faktor β jako ovisi o konfiguraciji magnetskog ograničenja, magnetska indukcija B_{maks} o raspoloživim supravodičkim materijalima, temperature pak o optimalnom udovoljavanju fizikalnim zahtjevima, razabiremo da je osnovni put za ispunjenje Lawsonova kriterija postizanje dovoljno dugog vremena ograničenja plazme τ_E. Pri tome se uočava velika ovisnost o prostornoj strukturi ograničenja.

U cilindričnom uređaju otvorenom na krajevima plazma može bježati duž osi cilindra. U tom je ne sprečava uzdužno polje, s posljedicom da je vrijeme τ_E prekratko. Ako ne bismo spekulirali s nedostižnim vrijednostima magnetskog polja i odgovarajućim gustoćama N, morali bismo imati cilindar duljine desetak kilometara da bi vrijeme τ_E doseglo vrijednosti potrebne prema Lawsonovu kriteriju.

Prema načinu rješavanja problema „bježanja na krajevima" fuzijski uređaji mogu se označiti kao zatvoreni i otvoreni. Savijemo li cilindar i spojimo krajeve dobivamo zatvorene toroidalne konfiguracije. Cilindričan zrcalni sustav dobiva se dodavanjem tzv. magnetskih zrcala na krajeve cilindričnih sustava (sl. 6.6). Magnetska zrcala pojačavaju i stežu cilindrično polje; bježanje se usporava, ali ne uklanja potpuno.



Slika 6.6. Linearni sustav s dodatnim magnetskim zrcalima (*a*) i zatvoreni sustav za magnetsko ograničenje plazme (*b*)

Promotrimo pojednostavnjene odnose o kojima ovisi efikasnost magnetskog zrcala. Neka se čestica naboja e i mase m kreće u cilindričnom polju indukcije B tako da je njezina brzina v_1 duž osi cilindra, a okomito na os (i približno na indukciju) $v_\perp$. Zbog okomite komponente javlja se magnetska sila veličine $e\,v_\perp\,B$, koja skreće čestice tako da spiraliziraju oko silnica polja. Iz uvjeta ravnoteže

$$ev_\perp B=\frac{mv_\perp^2}{r^2}$$

dobiva se frekvencija spiraliziranja

$$\omega=\frac{eB}{m}.$$

Kinetička energija tog kružnog gibanja iznosi

$$E_r=\frac{mr^2\,\omega^2}{2}$$

odnosno

$$E_r=r^2\,\pi e\,\frac{\omega}{2\pi}\cdot\frac{\omega m}{e}.$$

Prvi dio iznos je magnetskog momenta kružnog gibanja iona, a drugi je indukcija B, tj. $E_r=\mu B$.

Za ukupnu energiju iona možemo pisati prema tome

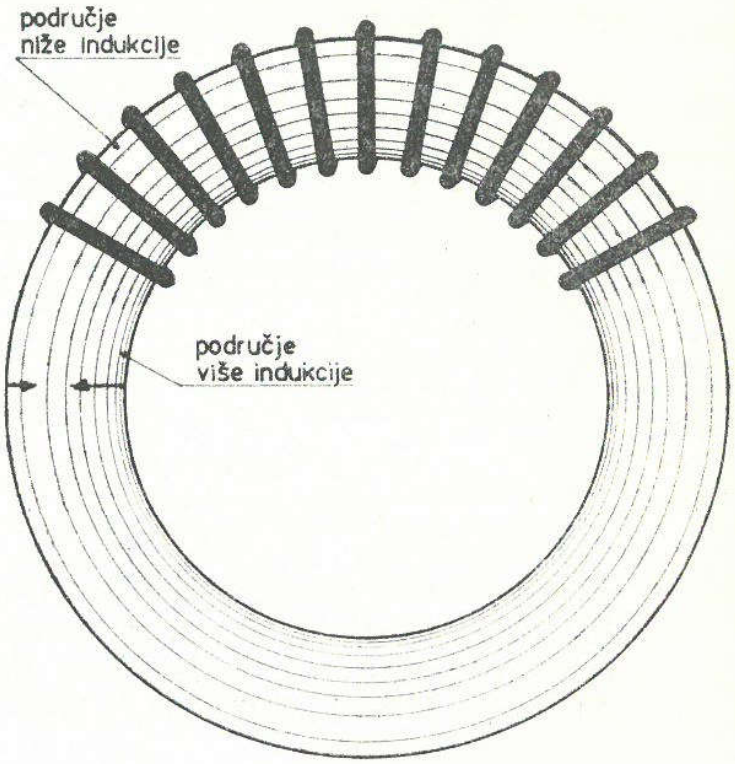
$$E=\frac{mv_1^2}{2}+\mu B. \qquad (6.21)$$

Što se dešava ako ion kretanjem duž polja dolazi u područje većih vrijednosti indukcije — kao što je to na krajevima zrcalnog sustva? Magnetski moment orbitalnog gibanja čestica mase m i naboja e općenito je vezan s mehaničkim momentom količine gibanja čestice $\vec{L}$ relacijom $\vec{\mu}=\frac{e}{2m}\vec{L}$. Ako se polje vremenski ne mijenja te nema induciranog električnog polja, mehanički i magnetski moment konstantni su. Magnetska sila okomita je na brzinu v_1, pa ne može promijeniti moment količine gibanja. Ako se čestica konstantne energije E kreće duž polja čija indukcija raste, raste i član μB u izrazu $E=\frac{mv_1^2}{2}+\mu B$, što znači da se mora smanjivati energije uzdužnog gibanja. Čestica će se vratiti ako prodre do polja granične jačine B_g takve da je $E=\mu B_g$. Ipak će neke čestice moći pobjeći, premda na krajevima imamo polje indukcije B_g. Način raspodjele energije E u translacijsku i rotacijsku, odnosno magnetsku, ovisi o kutu gibanja čestice prema polju B. Ako se čestica kreće duž polja, tako da je $v_\perp=0$, tada je i $\mu=0$, pa magnetsko polje ne djeluje na česticu. Za određeno polje B_g na kraju cilindra, određen je maksimalan kut pod kojim se čestica može kretati prema smjeru indukcije i pobjeći iz polja, odnosno određen je stožac gubitka čestica. Čestice sa

smjerom gibanja unutar stošca mogu pobjeći iz plazme.

U toroidalnoj konfiguraciji tlak polja na plazmu ovisi o udaljenosti od središta torusa (sl. 6.7). Plazma bježi prema području manjeg magnetskog tlaka (manje gustoće silnica). Isto se dešava u otvorenom sustavu. Otvoreni sustavi modificirani su u tzv. „magnetsku jamu". U takvom uređaju cilindrično uzdužno polje raste s polumjerom. Zajedno sa zrcalima ta konfiguracija ima karakteristiku da iz središta uređaja gdje se nalazi plazma, jakost polja raste u svim smjerovima.

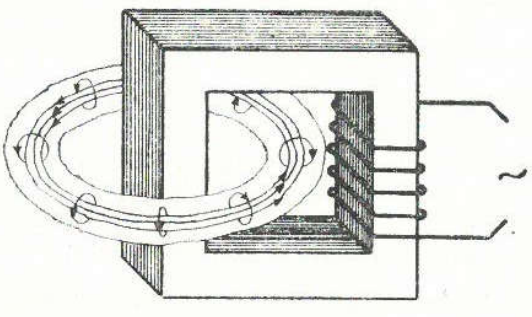
Kod toroidalne konfiguracije stabilizirajući učinak postignut je dodatnim poljem, takvim da se kružne silnice toroidalnog polja pretvaraju u spirale koje obilaze torusom omatajući se oko njegove osi. Pri tome „hod" spirale mora padati s rastućim polumjerom omatanja oko osi torusa. Najjednostavniji način da se postigne takva konfiguracija polja jest pokretanje inducirane struje kroz plazmu, koja u odgovarajućem uređaju čini sekundarnu zavojnicu transformatora (sl. 6.8). Promjena toka magnetskog polja kroz otvor torusa pokreće struju plazme I_p. Magnetsko polje struje kroz plazmu $H\varphi$ zajedno s uzdužnim toroidalnim poljem H_Θ zbraja se u traženu helikoidalnu konfiguraciju (sl. 6.9). Uređaji takvog tipa poznati su kao tokamak uređaji, nazvani prema uređaju izgrađenom u Institutu Kurčatova u Moskvi s kojim je krajem 60-ih godina postignut

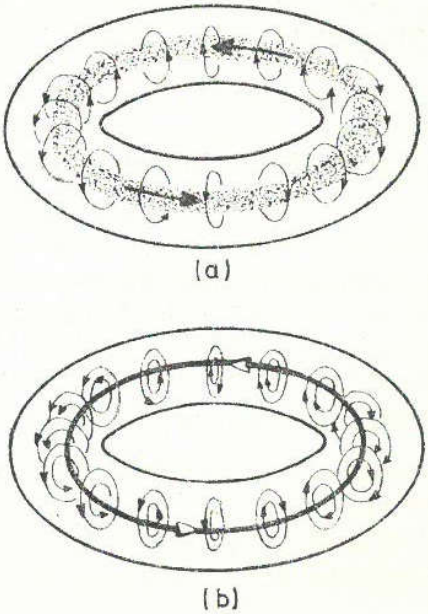


Slika 6.7. Sila na plazmu u toroidalnoj konfiguraciji. Radijalno opadanje indukcije vodi i na radijalno opadanje tlaka polja na plazmu

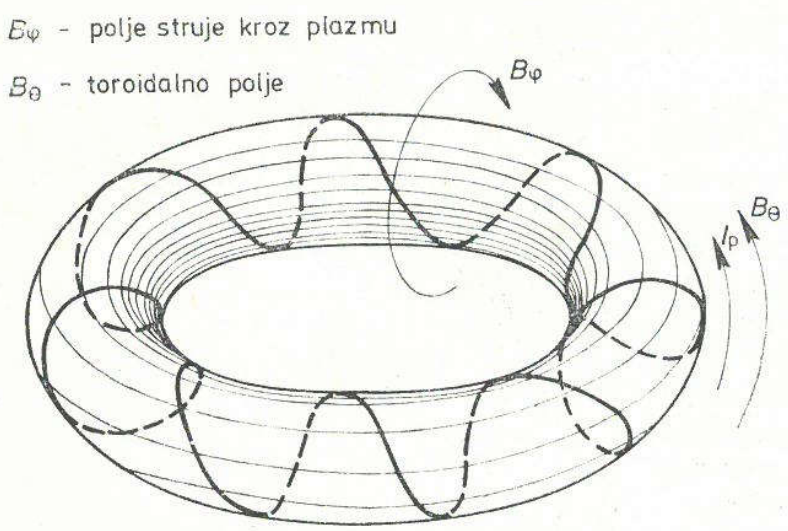
znatan napredak u približavanju fuzijskim uvjetima. Uređaji sa zavojnicama za dodatno polje zovu se stelaratori prema takvom uređaju izgrađenom u Princetonu (SAD).

Uvjeti za makroskopsku stabilnost torusa plazme u tokamak uređajima teorijski su objašnjeni radovima Kruskala i Šafranova. Teorijski uvjet za makroskopsku





Slika 6.8. Načelo rada tokamak uređaja. Izmjenično magnetsko polje inducira kružnu struju kroz plazmu, a magnetsko polje te struje obuhvaća i komprimira plazmu (*a* i *b*). Tok struje i kompresija zagrijavaju plazmu.



Slika 6.9. Stvaranje helikoidalnog polja u tokamak reaktoru (uspon spirale znatno je smanjen radi preglednosti crteža)

stabilnost dovodi u vezu odnos polja H_φ i H_Θ s parametrima torusa, njegovim polumjerom plazme a i polumjerom R. Za stabilnu plazmu potrebno je da bude:

$$\frac{H_\varphi}{H_\Theta} \leqslant \frac{1}{q}\frac{a}{R}. \qquad (6.22)$$

Uvjet se može predočiti geometrijski. Uzmemo li da je $q=1$, nestabilnost nastupa ako je helikoidalnost ukupnog polja takva da linija polja obilazi jedanput oko presjeka prstena pri jednom obilasku oko torusa. Odmah se razabire da to povezuje geometrijske odnose torusa s omjerom H_φ/H_Θ

$$\frac{H_\varphi}{H_\Theta} = \frac{a}{R}.$$

Stabilnost se može postignuti s manjim poljem H_φ. Faktor q u uvjetnoj relaciji sigurnosni je faktor. On pokazuje koliko će puta linija polja obići oko glavne osi torusa za jedan obilazak oko presjeka torusa. Njegova se vrijednost kreće između 2 i 3.

Uvjet za stabilnost postavlja ograničenje na struju plazme I_p o kojoj ovisi zagrijavanje plazme. Dosljedno, ispunjavanje uvjeta za stabilnost uzrokuje potrebu dodatnih načina zagrijavanja plazme. Ispunjavanje tog uvjeta stabilizira plazmu protiv deformacije u kojoj se stupac plazme stisne i prekine lokalno — poput veza na kobasici. To nije jedini oblik makroskopskih nestabilnosti. Postoji još nekoliko oblika, a istražuje se mogućnost njihove kontrole, odnosno smanjenje njihovih učinaka. Uvjet za stabilnost Kruskala i Šafranova nužan je, ali ne i dovoljan za ukupnu makroskopsku stabilnost.

Difuzija u plinskoj plazmi

Difuzijom u širem smislu naziva se proces kojim se neki sustav čestica vraća iz neravnotežnog stanja u ravnotežno toplinskim gibanjem atoma ili molekula. Neravnoteža može bit uzrokovana razlikama gustoće, temperature, električnih potencijala itd. Ako je neravnoteža uzrokovana različitom gustoćom čestica N, ravnoteža se uspostavlja protokom čestica s područja veće gustoće prema području manje gustoće. Ako je taj protok karakteriziran strujom $\mathcal{J}_N$, tj. brojem čestica koje u jedinici vremena prolaze kroz jediničnu površinu u pravcu x, a neravnoteža gradijentom $\frac{dN}{dx}$, gdje je x pomak u smjeru manje gustoće, između neravnoteže i brzine kojom se uspostavlja ravnoteža postoji izravna proporcionalnost

$$J_N = -D\frac{dN}{dx}. \qquad (6.23)$$

Veličina D naziva se koeficijentom difuzije. Zakon važi u vremenskim intervalima u kojima se gradijent može smatrati konstantnim. Ako bi se neravnoteža uspostavila temperaturnim gradijentom $\frac{dT}{dx}$, ravnoteža bi se uspostavljala protokom energije J_E

$$J_E = -D\frac{dT}{dx}. \tag{6.24}$$

Sasvim približno, u plinovima i tekućinama konstanta difuzije jest reda veličine umnoška broja sudara čestica u jedinici vremena s kvadratom srednjeg slobodnog puta. U plinskoj plazmi u magnetskom polju prilike su drukčije. Čestice plazme spiraliziraju oko silnica magnetskog polja s polumjerom r. Koeficijent difuzije u smjeru okomitom na silnice polja proporcionalan je umnošku broja sudara i kvadrata polumjera kruženja r. Uzmemo li jednostavnosti radi, da se čestica giba okomito na magnetsko polje brzinom v, tada je polumjer $r = \frac{m v}{e B}$, što slijedi iz uvjeta ravnoteže sile magnetskog polja na naboj i centripetalne sile.

Broj sudara određen je kvocijentom brzine v i srednjeg slobodnog puta λ. Kako je za nabijene čestice u plazmi srednji slobodni put proporcionalan kvadratu temperature T plazme, a brzina v korjenu temperature, dobiva se da je difuzijski koeficijent D_C u smjeru okomitom na silnice polja obrnuto proporcionalan kvadratu indukcije B_Θ i korijenu temperature T a izravno proporcionalan gustoći plazme N

$$D_C \propto \frac{N}{B_\Theta^2 \sqrt{T}}. \tag{6.25}$$

Ako bi difuzija u plinskoj plazmi bila doista karakterizirana tako dobivenim koeficijentom difuzije, ne bi bilo teškoća s magnetskim ograničenjem plazme. Opažaju se međutim znatno veće vrijednosti koeficijenata difuzije — pojavljuje se anomalna difuzija odnosno tzv. Bohmova difuzija [Bo 1949]. Za normalnu difuziju može se očekivati smanjenje na višim temperaturama, a *anomalna* difuzija pokazuje nepovoljnije ovisnosti. Difuzijski koeficijent proporcionalan je temperaturi, a obrnuto proporcionalan indukciji,

$$D_B \propto \frac{T}{B_\Theta}. \tag{6.26}$$

Povećanje indukcije ne smanjuje anomalnu difuziju toliko koliko bi se očekivalo za normalnu, a porast je temperature ubrzava, suprotno normalnoj difuziji.

Uobičajeno je obilježavanje normalnog „klasičnog izvedenog" koeficijenta difuzije indeksom C, a anomalnog indeksom B, tj. D_C i D_B.

Mikronestabilnosti plinske plazme. Osim nestabilnosti koje deformiraju stupac plazme pojavljuju se i tzv. mikronestabilnosti unutar stupca plazme, a učinak im je ubrzanje difuzije i gubitak čestica iz plazme.

Jedan oblik nestabilnosti uzrokovan je opadanjem polja H_Θ, odnosno indukcije B_Θ s udaljenošću od glavne osi torusa. Čestice plazme s manjim termičkim brzinama ne slijede helikoidalne linije magnetskog polja obilazeći torusom, nego osciliraju na periferiji torusa u područjima slabijeg magnetskog polja. Govori se o „uhvaćenim česticama" i odgovarajućoj nestabilnosti. Za tokamak uređaj jedna od značajnijih neodređenosti jest upravo gubitak vezan za postojanje „uhvaćenih čestica".

Kontrola preostalih, odnosno rezidualnih nestabilnosti središnji je fizikalni problem u sadašnjem istraživanju magnetskog ograničenja plazme. Koji će geometrijski oblik fuzijskog uređaja biti najuspješniji za to još je neizvjesno. Kvantitativno se učinak rezidualnih mikronestabilnosti izražava koeficijentom difuzije D u smjeru okomitom na stupac plazme i ograničujuće magnetsko polje.

Klasično promatranje pokazuje da vrijeme difuzije odnosno vrijeme ograničenja energije τ_E ovisi o polumjeru plazme i

difuzijskom koeficijentu kvadratno, odnosno inverzno

$$\tau_E \propto \frac{a^2}{D}. \qquad (6.27)$$

Za mirnu plazmu ovisnost koeficijenta difuzije o parametrima plazme ima oblik (vidi blok)

$$D_C \propto \frac{T^{-1/2} N}{B_\Theta^2}.$$

Alternativna procjena koeficijenta dobiva se ako u plazmi postoje mikronestabilnosti, odnosno turbulencije.

Maksimalan koeficijent pri postojanju mikronestabilnosti jest Bohmov koeficijent difuzije D_B. Za Bohmovu difuziju dobiva se koeficijent difuzije u obliku

$$D_B \propto \frac{T}{B_\Theta}.$$

Omjer prema klasičnoj vrijednosti za neturbulentnu plazmu D_C ima oblik

$$\frac{D_B}{D_C} \propto \frac{T^{3/2} B_\Theta}{N}. \qquad (6.28)$$

Ukoliko ionska i elektronska temperatura T_i i T_e nisu jednake, za difuziju odlučna je elektronska temperatura.

Pri temperaturama fuzije omjer može doseći iznos 10^5 i više, što pokazuje koliko je značajan problem mikrostabilnosti plazme. Fuzijski uređaji istog osnovnog tipa postižu vrlo različite vrijednosti koeficijenata difuzije, pa je potrebno dublje teorijsko razumijevanje mirkostabilnosti. U međuvremenu, do novih teorijskih spoznaja, akumulirani podaci iz niza fuzijskih uređaja služe da se ovisnosti vremena ograničenja utvrde eksperimentalno.

6.2.2. Grijanje magnetski ograničene plazme

Magnetski ograničena plazma može se zagrijati na milijunske temperature na više načina. U uređajima tipa tokamak, struja pokrenuta kroz plazmu stvara stabilizacijsko polje, ali i zagrijava plazmu. Metoda je djelotvorna pri temperaturama od nekoliko milijuna kelvina, gdje je omski otpor plazme relativno velik; ali kako otpor plazme opada s temperaturom, zagrijavanje na više temperature postaje sve teže. Struja plazme može se povećavati radi kompenzacije pada otpora samo do maksimalne vrijednosti određene Kruskal-Šafranovim kriterijem, pa su potrebni dodatni načini zagrijavanja plazme.

Metoda grijanja mnogo korištena u linearnim sustavima jest tzv. „theta pinch kompresija" i konsekventno zagrijavanje plazme magnetskim poljem. Pod „theta pinch kompresijom" podrazumijeva se kompresija proizvedena naglim povećanjem magnetskog polja koje okružuje i ograničuje plazmu. Poradi povećanog tlaka magnetskog polja dolazi do kompresije plazme. (Ako je tlak magnetskog polja p, energija predana plazmi pri kompresiji s volumena V_1 na V_2 iznosi

$$E = \int_{V_2}^{V_1} \beta p \, dv.) \qquad (6.29)$$

Skupina linearnih uređaja s pomoću kojih se postižu visoke gustoće plazme magnetskom kompresijom nazivaju se linearni theta pinch uređaji. No theta pinch može se primijeniti i u toroidalnom uređaju (npr. Scyllac uređaj u Los Alamosu). Posebno važna metoda zagrijavanja magnetski ograničene plazme razvijena zadnjih godina jest zagrijavanje snopom neutralnih atoma. U toj metodi ioni se najprije ubrzaju u visokostrujnom akceleratoru, zatim neutraliziraju prolazom kroz razrijeđeni plin i potom uvedu u fuzijski uređaj do plazme. To nije veći problem zbog neutralnosti ubrzanih čestica. U sudarima sa zagrijanom plazmom neutralne se čestice ioniziraju i predaju svoju energiju plazmi. Današnji izvori neutralnih atoma postižu snage neutralnih snopova oko 1 MW, a grade se znatno veći. Taj način grijanja može se primijeniti u linearnim i toroidalnim uređajima.

Pri brojnosnim gustoćama plazme oko 10^{20} čestica po kubičnom metru (m^{-3}) za prodor u plazmu potrebno je da energija čestica u neutralnom snopu bude oko 300 keV. To zahtijeva ubrzavanje negativnih iona, budući da djelotvornost neutralizacije pozitivnih iona iznad energije oko 100 keV naglo pada. Pri nižim energijama neutralni snop proizvodi se ubrzavanjem pozitivnih čestica te njihovom neutralizacijom prolazom kroz razrijeđeni plin.

Novije analize koje računaju sa zagrijavanjem središnjeg područja plazme fuzijskim alfa-česticama, kao i s početnom nižom gustoćom plazme pokazuju da bi energija iznosa 150 keV bila dovoljna. To bi omogućilo korištenje uspješno razvijenih izvora pozitivnih iona.

Razvijaju se i upotrebljavaju i metode zagrijavanja plazme izmjeničnim elektromagnetskim poljem u području frekvencije od oko 1 MHz do 100 GHz. Iako se još istražuju osnovni fenomeni interakcije elektromagnetskih valova s plazmom, metoda pruža niz prednosti pa će se vjerojatno primijeniti u budućim uređajima.

Prema fizikalnom mehanizmu zagrijavanja raspoloživa su četiri osnovna načina grijanja izmjeničnim poljima;

— grijanje tzv. Alfvenovim valovima, u području frekvencije od 1 MHz do 10 MHz,

— ionsko ciklotronsko rezonantno grijanje, u području od 50 MHz do 100 MHz,

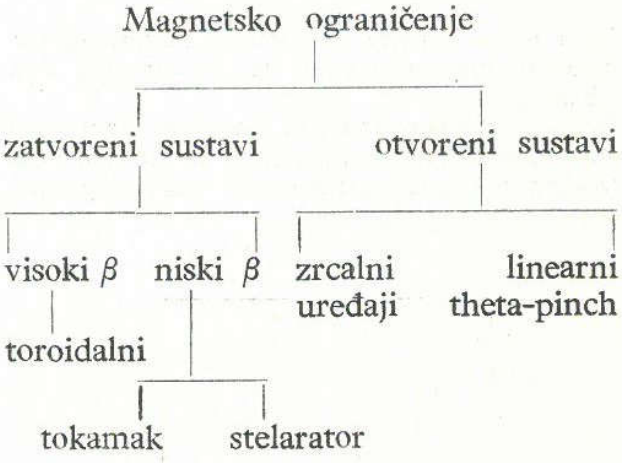
— niže hibridno rezonantno grijanje, u području od 1 GHz do 5 GHz, i

— elektronsko ciklotronsko rezonantno grijanje u području od 30 GHz do 150 GHz.

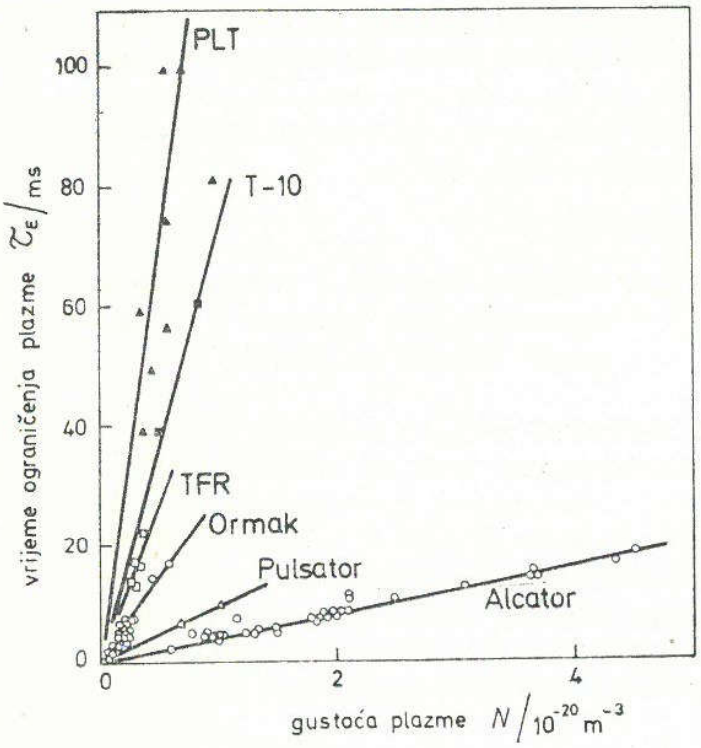
Zagrijavanje plazme u različitim projektnim studijama pretpostavlja zagrijavanje radiofrekventnim poljima sa snagom i do 100 MW. Zajednički evropski fuzijski uređaj u gradnji JET (Joint European Torus) predviđa složeno zagrijavanje. Neutralni snopovi trebali bi dati oko 10 MW, a izmjenična polja oko 15 MW. Koje će frekventno područje biti najpovoljnije još se istražuje. Čini se ipak prema dosadašnjem radu da je elektronsko ciklotronsko rezonantno grijanje najpovoljnije.

6.2.3. Fuzijski uređaji s magnetskim ograničenjem plazme i postizanje uvjeta za fuziju

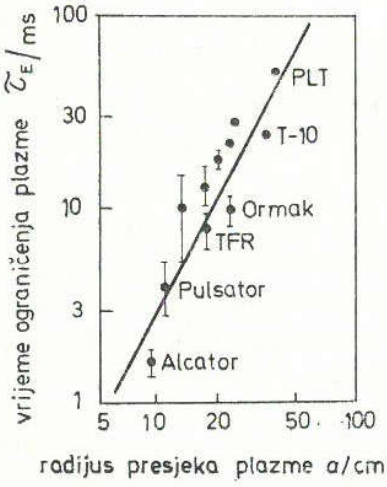
Sustavan pregled fuzijskih uređaja i eksperimenata koji se njima obavljaju bio bi preopširan za ovaj rad. Ipak je interesantno pogledati osnovnu klasifikaciju fuzijskih uređaja koja polazi od geometrijskih oblika magnetskog ograničenja i načina upotrebe magnetskog polja za zagrijavanje plazme.



Razvoj posljednjih godina omogućuje bolju ocjenu. Nakon ohrabrujućih rezultata koji su postignuti s tokamacima krajem 60-ih godina u Sovjetskom Savezu (postignut iznos $\approx 10^{18}$ $m^{-3}s$ u umnošku $N\tau$), u nizu zemalja izgrađeni su ili se grade uređaji tog osnovnog tipa. Možemo kazati da je sadašnji razvoj fuzije karakteriziran optimizmom i velikim naporima vezanim uz tokamak uređaje. Neki stručnjaci, međutim, misle da je takva koncentracija napora preuranjena. Ako se uspješnost tokamak uređaja ne bi ostvarila to bi znatno usporilo postizanje kontrolirane fuzije s magnetskim ograničenjem. Nade u uspjeh tokamaka temelje se dijelom na empirički utvrđenim ovisnostima vremena ograničenja τ_E o parametrima plazme i fuzijskih uređaja. Razabire se linearna



Slika 6.10a. Vrijeme ograničenja plazme τ_E kao funkcija gustoće plazme za niz uređaja tipa tokamak.
Svaki uređaj karakterizira određena vrijednost konstante proporcionalnosti, ali se linearna veza između vremena ograničenja i gustoće plazme jasno razabire (Mu 1979).



Slika 6.10b. Ovisnost vremena ograničenja τ_E o polumjeru plazme u različitim tokamak uređajima.
Unesene vrijednosti odnose se na gustoću plazme $3{,}5 \cdot 10^{19}$m^{-3}. Pravac na dijagramu daje proporcionalnost vremena ograničenja s a^2.

proporcionalnost vremena ograničenja s gustoćom plazme (sl. 6.10a) uz koeficijent proporcionalnosti ovisan o konkretnom uređaju, te kvadratna ovisnost s polumjerom presjeka plazme a (sl. 6.10b)

$$\tau_E \propto a^2 N. \qquad (6.30)$$

Na tom empiričkom zakonu temelji se optimizam da će se postignuti uvjeti za fuziju u velikim tokamacima koji se grade.

Veliki tokamaci treba da pokažu da li će vrijeme τ_E rasti u skladu s očekivanjima. Odlučna će biti difuzija pri temperaturi i gustoći koje se traže za fuziju, odnosno, koliki će tada biti učinak mikronestabilnosti. Stručnjaci koji grade tokamake ne očekuju da će nestabilnosti potpuno svladati, ali se nadaju da će povećanjem dimenzija uređaja i intenziteta polja difuziju približiti vrijednostima kompatibilnim s Lawsonovim kriterijima.

Stavljanje težišta istraživanja na određene konfiguracije predstavlja izvjestan rizik. Korisno je podsjetiti se na početne godine rada na fuziji. Tada je nakon uočavanja problema magneto-hidrodinamičkih nestabilnosti postalo jasno da se premalo zna o osnovnim svojstvima plazme i da je teorijsko znanje nedovoljno. Slijedilo je dugo razdoblje u kome se detaljnije istraživalo zakonitosti ponašanja plazme. Razvijeno je novo područje fizike; fizika visokotemperaturne plazme. Nađena su i rješenja za prevladavanje magneto-hidrodinamičkih nestabilnosti plazme.

Uspjehom tokamaka na prijelazu u 70-e godine započinje treće razdoblje u razvoju fuzije magnetskim ograničenjem. Iako se misli da bi istraživanja još trebala biti na širokom području i usmjerena na fundamentalne probleme, te da se ne bi smjelo preferirati određene prostorne rasporede ipak prevladavaju u ovom razdoblju tokamak uređaji.

No, intenzivan rad na tokamak uređajima počeo je i otkrivati i njihova ograničenja, čak ako se i ne pojave problemi sa stabilnošću plazme pri većim gustoćama. Zato se krajem 70-ih godina ponovno istražuju druge konfiguracije koje su prema tokamaku bile manje privlačne, ali se također razvijaju i sasvim nove. Promotrimo zato detaljnije tokamak uređaje i najvažnije druge konfiguracije za magnetsko ograničenje plazme.

6.3. Tokamak uređaji

6.3.1. Etape razvoja toroidalnih sustava

U poglavlju 6.2. istaknute su glavne fizikalne i geometrijske karakteristike tokamak uređaja i ostalih osnovnih tipova magnetskih ograničenja. Međutim, usmjeravanje razvoja prema tokamak uređajima stavlja tu konfiguraciju na posebno mjesto u razvoju fuzije u zadnjih deset godina. To se može razabrati iz pregleda tokamak uređaja stavljenih u pogon do kraja 70-ih godina.

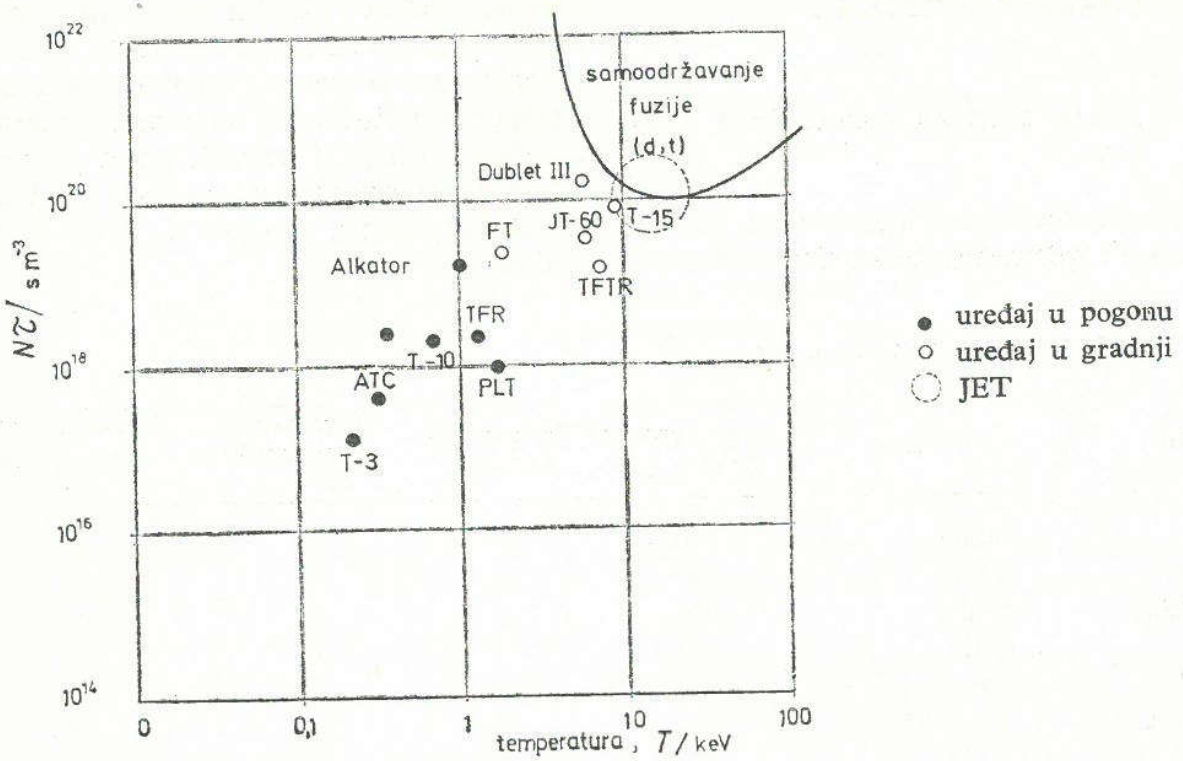
Tablica 6.1. Značajniji tokamaci u pogonu

Uređaj	Država	Glavni promjer R_0/cm	Promjer plazme a/cm	Toroidalno polje indukcije B_0/T	Struja plazme I_0/kA
T-3	SSSR	100	17	2,5	100
T-4	SSSR	100	17	5	200
ORMAK	SAD	80	23	1,8	200
ST	SAD	109	13	4	130
TFR	Francuska	98	20	5	300
PULSATOR	SR Njemačka	70	12	2,8	80
ALCATOR	SAD	54	9,5	7,5	100
DITE	Velika Britanija	112	23	2,8	200
PLT	SAD	130	40	3,5 (4,6)	600
T-10	SSSR	150	37	3,5 (5)	400
DOUBLET II	SAD	66	35 ·100	0,8	140
JFT-2	Japan	90	25	1,8	150
FT	Italija	83	21	10	1 000
PDX	SAD	140	45	2,4	500
ASDEX	SR Njemačka	154	40	3	500
DOUBLET III	SAD	140	45 ·150	4	5 000

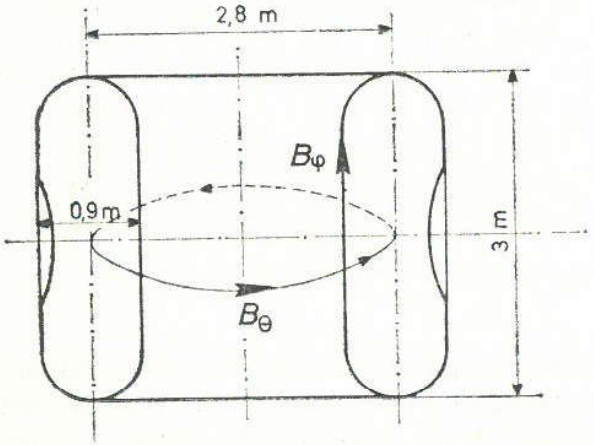
Tablica 6.1. prikazuje osnovne karakteristike najvažnijih tokamak uređaja u pogonu. U parametrima postignut je znatan napredak prema rezultatima s prvim tokamacima. Američki uređaji ALCATOR (MIT) i PLT (Princeton), te sovjetski T-10 postigli su vrijednost umnoška $N\tau$ reda veličine $10^{19}\,m^{-3}s$ i tako se primakli, iako ne pri dovoljnim temperaturama, na samo jedan red veličine do fuzijskog uvjeta na taj umnožak. Pri manjoj vrijednosti umnoška $N\tau$ oko $10^{18}\,m^{-3}s$ u Princetonskom uređaju PLT postignuta je temperatura 70 milijuna kelvina. Osobito ohrabruje da je ta temperatura postignuta bez nastupa nestabilnosti zbog „uhvaćenih čestica" i bez ubrzanja difuzije. Rezultat je svakako povoljan, iako se još ne može teorijski objasniti zašto je izostala očekivana nestabilnost. S obzirom da je za ocjenu približavanja Lawsonovu kriteriju bitna temperatura plazme, približavanje uvjetima fuzije bolje se razabire iz slike 6.11. u koju ulaze oba odlučujuća parametra, umnožak $N\tau$ i temperatura plazme.

Zanimljivi rezultati očekuju se od tokamaka Dublet III (izgrađen u SAD, General Atomic, San Diego). Dublet III jest tokamak s aksijalno sploštenim, odnosno elongiranim presjekom plazme (sl. 6.12). Razabiremo da se u takvoj prostornoj strukturi do granice makroskopske nestabilnosti određene uvjetom

$$\frac{H_\varphi}{H_\Theta} = \frac{a}{R}$$



Slika 6.11. Napredovanje u umnošku $N\tau$ prema području samoodržanja fuzije za D+T plazmu.



Slika 6.12. Dublet III, presjek komore za plazmu

dolazi pri višim vrijednostima polja H_φ jer elongacijom plazme po z-osi pri istim poljima H_φ i H_Θ raste broj aksijalnih obilazaka silnica helikoidalnog polja oko torusa za jedan obilazak oko presjeka plazme. Uvjet za nastup nestabilnosti važi i dalje u gornjem obliku, samo umjesto polumjera plazme treba staviti efektivan polumjer koji iznosi pri jače izduženim plazmama približno 2/3 dulje poluosi presjeka plazme.

Plazma se zagrijava — osim omski, strujom kroz plazmu — snopom neutralnih čestica. U prvoj fazi ispituje se ponašanje plazme običnog vodika.

Dublet III radit će u režimu u kojem se očekuje učinak „uhvaćenih čestica" na difuziju; učinak je procijenjen teorijski i uzet u obzir pri projektiranju Dubleta III.

Očekuju se slijedeći parametri plazme:

gustoća $2 \cdot 10^{20}$ m^{-3}
temperatura 5 keV
vrijeme ograničenja 0,5 s
umnožak $N\tau \approx 10^{20}$ m^{-3}

Ispune li se očekivanja, Dublet III bi mogao s vodikovom plazmom demonstrirati mogućnost postizanja uvjeta fuzije u gustoći, temperaturi i vremenu ograničenja plazme. U Dubletu III želi se elongacijom presjeka plazme u manjim dimenzijama postignuti karakteristike većeg uređaja; međutim grade se veliki uređaji i oni će sredinom 80-ih godina već davati rezultate.

Skupina uređaja koji bi trebali ući u pogon oko 1985. prikazana je u tablici 6.2.

Nakon duge rasprave o lokaciji, zajednički evropski projekt JET (Joint

Tablica 6.2. Veliki tokamaci u konstrukciji koji trebaju ući u pogon do i oko sredine 80-ih godina

Uređaj	Država	Glavni polumjer R_0/m	Polumjer plazme a/m	Toroidalno polje indukcije B_Q/T	Struja plazme I_p/MA
TEXTOR	SR Njemačka	1,75	0,50	2,6	0,48
TFTR*	SAD	2,48	0,85	5,2	2,5
JET	EUROATOM	2,96	1,25 ·2,10	2,7 (3,4)	3,8 (4,8)
JT-60	Japan	3,00	1,00	5	3,0
T-15	SSSR	2,30	0,75	3,5 (4,5)	1,4 (2,0)
Torus II	Francuska	2,15	0,70	4,5	1,7

*u pogonu od prosinca 1982.

European Torus) počeo se graditi u Culhamu u Velikoj Britaniji. Njegove prve rezultate treba očekivati 1984. ili kasnije iako prva istraživanja na tom uređaju već počinju.

Poslije toga bi trebao ući u pogon japanski uređaj JT-60. Sovjetski uređaj T-15, bitno modernizirana verzija uređaja T-10, trebao bi ući u pogon 1986. godine, a francuski uređaj 1988. godine.

Na slici 6.11. uneseni su i parametri koji se očekuju od tih uređaja.

Svi ti uređaji trebali bi se u parametrima deuterijsko-tricijske plazme dovoljno približiti reaktorskim vrijednostima da se omogući preciznija procjena osnovnih dimenzija i karakteristika fuzijskog energetskog reaktora. Nedvojbeno je da će napredak prema ostvarenju fuzije veoma ovisiti o rezultatima te generacije fuzijskih uređaja. Stvarno postignuti rezultati pokazat će valjanost pretpostavki o ponašanju plazme pri višim temperaturama i u većim uređajima. Perspektiva fuzije bit će jasnija kad ti uređaji, ili barem neki od njih uđu u pogon, bez obzira budu li rezultati povoljni ili ne. Ono što je interesantno jest pitanje koliko je vremena potrebno za razvoj fuzijske elektrane, ako se razvoj u ovoj generaciji velikih uređaja završi uspješno oko 1985. godine. Odgovoriti nije lako jer odgovor ovisi o mnogim činiteljima. Tehnološki problemi izgradnje fuzijske elektrane danas se jasnije shvaćaju, a ovise o tome koji će osnovni pristup fuziji — inercijalno ili magnetsko ograničenje plazme — biti uspješan, odnosno uspješniji.

Budu li oba osnovna pristupa fuziji moguća, tehnološki će problemi odlučiti o konačnom razvoju komercijalne elektrane.

Za fuzijske uređaje tipa tokamak predviđaju se etape razvoja na temelju pretpostavke da će se samoodržanje fuzije postignuti oko 1985. godine. Nakon još jedne generacije velikih uređaja s pomoću kojih bi se trebali riješiti osnovni znanstveni problemi fizike D-T plazme u kojoj se održava fuzija, te tehnički i tehnološki problemi fuzijskog reaktora, u zajedničkom evropskom (Euratom) i američkom fuzijskom programu predviđaju se demonstracijske fuzijske elektrane (DEMO) koje bi ušle u pogon oko 2000. godine. Na tim bi se prototipima relativno male snage provjerila pogonska sigurnost, pouzdanost i ekonomičnost prije gradnje velikih komercijalnih fuzijskih elektrana.

Međutim te su faze i previše udaljene i ovise o razvoju u idućem desetljeću, pa se ne mogu predviđati s iole značajnijom vjerojatnošću. Sigurno je samo to da se jedna generacija velikih tokamaka gradi. Kakva će biti slijedeća generacija, tj. faza prije demonstracijskih elektrana nije još jasno. Troškovi gradnje sve su veći pa se predviđa, odnosno dogovara gradnja međunarodnog tokamak uređaja INTOR (International Tokamak Reactor) kao uređaja sljedeće generacije

koji bi trebao ući u pogon oko 1990. godine.

Uređaj INTOR trebao bi održavati reakciju fuzije s D-T plazmom bar 100 sekundi snagom 600 MW, te dati fizikalne i tehničke informacije za DEMO reaktor. U INTOR-u se predviđa demonstrirati proizvodnju električne energije, proizvodnju i izdvajanje tricija, te testirati materijale i omotač.

Predviđeni parametri plazme i osnovne dimenzije projekta INTOR:

glavni polumjer R	520 cm
presjek torusa	130 cm × 210 cm
toroidalno polje $B\Theta$	5,5 T
struja plazme I_p	6 MA
temperatura iona T_i	10 keV
srednja brojnosna gustoća N	$1{,}4 \cdot 10^{20}$ m^{-3}
srednji β	5%
srednje opterećenje prve stijenke	1,3 MW/m^2

Projekt INTOR razradila je međunarodna skupina stručnjaka u koordinaciji MAAE. Taj projekt nedvojbeno je znanstveno utemeljen i ekonomski opravdan jer omogućuje racionalno trošenje sredstava za razvoj fuzije. Međutim, zemlje sudionice u tom projektu još nisu donijele odluke na temelju kojih bi se projekt realizirao. INTOR bi svakako bio razuman razvojni korak nakon izgradnje generacije 4 velika tokamaka: TFTR, JT-60, T-15 i JET, naravno, osim ako rezultati istraživanja na tim uređajima ne bi bili povoljni.

6.3.2. Karakteristike i problemi velikih tokamaka

Godine 1978. stručnjaci koje je imenovalo američko Ministarstvo za energiju (Department of Energy) da bi izrazili mišljenje o fuzijskom programu u SAD [PT 1978] utvrdili su da je potrebno promatrati i procijeniti tehničke i tehnološke probleme fuzijskih reaktora i prije postizanja uvjeta za fuziju. Takvu ocjenu stručnjaci temelje na uvjerenju da ostvarenje uvjeta za fuziju nije garancija da bi se mogla izgraditi tehnički i ekonomski prihvatljiva elektrana:

„Mi nismo dovoljno uvjereni da bi određeni fizikalni prilazi fuziji, ako bi i postigli svoje znanstvene ciljeve, mogli biti osnova za praktičan reaktor. Mislimo da je vrijeme da se spektar različitih fizikalnih pristupa fuziji na kojima se radi promotri u tom smislu" — kaže se u njihovom izvještaju. Prije nego što se jasnije promotri put od postignuća fuzijskih uvjeta do termonuklearne elektrane za različite pristupe, ne može se opravdati samo neki određeni pristup istraživanju. U raspravi je izraženo mišljenje da osim tokamaka treba osnažiti i istraživanje drugih prilaza u magnetskom ograničenju plazme:

„Prednost koja se danas daje tokamak uređajima nepotreban je rizik. Premda je taj pristup znanstveno najrazvijeniji u približavanju uvjetima fuzije, čini se da postavlja i najteže tehničke probleme."

Prema objektivnoj ocjeni istraživanja fuzije čini se da se još ne može izabrati optimalni pristup ako se gleda čitav kompleks problema od postizanja fuzijskih uvjeta do izgradnje fuzijske elektrane. Ipak, činjenica je da su tehnički problemi za tokamak uređaje najmanje neodređeni upravo zato što su se ti uređaji najviše približili fuzijskim uvjetima. Stoga se u ovom dijelu promatraju uglavnom uređaji tipa tokamak. Tek kad se i druge moguće konfiguracije za magnetsko ograničenje plazme više približe uvjetima fuzije moći će se i za njih promotriti specifični tehnički i tehnološki problemi te ocijeniti mogu li poslužiti kao temelj za razvoj termonuklearnog reaktora. Čini se da bi to mogao najprije postignuti tandem zrcalni sustav, kao novi razvoj linearnog sustava.

Tehnološke i tehničke probleme kontrolirane fuzije određuju dijelom radni uvjeti, a dijelom dimenzije fuzijske elektrane. U fisijskih reaktora potrebna je određena kritična masa goriva za lančanu reakciju, tj. za samoodržanje re-

akcije fisije. Kao što je već spomenuto u poglavlju 6.1, uvjeti za samoodržavanje fuzije određuju minimalne dimenzije uređaja. Ako je na temelju promatranja gustoće snage, opterećenja prve stijenke i magnetske indukcije kojom se može raspolagati, određena brojnosna gustoća plazme N, Lawsonov kriterij daje potrebno vrijeme ograničenja energije $\tau_E = \frac{C}{N}$, a vrijednost je umnoška $N\tau_E = C$ određena temperaturom i sastavom plazme. No, određeno vrijeme τ_E određuje dimenzije termonuklearnog reaktora. U otvorenih sustava vrijeme τ_E linearno je proporcionalno dimenzijama uređaja, za tokamak uređaj ovisnost je kvadratna s polumjerom plazme (sl. 6.11). Za određene polazne vrijednosti indukcije B i faktora β te njima određene gustoće N, dobit ćemo vrijeme τ_E, a zatim potrebne dimenzije, tj. polumjer torusa potreban za samoodržanje fuzije. Još je vrlo neodređena vrijednost difuzijskog koeficijenta D o kome ovisi faktor proporcionalnosti između τ_E i a^2 pa se dimenzije termonuklearnog reaktora mogu sada samo manje ili više vjerojatno procijeniti. Ipak, da bi se mogli promotriti i procijeniti tehnološki problemi pri gradnji termonuklearnih reaktora, zadnjih je godina načinjen niz preliminarnih projekata termonuklearnih reaktora. Projekti najvećim dijelom polaze od koncepcije tokamak reaktora koja traži najmanju ekstrapolaciju prema uređajima koji su izgrađeni ili se grade. No, i za tokamak elektrane ekstrapolacije ipak su znatne ako se pogledaju karakteristike fuzijskog reaktora u tim studijama.

Kao tipične možemo navesti slijedeće vrijednosti glavnih karakteristika u projektnim studijama:

toplinska snaga P_t	2 000 MW – 5 000 MW
glavni polumjer R	10 m
polumjer plazme a	2 – 5 m
struja plazme I_p	10 – 20 MA
vrijeme ograničenja τ_E	red veličine sekunda
toroidalno polje B	3 – 8 T

Za razliku od fisijske elektrane pri gradnji termonuklearnih elektrana s magnetskim ograničenjem plazme ne mogu se najprije graditi male jedinice da bi se ispitivalo ponašanje svih komponenti u pogonu cijelog sustava.

Prema projektnim studijama prvi prototip tokamak sustava koji bi mogao proizvoditi energiju morao bi imati snagu danas najvećih elektrana. Zbog troškova i vremena izgradnje ta nepovoljna karakteristika sigurno će usporiti razvoj. Promotrimo prema projektnim studijama neke specifične tehničke probleme za termonuklearne elektrane tipa tokamak.

a) *Magneti.* Zbog golemih dimenzija jedan od glavnih tehničkih problema bit će gradnja supravodičkih magneta. Polje koje se specificira u projektnim studijama isključuje klasične magnete, ali dopušta upotrebu iskušanih supravodiča od legure niobij-titana (NbTi). No, dimenzije supravodičkog magneta morale bi biti mnogo veće od svih do danas izgrađenih. Oko komore za plazmu dolazi najprije omotač od litija ili grafita debljine oko 1 m da bi zaustavio brze neutrone iz reakcija fuzije u plazmi. Supravodič se ne bi mogao staviti neposredno uz plazmu jer bi bio podvrgnut previše intenzivnoj struji neutrona, pa se stoga polje mora proizvesti preko ukupnog volumena komore za plazmu i moderatorskog omotača. U projektu UWMAK-II presjek toroidalne zavojnice jest oko 500 m^2, a volumen u kojemu se proizvodi polje iznosi nekoliko desetaka tisuća kubičnih metara. To su dimenzije koje za gotovo dva **reda veličine** premašuju danas najveće supravodičke magnete izgrađene uz velike akceleratore, a ti su još nedavno bili značajna dostignuća kriotehnike [UW 75].

Prema današnjim iskustvima još je veća ekstrapolacija za magnete koji trebaju proizvoditi poloidalno polje, promjenljivo u vremenu u korak s promjenom struje kroz plazmu. Budući da je potrebna velika energija u magnetskom polju (oko 10 GJ za poloidalno polje u projektu UWMAK-II), problem je kako dovesti

tu energiju u vremenu oblikovanja plazme. Momentalna je snaga vrijednosti više tisuća MW.

b) *Stijenka komore za plazmu.* Prva stijenka komore za plazmu koja mora održavati potreban vakuum u unutrašnjosti, trebat će izdržati tok brzih neutrona energije 14 MeV od $\sim 5 \cdot 10^{13}/\mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{s}$. Nadalje stijenka će biti izložena trajnom bombardiranju česticama plazme. Materijali s visokim rednim brojem nisu povoljni jer bi onečišćenje plazme s atomima stijenke moglo previše povećati gubitke energije radijacijom plazme zbog povećanog zakočnog zračenja. Stijenka bi bila podvrgnuta vrlo nepovoljnom cikličkom toplinskom i mehaničkom naprezanju, s radnim temperaturama od 400 °C do 1 000 °C.

Osim nerđajućeg čelika kao materijali za prvu stijenku proučavaju se npr. niobij, vanadij i molibden. Kako se procjenjuje da bi trajnost materijala prve stijenke mogla u takvim uvjetima biti oko dvije godine, ispituju se radioaktivnosti koje brzi neutroni induciraju u materijalu prve stijenke. Zbog dimenzija komore za plazmu česta izmjena prve stijenke bila bi veoma velik problem. Projekti zamišljaju modularnu konstrukciju, no teškoće će vjerojatno biti vrlo velike i utjecat će na ekonomičnost, ako se ne razvije materijal sa znatno većom trajnošću, a manjom induciranom radioaktivnošću nego kod nerđajućeg čelika.

c) *Moderatorski omotač.* Većina projekata predviđa moderatorski omotač od litija, a imao bi dvostruku zadaću, morao bi usporavati neutrone i proizvoditi tricij reakcijama $^6\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow \alpha + \mathrm{T}$ (najvećim dijelom) i $^7\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow \alpha + \mathrm{T} + \mathrm{n}$.

Međutim, litij je vodič i njegovo proticanje u magnetskom polju prouzročilo bi problem zbog pojave elektromagnetskih sila. Projekt UWMAK-II predviđa grafit kao moderator, a toplina bi se odvodila protokom helija. No, sloj litija i dalje bi bio potreban za proizvodnju tricija. Ekstrakcija tricija i sprečavanje da on izađe u okoliš, ozbiljan je problem.

d) *Raspoloživa neto energija.* Iz podataka u projektnim studijama o električnoj i toplinskoj snazi, razabire se da bi toplinski koeficijent iskorištenja bio oko 35%, što je kao i u termoelektranama ili fisijskim elektranama određeno materijalima za gradnju parogeneratora i turbina te nije specifično za fuzijsku elektranu. Tehnologija hlađenja helijem razvija se i koristi za visokotemperaturne reaktore, pa se iskustvo može prenijeti, pazeći na temperaturu zbog kritičnog opterećenja prve stijenke. Tipična vrijednost za bruto efikasnost toplinske konverzije η_T jest 0,4 (odnosno 40%) jer se za izlaznu temperaturu helija predviđaju vrijednosti oko 550 °C. Međutim, valja napomenuti da to nije koeficijent iskorištenja za elektranu kao cjelinu prema van jer proizvedenom električnom energijom treba još opskrbiti nekoliko velikih vlastitih potrošača. Najvažniji su:

Supravodički magneti; pripadni rashladni uređaji i sustavi za uskladištenje enegije. Kritična je ukupna snaga rashladnih uređaja po kubnom metru proizvedenog polja.

Prema dostupnim podacima najveći supravodički magneti u Argonne National Laboratory i u CERN-u, s volumenima polja od nekoliko desetaka kubičnih metara ukazuju na ukupan utrošak energije snagom od 5 kW/m³ do 10 kW/m³. Mada je ekstrapolacija problematična, ipak je, orijentacije radi, interesantno pogledati za projekt UWMAK-II kolika bi se potrošnja mogla očekivati pri volumenu toroidalnog polja oko 30 000 m³.

Toplina koju treba odvoditi iz supravodičkog magneta dolazi dijelom zbog disipacije energije u supravodiču, a dijelom zbog vođenja topline iz okoliša. Prvi dio, izražen kao disipacija energije po jedinici volumena polja, bitno se ne mijenja s dimenzijama magneta, ali drugi bi dio opadao približno za 1/L, gdje je L linearna dimenzija sustava. Pretpostavivši takvu ovisnost, zatim da disipacija u supravodiču ima relativno manji udio nego dovođenje topline izvana, te da je

magnet volumena 30 000 m³ načinjen modularno iz više relativno tankih magneta s pripadnim volumenom polja 1 000 m³ — 2 000 m³, dobiva se da bi specifična snaga rashladnog sistema bila od 2 kW/m³ do 3 kW/m³, odnosno ukupno između 60 MW i 90 MW. To je 4%—6% od proizvedene električne snage i nije nepodnosivo, ali ni zanemarivo. Svakako bit će potrebno optimalno smanjiti takve gubitke.

Injektor neutralnih čestica plazme i drugi uređaji za grijanje plazme. U projektu UWMAK-II predviđa se npr. neutralni snop energije 500 keV deuterona snage 200 MW. Djelotvornost akceleratora i čitavog sustava za injektiranje procjenjuje se s 10%. Znatnija je neodređenost u trajanju injekcije. Projekt UWMAK-II predviđa rad injektora samo 10 sekunda, nakon čega se fuzija samoodržava. No, ako bi zbog nepovoljne difuzije plazme bio potreban znatno dulji rad ili trajna injekcija, potrošak energije mogao bi postati veoma velik.

Separacija i pročišćavanje tricija. Zbog vrlo velike kompleksnosti elektrane, koja osim nestandardnih potrošača (neke smo spomenuli) ima i potrošače tipične za sve elektrane približne procjene pokazuju da bi bilo optimistički pretpostaviti da će interni potrošak biti manji od 20% energije proizvedene u generatoru, što znači da bi neto stupanj djelovanja mogao biti oko 25% ili manje. Niže bi vrijednosti vodile u visoke specifične investicije i konzekventno skupu energiju. Drugim riječima, kada i ako se postignu uvjeti za samoodržavanje fuzije, potencijalno najozbiljniji problem u razvoju fuzijskih elektrana tipa tokamak bit će njihova ekonomičnost, o čemu će još biti riječi kasnije.

6.3.3. Razvoj projektnih studija

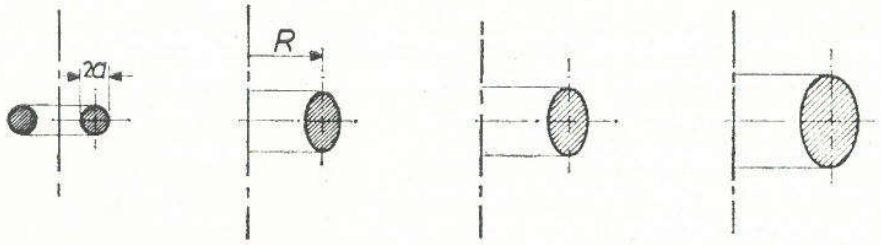
Zadatak projektnih studija jest uočavanje ključnih tehničkih, tehnoloških i fizikalnih problema pri usvajanju određene koncepcije magnetskog ograničenja kao temelja za izgradnju fuzijske elektrane. Projektne studije zato povratno djeluju na usmjeravanje istraživanja fizikalnih i tehnoloških problema. Ta uzajamna povezanost istraživanja i projektnih studija uvjetuje njihov trajni razvoj, u njih se unose nove pretpostavke o parametrima plazme, novi podaci o materijalima i dopuštenim opterećenjima prve stijenke, nove karakteristike sustava za grijanje plazme, poboljšanja u sustavu za odvođenje topline iz omotača i tako dalje.

Nakon projektnih studija UWMAK-I i UWMAK-II iz 1973. i 1975. godine, izrađena je studija UWMAK-III 1976. godine. U tom projektu smanjene su dimenzije glomaznih instalacija iz projekta UWMAK-I i II. To je postignuto udvostručenjem opterećenja prve stijenke na 2,5 MW/m².

Godina 1978. i 1979. načinjene su projektne studije na Sveučilištu u Wisconsinu (NUMAK), te na Sveučilištu u Massachusettsu (High Field Compact Tokamak Reactor, HFCTR). U oba slučaja projektirane su kompaktne instalacije s volumnom gustoćom snage oko 10 MW/m³. NUMAK pretpostavlja srednje magnetsko polje i relativno visoku β vrijednost (6%), a HFCTR višu vrijednost indukcije magnetskog polja (B = =7,4 T), nižu vrijednost parametra β (ispod 5%), te minimalne ekstrapolacije na eksperimentalno utvrđeno ograničenje i MHD stabilnost plazme.

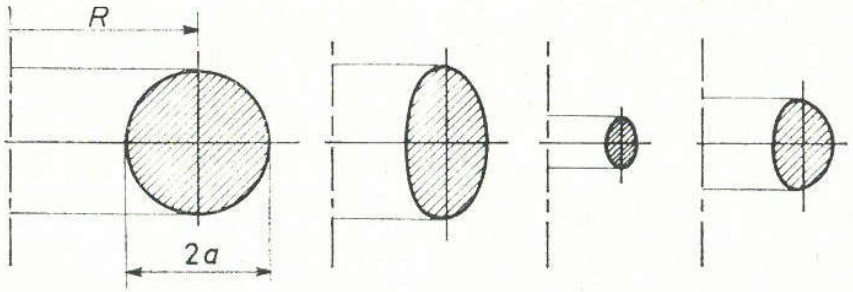
Projektna studija STARFIRE izrađena je u Argonskom Nacionalnom Laboratoriju (ANL) 1980. godine. Projekt STARFIRE pretpostavlja da su uspješno svladane prethodne etape, počevši s TFTR, zatim s ETF (Engineering Test Fusion Device) i s demonstracijskim uređajem DEMO.

Na slici 6.13. prikazane su glavne karakteristike instalacija do projekta STARFIRE (Američki program). Alternativa za fazu gradnje instalacije ETF — namijenjene rješavanju osnovnih tehnoloških problema fuzijske elektrane — jest INTOR, međunarodni projekt u fazi tehničkog definiranja o kojem smo već govorili.



	TFTR	INTOR - ETF	ORNL/DEMO	STARFIRE
R	2,5 m	5,2 - 5,4 m	6,0 m	7,0 m
a	0,9 m	1,3 m	1,5 m	2,0 m
toplinska snaga	20 MW	620 - 1130 MW	1700 MW	4000 MW

Slika 6.13. Predviđene etape (američki program) u razvoju do komercijalne fuzijske elektrane



	UWMAK-I 1973	UWMAK-III 1976	NUWMAK 1978	STARFIRE 1980
R	13 m	8,1 m	5,1 m	7,0 m
a	5,0 m	2,7 m	1,1 m	2,0 m
P_{NW}	1,25 MW/m²	2,5 MW/m²	4,0 MW/m²	3,6 MW/m²
toplinska snaga	5000 MW	5000 MW	2100 MW	4000 MW

Slika 6.14. Evolucija glavnih parametara u američkim projektima komercijalnih fuzijskih elektrana

INTOR odnosno ETF trebao bi biti maksimalan razuman korak naprijed nakon generacije tokamaka: TFTR, JET JT–60, T-15, a trebali bi se postignuti parametri plazme potrebni za demonstracijsku elektranu i razvoj osnovne tehnologije, npr. supravodičkih magneta, grijanja plazme itd. Služio bi kao pokusna instalacija za omotač, proizvodnju tricija, materijale i sve ostale značajne tehnološke probleme pri radu na snazi.

Na slici (6.14) prikazane su osnovne karakteristike projekta STARFIRE prema prijašnjim projektima.

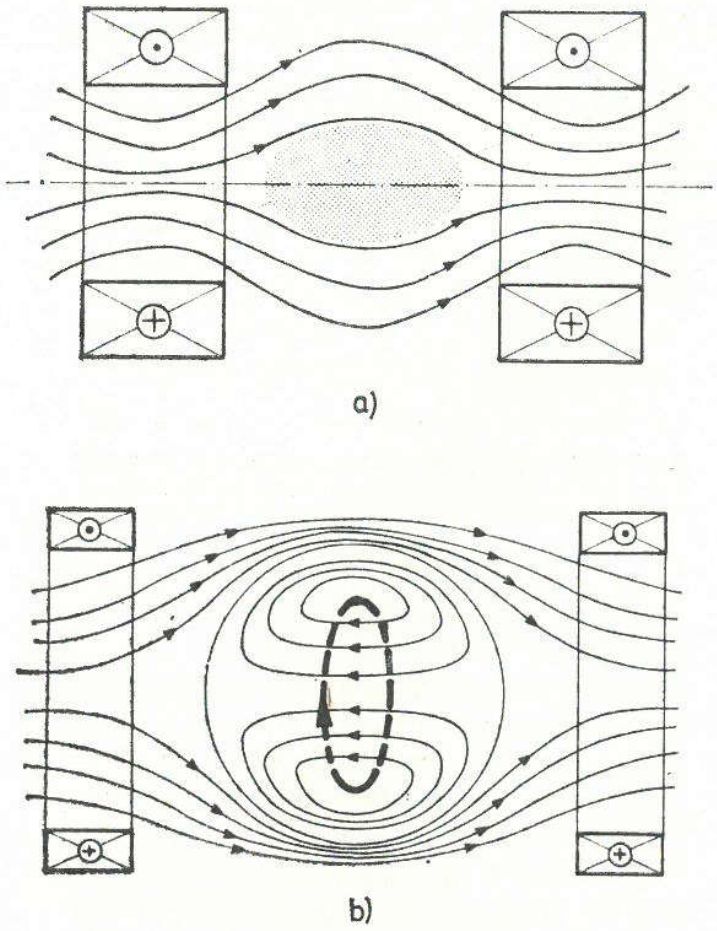
6.4. Linearni sustavi

6.4.1. Nov razvoj linearnih sustava

Tehnički i tehnološki problemi koji se naziru u razvoju tokamaka do komercijalne elektrane stimuliraju istraživanje i razvoj alternativnih koncepcija. U najjednostavnijoj takvoj koncepciji, u linearnom sustavu valja pokušati smanjiti bježanje iona na krajevima, što je glavna slabost tog sustava.

Posljednjih godina postignuti su rezultati na temelju kojih se ponovno čini da se zrcalnim linearnim sustavom mogu postignuti uvjeti za fuziju. S obzirom na povoljniju prostornu strukturu, te znatno povoljnije β vrijednosti postao bi taj sustav i vrlo ozbiljan kandidat za razvoj do fuzijske elektrane.

Koncepcijski se mogu razlikovati dva puta u poboljšanju linearnog sustava. Jedan su sustavi u kojima se poboljšava efikasnost zrcala, a dodatni uređaji obavljaju povrat u plazmu energije čestica odbjeglih na krajevima. To su tzv. sustavi s povećanim Q faktorom. Drugi po-



Slika 6.15. Sustav za ograničenje plazme s obrtanjem magnetskog polja.
a) Dijamagnetske struje u plazmi istiskuju silnice iz područja plazme. Stanje u jednostavnoj magnetskoj jami.
b) Pojačane dijamagnetske struje uzrokuju suprotno polje u središnjem dijelu jame. Pojačanje dijamagnetskih struja može se postići tangencijalnim ubrizgavanjem neutralnih snopova čestica.

lazi od visoke β vrijednosti u linearnim sustavima, a koja znači da u plazmi teku snažne dijamagnetske struje. Ta koncepcija u linearnom sustavu predviđa pojačanje tih struja sve do promjene smjera ukupnog polja. To bi bili tzv. uređaji s obrnutim poljem (Field reversal system).

6.4.2. Povećanje Q faktora i tandemski zrcalni sustav

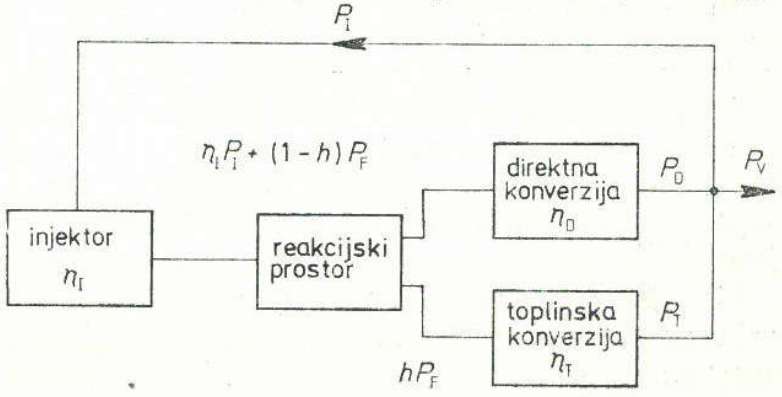
Promotrimo glavne mogućnosti odnosno putove za poboljšanje linearnog sustava sa zrcalima. U jednom se nastoji povećati efekat magnetskih zrcala, a u drugom se nastoji energija čestica koje bježe iz plazme izravnom konverzijom pretvoriti u električnu energiju, pa sustavima za grijanje plazme vratiti u plazmu. Pri (D, T) reakciji oko 20% energije ostaje u plazmi kao kinetička energija alfa-čestica nastalih u reakciji, a ostalo odnose neutroni. Dijagram toka energije za zrcalni sustav s konvertorom i oznakama efikasnosti konverzija prikazan je na slici 6.16. Sa h određen je dio fuzijske energije koji se apsorbira u plazmi.

U linearnom sustavu postizanje fuzijskih uvjeta osjetljivo je ovisno o efikasnosti recirkuliranja, odnosno vraćanja u plazmu energije koja bježi na krajevima; zato je za utvrđivanje energetske bilance potrebno uvesti odgovarajuće veličine.

Sa η_D označena je efikasnost uređaja za izravnu konverziju. Taj uređaj dočekuje odbjegle ione na istoimeno nabijenim elektrodama te se njihova kinetička energija pri tome pretvara izravno u električnu energiju. Predstavlja neku vrstu akceleratora čestica u inverziji.

Sa η_I označena je efikasnost uređaja za zagrijavanje plazme, a sa η_T efikasnost pri konverziji toplinske energije u električnu energiju.

Sa P_D, P_T i P_F označene su električne snage uređaja za izravnu i toplinsku konverziju, te toplinska fuzijska snaga.



Slika 6.16. Tok energije i osnovni parametri za bilancu energije u linearnom sustavu s povratom energije odbjeglih iona

Od energije koja se vraća u plazmu P_I iskorištava se dio $\eta_I P_I$, gdje je η_I oko 0,8, a dobivena je energija fuzije P_F. Omjer $\frac{P_F}{\eta_I P_F}$ faktor je umnažanja energije Q, a omjer $\varepsilon=\frac{P_I}{P_D+P_T}$ određuje dio električne energije koji se vraća u plazmu. Kako je $P_T=h P_F \eta_T$,

a

$$P_D=[\eta_I P_I+(1-h) P_F] \eta_D$$

gdje je h dio fuzijske energije koja se oslobađa kao energija neutrona, slijedi:

$$\varepsilon=\frac{1}{Q \eta_I [h\eta_T+(1-h)\eta_D+\eta_D/Q]} \quad (6.31)$$

a odatle

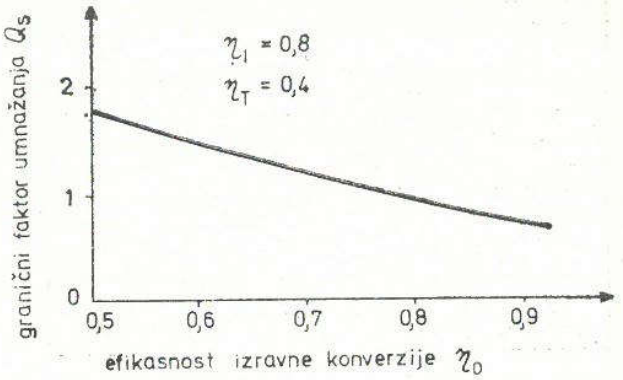
$$Q=\frac{\varepsilon^{-1}-\eta_I \eta_D}{\eta_I [h\eta_T+(1-h)\eta_D]}. \quad (6.32)$$

Samoodržavanje fuzije karakterizirano je s vrijednošću $\varepsilon=1$, tj. proizvedena električna energija upravo dostaje za zagrijavanje plazme. Učinak recikliranja energije može se ocijeniti ako usporedimo granične vrijednosti potrebnog pojačanja Q_S s recikliranjem i bez njega. Bez recikliranja $\eta_D=0$, te s vrijednostima $\eta_T=0,4$ i $\eta_I=0,8$ — dobiva se granična vrijednost faktora umnažanja

$$Q_S=3,9.$$

Uz recikliranje s efikasnošću izravne konverzije $\eta_D=0,8$, dobiva se granični faktor umnažanja $Q_S=0,938$. U tom graničnom slučaju energija fuzije P_F samo kompenzira gubitke u izravnoj konverziji i injekciji. Ako bi η_I i η_D imali vrijednost 1, tj. ako tih gubitaka ne bi bilo, dobila bi se vrijednost $Q_S=0$. Kako vidimo pri recikliranju s odabranom efikasnošću $\eta_D=0,8$ potrebna je približno 4 puta manja granična vrijednost energetskog pojačanja Q_S. Eksperimentalne i analitičke procjene stavljaju efikasnost η_D u interval 0,6—0,8 [Ka 1975].

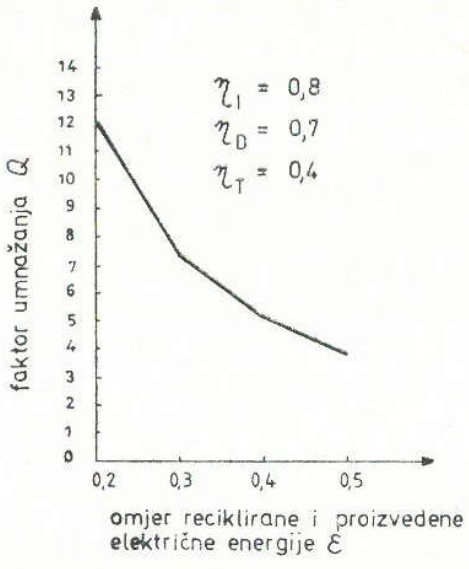
Na slici 6.17. prikazane su granične vrijednosti Q_S ovisno o efikasnosti izravne konverzije η_D.



Slika 6.17. Granični faktor umnažanja energije Q_S ovisno o djelotvornosti izravne konverzije

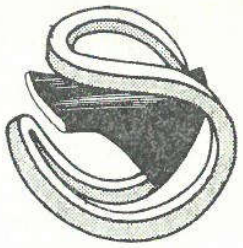
Da bi se dobio koristan i ekonomski prihvatljiv uređaj, dio energije koji se reciklira P_I ne bi smio biti veći od 1/3 proizvedene električne energije. Neki autori [Ha 1977, str. 120] misle da bi taj dio trebao biti samo oko 20% proizvedene električne energije.

Na slici 6.18. prikazani su potrebni iznosi faktora umnažanja energije Q ovisno o omjeru ε između reciklirane i proizvedene električne energije u području vrijednosti ε od 0,2 do 0,5. Pretpostavljene su vrijednosti $\eta_D=0,7$, $\eta_I=0,8$, $\eta_T=0,4$.

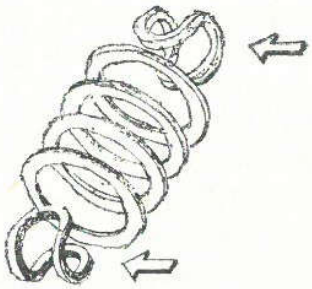


Slika 6.18. Faktor umnažanja energije Q kao funkcija omjera ϵ reciklirane električne energije i proizvedene energije

Razabiru se vrijednosti faktora umnažanja Q koji bi bili potrebni za smanjenje i prihvatljivost investicijskih troškova. Q veći od 7 potreban je da bi reciklirana snaga bila manja od 1/3 proizvedene električne energije. Koje se vrijednosti faktora Q mogu očekivati? U početku 70-ih godina ocjenjivalo se da je moguće postignuti vrijednosti Q od 1 do 2, što bi dalo perspektivu tek za fuzijsko-fisijski hibrid. Međutim, u drugoj polovici 70-ih godina pojavilo se nekoliko koncepcija koje bi trebale dati znatno smanjeno bježanje na krajevima. Takozvani tandemski zrcalni sustav kao razvoj linearnog sustava predložili su neovisno sovjetski i američki znanstvenici [Di 1976. i Fo 1977]. Eksperimenti kojima će se provjeriti fizikalne osnove te koncepcije još se obavljaju, odnosno pripremaju. Međutim, ohrabruje da se tandemski zrcalni sustav sastoji od već istraženih magnetskih konfiguracija, pa se iznenađenja ne očekuju. Tandemski zrcalni sustav sastoji se od cilindričnog središnjeg dijela, te zavojnica u obliku šava na teniskoj lopti koje proizvode magnetsko polje s minimumom indukcije u središtu sustava i tako potencijalnu jamu za plazmu (sl. 6.19. i 6.20). Te, tzv. Jin-Jang zavojnice, djeluju kao zatvarači ili „čepovi" za središnji dio.



Slika 6.19. Zavojnica s minimumom indukcije u središtu, tzv. Jin-Jang zavojnica. (Američki eksperimentalni uređaj 2XIIB u *Lawrence Livermore* nacionalnom laboratoriju načinjen je u toj konfiguraciji.)



Slika 6.20. Shematski prikaz tandem zrcalnog sustava (strelice označuju ulaz neutralnih čestica u magnete s minimumom indukcije)

Velika gustoća plazme u tim magnetskim jamama održava se injektiranjem neutralnih snopova čestica velike energije — oko 1 MeV. Kako elektroni lakše bježe iz magnetske jame ona ostaje s pozitivnim potencijalom prema cilindričnom dijelu sustava i djeluje kao elektrostatska barijera pozitivnim ionima.

Princip tandemskog zrcalnog sustava

U magnetskoj se jami nabijene čestice zadržavaju jer ih vraća polje koje raste od središta jame prema van. Jedan dio uspijeva ipak pobjeći — u početnoj fazi to lakše uspijeva bržim elektronima. Tako zbog gubitka elektrona plazma postaje pozitivno nabijena, postupno reducirajući bijeg elektrona dok se ne izjednači s bijegom pozitivnih iona. U tandemskom zrcalnom sustavu iskorišteno je to stvaranje pozitivnog potencijala u magnetskoj jami za zatvaranje cilindričnog sustava. Po jedna magnetska jama na svakom kraju linearnog cilindričnog sustava stvara svojim pozitivnim potencijalom elektrostatsku barijeru za pozitivne ione u cilindričnom dijelu tandema. Pozitivni ioni kreću se duž cilindra, a na krajevima reflektiraju od elektrostatske barijere, odnosno njezinog električnog polja. Zajedno s potencijalnim barijerama na kraju, cilindrični dio tandemskog zrcalnog sustava postaje potencijalna jama za pozitivne ione. Prema tome taj sustav, odnosno „tandem" dviju konfiguracija, linearnog sustava i magnetske jame znatno poboljšava mogućnosti da se postigne Lawsonov kriterij (svaki sustav za sebe ne bi to nikako mogao).

6.4.3. Izvedbe i projekti linearnih sustava s povećanim Q faktorom

Tandemski zrcalni sustav sastojao bi se od glavnih komponenata kao na slici 6.20. Osobito je privlačna jednostavna cilindrična struktura središnjeg dijela u kojemu se odvija fuzija. Izvan toga se nalaze Jin-jang magneti, akceleratori neutralnih snopova i uređaji za izravnu konverziju. Prema projektnoj studiji iz 1977. godine [Mo 1978] mogu se upoznati osnovni fizikalni i tehnički parametri. Početni fizikalni parametri temelje se na dobrim rezultatima s američkim 2 XII B zrcalnim uređajem. Tako je 1 i 0,7 odabrano kao vrijednost parametra β za zrcalo odnosno za središnji dio reaktora.

Izborom 2,4 T kao vrijednosti magnetskog polja u središnjoj ćeliji, što omogućuje korištenje iskušanih niobij-titanovih supravodiča, određena je gustoća plazme, a tako i gustoća snage u središnjoj ćeliji reaktora. Izborom i procjenom efikasnosti η_T, η_I, η_D, te faktora multiplikacije energije u litijskom omotaču središnje ćelije određeni su pak relativni energetski tokovi u reaktorskom sustavu. Izborom izlazne snage određuju se sve vrijednosti i dimenzije reaktora. Rezultati projektne studije prikazani su za izlaznu električnu snagu od 1 000 MW.

U tablici 6.3. navedeni su glavni energetski parametri, a u tablici 6.4. dimenzije i fizikalni parametri magneta i plazme u središnjoj ćeliji i zrcalima.

Tablica 6.3. Energetski parametri projekta tandemskog zrcalnog sustava [Mo 1978]

Neto električna snaga	1 000 MW (e)
Fuzijska snaga	2 500 MW
Q faktor	4,8
Specifično opterećenje prve stijenke	2 MW/m^2
Gustoća snage u plazmi	5 MW/m^3
Omjer recirkuliranja snage ε	0,43
Stupanj djelovanja elektrane	34 %

Tablica 6.4. Fizikalni parametri projekta tandemskog zrcalnog sustava

Zrcalo	
energija injekcije	1,2 MW
srednja ionska energija	880 keV
gustoća plazme	$8{,}6 \cdot 10^{20}$ m^{-3}
elektronska temperatura	42 keV
faktor β	1
polumjer plazme	0,48 m
indukcija polja	16,5 T
umnožak $N\tau$	$2{,}5 \cdot 10^{20}$ s m^{-3}
Središnja ćelija	
faktor β	0,7
duljina	100 m
polumjer plazme	1,2 m
indukcija polja	2,4 T
elektronska temperatura	42 keV
ionska temperatura	30 keV
gustoća plazme	$1{,}1 \cdot 10^{20}$ m^{-3}
umnožak $N\tau$	$7{,}7 \cdot 10^{20}$ s m^{-3}

Magnet za središnju ćeliju promjera 8,4 metra bio bi načinjen s niobij-titanovim supravodičima u 36 sekcija, ukupne duljine 100 m. Zrcala moraju zadovoljiti dva veoma teška zahtjeva. Jedan je da energija snopa neutralnih čestica mora biti 1,2 MeV, što je više od postignutoga. Drugi je zahtjev: potrebno je magnetsko polje indukcije 16,5 T koje se u projektu dobiva niobij-kositrenim supravodičkim magnetom promjera 5,75 m. Jin-Jang magnet kriogenički je — od čistog aluminija disipacije $2 \cdot 0{,}25$ MW. Odvođenje topline iz litijskog omotača predviđa se helijem pod tlakom ~50 bar na ulazu i izlaznom temperaturom 530 °C. Toplinska konverzija slična je tehnički i tehnološki onoj koja se koristi u visokotemperaturnim reaktorima (hlađenje također helijem). Na temelju određenih fizikalnih i odabranih tehničkih parametara magneta, uređaja za grijanje plazme, uređaja za izravnu i toplinsku konverziju obavljena je procjena investicijskih troškova.

Tablica 6.5. Investicijski troškovi prema projektnoj studiji fuzijske elektrane s tandemskim zrcalnim reaktorom [Mo 1978]

Središnja ćelija

	Investicije milijuni dolara*
omotač	114
štit	62
vakuumska posuda	11
namotaj magneta	35
mehanička struktura namotaja	21
glavna konstrukcija	51
uređaj za izmjenu sekcija ćelije	22
	316

Zrcalo, injekcija i konverzija

namotaj zrcala	171
reaktorska zgrada	44
injekcijski uređaj	147
uređaj za izravnu konverziju	134
uređaj za toplinsku konverziju	199
ostalo	270
ukupno	1 281

*Dolari 1977. godine

Prema studiji investicijski su troškovi oko 1 300 $/kW (e) (1977. godine). Prema procjenama za nuklearne elektrane 1976/77. [Mitre report, str. 116] ta bi vrijednost bila otprilike dva puta veća od analogne vrijednosti za lakovodne reaktore iste snage. Dakako da su ove rane procjene vrlo neodređene, korisne u prvom redu za procjenu odnosa prema drugim fuzijskim konfiguracijama.

6.4.4. Tandemski zrcalni sustav s termičkom barijerom

Kako se razabire iz projektne studije iz 1977. godine tandemski zrcalni sustav ima prema toroidalnim uređajima niz prednosti:

— visoke vrijednosti faktora β znače racionalno korištenje magnetskog polja i smanjenje dijela troškova za magnete;

— mogućnost rada u trajnom režimu, za razliku od pulsnoga u toroidalnih sustava;

— modularnu konstrukciju središnjeg magneta s relativno lakšim održavanjem;

— cilindrična struktura s otvorenim krajevima olakšava rješavanje problema nečistoća u plazmi;

— visoka β vrijednost čini sustav prikladnim za korištenje naprednih fuzijskih ciklusa goriva.

Dakako, te su karakteristike cilindričnog sustava bile poznate i ranije, ali nije bilo poznato rješenje za bježanje iona na krajevima, pa ta konfiguracija nije imala realnu perspektivu. Velik korak naprijed bio je pronalaženje učinka elektrostatske bariere u tandemskom zrcalnom sustavu. Eksperimenti u Lawrence Livermore National Laboratory na TMX uređaju potvrdili su da je koncepcija elektrostatske barijere ispravna. Međutim, kako se razabire iz projektne studije, u konceptu elektrostatske barijere vrlo visoke tehnološke zahtjeve moraju zadovoljiti „čepovi", tj. magnetska zrcala na krajevima u kojima se nalazi plazma visoke gustoće (tablica 6.4). Značajan napredak ostvaren je 1979. godine novom koncepcijom toplinske barijere [Ba 1979] koja zapravo unapređuje princip elektrostatske barijere. Ona se sastoji u efikasnijem iskorištenju zagrijavanja elektrona i u spoznaji da visina elektrostatske barijere ovisi o temperaturi elektrona u magnetskom čepu. U normalnom tandemskom zrcalnom sustavu tok elektrona između središnjeg magneta i magnetskih čepova toliko je intenzivan da se mogu uspostaviti samo male temperaturne razlike. U novijoj koncepciji dodavanjem međumagneta između središnje ćelije i čepa stvorena je zapreka za prijelaz elektrona iz središnje ćelije u čepove. Pri višoj temperaturi elektrona u plazmi čepova elektrostatska potencijalna barijera može se ostvariti pri manjoj ionskoj gustoći i stoga s manjim magnetskim poljima za ograničenje pla-

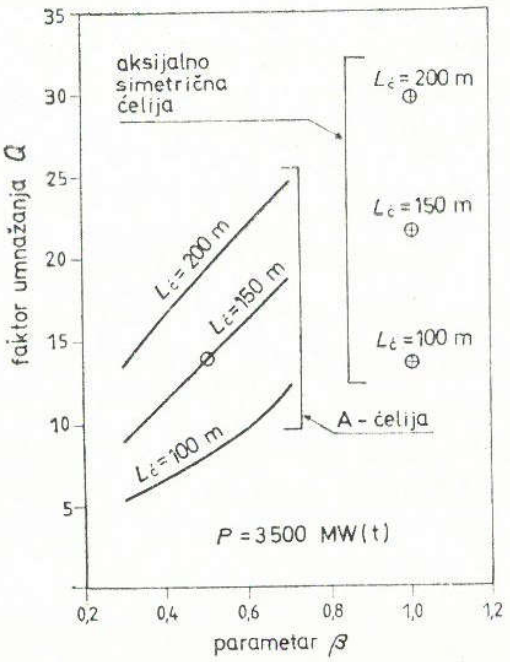
zme. Zahtjevi koje mora zadovoljiti čep smanjuju se s energije od 1,2 MeV za čestice neutralnog snopa i indukcije polja od 17 T na energiju 150 keV—500 keV, odnosno indukciju 12 T. To je veoma značajno olakšanje jer su već i pri indukciji polja 10 T mehanički problemi konstrukcije magneta vrlo veliki, a osim toga smanjuju se potrošak energije i utjecaj na Q vrijednost. I neutralni snopovi s energijom čestica 1,2 MeV također bi prouzročili velike probleme.

Novi princip termičke barijere eksperimentalno će se ispitivati u prerađenom TMX uređaju (TMX-U) u LLNL tokom 1983. godine, a ispitivanje ograničenja plazme u velikom tandemskom zrcalnom sustavu Mirror Fusion Test Facility, MFTF-B se planira za 1986, kada bi taj uređaj trebao biti dovršen.

Preliminarna projektna studija reaktora s tandemskim zrcalnim sustavom i termičkom barijerom načinjena je 1979. godine. Sa središnjom ćelijom duljine 56 m i Q faktorom ≈ 10 fuzijska snaga P_F iznosi 1 770 MW. Reaktor bi proizvodio neto električnu snagu 500 MW. Neutralni snopovi kojima se podržava i zagrijava plazma u čepovima bili bi energije 400 keV [Bo 79].

Nakon 1979. promatrano je i predloženo nekoliko načina uspostavljanja termičke i potencijalne barijere. Varijanta na kojoj se temelji sustav MFTF-B sastoji se — idući od središnje ćelije — od prelaznog magneta, zatim para Jin-Jang zavojnica, te konačno zavojnice u obliku slova C, orijentirane kao što je orijentirana vanjska zavojnica Jin-Jang para. Takav sustav poznat je kao sustav s A-ćelijom. Još nije poznato i budućim teorijskim i eksperimentalnim radom valja riješiti do kojih će se β vrijednosti moći ići u središnjoj ćeliji prije nastupa nestabilnosti posebnog tipa, tzv. baloniranja, tj. lokalnog deformiranja plazme poput onog koje nastaje na slabijem mjestu gumene cijevi pod unutrašnjim tlakom. U reaktorskim studijama zrcalnih sustava vrijednost β uzima se stoga kao promjenljiv parametar. Za konfiguraciju s A-ćelijom u LLNL razvijeni su fizikalni modeli za pretkazivanje ponašanja plazme.

Na slici 6.21. izračunate su Q vrijednosti za različite vrijednosti β i različite duljine središnje ćelije. Snaga fuzije jest 3 500 MW (t), magnetska polja idu u A-ćeliji do 9 T, a u središnjoj ćeliji do 3,4 T. Sa središnjom ćelijom duljine 150 m, ovisno o vrijednosti β za ćeliju, Q vrijednost kreće se od 10 do blizu 20 [Lo 80].



Slika 6.21. Q vrijednosti tandem zrcalnog sustava s toplinskom barijerom ostvarenom s A-ćelijom, te preliminarno, za noviju varijantu aksijalno-simetrične ćelije za zatvaranje.
(Q vrijednosti su dane za tri duljine središnje ćelije, ovisno o β vrijednosti u središnjoj ćeliji, za aksijalno-simetrične ćelije dane su vrijednosti za $\beta = 1$)

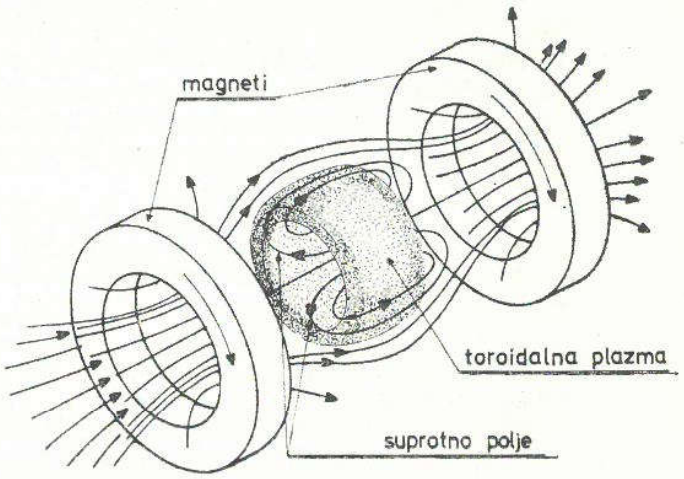
Detaljnija projektna studija načinjena je na Sveučilištu u Winconsinu, SAD, WITAMIR-I (Winconsin Tandem Mirror), [Ba 1980]. Uređaj je projektiran na električnu snagu od 1 000 MW, duljinu centralne ćelije 165 m i ukupnu dužinu 250 m. Maksimalna indukcija u centralnoj ćeliji bila bi 6,1 T, a u magnetskom zatvaraču 15 T. Q vrijednost uređaja u projektu iznosi 28, udio recirkulirane energije ε je 18%, a ukupan stupanj djelovanja 39%. Projektna studija daje i procjenu strukture investicijskih troškova za opremu sistema za proizvodnju pare. Ma-

gneti sudjeluju sa 25%, uređaji za grijanje plazme sa 21%, štit sa 13%, omotač za proizvodnju tricija sa 5% dok na primarni krug za odvođenje topline u koji su uključeni parogeneratori ide 23%. Ostatak ide na uređaje za direktnu konverziju, vakuumske sisteme itd. U Lawrence Livermoore National Laboratory, zajedno sa Sveučilištem u Wisconsinu i sa dva industrijska laboratorija dovršava se nova projektna studija tandemskog zrcalnog uređaja s termičkom barijerom — MARS (Mirror Advanced Reactor Study). U ovom projektu središnja ćelija dužine 129 m i poljem 4,7 T razvijala bi snagu 2 575 MW. Projekt se ističe karakteristikama kojima se podiže ukupan stupanj djelovanja. Hlađen je legurom litija i olova izlazne temperature 500 °C. Sistem koristi direktnu konverziju energije odbjeglih iona. No s obzirom na relativan stupanj razvijenosti linearnog sistema, projektna studija polazi od težih pretpostavki i ekstrapolacija nego tokamak studija STARFIRE.

Nedvojbeno je da je novim koncepcilama elektrostatske i termičke barijere jinearnom sustavu otvorena nova perspektiva. Posljednjih nekoliko godina ta se koncepcija veoma živo istražuje i postaje uz tokamak sustave glavno područje istraživanja magnetskog ograničenja. Važni rezultati očekuju se od instalacije MFTF-B, s kojom bi se u središnjoj ćeliji trebali postignuti uvjeti za fuziju.

6.4.5. Linearni sustav s promjenom smjera magnetskog polja

Koncepcija takvog sustava temelji se na snažnim dijamagnetskim strujama koje se pokreću u linearnim sustavima (sl. 6.15) visokim β vrijednostima. Pri $\beta=1$ uzdužno magnetsko polje linearnog sustava potpuno je izbačeno iz područja plazme dijamagnetskim strujama plazme. Daljnjim pojačanjem tih struja, što je ostvarivo injekcijom snopova neutralnih čestica, došlo bi do promjene smjera magnetskog polja u plazmi. Plazma bi poprimila toroidalan oblik, a silnice struja u plazmi zatvarale bi se oko nje (sl. 6.22).



Slika 6.22. Toroidalna plazma u linearnom sustavu s promjenom smjera magnetskog polja

Mogućnost pokretanja takvih struja razabire se iz rezultata eksperimenata na uređaju 2 X II B, s kojim su dobivene β vrijednosti veće od 1.

Takva konfiguracija magnetskog polja i plazme pretvarala bi, zapravo otvoreni linearni sustav u zatvoreni i tako znatno smanjila bježanje na krajevima i povećala Q faktor.

Pripremaju se eksperimenti koji trebaju najprije utvrditi da li se može ostvariti promjena smjera polja, a zatim stabilnost torusa plazme. Sustav s kojim će se ta ispitivanja obaviti konstruira se u Livermoru (LLNL), i trebao bi biti završen 1983/84. godine (Beta II). Ako se postigne obrnuto polje i stabilna plazma taj sustav imao bi povoljne ekonomske karakteristike. Torus plazme i dimenzije magneta bili bi maleni. Unatoč tome visoka β vrijednost omogućila bi visoku gustoću snage.

Ocjenjuje se da bi ta koncepcija omogućila izgradnju jedinica sasvim male snage — do oko 10 MW (e). Fuzijska elektrana koristila bi linearni niz manjih modula s obrnutim poljem, pa bi uvjeti za tehnički i tehnološki razvoj bili povoljni. Međutim, na ocjenu ostvarivosti ove koncepcije treba pričekati.

Razvojna strategija magnetskog ograničenja u SAD

Opravdano je gledište da poznavanje nuklearne fuzije s magnetskim ograničenjem nije takvo da bi valjalo preporučiti istraživanje samo jedne konfiguracije. Tehnološki problemi tokamaka teški su. Istina je da kasniji projekti, pa i STARFIRE, imaju razumnije dimenzije od UWMAK-I i II, ali valja znati da tek treba demonstrirati postizanje uvjeta za fuziju. Problem makroskopskih nestabilnosti pri većim gustoćama plazme još nije riješen. Takvo gledište potkrepljuje i novi napredak u istraživanju linearnih sustava, a njihov pravi potencijal bit će znatno jasniji u idućih nekoliko godina.

Tehnološki i fizikalni problemi postoje i za linearne sustave, ali oni su olakšani geometrijskom strukturom sustava. Osnovni tehnički i tehnološki zahtjevi razabiru se iz projektne studije, a njezine su glavne karakteristike prikazane u poglavlju 4.3. Opterećenje prve stijenke olakšano je time što sustav ne radi ciklički, a linearnost olakšava modularnu konstrukciju.

Tehnološki zahtjevi za zrcala mnogo su teži nego za središnju zavojnicu, ali povoljno je da su zrcala izvan područja intenzivnog neutronskog toka. Središnja zavojnica oko koje se nalazi moderator i toplinski izmjenjivač, dakle dio sustava u kojem se proizvodi energija, odvojen je i odvojiv od sustava zrcala, uključivši izvore i injektore neutronskih snopova.

Sadašnje istraživanje i poznavanje fuzije dobro prikazuje izvještaj odbora, grupe stručnjaka što ga je imenovalo američko ministarstvo za energiju (Department of Energy) 1980. godine (prema predsjedniku odbora S. Buchsbaumu poznat je kao „Buchsbaumov izvještaj") Iako se raspravlja o programu fuzijskih istraživanja u SAD, izvještaj dobro prikazuje opće stanje, osobito zato što je američki program veoma intenzivan i što je postigao niz značajnih rezultata zadnjih godina. Nakon višemjesečnog rada i obilaska najvažnijih instalacija zaključuju da napredak u zadnje vrijeme opravdava očekivanje da će se samoodržanja fuzije postignuti uskoro, barem u jednom od velikih tokamaka u gradnji, na primjer u TFTR instalaciji u Princetonu. Stručnjaci ocjenjuju da je fizika tokamak uređaja dovoljno jasna da bi se mogle obaviti ekstrapolacije za veće sustave i fuzijsku plazmu.

Unatoč takvoj ocjeni perspektive postizanja fuzijskih uvjeta, odbor slično kao i u 1978. godini upozorava da to ne osigurava razvoj sigurnog, ekonomičnog i prema utjecaju na okoliš prihvatljivog fuzijskog reaktora.

Na temelju takvog shvaćanja stručnjaci preporučuju da se bez odlaganja pristupi pripremi gradnje tokamak uređaja na kojemu bi se mogli ispitati i rješavati tehnički i tehnološki problemi. Takav uređaj nazivaju Engineering Test Reactor (ETR) i predlažu da se izgradi u 80-im godinama. Za razliku od ranijih prijedloga stručnjaci misle da ne bi trebalo predviđati da ETR bude zadnji korak do komercijalne elektrane pa da tako bude opterećen zadatkom rješavanja svih tehničkih i tehnoloških problema.

Da bi se moglo koordinirano i sustavno pristupiti tim problemima stručnjaci predlažu da ministarstvo za energiju (DOE) osnuje Centar za fuzijsku tehniku (Center for Fusion Engineering) u kojem bi se intenzivno moglo početi raditi nakon dobivanja rezultata iz fuzijskog uređaja TFTR.

U skladu s Buchsbaumovim izvještajem američki je Kongres 1980. godine ozakonio smjernice razvoja (Magnetic Fusion Energy Engineering Act). Propisuje se pomicanje težišta s nastojanja da se dokaže znanstvena izvedivost fuzije na demonstraciju tehničke izvedivosti, te na izbor najpovoljnijeg sustava i konstrukciju demonstracijske elektrane do kraja stoljeća. Ministarstvo za energiju (DOE) izrađuje planove za ostvarenje tih smjernica.

Početkom 1982. godine američki sekretar za energiju formirao je Savjetodavnu komisiju za fuziju s magnetskim ograničenjem — Magnetic Fusion Advisory Committee (MFAC), sa zadaćom da priprema preporuke Ministarstvu energije (Department of energy) u vezi s fuzijskim istraživanjem i razvojem. Komisija je sumarno iznijela svoja gledišta travnja 1983. (Fifth Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, Knoxville, Tennesse, April 26—28, 1983). Komisija nalazi da najrazvijenije konfiguracije, tokamak i tandem zrcalni sistem pokazuju stalan napredak, sa za sada podjednakim potencijalom razvoja do fuzijskog reaktora. Postojeći rezultati impliciraju za tokamake mogućnost dostizanja samoodržanja fuzijske reakcije, pa je u budućnosti nužno demonstrirati gustoću snage i dužinu pulsa nužnu za komercijalan rad elektrane. Tandemski uređaji nalaze se u ranijoj fazi razvoja, te je nužno najprije demonstrirati mogućnost dosizanja samoodržanja fuzijske reakcije. Od primarne važnosti za to je uspješna demonstracija koncepta termičke barijere.

S obzirom na planirane izgradnje eksperimentalnih tokamak uređaja i tandem zrcalnih uređaja Komisija predviđa preliminarnu procjenu 1984. godine i smatra da će temeljitija ocjena biti moguća 1987. godine. Uz pretpostavku povoljnog tehničkog razvoja nakon te procjene bilo bi iza 1987. godine moguće i opredjeljenje za ETR (Engineering Test Reactor) tokamak ili tandem zrcalnog tipa.

6.5. Inercijsko ograničenje plazme

6.5.1. Fizikalne osnove

Složeni i teški problemi u razvoju magnetskog ograničenja potaknuli su razmišljanja o načinima kojima bi se teškoće zaobišle. Inercijsko ograničenje plazme svakako je potpuno različita alternativa, ono je zapravo odsustvo svakog ograničenja, pa i magnetskoga. Plazma se zagrije vrlo brzo na temperaturu fuzije i reakcija se odvija s dobitkom energije dotle dok slobodnom ekspanzijom gustoća plazme ne padne ispod određene vrijednosti — određene na principu energetske bilance koji vodi do Lawsonova kriterija.

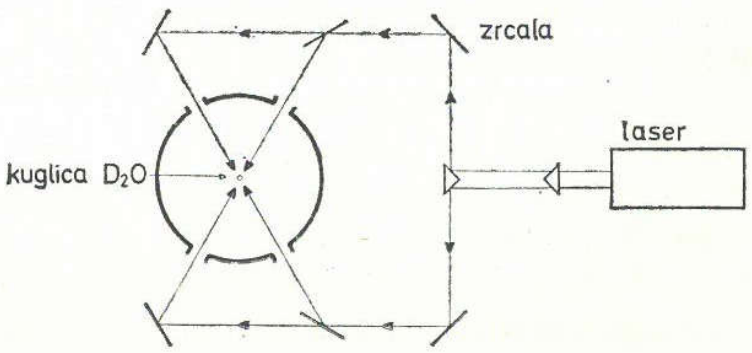
Naravno, kao ideja to je vrlo jednostavno. Ako se ipak razvijalo magnetsko ograničenje znači da su postojale teškoće. Naime, nije bio poznat način na koji bi se postiglo brzo zagrijavanje plazme. Mogućnost vrlo brzog zagrijavanja malih količina tvari pojavila se tek razvojem lasera koji emitiraju energiju u obliku prostorno i vremenski koncentriranih pulseva elektromagnetskog zračenja valnih duljina u području ili u blizini vidljivog spektra. Prvi prijedlozi o inercijskom ograničenju plazme temelje se na laserima, a tek dosta kasnije kad su se u istraživanjima laserske inercijske fuzije pojavile teškoće traženi su i ispitivani i drugi načini brzog zagrijavanja plazme, najprije s pomoću elektronskih snopova a zatim s pomoću snopova teških i lakih pozitivnih iona.

Da bi se mogli predočiti zahtjevi koji se postavljaju pri zagrijavanju plazme u inercijskom ograničenju, potrebno je najprije kazati što ovdje znači brzo zagrijavanje plazme. Fizikalno to znači zagrijati je u vremenu kraćem od vremena ekspanzije do ispod granične gustoće pri kojoj nema više prinosa energije fuzije. Pri temperaturi oko $100 \cdot 10^6$ K brzine su jezgara u plazmi oko 10^6 m/s, što znači da se volumen plazme promjera oko 1 cm razilazi u vremenu reda 10^{-8} s. Dakako, znatno veći volumen s linearnim dimenzijama oko 1 m trebao bi više vremena, međutim, u stvarnosti zagrijavanje s pomoću bilo koje od spomenutih metoda ograničeno je energijom koja se može dovesti plazmi u vrlo kratkom vremenu, pa su volumeni s linearnim dimenzijama 1 cm na gornjoj granici. Dakle, zagrijavanje se mora obaviti u vremenu kraćem od 10^{-8} s.

Primijenimo li Lawsonov kriterij da bi odredili potrebnu brojnosnu gustoću plazme za tako kratkotrajno vremensko ograničenje — reda veličine 10^{-8} s — njezin bi iznos trebao biti bar 10^{28} m^{-3}. Ta je gustoća više stotina puta veća od gustoće plinova pri atmosferskom tlaku i normalnim temperaturama i bliži se gustoći krute tvari.

Da bi se odredila energija laserskog pulsa potrebna za zagrijavanje plazme bit će pogodnije promotriti jedan ilustrativan primjer u kojem se plazma zagrijava laserskim snopom.

Budući da proces fuzije traje vrlo kratko, u inercijskoj fuziji on se često naziva fuzijskom mikroeksplozijom. Početna smjesa tricija i deuterija predviđa se u obliku sitne kuglice smrznutog tricija i deuterija ili plina u tankoj šupljoj kuglici. Kuglica se simetrično obasjava laserskim snopovima (sl. 6.23) koji je zagrijavaju do temperature fuzije.



Slika 6.23. Shematski prikaz uređaja za lasersku fuziju

Promotrimo primjer koji daje grubu procjenu uvjeta za ostvarenje mikroeksplozije deuterij-tricij kuglice goriva. Pretpostavimo da je njezina masa 10^{-9} kg i da se sastoji od istog broja jezgara deuterija i tricija. Energija potrebna da se stvori plazma u kojoj bi svi elektroni i ioni imali temperaturu $T=10$ keV (tj. oko 10^8 K) iznosi za par elektron-ion

$$E_p=\frac{3}{2}kT\cdot 2=4{,}8\cdot 10^{-15}\ \text{J}.$$

Broj iona u kuglici mase 10^{-9} kg iznosi

$$N_i=\frac{10^{-9}\ \text{kg}}{4{,}18\cdot 10^{-27}\ \text{kg/ion}}=2{,}4\cdot 10^{17}\ \text{iona}$$

pri čemu je prosječna masa iona

$$m=\frac{(2+3)}{2}\cdot 1{,}67\cdot 10^{-27}\ \text{kg}=4{,}18\cdot 10^{-27}\ \text{kg}.$$

Odatle, ulazna energija E_u potrebna za zagrijavanje mase od 10^{-9} kg deuterijsko-tricijskog goriva na 10 keV (ne uzevši u obzir ograničenu efikasnost procesa grijanja) iznosi približno $E_u=E_p\cdot N_i=$ $=1{,}15$ kJ.

Današnji veliki laseri već proizvode kratkotrajne pulseve takvih energija, što i objašnjava našu pretpostavku o masi kuglice goriva.

Ako je gorivo kruto i normalne gustoće, što za smjesu deuterij-tricija znači gustoću $\rho=213$ kg/m^3, polumjer r kuglice mase 1 μg iznosi 104 μm, odnono približno 0,1 mm. Brojnosna gustoća iona (ili elektrona) u kuglici jest

$$N=\frac{213\ \text{kg/m}^3}{4{,}18\cdot 10^{-27}\ \text{kg/ion}}=5{,}10\cdot 10^{28}\ \text{ion/m}^3.$$

Ako se ta kuglica iznenada zagrije na temperaturu 10 keV, tlak plazme p doći će do vrijednosti

$$p=NkT=\frac{2}{3}N\left(\frac{3}{2}kT\right)=\frac{2}{3}\cdot 5{,}10\cdot$$

$$\cdot 10^{28}\frac{\text{ion}}{\text{m}^3}\cdot 4{,}8\cdot 10^{-15}\frac{\text{J}}{\text{par elektron-ion}}=$$

$$=1{,}63\cdot 10^{14}\ \text{N/m}^2=1{,}63\cdot 10^{8}\text{MPa}.$$

Pretpostavimo da se kuglica jednoliko zagrije prije nego što stigne znatnije ekspandirati. Udarni val širi se od površine prema središtu kuglice brzinom zvuka v_z

$$v_z\sim\sqrt{\frac{5}{3}\frac{p}{\rho}}=1{,}13\cdot 10^5\ \text{m/s}$$

pa je za to potreban vremenski interval Δt

$$\Delta t=\frac{r}{v_z}=92\cdot 10^{-12}\ \text{s, odnosno 92 ps.}$$

Dakle, ako bi se na taj način željelo ostvariti lasersku fuziju, za krutu kuglicu goriva mase 1 μg trajanje pulsa trebalo bi biti kraće od 92 ps, sa srednjom snagom $\overline{P}$ određenom kvocijentom energije E i vremena Δt u kojem se energija dovodi kuglici, tj.

$$\overline{P}=\frac{E}{\Delta t}=\frac{1\ 150\ \text{J}}{92\cdot 10^{-12}\ \text{s}}=1{,}25\cdot 10^{13}\ \text{W}.$$

Uz kratkotrajan plus ogromna trenutačna snaga karakteristika je laserske fuzije.

Broj fuzijskih reakcija R za jedinicu volumena i vremena na temperaturi 10 keV jest

$$R=N_D N_T\,\overline{\sigma_f v}=\left(\frac{1}{2}\cdot 5{,}10\cdot 10^{28}\ \text{m}^{-3}\right)^2 1{,}2\cdot$$

$$\cdot 10^{-22}\frac{\text{m}^3}{\text{s}}=7{,}8\ 10^{34}\ \text{m}^{-3}\,\text{s}^{-1},$$

ako se koristimo slikom 6.2. za očitanje vrijednosti $\overline{\sigma_f v}$. Odatle se procjenjuje za razvijenu fuzijsku snagu P_F u kuglici

$$P_F=R\cdot 17{,}6\ \text{MeV}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-13}\frac{\text{J}}{\text{MeV}}\ \text{x volumen kuglice}=1{,}03\cdot 10^{12}\ \text{W}.$$

Uz procjenu da je prosječno vrijeme termonuklearnog sagorijevanja jednako $\frac{\Delta t}{5}$ [Mo 1974] dobivena energija fuzije E_F iznosi

$$E_F = P_F \frac{\Delta t}{5} = 1{,}03 \cdot 10^{12} \cdot \frac{92}{5} 10^{-12} = 19\,\text{J}.$$

Pri tome bi nastalo $\approx 7 \cdot 10^{12}$ fuzijskih neutrona. Faktor umnažanja energije Q laserske fuzije bio bi znatno ispod jedinice

$$Q = \frac{E_F}{E_u} = \frac{19\,\text{J}}{1\,150\,\text{J}} \sim 0{,}02.$$

Kako povećati faktor umnažanja energije Q? Jedan način da se to postigne jest povećanje polumjera, budući da je Q proporcionalan s polumjerom. Povećanje polumjera produžuje vrijeme termonuklearnog izgorijevanja. Međutim, to praktički ne bi pomoglo, budući da potrebna ulazna energija raste s kubom polumjera, pa bi već za $Q=1$ bio potreban laserski puls energije reda veličine 10^8 J, što je mnogo više od današnjih mogućnosti. Najveći današnji laseri daju laserske pusleve energije nekoliko puta 10^4 J, a najveći u gradnji dat će oko 10^6 J. Pokušaj da se umnažanje energije poveća zagrijavanjem plazme na višu temperaturu također ne pomaže, budući da s povećanjem temperature E_u raste brže od E_F.

Realniji način da se poveća Q jest povećanje gustoće, odnosno kompresija kuglica, što se razabire ako se izraz za faktor umnažanja Q napiše eksplicitnije:

$$Q = \frac{N_D N_T \overline{\sigma v} \cdot 17{,}6\ \text{MeV} \cdot t}{(N_D + N_T)\, kT}.$$

Pri uvjetu $N_D = N_T = N/2$ i $\Delta t = \frac{r}{5 v_z}$ slijedi

$$Q = N \cdot r \frac{\overline{\sigma v} \cdot 17{,}6\ \text{MeV}}{20 \cdot kT \cdot v_z}. \qquad (6.33)$$

Za konstantnu masu kuglice gustoća N jest proporcionalna s r^{-3}, pa prva dva faktora daju bitnu ovisnost faktora umnažanja Q o gustoći čestica

$$Q \sim Nr \sim N^{2/3}. \qquad (6.34)$$

Stoga se Q može povećati npr. za 50 puta (tj. u našem primjeru do jedinice) tako da se početna gustoća poveća za $50^{3/2} = 354$ puta, tj. da se polumjer kuglice deuterijsko-tricijskog goriva mase 1 μg smanji za 7 puta.

S obzirom na raspoložive odnosno perspektivne snage lasera za praktično korištenje laserske fuzije potrebna je, dakle, snažna kompresija do tisuću puta većih gustoća.

Činjenica da su za lasersku fuziju potrebni laseri velike snage dovodi ovo znanstveno područje u neposrednu blizinu mogućih vojnih primjena — a to i pozitivno i negativno utječe na razvoj. Naime, razvoj snažnih lasera ubrzava se i stimulira vojnim interesom, ali zbog toga su istraživanja zatvorenija i tajnovitija što koči razvoj.

6.5.2. Apsorpcija energije laserskog zračenja u gorivoj kuglici

Ako se laserski puls maksimalne snage oko 1 TW ($=10^{12}$ W), tipične za današnje velike lasere, fokusira na volumen promjera 30 μm, u tom dijelu prostora snaga po jedinici površine iznosi do 10^{21} W/m^2, a lokalno električno polje u blizini žarišta dosiže vrijednost 10^{12} V/m. To su vrijednosti bez presedana u fizici.

Kad snažni laserski puls obasja deuterijsko-tricijsku kuglicu, nastupa naglo lokalno zagrijavanje njezinog vanjskog sloja i kaskadnim procesom dolazi do eksponencijalnog porasta ionizacije; stvara se snažno ionizirana i gusta plazma. Ta plazmina atmosfera apsorbira lasersku energiju uglavnom na dva načina:

a) pojedini elektron iz plazme upije laserski foton, a pri tome se dio impulsa prenese u sudaru na obližnji ion (to je tzv. inverzno zakočno zračenje);

b) laserski foton međudjeluje s kolektivnim pobuđenjima plazme.

Ta je apsorpcija najintenzivnija u onom području plazme u kojem je frekvencija oscilacije plazme jednaka ili bliza frekvenciji laserske svjetlosti. Apsorpcijom laserske energije nastaju „vrući"

elektroni koji imaju energiju od više kiloelektronvolta. Ti „vrući" elektroni prodiru kroz atmosferu plazme i naglo zagrijavaju vanjski sloj kuglice što uzrokuje ablaciju, tj. naglo isparivanje površinskih slojeva. Eksplozivno povećanje površinskog tlaka uzrokuje imploziju unutrašnjeg dijela kuglice. Kad isparene čestice ekspandiraju prema van, prema zakonu akcije i reakcije izazivaju suprotnu silu koja djeluje na preostali dio kuglice u smjeru prema njezinom središtu. Situacija je takva, slikovito rečeno, kao da su posvuda po površini kuglice aktivirane minijaturne rakete usmjerene prema njezinom središtu. Implodirajuća materija kuglice ubrzava se prema središtu i postiže brzinu od više stotina kilometara u sekundi sve dok je ne zaustavi tlak koji se stvara u komprimiranom središnjem dijelu. Analize pokazuju da se na taj način gustoća deuterijsko-tricijske (D-T) kuglice može povećati do 10^4 puta i da se snaga po jedinici površine može multiplicirati 10^{14} puta. Da bi se postigla kompresija za faktor 10^4 potrebna je maksimalna površinska gustoća snage oko 10^{23} W/m^2.

Pri udaru laserskog pulsa u kuglicu javlja se i tlak zračenja na kuglicu. Iako je vrlo snažan, znatno manje utječe nego ablacijski tlak. Ako se laserski puls snage 1 TW fokusira na prostor promjera 50 μm, tlak zračenja jest oko 10^6 MPa. Kompresija goriva laserskom ablacijom površine popraćena je mnogo većim tlakom. Proračuni predviđaju tlak 10^{11} MPa uz povećanje gustoće 10^4 puta.

Na slici 6.24. prikazani su rezultati odgovarajućih proračuna.

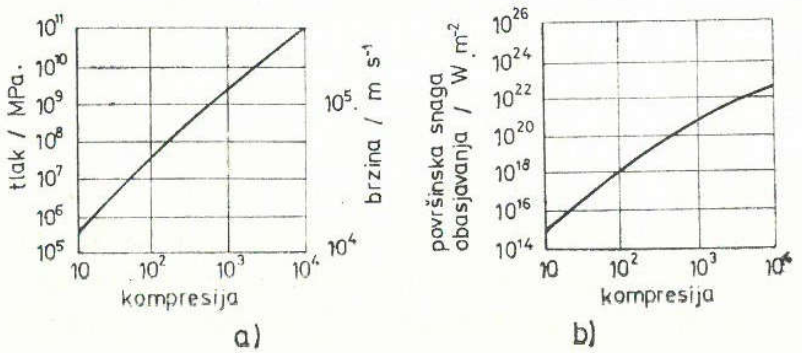
Po zaustavljanju implozije, vruće komprimirano gorivo slobodno ekspandira. Međutim, zbog inercije za to je potrebno određeno, iako vrlo kratko vrijeme, reda veličine 1 ns, (10^{-9} s). Cilj je ostvarivanje takvih uvjeta da se visoki tlak i temperatura održe dovoljno dugo da dođe do odvijanja reakcije fuzije na što većem dijelu goriva.

Zbog toga jedan od osnovnih problema u inercijalnom ograničenju plazme jest optimalno modeliranje pulsa i D-T kuglice [Br 1974]. U SAD i SSSR-u postoje složeni kompjutorski programi u koje su uključene interakcije laserskih fotona, elektrona, iona, fotona X-zraka i fuzijskih proizvoda, te prijenos energije iz plazme u kuglicu i dinamičko ponašanje kuglice.

Laserskim obasjavanjem deuterijsko-tricijske plazme postignute su gustoće, preko 100 puta veće od gustoće tekućine, uz dobro slaganje sa teorijskim predviđanjima (npr. američki LASNEX program).

Vremensku ovisnost snage pulsa treba modelirati tako da se dobije optimalna vremenska promjena tlaka tokom implozije. Za krutu D-T kuglicu optimalno je da u vremenskom intervalu od 10^{-8} s tlak poraste od 10^5 MPa na 10^{10} MPa. Tada je brzina implozije usporediva s lokalnom brzinom zvuka u kuglici. Zato tokom kompresije ne dolazi do značajnijeg prethodnog zagrijavanja, a središnje područje se u trenutku kad je postignuta maksimalna kompresija zagrije na fuzijsku temperaturu.

Međutim, pri korištenju laserskih pulseva vrlo visokih energija javljaju se teškoće: „predgrijavanje" i „razvezivanje". Apsorpcijom laserskih fotona u plazmi mogli bi se generirati ekstremno brzi



Slika 6.24. Kompresija kuglice goriva laserskim zračenjem
a) ovisnost kompresije o ablacijskom tlaku. Na ordinati desno naznačena je brzina implozije,
b) ovisnost kompresije o specifičnoj površinskoj snazi obasjavanja kuglice goriva

(tzv. supertermički) elektroni. Oni mogu izazvati predgrijavanje: prodrijeti u središnji dio D-T kuglice prije nailaska kompresijskog vala i tako otežati kompresiju. S druge strane, zbog manjeg udarnog presjeka supratermičkih elektrona mogla bi se smanjiti efikasnost prijenosa energije između atmosfere i kuglice: nastalo bi tzv. energijsko razvezivanje.

Optimalnim modeliranjem kuglice mogu se smanjiti ti nepovoljni učinci. Jedan način da se to postigne jest da se u D-T kuglicu u tragovima ugrade materijali visokog atomskog broja i tako poveća frekvencija elektronskih sudara.

Procesi međudjelovanja laserske svjetlosti s plazmom ovise o valnoj duljini. Pri izboru optimalne valne duljine važno je razmotriti tzv. stimulirano Brillouinovo raspršenje. U tom procesu laserski fotoni raspršuju se uz emisiju zvučnog vala kroz plazmu. Bitno je da proces može raspršiti laserski foton unazad, pa se tim procesom lasersko zračenje reflektira na plazmi, a efikasnost predaje energije plazmi smanjena je. Zadnjih godina istražuje se ovisnost tih procesa o valnoj duljini laserskog snopa.

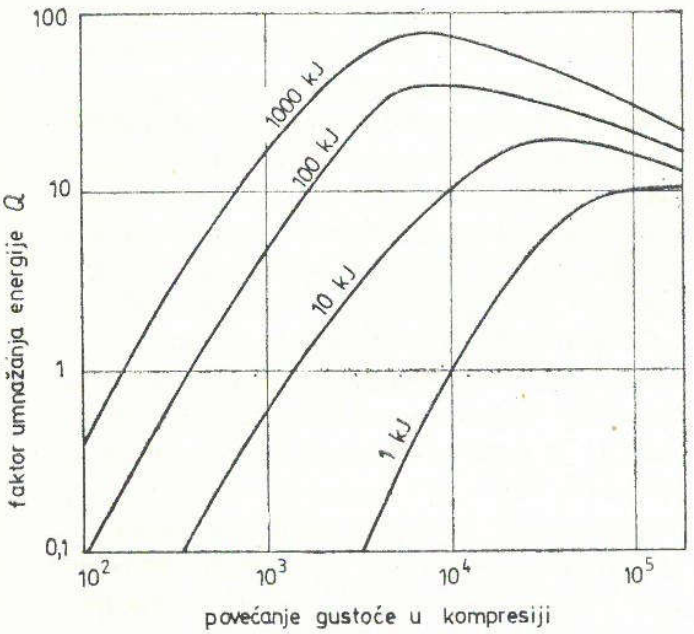
Relativni odnosi među procesima ovise i o gustoći snage. Raspršenje laserske svjetlosti unazad pokazuje nagli porast s povećanjem valnih duljina od 0,35 μm do 1,06 μm te znatan porast s gustoćom snage. Udio kolektivnog pobuđenja također je veći pri većim valnim duljinama i na većoj gustoći snage. To je nepovoljno zbog stvaranja vrućih elektrona. Ovisnost nastajanja vrućih elektrona o gustoći snage može se predočiti „lomom" valova na tekućini pri prevelikim amplitudama. Dakle povoljni se uvjeti za prijenos energije i kompresiju ostvaruju pri kraćim valnim duljinama i manjim gustoćama snage upadnog pulsa.

Na temelju takvih kvalitativnih argumenata i aproksimativnih i numeričkih metoda očekivali bismo da je za lasersku fuziju znatno povoljnija laserska svjetlost kraćih valnih duljina. Međutim, još je dosta nepoznanica u mehanizmu apsorpcije intenzivne laserske svjetlosti u plazmi. Ta je apsorpcija u području dosad dostignutih energija laserskog snopa znatno efikasnija nego što se to teorijski može objasniti na temelju dosad poznatih klasičnih mehanizama apsorpcije. Intenzivno se istražuju fizikalni procesi koji se pri tome zbivaju. Tako su npr. s Nd laserom Argus u LLNL obavljeni eksperimenti sa svjetlošću valnih duljina 1,06 μm, 0,53 μm i 0,35 μm i gustoćom snage od 10^{17} W/m^2 do $5 \cdot 10^{19}$ W/m^2. Rezultati pokazuju prednost kraćih valnih duljina u prijenosu energije na plazmu [Ca 1981].

Efikasnost laserske implozije ovisi o simetriji obasjavanja. Simetrična implozija postiže se jednolikim i sinhroniziranim osvjetljavanjem kuglica s pomoću sustava laserskih snopova. Plazmina atmosfera, koja se naglo oblikuje oko obasjane kuglice, ostvaruje sferno-simetričnu imploziju, čak u prisutnosti manjih nepravilnosti u obliku kuglice i simetriji laserskih snopova. Ukupni učinak atmosfere na simetriju implozije mogli bismo usporediti s planetom veličine Zemlje, koji bi imao 6 000 km debelu atmosferu magle, grijanu s desetak simetrično smještenih zvijezda znatno većih od našeg Sunca. Tada bi se postigla tolika jednolikost rasvjete, da bi sjene bile potpuno eliminirane.

Na slici 6.25. prikazani su izračunati faktori umnažanja energije Q (oslobođena fuzijska energija/utrošena energija laserskog snopa) ovisno o maksimalnoj gustoći (izraženoj jedinicama gustoće tekućeg DT-goriva) koja se kompresijom postiže u središnjem dijelu kuglice. Rezultati su prikazani za četiri različite energije laserskog snopa: 1, 10, 100 i 1 000 kJ, uz optimalno modeliranje kuglice i laserskog snopa. Vidimo da Q brzo raste s povećanjem gustoće. Tek za vrlo velike gustoće on se počinje smanjivati, budući da energija za kompresiju kuglice tada postaje vrlo velika.

Posljednjih godina teorijska istraživanja ovisnosti procesa kompresije o strukturi kuglice goriva utvrdila su da je koncepcija tzv. mikrobalona povoljnija



Slika 6.25. Ovisnost faktora umnažanja energije Q o kompresiji kuglice goriva i energiji laserskog snopa (ilustracija za optimalno modeliranje kuglice goriva i laserskog snopa)

od koncepcije pune kuglice goriva. Mikrobalon je šuplja kuglica, koja se sastoji od vanjskog sloja materijala koji treba prihvatiti energiju laserskog snopa i ablacijskim tlakom ubrzavati gorivo koje čini unutrašnji sloj šuplje kuglice. Šupljina može biti ispunjena plinskom smjesom deuterija i tricija. Misli se da takva konfiguracija ima niz prednosti:

— omogućuje upotrebu duljeg obasjavanja na manjoj gustoći snage, što je povoljnije s obzirom na procese prenosa laserske energije na plazmu;

— omogućuje efikasnije iskorištenje ablacijskog tlaka za ubrzavanje i kompresiju goriva.

Ocjenjuje se da bi učinak korištenja mikrobalona mogao biti u sniženju potrebne energije laserskog snopa za jedan red veličine. Međutim, uz prednosti ta konfiguracija uvodi i svoje specifične probleme. Ako je omjer između polumjera i debljine stijenke otprilike veći od 5, pojavljuju se nestabilnosti kao posljedica pobuđivanja oscilacija u ljusci mikrobalona. Istražuju se optimalne konfiguracije koje će maksimalno iskoristiti prednosti šuplje kuglice, a bez ulaženja u takve nestabilnosti.

Nestabilnosti u laserskoj fuziji. Pri magnetskom ograničenju stabilnost plazme primaran je problem. Plazma treba da se održava relativno dugo u stabilnom stanju. Ako se male inicijalne deformacije prigušuju, plazma je stabilna, inače se razvijaju makroskopske deformacije. Koliko će problem stabilnosti utjecati na inercijsko ograničenje plazme nije još jasno. Sigurno je da se neke nestabilnosti karakteristične za magnetsko ograničenje neće pojaviti jer jednostavno za to nema vremena. U inercijalnom ograničenju kompresija, stvaranje plazme i fuzija odvijaju se u vremenu reda nanosekunde pa nema nestabilnosti koje bi trebale više vremena da se razviju. Moguće su, međutim, nestabilnosti drugog tipa, specifične procesu kompresije i grijanja kuglice goriva laserskim snopom.

Pri kompresiji kuglice goriva njezina gustoća raste od središta što daje nestabilnu konfiguraciju; možemo je ilustrirati dvoslojnom tekućinom u gravitacijskom polju, ako se gušći sloj nalazi iznad rjeđega. Na sfernoj kapljici tekućine takva nestabilnost konfiguracije pojačava inicijalne male oscilacije sferne površine sve dok ne dođe do velikih deformacija i prijelaza u stabilno stanje. Oscilacije nestabilnosti u nestlačivoj tekućini proučavao je prije mnogo godina Lord Rayleigh, a kasnije Taylor, pa je po njima takav tip nestabilnosti dobio naziv. Pojava Rayleigh-Taylorove nestabilnosti bitno određuje geometrijske odnose, tj. debljinu ljuske prema polumjeru kuglice goriva u obliku mikrobalona. Eksperimentalno razjašnjenje uloge ove nestabilnosti traži veće kompresije i snage snopova. Taj se problem mnogo istražuje jer je koncentrična ravnomjerna kompresija plazme vrlo važna. Nestabilnosti i odstupanja od ravnomjerne kompresije mogu imati i razne druge uzroke. Predgrijavanje središta kuglice vrućim elektronima može biti uzrok nestabilnosti koja se može ilustrirati nestabilnošću pri zagrijavanju donjih slojeva tekućine u gravitacijskom polju. Samofokusiranje laserskog snopa može uzrokovati lokalno nesimetrično zagrijavanje kuglice.

Pri uvjetima kompresije potrebnim za fuziju moguća su različita iznenađenja. Valja imati na umu da se tu radi o fizikalnim uvjetima s kojima nemamo prethodnog iskustva osobito s ogromnim intenzitetima elektromagnetskog polja i velikim gustoćama.

6.5.3. Osnovni energetski odnosi u laserskoj fuziji

Na parametre buduće elektrane na lasersku fuziju najviše utječe pretpostavljena efikasnost lasera. Tok energije u sustavu koji sadrži fuzijsku komoru, konvertor toplinske energije u električnu energiju, te laserski sustav prikazan je na slici 6.26. Efikasnosti toplinske konverzije i lasera označene su s η_T i η_L, a Q je faktor umnažanja energije. Ako je energija koja ulazi u fuzijsku komoru E_u, izlazna korisna električna energija iznosi

$$\eta_T Q E_u - \frac{E_u}{\eta_L},$$ a otpadna je toplina

$$E_u(1-\eta_T)Q + \frac{E_u}{\eta_L} - E_u. \qquad (6.35)$$

Omjer proizvedene električne energije prema otpadnoj toplini određen je koeficijentom η

$$\eta = \frac{\eta_T Q - \frac{1}{\eta_L}}{(1-\eta_T)Q + \frac{1}{\eta_L} - 1}. \qquad (6.36)$$

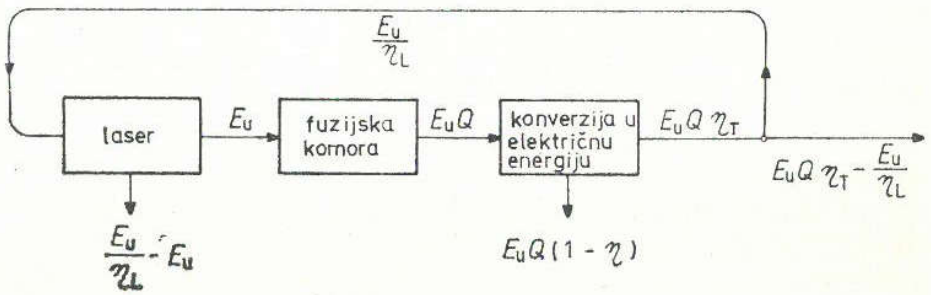
Računajući s ukupnim faktorom konverzije toplinske energije u električnu $\eta_T = 0{,}33$ i s laserom efikasnosti 2% ($\eta_L = 0{,}02$), potrebno je da faktor umnažanja energije u fuziji Q bude barem 150 da bi brojnik bio pozitivan, tj. da uopće postoji višak proizvedene električne energije prema potrošenoj. S laserima efikasnosti 5% granični faktor umnožavanja energije bio bi 60. Za laser takve efikasnosnosti i faktor umnožavanja energije $Q=150$, omjer proizvedene električne energije prema otpadnoj toplini iznosio bi

$$\eta = \frac{\frac{1}{3}\cdot 150 - \frac{1}{0{,}05}}{\frac{2}{3}\cdot 150 + \frac{1}{0{,}05} - 1} = \frac{30}{119} = 0{,}252.$$

Proizvedena električna energija činila bi $\frac{30}{119+30} = 0{,}201$ dio ukupno proizvedene energije.

Kako se vidi proizvedena električna energija iznosi ~20% ukupne; to je granica ispod koje bi vrlo teško bilo odvoditi otpadnu toplinu, odnosno troškovi za rashladne uređaje bili bi preveliki. Istodobno se razabire (sl. 6.25) da pretpostavljeni faktor umnažanja energije $Q=150$ nije ostvariv ni s laserskim pulsom energije 1 000 kJ, što je već ionako iznos koji će biti veoma teško postignuti. S pulsom energije oko 500 kJ mogla bi se postignuti vrijednost $Q\sim 75$. Da bismo s tim faktorom dobitka ostali na otprilike istom omjeru električne energije prema ukupnoj, potrebno je da se efikasnost lasera poveća na 10%.

Bit će vrlo je teško postignuti svojstva koja bi morao imati laserski sustav: energiju pulsa u području oko 500 kJ uz efikasnost 10%. Misli se da bi se jedino CO_2-laseri mogli razviti do efikasnosti 5%—10%. Neodimski laser ne pruža takvu perspektivu, a osim toga on



Slika 6.26. Tok energije u laserskom fuzijskom sustavu s djelotvornostima lasera i toplinske konverzije η_L i η_L, te faktorom umnažanja energije Q

se ne bi mogao koristiti u elektrani i zbog toga što mu je aktivni medij kruta tvar, pa za vrlo ozbiljan problem odvođenja otpadne topline nema praktičnog rješenja. Da bi laser funkcionirao potrebno je brzo odvesti otpadnu toplinu i zato laserski medij treba biti tekuć ili plinovit. Budući da tekući laseri zbog optičkih nelinearnosti nisu pogodni za proizvodnju pulseva velikih snaga, jedini su prikladni plinski laseri. Također, umjesto da se koristi jedan laserski sustav s repeticijom od 100 pulseva u sekundi, predviđa se i mogućnost kombinacija nekoliko laserskih sustava s nižim brzinama repeticije, a njihovi snopovi izmjenično bi pogađali DT-kuglicu.

Da bi se shvatio taj problem korisno je kao ilustraciju pogledati odnose uz pretpostavljene efikasnosti i faktor Q:

$$\eta_T = 1/3,\ \eta_L = 0{,}1,\ Q = 75.$$

Za elektranu snage 1 000 MW (e) bilo bi potrebno oko 100 mikroeksplozija u sekundi. Za prosječnu snagu laserskih pulseva oko 66 MW otpadna toplina u laserskom sustavu iznosila bi približno 600 MW, a ukupna otpadna toplina približno 4 000 MW.

Laserski sustav mora imati što veću brzinu repeticije pulseva radi smanjivanja investicijskih troškova, no tako se povećavaju problemi odvođenja otpadne topline iz samog laserskog uređaja.

Multipliciranjem laserskih sustava olakšava se odvođenje otpadne topline, ali povećavaju se investicije, vjerojatno znatno iznad onih koje bi bile potrebne s alternativnim načinima zagrijavanja kompresije kuglice.

6.5.4. Generiranje i pojačavanje laserskog pulsa

U laserskoj fuziji ključni su problemi vezani i uz sam laserski sustav.

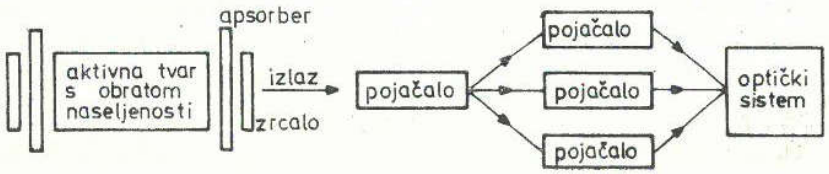
Laseri su uređaji za generiranje i pojačavanje monokromatske koherentne svjetlosti [npr. Re 1978]. Laserska svjetlost nastaje međudjelovanjem elektromagnetskog zračenja s laserskim materijalom, tj. materijalom u kojem je ostvaren tzv. obrat naseljenosti. Tvar s obratom naseljenosti je pobuđena na vrlo specifičan način, tako da se veći broj istovrsnih atoma (ili molekula) nalazi u određenom višem energetskom stanju (tzv. gornjem laserskom stanju) nego u određenom nižem stanju (tzv. donjem laserskom stanju). Ako tada kroz lasersku tvar proleti foton ili snop fotona s energijom jednakom upravo razlici energije višeg i nižeg laserskog stanja, nastupa tzv. stimulirano zračenje u obliku simultanih energetskih prelaza atoma (ili molekula) s višeg laserskog stanja u niže, pa se tako pojačava laserski snop.

Veliki laserski sustav sastoji se od laserskog oscilatora, više kaskada laserskih pojačala i odgovarajućih optičkih elemenata (sl. 6.27).

U laserskom oscilatoru generira se prvotni laserski puls razmjerno male energije (oko 10^{-6} kJ). Taj svjetlosni puls prolazi kroz laserska pojačala, cijepa se na više snopova svjetlosti od kojih svaki opet prolazi kroz kaskadu laserskih pojačala. Na taj se način početna energija pulsa povećava više od milijun puta. Svi ti snopovi sastaju se pri istodobnom udaru u DT-kuglicu.

Laserska pojačala omogućuju uskladištavanje energije uspostavljanjem obrata naseljenosti, sve dok ne naleti laserski puls kojeg treba pojačati. Tada dolazi do stimuliranog zračenja i pojačavanja tog laserskog pulsa.

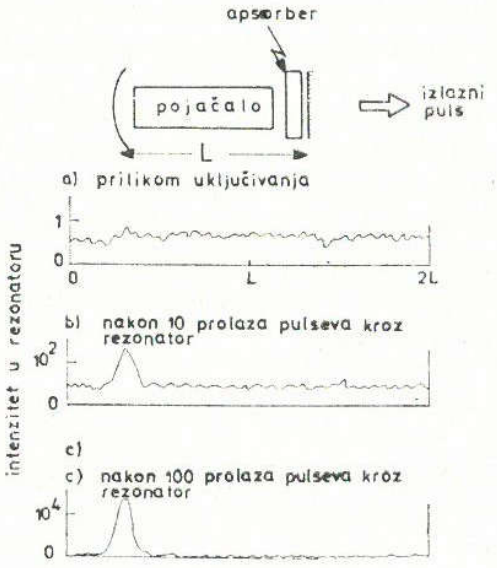
Temelj laserskog oscilatora jest pojačalo koje na krajevima ima dva zrcala, tako da tvore optički rezonator. Jedno je zrcalo djelomično prozirno, pa nakon određenog broja refleksija između zrcala



Slika 6.27. Shematski prikaz laserskog sustava velike snage

snop svjetlosti ipak uspijeva izaći iz rezonatora. Optimalni profil (Gaussova tipa) izlaznog pulsa postiže se tako da se unutar rezonatora stavi odgovarajući otvor pored jednog zrcala.

Da bi se generirali izvanredno kratkotrajni pulsevi, unutar rezonatora stavlja se dodatna komponenta, apsorber sa svojstvom zasićivanja: njegova sposobnost apsorpcije smanjuje se s intenzitetom svjetlosti. U trenutku uključivanja oscilatora raspodjela intenziteta pulseva unutar rezonatora jest statistička. Međutim, djelovanjem zasićujućeg apsorbera najveći puls bit će progresivno favoriziran prema ostalima, pa će sve više rasti. Nakon mnogo refleksija između zrcala unutar rezonatora taj favorizirani puls postaje dovoljno intenzivan da potpuno zasiti apsorber i potisne sva ostala zračenja, te napokon kao jedino zračenje nastavlja oscilirati u rezonatoru.



Slika 6.28. Generiranje laserskog pulsa u rezonatoru pomoću apsorbera sa svojstvom zasićenja

Na slici 6.28. ilustrirano je generiranje jednog takvog pusla unutar rezonatora. Svaki dijagram prikazuje u određenom trenu intenzitet zračenja koje se širi slijeva nadesno (od 0 do L) i zdesna nalijevo (od L do $2L$) duž rezonatora. Svaki put kad generirani veliki puls udari u djelomično prozirno zrcalo unutar rezonatora, mali njegov dio prođe i tako nastaje laserski izlaz u obliku niza ekvidistantnih kratkih pulseva, u vremenskim intervalima $\frac{2L}{c}$ (L je duljina rezonatora, c je brzina svjetlosti). Kad se potroši veći dio energije pohranjene u obrat naseljenosti u laserskom materijalu, niz pulseva se prekine. Idući niz pulseva može se dobiti tek nakon što se postigne ponovno uskladištavanje energije u obrat naseljenosti.

Nakon laserskog oscilatora dolazi slijedeći element laserskog uređaja — pulsni selektor. On od svakog niza ekvidistantnih pulseva koji dolaze iz laserskog oscilatora propušta samo jedan puls. Za to se obično koristi elektro-optički kristal smješten između dva ukrštena polarizatora. Električno polje primijenjeno na elektro-optički kristal rotira ravninu polarizacije transmitiranog zračenja i omogućuje prolaz kroz izlazni polarizator.

6.5.5. Problemi postizanja velikih snaga laserskog pulsa

Praktički bez iznimke izlazna snaga velikih lasera ograničena je oštećenjem optičkih komponenata pri prolazu pulsa. Razvoj lasera sposobnih za velike snage bio je i morao biti praćen upoznavanjem prirode pojava koje nastaju pri propagaciji svjetlosnog pulsa vrlo velike snage kroz optičke materijale [Si 1981]. Iako svi mehanizmi djelovanja laserske svjetlosti na materijale nisu potpuno istraženi, ipak je napredak u upoznavanju tog djelovanja omogućio razvoj materijala i konstrukciju optičkih komponenata laserskih uređaja s kojima se postižu znatno povećane izlazne snage [Lo 1981]. Osnovne teškoće u radu laserskih uređaja velike snage jesu superfluorescencija i nelinearni optički efekti.

Superfluorescencija je lasersko pojačavanje fotona nastalih spontanom depopulacijom gornjeg energijskog stanja, tj. spontanim prelazom atoma (ili molekula) s gornjeg laserskog stanja na donje

prije no što naiđe laserski puls kojeg treba pojačati. Superfluorescencija se ne može potpuno izbjeći i ona ograničuje mogućnost energijskog punjenja laserskog pojačala. Međutim, izborom laserskog materijala sa sporijom spontanom depopulacijom omogućuje se bolje i dulje energijsko punjenje pojačala. Stvoren u jednom od početnih pojačala iz kaskade, parazitski puls generiran spontanom emisijom može znatno ojačati i prijevremenim obasjavanjem oštetiti DT-kuglicu i time znatnije smanjiti efikasnost kompresije pri naletu glavnog pulsa. Budući da se spontana emisija zbiva podjednako u bilo kojem smjeru, međusobnim udaljavanjem pojačala u kaskadi može se znatno smanjiti vjerojatnost da parazitski superfluorescentni puls stigne iz jednog pojačala u drugo. To je jedan od razloga zašto se koristi kombinacija više kraćih pojačala umjesto manjeg broja duljih.

Nelinearni optički efekti nastaju povećavanjem indeksa loma čvrstog materijala pod utjecajem intenzivnog električnog polja pri laserskom pulsu velikog intenziteta. To se zbiva i u pojačalu i u optičkim komponentama. Kao posljedica, javlja se samofokusiranje laserskog snopa; svaki izrazito intenzivniji dio u svjetlosnom snopu kao da stvara konvergentnu leću u inače homogenom čvrstom materijalu. Zato treba svakako izbjegnuti izražene „vruće" točke u profilu pulsa. Samofokusiranje oštećuje materijal i djelomično narušava koherenciju svjetlosti. To ograničuje maksimalni intenzitet laserskog zračenja koje se može širiti materijalom. Npr. staklo i drugi materijali za prozore na pojačalima i za optičke elemente (zrcala, leća. . .) oštećuju se ako su izloženi laserskom pulsu s gustoćom snage većom od 100 TW/m^2. Zbog toga treba duž kaskade postupno povećavati širinu pojačala i optičkih elemenata. Npr. promjer pojačala od Nd-stakla za puls snage 10 TW jest oko 30 cm.

Za smanjivanje samofokusiranja, optimalan poprečni profil pulsa bio bi takav, pri kojem je intenzitet svjetlosti konstantan preko otvora svake optičke komponente na koju puls nalijeće, a da na rubovima naglo iščezava. Međutim, samo puls s profilom Gaussova tipa može se propagirati bez promjene profila. Zato se koristi takav profil. No, on se ipak djelomično narušuje zbog optičkih efekata u transmisijskom mediju. Zato se između pojačala postavljaju uređaji za profiliranje snopa koji periodički regeneriraju njegov profil duž svake kaskade pojačala.

Ograničenje materijala također onemogućuje korištenje ultraljubičaste laserske svjetlosti, budući da materijali snažno apsorbiraju svjetlost tih valnih duljina.

U laserskom sustavu pojavljuje se i problem zaštite od refleksije. Ako bi se svjetlost reflektirana od DT-kuglice (ili od površine nekog optičkog elementa) vratila u kaskadu pojačala, toliko bi povećala intenzitet na putu do laserskog oscilatora da bi ga uništila. Za zaštitu od reflektirane svjetlosti služe tzv. nereciprocni elementi. Oni prigušuju reflektiranu svjetlost (također i parazitsku superfluorescentnu svjetlost koja bi krenula unazad). Pri tome se koristi efekt da u prisutnosti aksijalnog magnetskog polja dolazi do zakretanja ravnine polarizacije zračenja u čvrstom tijelu. Takvi nereciprocni elementi nazivaju se Faradayevi izolatori.

6.5.6. Laseri za fuzijske eksperimente i uređaje

a) Neodimski laseri (Nd-laseri) Među postojećim, odnosno, razvijenim laserskim sustavima najintenzivniji puls proizvode Nd-laseri. Ti se laseri koriste u laboratorijima u nastojanju demonstriranja znanstvene izvedivosti laserske fuzije s razmjerno velikim Q faktorom i za upoznavanje fizikalnih procesa pri laserskoj fuziji.

U Nd-oscilatoru i pojačalima laserski materijal je Nd-staklo. Valna duljina laserskog pulsa jest 1,06 μm. Budući da je laserski materijal kruta tvar, ne može

se brzo hladiti pa između dva uzastopna pulsa treba proći dosta vremena — brzina je ponavljanja mala (oko jedan puls/sat). Osim toga radna je efikasnost vrlo malena ($\lesssim 0{,}1\%$). Zbog ta dva razloga Nd-laser neće se moći koristiti u budućim elektranama na lasersku fuziju.

Najveći postojeći Nd-laserski sustav, nazvan SHIVA, s 20 snopova (kaskada) ukupne snage pulsa 30 TW radi u Lawrence Livermore National Laboratory. Sustav je već u pokusnom radu proizveo puls trajanja 1 ns ukupne energije 10 kJ. Pokušava se skratiti laserski puls do 0,1 ns.

Prvi eksperimenti predviđeni su sa staklenim kuglicama u kojima je DT-gorivo male gustoće. Koristeći takvu metu u Livermorskom laboratoriju već je ranije dobiveno $2 \cdot 10^9$ fuzijskih neutrona po pulsu uz temperaturu goriva 8 keV. U drugom krugu eksperimenta koristit će se višeslojne kuglice veće gustoće da bi se postigla što veća kompresija.

Istodobno u Livermoru grade se, odnosno planiraju Nd-laseri slijedeće generacije, sustavi Nova I i Nova II. Sustav Nova II ukupne snage 300 TW, stvarao bi puls energije 300 kJ. Prethodno dovršenju uređaja Nova I, dva snopa tog uređaja s energijom 10 kJ i konvertirani na valnu dužinu 0,53 μm (uređaj Novette), već se koriste. Odluka o gradnji uređaja Nova II zavisit će o ishodima istraživanja s Novette i Nova I. S uređajem Novette u toku 1984. očekuje se dostizanje kompresije 200 do 400 puta iznad gustoće tekućine, dok bi Nova I trebala doseći vrijednosti od 500 do 1 000 puta veću od gustoće tekućine 1987. godine.

b) CO_2-laser; mogući laser za fuzijsku elektranu. Među postojećim razvijenim laserskim sustavima samo CO_2-laser [PT 1977] pokazuje perspektivu za praktičnu upotrebu u elektranama na lasersku fuziju.

CO_2-laser jest plinski laser u kojem je laserski materijal CO_2 uz primjese helija i neona. Za praktičko korištenje pogodan je zbog tri svojstva:

1. radna mu je efikasnost relativno velika, 1% — 2%, s mogućnošću povećanja do 5%, a možda i više;

2. budući da je plinski, sustav se može brzo hladiti pa se može ostvariti dosta velika brzina ponavljanja plusa;

3. laserski je materijal jeftin.

Međutim, CO_2-laser ima jedno nepovoljno svojstvo zbog kojeg sve donedavno nije ozbiljnije uziman u obzir: valna je duljina laserske svjetlosti velika, daleko je u infracrvenom području. Mislilo se da je zbog te velike valne duljine laserski puls iz CO_2-lasera manje povoljan za izazivanje kompresije kuglice nego laserski pulsevi kraćih valnih duljina, npr. iz Nd-lasera. Međutim, prema eksperimentalnim rezultatima postignutim 1977. godine u Los Alamosu taj je zaključak dvojben, pa je moguće da je CO_2-laser ipak pogodan za praktičku upotrebu. Naime, rezultat obasjavanja kuglica dobivenih korištenjem CO_2-lasera i Nd-lasera iste snage pokazuje iznenađujuću međusobnu sličnost unatoč činjenici da se valne duljine njihove svjetlosti razlikuju 10 puta.

Dobivena je velika sličnost između elektronskih temperatura ostvarenih s pomoću CO_2-lasera i Nd-lasera. A upravo jedan od bitnih argumenata za neprikladnost CO_2-lasera bilo je uvjerenje da zračenje valne duljine 10,6 μm stvara supratermičke elektrone znatno više temperature (tj. veće energije) nego zračenja valne duljine 1,06 μm. Budući da bi bili većeg dometa, oni bi izazivali znatno predgrijavanje unutrašnjosti kuglice i na taj bi način kompresija bila otežana. To što tog efekta nema, iako se čini očit ako promatramo samo obratno zakočno zračenje (apsorpcija laserskog fotona od elektrona plazme), pokazuje da su važni kolektivni efekti u plazmi i njihovo međudjelovanje s procesom obratnog zakočnog zračenja za pojedini elektron. Zasad taj mehanizam nije potpuno objašnjen. Da bi se razjasnilo pitanje koje je područje valnih duljina pogodno za lasersku fuziju načinjeni su brojni eksperimenti zadnjih godina. Istraživanja su olakšana nedavnim

razvojem posebnih kristala u kojima se posredstvom nelinearnih optičkih efekata može osnovna frekvencija laserske svjetlosti ω_0 pretvoriti u više harmoničke oscilacije, frekvencije $2\omega_0$, $3\omega_0$ ili više. Prolazom kroz kristal osnovna frekvencija se prigušuje, a više se propuštaju. Od laserske svjetlosti valne duljine λ, dobivaju se valne duljine $\lambda/2$, $\lambda/3$, pa i kraće. Takva konverzija postignuta je za svjetlost neodimijeva lasera s $\lambda=1{,}06$ μm propuštanjem kroz tzv. KDP kristal. U tom umnožavanju frekvencije, odnosno odgovarajućem smanjenju valne duljine na 0,53 i 0,35 μm postižu se iznenađujuće visoke efikasnosti — i više od 80% [Se 1980].

Zasad nema materijala kojim bi se mogla obaviti efikasna frekventna konverzija svjetlosti iz CO_2-lasera s deset puta većom valnom duljinom. U Los Alamosu izgrađen je CO_2-laserski sustav Helios s osam snopova ukupne energije pulsa 10 kJ.

Predviđa se da će 1984. godine u Los Alamosu biti završena izgradnja CO_2-laserskog sustava ANTARES s ukupno 72 snopa, koji će davati pulseve ukupne laserske energije 100 kJ s trajanjem pulsa između 0,25 ms i 1 ns. Što se tih karakteristika tiče na temelju postignutih rezultata procjenjuje se da bi bila omogućena laserska fuzija s Q faktorom većim od 1. Ako bi CO_2-laser bio upotrebljiv za elektrane na lasersku fuziju, znatno bi se skratilo vrijeme do izgradnje komercijalne nuklearne elektrane budući da je tehnologija CO_2-lasera već prilično razvijena. Nažalost, novija istraživanja ne daju osnovu za optimizam. Posljednjih godina velika pažnja posvećena je istraživanju djelovanja lasera na plazmu u ovisnosti o valnoj duljini laserske svjetlosti. Rezultati pokazuju znatnu prednost kraćih valnih duljina, idući od 1,06 μm preko 0,53 μm na 0,35 μm, s time što prednost raste s porastom gustoće snage na plazmi.

Rani rezultati u kojima prednost kraćih valnih duljina nije bila očita, mogu se vjerojatno objasniti malom efektivnom gustoćom snage na plazmi.

Pri gustoćama od 10^{20} W/m^2 već za valnu duljinu od 1,06 μm prenos energije laserskog pulsa na plazmu postaje vrlo nedjelotvoran [npr. Nu 82]. Ekstrapolacijom na valnu duljinu od 10 μm i fuzijske uvjete, izgledalo bi da je CO_2-laser isključen kao laser za pogon fuzijske elektrane.

Postoje, međutim, ideje i prijedlozi da se posebnim konfiguracijama kuglice goriva poveća apsorpcija energije. U jednom se prijedlogu predviđa šuplja kugla sa centralnom jezgrom. Vanjska ljuska trebala bi smanjiti gubitak energije refleksijom i vraćati energiju na jezgru gorivne kuglice. Eksperimenti još nisu provedeni, odnosno, objavljeni te je za sada ipak preuranjeno dati konačan sud u upotrebljivosti CO_2. Očekuje se da će to biti moguće na osnovi rada uređaja ANTARES do kraja 1985. godine.

c) Drugi laserski sustavi. Intenzivno se istražuju novi laserski sustavi koji bi mogli posjedovati povoljne karakteristike CO_2-lasera uz znatno kraće valne duljine. Razvija se nekoliko takvih tipova.

— Jodni laser s valnom duljinom laserske svjetlosti $\lambda=1{,}315$ μm. Atomi joda pobuđeni u gornje lasersko stanje dobivaju se fotodisocijacijom molekula CF_3J ili C_3F_7J u plinovitom stanju. Jodni laser Asterix III u Garchingu (SR Njemačka) već se koristi za fuzijska istraživanja. S efikasnošću 0,1% postiže snagu snopa 1 TW, uz mogućnost ponavljanja pulsa u intervalima 10 minuta. Očekuje se povećanje efikasnosti na 0,2%. Budući da je optički aktivno sredstvo plin, može se povećati učestalost pulseva. Novi razvoj najavljuje se jodnim laserom u kojem se obrat naseljenosti stanja postiže kemijskom reakcijom (Chemically Pumped Iodine Laser, CPIL). Očekuje se povećanje efikasnosti do 6% i više, pa bi se i zbog kompaktnosti jodni laser s kemijskim pumpanjem mogao razvijati kao ozbiljni kandidat za fuziju [Ha 1981].

— Selenski laser s valnom duljinom $\lambda=0{,}4887$ μm. I ovdje se obrat nase-

ljenosti postiže fotodisocijacijom molekula, npr. OCSe u plinovitom stanju.

— Kisikov laser s valnom duljinom λ=0,5577 μm. Zelena (ali nekoherentna) svjetlost te valne duljine vidi se za polarne zore, a izvor su joj kisikovi atomi u atmosferi.

— Kriptonski laser u kojem je aktivna tvar kripton-flourid u plinovitom stanju. Očekuje se povoljna efikasnost tog lasera, čak do 7%. S valnom duljinom 0,248 μm on bi imao niz povoljnih svojstava za lasersku fuziju. Koncepcijska razrada kriptonskog lasera energije pulsa 50 kJ pokazuje da bi kriptonski laser mogao zadovoljiti uvjete za razvoj laserske fuzije [Lo 1981].

— Laser sa slobodnim elektronima (Free electron laser, FEL) sve češće se spominje. Takvu lasersku koncepciju sve više razvijaju opsežna teorijska i eksperimentalna istraživanja u vodećim svjetskim laboratorijima. Taj se laser temelji na pojavama pri prolazu relativističkih elektrona kroz prostorno periodičko magnetsko polje. Pri prolazu kroz periodičko magnetsko polje raspršuju se elektroni i emitira elektromagnetsko zračenje. Ako se sustavu elektronskog snopa i periodičkog magnetskog polja doda i optički rezonator, kako bi se uspostavila povećana gustoća emitiranih fotona mogu nastati uvjeti za stimulirano raspršenje elektrona, odnosno za stimuliranu emisiju zračenja pri raspršenju [St 1981, Fe 1981 i drugi članci u posebnom broju časopisa Quantum Electronics iz 1981]. S obzirom da su dostupni snažni izvori elektronskih snopova laser sa slobodnim elektronima mogao bi se razviti do velikih snaga, a mogao bi imati vrlo povoljna svojstva za po-

Tablica 6.6. Nd-stakleni laseri u pogonu i gradnji s izlaznom energijom većom od 1 kJ

Država, laboratorij, naziv uređaja	Broj snopova	Izlazna snaga / TW	Izlazna energija / kJ	Trajanje pulsa / ns	Pogonski status
SAD, LLNL,					
Argus	2	5	2	0,03–1	u pogonu
Shiva	20	30	10	0,1 –1	u pogonu
Nova-I (*Novette*)	12	100	100		1984.
Nova-II	24	300	250		plan
Rochester, *Omega* x	24	12 (30)	2 (10)		u pogonu (plan)
SSSR, Lebedev,					
Mišen-2	4		1		u pogonu
Mišen-3			30		1984.
UMI-35	35		10		1983.
Flora	20	1	1	1	u pogonu
Delfin	256	5	10	2	u pogonu
Velika Britanija,					
Aldermaston	2	1	1	0,05–1	u pogonu
Rutherford Lab., *Vulcan*	6	6	1,2		u pogonu
Japan, Osaka,					
Gekko IV	4	3,4	1	0,05–1	u pogonu
Gekko XII (Mod)	2	4	2	0,1 –1	u pogonu
Gekko XII	12	40	20	0,1 –1	1983.

Tablica 6.7. CO_2-laseri (u pogonu i gradnji) izlazne energije veće od 1 kJ

Država, laboratorij, naziv sustava	Broj snopova	Izlazna energija kJ	Trajanje pulsa ns	Pogonski status
SAD, LASL				
DBS	2	2,5	1	u pogonu
Helios	8	10	1	u pogonu
Antares	6×12	100	1	1984.
Japan, ILE Osaka				
Lekko II	2	1	1	u pogonu
Lekko VIII	8	10	1	u pogonu
Velika Britanija, Culham				
Trojan	1	2,5		u pogonu
Italija Frascati				
Chimera	2	2,5	1	1983.
SSSR				
Kurčatov	1	1		u pogonu

navljanje pulseva. Važna je njegova efikasnost. Upravo se istražuje kako bi se povećala efikasnost upotrebom prostorno periodičkog magnetskog polja s promjenljivim parametrima. Teorijski rezultati su povoljni [Kr 1981].

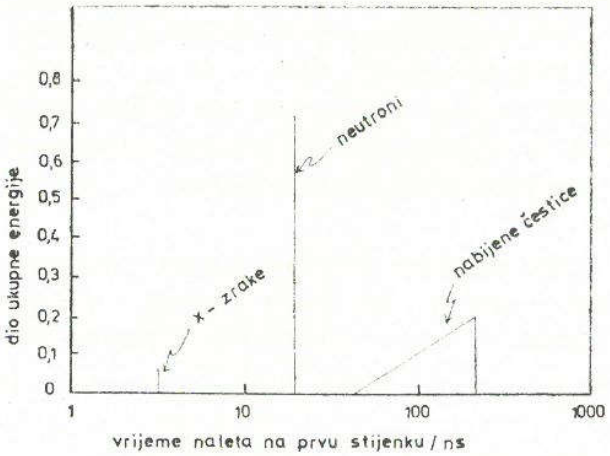
U tablicama 6.6. i 6.7. prikazani su laseri (u pogonu i gradnji) s energijom pulsa većom od 1 kJ [Ya 1980].

6.5.7. Reaktorski tehnološki problemi

Procjenjuje se da će vrijeme odvijanja pojedine mikroeksplozije u reaktoru na lasersku fuziju biti kraće od 10^{-10} s uz oslobađanje energije najmanje 100 MJ. Dakle, maksimalna snaga bit će najmanje 10^{18} W, no, samo kroz izvanredno kratki interval od 10^{-10} s. To je gotovo milijardu puta više od snage hidrocentrale Đerdap ili više od ukupne snage zračenja kojim Sunce obasjava Zemlju. Stoga je jedan od važnijih zadataka rješavanje tehnoloških problema izgradnje reaktora: stijenke fuzijske komore moraju kroz dulje vrijeme izdržati eksplozivne udare mikroeksplozija, koje razvijaju energiju kao više kilograma kemijskog eksploziva.

Energiju oslobođenu mikroeksplozijom odnose neutroni, X-zračenje i električki nabijene čestice (alfa-čestice, protoni, deuteroni, tritoni, . . .). Zbog velikih raspona njihovih brzina one ne bi udarale istodobno u stijenke fuzijske komore već u određenom vremenskom intervalu.

Na slici 6.29. prikazana su vremena naleta na stijenku ako bi ona bila udaljena 1 m od mjesta mikroeksplozije. Osobit tehnološki problem stvaraju brzi neutroni koji u (D, T) reakciji odnose oko tri četvrtine fuzijske energije. Neutroni znatno lakše prolaze kroz materiju nego druge vrste zračenja jer su bez električnog djelovanja. Međutim, oni duž svog puta kroz materiju razbijaju atomske jezgre ili ih izbacuju iz njihova položaja u kristalnoj rešetki u čvrstoj tvari. Usporenjem izbačenih atomskih jezgri i uhvatom elektrona iz okolice nastaju neutralni ato-



Slika 6.29. Nailazak proizvoda reakcije iz (D, T) mikroeksplozije na stijenku reakcijske komore

mi pa se stvara plin unutar stijenke. U stijenki mogu nastati mjehurići plina s vrlo visokim unutrašnjim tlakom, što uzrokuje oštećenje stijenke.

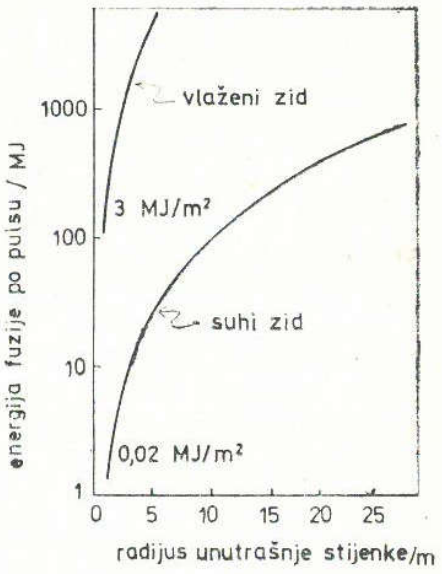
Drugi problem jest stvaranje radioaktivnog materijala: atomske jezgre uslijed nuklearnih reakcija pri usporavanju neutrona često postaju radioaktivne. O tome ćemo još govoriti.

Tvrdo X-zračenje prodire dublje u stijenku i troši svoju energiju unutar većeg volumena materijala pa ne uzrokuje osobite probleme. Međutim, meko X-zračenje — fotoni kojega imaju energiju manju od 2 keV — apsorbira se u tankom površinskom sloju stijenke. To izaziva naglo zagrijavanje površine, velike termomehaničke napetosti i postupno isparivanje. Ako bi prva stijenka mogla biti građena od tvari relativno prozirne za X-zračenje, npr. od litija, berilija ili grafita, i meko X-zračenje prodiralo bi dublje u stijenku i tako rasipalo svoju energiju na veću količinu tvari, pa bi temperaturna opterećenja bila niža.

Udari električki nabijenih čestica u stijenke uzrokuju višestruke posljedice. Sporije čestice stvaraju efekte slične efektima mekog X-zračenja, a brže čestice efekte poput neutrona.

Unutrašnja stijenka fuzijske komore može se zaštititi tako da se presvuče tankim slojem (nekoliko milimetara) tekućeg litija koji se regenerira, a uz čvrstu stijenku drži se površinskom napetošću. Takva tekuća kožica bila bi otporna na termomehaničke napetosti, a stvoreni mjehurići brzo bi putovali prema kontaktnoj površini s čvrstom podlogom, odakle bi se ispumpavali. Pogodni materijali za čvrste stijenke mogli bi biti vanadij i niobij jer su otporni na djelovanje tekućeg litija, a pri apsorpciji neutrona nastaje relativno malo radioaktivnih tvari.

Na slici 6.30. prikazan je minimalni polumjer unutrašnje stijenke fuzijske komore kao funkcija energije oslobođene po jednoj mikroeksploziji. Rezultati su prikazani za suhu čvrstu stijenku i „vlažnu" čvrstu stijenku, presvučenu slojem tekućeg litija. Zbog znatno većeg maksimalno dopuštenog toka energije u potonjem slučaju potreban je znatno manji polumjer komore, što osobito dolazi do izražaja za veće energije. Međutim, za fuzijsku energiju oko 10^4 kJ po pulsu (laserska energija pulsa iznosila bi oko 100 kJ), suhi čvrsti zid imao bi polumjer nekoliko metara i bio bi tehnološki i ekonomski upotrebljiv.



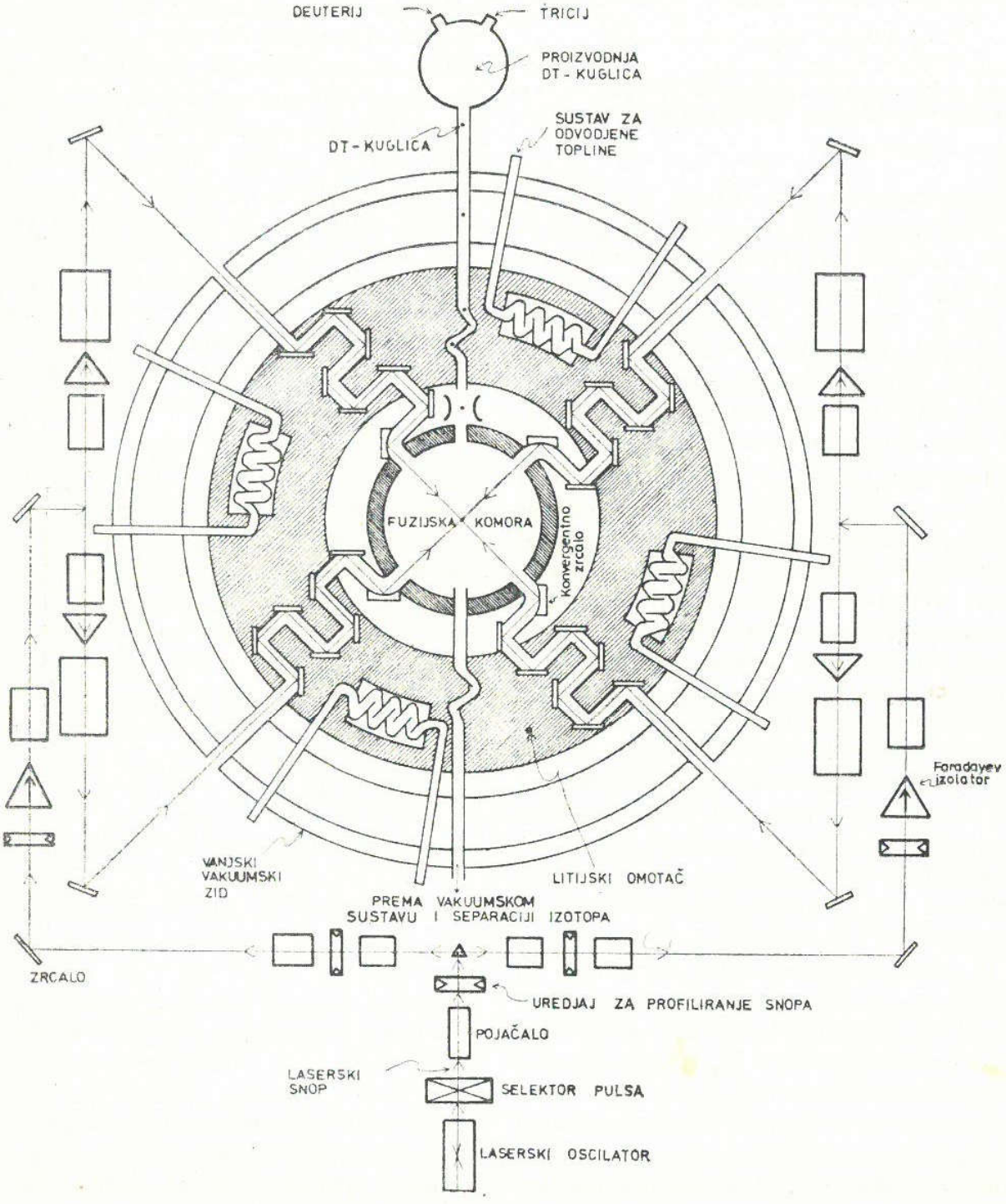
Slika 6.30. Energija fuzije po pulsu ovisno o polumjeru prve stijenke za suhu i vlažnu stijenku

U američkoj projektnoj studiji „Hylife" između goriva i prve stijenke teku slobodnim padom mlazovi litija, tako da produkte mikroeksplozije zaustavlja sloj litija (više desetaka cm) prije nailaska na

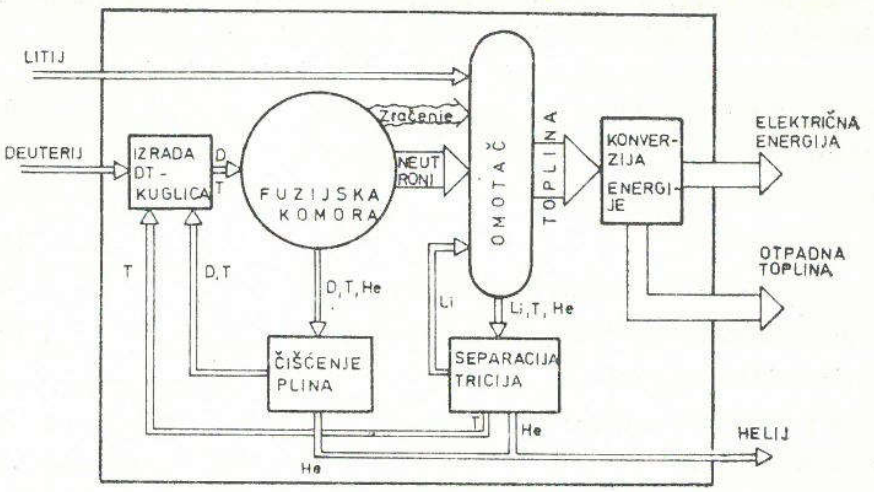
prvu stijenku. Sa pola metra litija život prve stijenke mogao bi se produžiti, kako se ocjenjuje i do 30 godina.

Iako bi se pri mikroeksploziji oslobađala znatna količina energije, sam eksplozivni val ne bi pričinjao veće teškoće. Npr. fuzijska energija (po mikroeksploziji) 100 MJ odgovara energiji koja se oslobodi pri eksploziji kemijskog eksploziva mase 20 kg. Impuls udarnog vala proporcionalan je, međutim, drugom korijenu umnoška energije i mase. Kako je pri mikroeksploziji masa oko 1 mg, eksplozivni učinak smanji se za 1 400 puta prema eksplozivnom učinku kemijskog eksploziva uz jednaku oslobođenu energiju.

Oko fuzijske komore nakon prve stijenke dolazio bi deblji litijski omotač. Većina fuzijskih neutrona proletjela bi



Slika 6.31. Glavni elementi reaktora za lasersku fuziju prema projektnoj studiji iz LLNL (Em 1974)



Slika 6.32. Tokovi energije i osnovnih tvari u reaktoru s inercijskim ograničenjem plazme.

kroz prvu stijenku, a apsorbirao bi ih litijski omotač uz nastajanje tricija i helija.

Litijski omotač bio bi, kao i pri magnetskom ograničenju, i usporivač neutrona i generator tricija.

Iz njega bi se odvodila toplina protokom rashladne tekućine ili plina. Tricij bi se odvajao od litija s pomoću destilacijskog uređaja i potom koristio kao gorivo za izradu DT-kuglica.

Reaktor na lasersku fuziju je u prednosti prema reaktoru s magnetskim ograničenjem u tome što se za stijenke, za omotač i za hlađenje može koristiti strujanje litija, čiji protok u magnetskom polju uzrokuje teškoće.

Pri modeliranju reaktora na lasersku fuziju valja riješiti i niz drugih problema. Jedan problem jest i način dovođenja laserskih snopova i DT-kuglica u fuzijsku komoru. Da bi se spriječio bijeg X-zračenja i neutrona iz reaktora predviđeni su sustavi cik-cak tunela s odgovarajućim elementima za vođenje. Kao optički elementi za vođenje laserskih snopova koristila bi se posebna otporna zrcala, vjerojatno s reflektirajućim površinama od tekućeg metala, koje bi se kontinuirano obnavljale. Osobitu otpornost moralo bi imati posljednje zrcalo koje bi fokusiralo puls na DT-kuglicu.

Jedna od metoda za vođenje DT-kuglica temelji se na tome da se one električki nabiju i potom elektrostatskim putem vode kroz cik-cak tunel do središta fuzijske komore.

Na slici 6.31. skicirani su osnovni elementi reaktora na lasersku fuziju na temelju projektne studije napravljene u Lawrence Livermore National Laboratory [Em 1974] i pripadnog laserskog sustava.

Na slici 6.32. shema je kretanja energije i osnovnih materijala u reaktoru na lasersku fuziju.

U tablici 6.8. navedeni su rasponi parametara laserske fuzijske elektrane u različitim prijedlozima i studijama. Neodređenost je velika, pa je potrebno da se ispita i njihova međusobna ovisnost i konzistentnost. Zato se izrađuju više ili manje detaljne projektne studije čitave elektrane.

6.5.8. Projektna studija SOLASE

U detaljnoj projektnoj studiji načinjenoj na Sveučilištu u Wisconsinu identificirani su tehnološki problemi inercijalnog ograničenja plazme. Projekt je poznat pod nazivom SOLASE [Co 1978]. U projektu su utvrđeni zahtjevi koje mora ispuniti laser i ostali dijelovi elektrane te je time olakšana realističnija ocjena perspektive. Definiranjem zahtjeva i parametara uočeni su i smjerovi razvoja posebno važni za buduću fuzijsku elektranu s inercijalnim ograničenjem.

U tablici 6.9. navedeni su odabrani parametri fuzijskog reaktora u SOLASE projektu. Sustav pretpostavlja plinski laser energije pulsa 1 MJ s visokom efikasno-

Tablica 6.8. Rasponi glavnih karakteristika fuzijske elektrane s inercijalnim ograničenjem i uređaja za zagrijanje i kompresiju kuglice goriva

Energija pulsa na gorivu	500 – 5 000 kJ
Trajanje pulsa	10 ns
Faktor umnažanja energije, Q	30 – 500
Faktor kompresije	$10^3 - 10^4$
Broj snopova na kuglici goriva	2 – 80
Snaga elektrane	1 000 – 5 000 MW (e)
Broj reakcijskih komora	1 – 5
Brzina ponavljanja mikroeksplozija	1 – 10 Hz
Polumjer komore	3 – 10 m
Opterećenje zida komore	1 – 6 MW/m^2
Efikasnost uređaja za grijanje i kompresiju goriva	3% – 40%

Tablica 6.9. Neki parametri u projektnoj studiji SOLASE

Toplinska snaga	3 340 MW
Električna snaga	1 334 MW
Neto električna snaga	1 000 MW
Neto stupanj djelovanja	30%
Udio recirkulirane snage	28%
Polumjer reakcijske komore	6 m
Opterećenje zida komore 14 MeV neutronima	5 MW/m^2
Tip lasera	plinski
Energija na kuglici goriva	1 MJ
Efikasnost lasera	6,7%
Broj završnih pojačala	6
Broj završnih snopova	12
Trajanje pulsa	1 ns
Frekvencija mikroeksplozija	20 Hz
Energija po mikroeksploziji	150 MJ
Dio izgaranja goriva	45%
Početna masa goriva	1 mg
Simetrija obasjavanja goriva	dvostrano
Broj završnih zrcala	12
Udaljenost zrcala od goriva	15 m
Promjer zadnjih zrcala	3,5 m
Faktor umnažanja količine tricija	1,33
Ukupna energija po jednoj fuziji	18,6 MeV
Ulazna temperatura Li_2O	400 °C
Izlazna temperatura Li_2O	600 °C

šću koja bi se mogla postignuti CO_2-laserima. U tim prilikama potrebno je umnažanje energije za faktor 150 da bi se dobio prihvatljiv ukupni stupanj djelovanja fuzijske elektrane (~30%), a uvjetovan ekonomičnošću i utjecajem na okoliš.

Neki detalji i zaključci iz studije SOLASE:

— Zahtjev za faktor umnažanja, $Q \geq 150$, odnosno za odgovarajuću efikasnost lasera energije 1 MJ vrlo je ozbiljan. S većim energijama pulsa situacija je povoljnija. Uočena je osjetljivost faktora umnažanja na oblik pulsa. Efikasnost prijenosa laserske energije gorivu neodređena je, osobito za CO_2-laser.

— Ozbiljan je problem precizno vođenje i dovođenje kuglice goriva odnosno mikrobalona u središte reakcijske komore. Proizvodni troškovi kuglica goriva značajno će utjecati na ukupnu ekonomičnost.

— Odabrano je 3 J/cm² kao gustoća energije u optičkom sustavu da bi se izbjegla oštećenja. U zoni visoke snage laserski sustav ima 6 snopova, a kuglica goriva, odnosno mikrobalon obasjava se s 12 zrcala promjera 3,5 m. Posljednja zrcala udaljena su 15 m od središta komore. Važan problem jest osiguranje zrcala od oštećenja X-zračenjem i proizvodima mikroeksplozije. Predviđaju se bakrena zrcala na aluminijskoj podlozi. Ozbiljni problemi nastali bi za laserske valne duljine od 0,3 μm do 0,6 μm, gdje se dovoljno visoka reflektivnost, viša od 99%, ne može postignuti bez dielektričnih slojeva osjetljivih na neutronsko zračenje. Spomenuto područje valnih duljina inače je optimalno za prijenos laserske energije na gorivo.

— Zahtjevi za vakuum reakcijske komore umjereni su, pa se za prvu stijenku i omotač mogla razviti koncepcija grafitne strukture sa sitnim česticama litij-oksida kao sredstvom za prijenos topline.

— Dostup reakcijskoj komori kod inercijalne fuzije znatno je lakši jer nema magneta. Obasjavanje s 12 zrcala ne daje, međutim, ravnomjerno obasjavanje goriva. Ako bude potrebno ravnomjernije obasjavanje, dio ove prednosti prema magnetskom ograničenju izgubit će se zbog složenog sustava dovođenja snopova na gorivo.

6.6. Fuzija elektronskim i ionskim snopovima

6.6.1 Fuzija elektronskim snopovima

Premda su laseri prema osnovnim fizikalnim karakteristikama vrlo prikladni uređaji za proizvodnju pulseva vrlo velike snage u ekstremno kratkim vremenskim intervalima, nije nikako sigurno da mogu ispuniti sve zahtjeve za razvoj ekonomski prihvatljive fuzijske elektrane. Odlučujući je dobitak u energiji, a laseri upravo u tome imaju ozbiljne teškoće. Njihova je efikasnost niska; za neodimijski laser ona iznosi samo oko 0,1%, a za CO_2-laser danas je između 2% do 3% s perspektivom dosizanja vrijednosti od 5% do 10%. Niska efikasnost lasera traži odvajanje znatnog dijela fuzijske energije za njihov pogon i zaoštrava uvjete na dobitak energije. Neodimijski laser ne može se upotrijebiti za lasersku fuzijsku elektranu, kao što smo već istaknuli, ponajprije zbog toga što mu je aktivni medij kruta tvar, te se ne može postignuti potrebna brzina ponavljanja mikroeksplozija. Za CO_2-laser s plinom kao aktivnim medijem i dosta povoljnom efikasnošću problem je prevelika valna duljina laserske svjetlosti. Pri tim uvjetima znatan dio energije laserskog snopa reflektira se na kuglici goriva, smanjujući prednosti veće efikasnosti CO_2-lasera. Ako se još neke rezervne mogućnosti, kao npr. kriptonski laser, ne ostvare, budućnost laserske fuzije bit će dvojbena zbog odsutnosti lasera pogodnog za igradnju elektrane. Stoga je razumljivo da su se počele istraživati druge mogućnosti.

U toku 60-ih godina u vojnim istraživanjima razvijeni su uređaji kojima se proizvode kratki i veoma snažni elektron-

ski pulsevi. Uređaj pod nazivom Hermes razvijen 1967. godine, proizveo je elektronske pulseve energije 100 kJ. Najsnažniji elektronski akcelerator razvijen za vojna istraživanja 1972. godine poznat pod imenom Aurora, s četiri snopa razvija snagu $2 \cdot 10^{12}$ W u pulsu koji traje $100 \cdot 10^{-9}$ s. Snaga i karakteristike pulsa još ne odgovaraju zahtjevima fuzije, no uređaj nije za tu svrhu ni konstruiran. Vrlo je privlačna karakteristika uređaja Aurora njegova efikasnost, oko 50%, a i niska cijena prema laserskim uređajima. Po jednom džulu energije u pulsu taj akcelerator trebao bi koštati barem deset puta manje od laserskog uređaja. S današnjim tehnologijama cijene velikih laserskih instalacija procjenjuju se na oko 400 $/J (Nu 82). Nedavno završen Novette laser energije 10 kJ stajao je oko 25 milijuna dolara (Gr 83). Te dvije karakteristike, efikasnost i znatno niža cijena prema laserima bile su temelj pokušaja da se elektronski akceleratori upotrijebe za inercijsku fuziju. Pri kraju 60-ih i u početku 70-ih godina obavljaju se istraživanja u Sovjetskom Savezu (Institut Kurčatova) i u SAD (Sandia Laboratoriji). Treba odmah kazati da pri korištenju elektronskog snopa za fuziju pored prednosti pred laserima, ima i očitih teškoća. Ponajprije se mogu očekivati problemi pri fokusiranju. Laserski snop može se koncentrirati na vrlo sitnu kuglicu goriva (tipičnih dimenzija oko 1 mm ili manje). Pri upotrebi elektronskog snopa teškoće nastaju zbog odbojnih sila među elektronima. Razumijevanje i rješavanje tog problema pridonijelo je razvoju elektronskog prilaza inercijskoj fuziji. Uspješno fokusiranje postignuto je korištenjem samofokusirajućeg djelovanja magnetskog polja elektronskog snopa i neutralizacijom odbojnog djelovanja [Yo 1978], pri čemu su vrlo važni ioni plazme kroz koju prolazi elektronski snop. Postignuti su snažni elektronski snopovi promjera 2 mm. Gustoća snage 10^{17} W/m^2 postignuta je u Institutu Kurčatova. Slijedeći problem jest vođenje elektronskog snopa od akceleratora do središta fuzijske komore (udaljenost više metara). Nađeno je da gusta plazma koja ograđuje magnetsko polje snopa djeluje kao svojevrsni kanal u kojem elektronski snop gubi malo energije. Potrebna plazma može se proizvesti izbojem duž predviđenog puta elektrona ili s laserskim snopom. Moguće nestabilnosti tako vođenog elektronskog snopa se istražuju.

Naravno, kada je elektronski snop doveden do središta fuzijske komore, počinju problemi na koje se već naišlo pri laserskoj fuziji, tj. predaja energije kuglici goriva. Prema presjeku elektronskog snopa i trajanju pulsa, kuglice goriva bit će masivnije nego u laserskih uređaja. Istodobno, veća energija u elektronskom pulsu to i dopušta.

Proučavaju se različite koncepcije kuglica goriva s promjerom i do 1 cm. Basov (Fizikalni Institut Lebedeva) predložio je 1975. šuplje višeslojne kuglice goriva. Vanjski je sloj materijal koji isparava i vrši reakcijski potisak. Unutrašnji sloj jest gorivo. Srednji sloj služi kao toplinska izolacija, budući da jezgrama visokog rednog broja koji se u tom sloju nalaze otežava prolaz vrućih elektrona u središnji dio kuglice. Značajna pogodnost te koncepcije jest povećan put za akceleraciju goriva prema središtu implozije. Međutim, u njoj postoji i opasnost. Na relativno tankoj ljusci kuglice goriva mogu se pobuditi Rayleigh-Taylorove nestabilnosti. Ako bi oscilacije uzrokovale lom odnosno deformaciju kuglice, ne bi bilo koncentrične implozije i kompresije goriva.

Eksperimentalno istraživanje procesa implozije traži snažnije snopove, no odgovor se očekuje u skoroj budućnosti. Sa šupljom kuglicom goriva obasjavanom elektronskim snopovima registrirao je Rudakov 1976. godine fuzijske neutrone.

U Laboratorijima Sandia to je postignuto 1977. godine, tako da je za izolaciju goriva od vanjskih slojeva plazme korišteno magnetsko polje proizvedeno visokostrujnim izbojem kroz kuglicu goriva neposredno pred imploziju. Registrirani su fuzijski neutroni pri relativno maloj brzini implozije od oko 4 cm u mikrosekundi

Ocjena perspektive fuzije s elektronskim snopovima može se očekivati do 1985. godine. U Sandia Laboratorijima gradi se sustav s 36 elektronskih snopova i ukupnom trenutnom snagom $30 \cdot 10^{12}$ W, te mogućnošću da se ona kasnije poveća na $60 \cdot 10^{12}$ W. Takav razvoj uz ostale pripreme omogućio bi da se 1985. godine pokuša postignuti sagorijevanje kuglice goriva. U Sovjetskom Savezu eksperimenti sagorijevanja goriva trebali bi početi 1984. godine s akceleratorom Angara V snage $100 \cdot 10^{12}$ W i energije pulsa 5 MJ u Institutu Kurčatova. Čini se da se u Sovjetskom Savezu daje relativno veća težina istraživanju fuzije s elektronskim snopom nego s laserima. Jednostavnija i jeftinija tehnologija, vjerojatno su razlog za takvo opredjeljenje, ali i tumačenje temeljeno na nepovoljnoj ocjeni perspektive lasera također je moguće. Eksperimenti s velikim uređajima jednog i drugog tipa pružit će u idućim godinama više podataka na temelju kojih bi se mogao izvršiti izbor.

6.6.2. Fuzija snopovima teških iona

Složeni fizikalni procesi pri prijenosu energije elektronskog snopa na gorivo kao i pri kompresiji potakli su da se zagrijavanje i kompresija kuglice goriva pokuša sa snopovima pozitivnih iona (protona, a možda i teških iona) umjesto s elektronima. Brzina gubljenja energije teških nabijenih čestica veća je. Pokazuje se da to smanjuje potrebnu snagu ionskog snopa prema elektronskom oko 10 puta. Međutim, problem je fokusiranja teži.

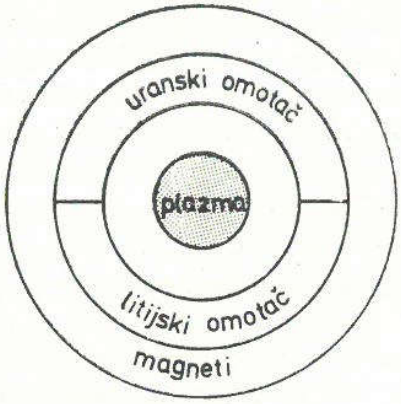
Povoljna eksperimentalna okolnost jest da se diode koje služe kao elektronski izvori u generatorima elektronskih snopova mogu koristiti uz potiskivanje elektrona dodatnim magnetskim poljem i kao izvor pozitivnih iona (protona). Uređaji koji se u Sandia laboratorijima grade za elektronsku fuziju i sovjetski uređaj Angara V koristit će se i za istraživanje ionske fuzije. Čini se da stručnjaci u sadašnjem razdoblju više vjeruju u uspjeh s protonskim snopovima. Fuzija sa snopovima teških iona istražuje se u laboratorijima u Berkleyju i Argonneu.

Ekstremni položaj u razvoju k sve težim česticama ima prijedlog elektromagnetskog ubrzanja makroskopskih čestica do brzina (reda 10^7 cm/s) pri kojima bi kinetička energija tih čestica, sudarom pretvorena u toplinsku, dostajala za zagrijavanje do temperatura fuzije.

Poseban magnetski akcelerator duljine čak 10 km ubrzao bi supravodljivu ili feromagnetsku česticu. Zbog malenog presjeka akceleratora bio bi i razmjerno niske cijene. Nema nikakve eksperimentalne potvrde za izvedivost te koncepcije.

6.7. Fuzijsko-fisijski hibridni sustavi

Kao što smo vidjeli u predhodnim poglavljima postoje teške fizikalno-tehničke prepreke na putu do ekonomičnosti fuzijskih elektrana. Ne ulazeći u detalje pojedinih koncepcija fuzijskog reaktora takvi zahtjevi mogu se izraziti faktorom umnažanja Q kojega treba postignuti na ekonomičan način. Pri magnetskom ograničenju plazme njegove vrijednosti trebale bi biti oko 10, a pri inercijalnom ograničenju znatno veće, između 30 i 300, ovisno o načinu grijanja i kompresije plazme. Koncepcija fuzijsko-fisijskog hibrida nastala je iz nastojanja da se ekonomičnost postigne uz blaže uvjete na fuzijski sustav, tj. s nižim Q faktorima s kojima se inače ne bi mogli postignuti ekonomičnost u „čistim" fuzijskim sustavima. Fuzijsko-fisijski hibrid razlikuje se od čistog fuzijskog sustava po omotaču od fisijskog oplodnog materijala (urana ili torija) oko fuzijske reakcijske komore. Fuzijski neutroni u hibridu koriste se, osim za proizvodnju energije i tricija, i za konverziju urana-238 i torija-232 u plutonij-239 odnosno uran-233. Pri tome se dodatna energija proizvodi fisijom u oplodnom



Slika 6.33. Shema rasporeda glavnih dijelova fisijsko-fuzijskog sustava

omotaču. Ovisno o sastavu omotača udio fisijske energije može biti i bitno veći od udjela fuzijske energije. Izvan hibrida energija se dobiva iz proizvedenih fisibilnih nuklida u fisijskim reaktorima.

Na slici 6.33. shematski je prikazan raspored glavnih komponenata hibridnog sustava. Fisijska obloga sastoji se od prirodnog ili osiromašenog urana. Osim fisije, fuzijski neutroni energije 14 MeV u oblozi izazivaju i (n,2n) i (n,3n) reakcije na uranu ili toriju kojima dolazi do umnažanja neutrona. Pri fisiji s neutronima od 14 MeV oslobađa se 4 do 5 neutrona, prema 2,5 do 3 fisijom pri niskim energijama. Najvažnije reakcije u uranskom omotaču jesu:

Reakcija	Udarni presjek pri energiji neutrona 14 MeV
$^{238}U+n\rightarrow{}^{239}U+\gamma\rightarrow{}^{239}Pu$	$\sigma=36\cdot10^{-4}\cdot10^{-28}\,m^2$
$^{238}U+n\rightarrow{}^{237}U+2n$	$\sigma=0{,}55\cdot10^{-28}m^2$ (6.37)
$^{238}U+n\rightarrow{}^{236}U+3n$	$\sigma=0{,}80\cdot10^{-28}\,m^2$
$^{238}U+n\rightarrow{}^{239}U\rightarrow$fisija	$\sigma=1{,}20\cdot10^{-28}\,m^2$

Energijski odnosi u hibridnom sustavu postaju pregledniji preračunaju li se na jednu reakciju fuzije.

Po jednom fuzijskom neutronu reakcijama (n,2n) i (n,3n) te fisije, proizvodi se $n_h\approx3{,}1$ neutron. Pri tome se oslobađa energija E od 120 do 200 MeV [Go 1978]. Jedan od proizvedenih neutrona troši se u litiju za nadomještavanje izgorjelog tricija. Preostali neutroni (n_h-1) apsorbiraju se u uranu-238, dajući plutonij-239.

Energija E_r koju proizvedeni plutonij-239 razvija izgaranjem u termičkom reaktoru karakteriziranom s prosječnim faktorom konverzije $\bar{C}$ iznosi

$$E_r=(n_h-1)\frac{E_f}{(1-\bar{C})(1+\alpha)} \qquad (6.38)$$

gdje je E_f energija fisije ($\sim$200 MeV), a $\alpha=\frac{\sigma_u}{\sigma_f}$ omjer udarnih presjeka za uhvat, odnosno fisiju u termičkom reaktoru. Ukupno proizvedena energija u sustavu hibridnog uređaja i reaktora jest $E_H=E+E_r$. Označimo s E_u energiju potrebnu za održavanje reakcije fuzije, te je izrazimo relacijom

$$E_u=\frac{E_{DT}}{Q\,\eta_T\,\eta_g}$$

gdje je Q faktor umnažanja energije u plazmi, a $E_{DT}=17{,}6$ MeV energija fuzije po jednoj reakciji. Faktor umnažanja energije u sustavu hibridnog uređaja i fisijskog reaktora Q_H može se tada izračunati:

$$Q_H=\frac{E_H}{E_u}=$$

$$=Q\,\eta_T\,\eta_g\,\frac{E+(n_h-1)\dfrac{E_f}{(1+\alpha)(1-\bar{C})}}{E_{DT}}=$$

$$=Q\cdot A \qquad (6.39)$$

Prema tipičnim vrijednostima $\bar{C}$, počevši od 0,4 za reaktore PWR tipa pa na više, vidi se da ukupnoj proizvodnji energije sustava najviše doprinosi proizvodnja u fisijskim reaktorima koji iskorištavaju proizvedeni plutonij, i da ona iznosi od 600 do 1 000 MeV u današnjim termičkim reaktorima. Kvocijent prima vrijednosti od 50 do 80. Ako pretpostavimo da je umnožak efikasnosti $\eta_T \eta_g \sim 0{,}2$, faktor A bit će u intervalu od 10 do 16, odakle se vidi da hibridni sustav može raditi i ako je faktor umnažanja energije u plazmi Q manji od jedan, tj. ispod dosizanja uvjeta za samoodržanje fuzije. Račun za dvozonski omotač koji osigurava tricij za pogon fuzijskog uređaja litijskom zonom debljine 30 cm (u kojem 95% volumena čini litij) i uranskom zonom debljine 70 cm (uran s 0,4% U-235), daje sljedeće rezultate [Ka 1975]:

proizvodnja energije u omotaču — 103 MeV po neutronu energije 14,1 MeV,

faktor nadomještanja tricija — 0,986,

proizvodnja plutonija reakcijom $^{238}U\ (n, \gamma)\ ^{239}Pu$ —

1,68 po jednom neutronu, energije 14,1 MeV.

Ako fisijski omotač sadrži torij-232, apsorpcijom se neutrona dolazi do urana-233

Za procjenu ekonomičnosti treba promatrati zajedno fuzijsko-fisijski hibrid i fisijske reaktore koji koriste u njemu proizvedene fisibilne materijale.

Bitni elementi takve procjene jesu kvantitativni podaci o proizvodnji fisibilnih jezgara u hibridu i potrošnja fisibilnih jezgara u fisijskim reaktorima. Podaci o fisijskim reaktorima mogu se temeljiti na izgrađenim elektranama, a podaci o hibridima izvode se iz različitih projektnih studija koje su upravo za to načinjene.

U tablici 6.10. prikazani su rezultati rane studije napravljene u Argonskom nacionalnom laboratoriju [Av 1978] za fuzijsko-fisijski hibrid ukupne toplinske snage 3 000 MW, za 2 tipa oplodnog omotača, te dvije pretpostavljene vrijednosti faktora umnažanja Q za fuzijski reaktor.

Pri raspoloživosti hibridnog sustava od 70%, proizvodnja fisibilnih jezgara iznosi za omotač iz urana i torija 1 200 kg plutonija-239 i 500 kg urana-233, a za omotač samo iz torija 1 600 kg urana-233 godišnje. S obzirom na različite fisijske udarne presjeke potrebna fuzijska snaga jest različita za dva omotača, što daje i različitu neto električnu energiju. S vrijednošću $Q=1$ i torijevim omotačem hibrid treba energiju iz mreže. Pretpostavi li se $Q=2$, ta verzija proizvodi višak električne energije. Ako i fisijski reaktor promatramo u jedinicama od 3 000 MW (t) raspoloživosti 70%, godišnji bruto potrošak fisibilnih jezgara iznosi približno 1 000 kg. Neto potrošak bit će manji za količinu fisibilnih jezgara proizvedenu konverzijom. Ako je prosječni faktor konverzije fisijskog reaktora $\bar{C}$, neto potrošak za godinu dana iznosit će 1 000 kg $(1-\bar{C})$ fisibilnih jezgara. Izborom određenog

Tablica 6.10. Karakteristike fisijsko-fuzijskog sustava za dva tipa omotača i dvije Q vrijednosti u studiji iz Argonskog nacionalnog laboratorija [Av 1978]

Karakteristike sustava	Omotač	
	uran-torij	torij
godišnja proizvodnja ^{233}U/kg	1 200	1 600
godišnja proizvodnja ^{239}Pu/kg	500	0
fuzijska snaga P_F/MW (t)	510	1 150
neto električna snaga/MW, $Q=1$	220	−750
neto električna snaga/MW, $Q=2$	600	120

fisijskog reaktora i time karakteristične vrijednosti faktora konverzije možemo dobiti broj S fisijskih reaktora čije će potrebe za fisibilnim jezgrama fuzijsko-fisijski hibrid moći podmiriti

$$S=\frac{1\,600\text{ kg}}{1\,000\text{ kg}\,(1-\bar{C})} \qquad (6.40)$$

uzevši za godišnji prinos hibrida 1 600 kilograma.

Za današnje lakovodne reaktore $\bar{C}$ ide od 0,4 na više. Za teškovodne reaktore s $\bar{C}\sim 0{,}8$ već se dobiva $S=8$, a različiti napredni ciklusi goriva termičkih reaktora imaju još više vrijednosti faktora konverzije.

Prema tim ilustrativnim podacima možemo promotriti proizvodnju i potrošnju energije u sustavu. Ukupna je proizvodnja energije $(S+1)$ 3 000 MW (t), a potrošnja je određena potroškom električne energije za zagrijavanje plazme u fuzijskom reaktoru. Uzmemo li da je udio fuzijske snage u ukupnoj snazi hibrida F (za podatke u tablici 6.10. on iznosi $\frac{510\text{ MW}}{3\,000\text{ MW}}$ odnosno $\frac{1\,150\text{ MW}}{3\,000\text{W}}$, onda je potrošak energije u fuzijskom reaktoru određen s

$$\frac{F\,3\,000\text{ MW}}{Q\,\eta_T\,\eta_g}. \qquad (6.41)$$

Neto snaga sustava iznosi

$$\left(S+1-\frac{F}{Q\,\eta_T\,\eta_g}\right)3\,000\text{ MW (t)}.$$

Odredimo li $S=10$, $\eta_T=1/3$, $\eta_g=0{,}8$ i $F=1/5$ dobiva se granična vrijednost faktora Q pri kojoj sustav počinje proizvoditi neto energiju

$$Q=\frac{F}{(S+1)\,\eta_T\,\eta_g}=\frac{\frac{1}{5}}{11\cdot\frac{1}{3}\cdot 0{,}8}=\frac{6}{88}\approx\frac{1}{14}.$$

Očito je prema primjeru da su zahtjevi za faktor umnažanja Q mnogo blaži nego u čistom fuzijskom sustavu. Razumljivo je stoga da se u razmišljanjima o cjelini problema, od fizike plazme do ekonomičnosti proizvodnje energije, u posljednje vrijeme sve više spominje hibridni sustav. Tako su npr. američki stručnjaci iz LLNL i General Atomics načinili projektnu studiju na temelju tandemskog zrcalnog fuzijskog sustava [Be 1978], koji je za to vrlo povoljan.

Druge američke grupe, iz Battele Northwest Lab. i Sveučilišta Wisconsin, te iz firme Westinghouse načinile su studije na temelju tokamak reaktora.

Sovjetski stručnjaci iz Instituta Kurčatova prikazali su rezultate detaljnih studija hibridnog sustava s tokamak reaktorom 1977. godine [Ve 1978 i Go 1978]. Razabire se da se u SSSR-u hibridni fuzijsko-fisijski sustav pažljivo istražuje. Načinjena je projektna studija za fuzijsko-fisijski hibridni uređaj snage 6 900 MW, s godišnjom proizvodnjom plutonija 4 200 kg. Pretpostavke o fuzijskoj plazmi ne idu znatno preko onog što se dobiva, odnosno očekuje s fuzijskim tokamak uređajima u gradnji, pa je to zahtijevalo povećanje snage injektora neutronskih snopova.

U tablici 6.11. navedeni su parametri plazme i druge karakteristike tog fuzijskog uređaja, a u tablici 6.12. podaci o energetici i proizvodnji plutonija i tricija.

Tablica 6.11. Karakteristike plazme i fuzijskog uređaja u projektnoj studiji tokamak hibridnog reaktora [Ve 1978]

Mala poluos presjeka plazme	1,5 m
Velika poluos presjeka plazme	3 m
Polumjer torusa	6,4 m
Volumen plazme	575 m^3
Magnetsko polje na osi plazme	6 T
Maksimalno polje na površini zavojnice	12 T
Faktor stabilnosti q na rubu plazme	3
Snaga injekcije neutralnih snopova	200 MW
Broj injektora	8
Energija čestica	500 keV
Broj toroidalnih zavojnica	16
Srednja gustoća plazme	$8 \cdot 10^{19} m^{-3}$
Vrijeme ograničenja energije τ_E	0,8 s
Trajanje ciklusa	1 000 s
Trajanje pulsa	920 s
Neutronski tok na prvoj stjenci	$5 \cdot 10^{13} n/cm^2$

Tablica 6.12. Energetika i proizvodnja plutonija i tricija u projektnoj studiji tokamak hibridnog reaktora

Toplinska snaga	6 900 MW (t)
Električna snaga, bruto	2 500 MW (e)
Vlastita potrošnja	570 MW (e)
Količina urana u omotaču	1 100 t
Trajanje ozračivanja urana u omotaču	2,65 godina
Godišnja proizvodnja plutonija	4 200 kg
Količina plutonija u omotaču na kraju ozračivanja	10 kg/t
Godišnja potrošnja tricija	37,2 kg
Godišnja proizvodnja tricija	38,7 kg
Broj fisija u omotaču po jednoj fuzijskoj reakciji	0,61
Fisijska energija u omotaču po jednoj fuziji	140 MeV
Srednja volumna snaga u uranskom omotaču	98 kW/L
Specifično izgaranje urana	4 500 MW d/t

O korisnosti hibridnog sustava postoje različita gledišta. Prema nekima oni objedinjuju loša svojstva fuzije i fisije, tj. složenost fuzijskog uređaja s produkcijom plutonija i fisibilnog urana u velikim količinama, kao i s potrebom za preradu goriva, radioaktivnim otpadom i ostalim karakteristikama fisijskog reaktora. Ističe se nadalje da oplodni reaktori na jednostavniji način od hibridnih reaktora omogućuju iskorištenje urana-238 i torija-232. Ako bi se hibridnim sustavom trebao iskoristiti samo inače neekonomičan i neperspektivan fuzijski sustav, takvi bi prigovori mogli imati znatnu težinu.

Stručnjaci koji se zalažu za hibridne sustave iznose, međutim, argumente koji pokazuju da bi hibridni sustavi trebali biti prelazna faza do fuzijskih elektrana. Ako u toj prelaznoj fazi sustav možda ne bi imao izrazite prednosti pred oplodnim reaktorom, on bi ipak olakšao razvoj do ekonomične fuzijske elektrane, a tada će problemi s radioaktivnim otpadom, preradom itd. biti mnogo manji. Razvoj olakšava to što se fuzijski reaktor sa znatno manjim Q faktorom može ugraditi u energetski objekt, a također i način na koji se hibrid koristi u energetskom sustavu. Hibridni sustav proizvodi, naime, relativno malo električne energije izravno; glavni doprinos dolazi posredno od fisijskih elektrana koje on opskrbljuje gorivom. Njegova bi osnovna uloga bila proizvodnja goriva, što bi omogućilo i diskontinuiran režim rada koji ne bi bio prihvatljiv kod bazičnog energetskog izvora. Hibridna faza omogućila bi stoga razvoj do pouzdanog pogona fuzijskog uređaja, bez nepovoljnih utjecaja na elektroenergetski sustav. Oplodni reaktori tako ne bi mogli raditi. Zbog relativno malog viška goriva oni su izravni energetski izvori, s odgovarajućim zahtjevima za njihovu pouzdanost. Oplodni reaktor ne proizvodi gorivo za veći broj drugih reaktora koji bi proizvodili energiju; on sam proizvodi energiju.

Fuzijski uređaj kao intenzivan izvor neutrona otvara i dodatne mogućnosti simbioze s fisijskim reaktorima.

Promatrana je mogućnost „osvježavanja" istrošenih gorivih elemenata termičkih reaktora njihovim ozračivanjem u fuzijskom uređaju. Za pokretanje U-Th ciklusa goriva interesantno je ozračivanje elemenata goriva načinjenih iz samog torija. Nakon ozračenja i stvaranja urana-233 elementi goriva koristili bi se u termičkom reaktoru bez međukoraka prerade i ekstrakcije.

Rađene su i projektne studije za hibridni sustav s inercijalnim ograničenjem plazme [UC 1976]. Ekonomičnost sustava hibridnog reaktora s laserskim fisijskim uređajem i lakovodnim toplinskim fisijskim reaktorima promatrana je u [Be 1981] za nekoliko tipova fisijskog omotača — uranski, torijski, miješani, te torijski s reduciranom fisijom. Analize pokazuju da bi sustav proizvodio energiju po cijeni 25%—30% većoj od modernih lakovodnih reaktora bez prerade goriva. Kompetitivnost hibridnog sustava može se očekivati kad cijena U_3O_8 bude oko 300 $/kg (dolari 1980). Za razliku od hibridnih sustava s magnetskim ograničenjem plazme neodređenosti za laserski sustav za grijanje i kompresiju plazme takve su da su potrebne znatne ekstrapolacije prema današnjim rezultatima i znanju. Navedene studije treba u prvom redu shvatiti kao određenje zahtjeva za laserski sustav, da bi se dobile specificirane ekonomske karakteristike.

U poslednjih nekoliko godina u nizu studija istraživani su detaljno ekonomski i fizikalno-tehnički aspekti fuzijsko-fisijskih hibrida. Razmatraju se koncepcije omotača s „postinutom fisijom" tj. omotača u kojem bi se reducirala snaga brze fisije, i time dobilo vrlo povoljne sigurnosne karakteristike.

Znatna pažnja bila je posvećena perspektivi i aktuelnim fizikalnim i tehničko-ekonomskim aspektima na nedavnim znanstvenim skupovima u Laxenburgu (IIASA Workshop 25—27. May 1981) i Knoxvilleu (Fifth Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, Knoxville, Tenessee, 26—28 April, 1983). U objavljenim materijalima s ovih skupova *(Nuclear Technologies in a Sustainable Energy System*, Ed. G. S. Bauer and A. Mc Donald, Springer Verlag 1983, te *Nuclear Technology* / Fusion, No 4, Vol 4 Parts 2 and 3*)* nalazi se niz radova koji se odnose na problematiku fuzijsko-fisijskih hibrida.

Ovdje možemo komentirati i odnos fuzijsko-fisijskog hibrida prema sustavu u kojem se fisibilni materijali proizvode akceleratorski.

Takvi sustavi analizirani su u više studija [npr. IM 1977]. Pokazano je da se s akceleratorima koji nisu daleka ekstrapolacija današnje akceleratorske fizike i tehnike može postignuti proizvodnja fisibilnih materijala i ekonomski prihvatljiv sustav oplodnog akceleratora i fisijskih elektrana kao i s fuzijsko-fisijskim hibridom, ali s jednostavnijom tehnologijom. Postoje određene tehničke i tehnološke prednosti takve strategije, ali valja reći da ona ima i jedno ograničenje.

Akceleratorsko-fisijski sustav ne može se vremenom razviti tako da radi bez fisijskih reaktora kao što se može razviti fuzijsko-fisijski sustav. Prema tome on će trajno biti opterećen problemima koji proizlaze iz prerade uran-torijskog goriva radi izdvajanja plutonija-239 i urana-233. Mogli bismo zaključiti da je akceleratorsko-fisijski sustav alternativa oplodnim reaktorima i da ih tako valja procjenjivati, a dodatna je kvaliteta fuzijsko-fisijskog sustava mogućnost razvoja u čisti fuzijski sustav.

Ako bi se, međutim, pokazalo da zbog visokih investicijskih troškova čisti fuzijski sustav nema u dogledno vrijeme ekonomske perspektive, ova bi teorijska prednost fuzijsko-fisijskim sustavom otpala. Razlozi zbog kojih je zadnjih godina rad na akceleratorsko-fisijskom sustavu u SAD „zaleđen" nisu jasni, ali je moguće i vjerojatno da nisu samo tehničke prirode.

6.8. Utjecaj fuzijskog uređaja na okoliš

6.8.1. Čisti fuzijski uređaj

Prilično je rašireno mišljenje da utjecaj fuzijskog uređaja na okoliš bitno ovisi o tome da li je uređaj „čisti" fuzijski ili hibridni fuzijsko-fisijski sustav. Tri su osnovna izvora utjecaja čisto fuzijskog sustava na okoliš:

a) otpadna toplina,

b) tricij u litijskom omotaču i preradi i

c) radioaktivnost prve stijenke reaktora.

U fuzijsko-fisijskom sustavu pojavljuje se dodatni rizik zbog prisutnosti radioaktivnih fisijskih proizvoda i fisibilnih nuklida u fisijskom dijelu hibrida.

Ako bi fuzijski uređaji bili veoma velike snage, kao npr. u projektnim studijama tokamak reaktora, njihovo lociranje neće biti tako jednostavno kao što se katkad misli. Valja znati da fuzijske elektrane ne mogu imati povoljan ukupan stupanj djelovanja zbog velike unutrašnje potrošnje energije sustava za grijanje plazme i supravodičkih magneta pri magnetskom ograničenju, ili uređaja za grijanje i kompresiju plazme pri inercijalnom ograničenju. Toplinski učinci zato mogu biti ozbiljni.

Rizik zbog prisutnosti velikih količina tricija procijenjen je u nizu radova [npr. Mc 1978]. Međutim, prema novijim podacima, odnosno procjenama, opasnost od radioaktivnosti prve stijenke znatno je veća ako postoji mehanizam za njezino oslobađanje. Promotrit ćemo stoga tu opasnost nešto detaljnije na temelju američkih studija. Holdren [Ho 1981] polazi od projektne studije tokamak reaktora UWMAK-I, u kojega je osnovni konstrukcijski materijal za prvu stijenku i omotač nerđajući čelik tipa 316 (62% Fe, 18% Cr, 14% Ni, 2% Mn i Mo, 1% Cu i Al).

U tablici 6.13. navedena je aktivnost najvažnijih aktivacijskih proizvoda nakon dvije godine rada fuzijske elektrane ($t=0$) i nakon $t=10^4$ s po obustavi rada. Aktivnosti preračunate su na snagu 1 000 MW (e), pa se mogu usporediti s radioaktivnim inventarom tipične fisijske elektrane (tablica 6.13). Iako su količine značajne i usporedive, treba ipak uočiti da je među induciranim radioaktivnostima najdulje vrijeme poluraspada jezgre ^{60}Co, $T_{1/2}=5{,}26$ godina. To znači da aktivnost kobalta-60 pada do neznatnih dijelova od početne vrijednosti nakon nekoliko desetljeća, a opadanje je znatno brže u ostalih radioaktivnih izotopa s kraćim vremenom poluraspada.

Naravno, ako bi se oslobodila radioaktivnost u nekoj nesreći elektrane, onda je za ocjenu opasnosti odlučan inventar radioaktivnosti u prvim danima odnosno tjednima.

U studiji se promatraju potencijalni načini oslobađanja radioaktivnosti prve stijenke, bez pokušaja kvantitativne procjene vjerojatnosti. Kao mehanizam koji bi mogao dovesti do takvih posljedica navode se požari litijskog omotača i natrija prisutnog kao sekundarnog rashladnog sredstva u projektu UWMAK-1. Jedino kemijski procesi s litijem i natrijem mogu razviti temperature i energije potrebne za taljenje znatnog dijela prve čelične stijenke. U studiji se promatraju i drugi materijali za prvu stijenku te se utvrđuje da se ne postiže temperatura taljenja molibdena i niobija, odnosno taljenja značajnijih količina cirkonija i vanadija. Studija je utvrdila da se radioaktivni rizik može značajno smanjiti povoljnim izborom materijala prve stijenke.

U tablici 6.14. taj je rizik od radioaktivnosti prve stijenke raspršene u zraku izražen volumenom potrebnim za razrjeđivanje do maksimalne dopuštene koncentracije u zraku. Osim za stijenke od čelika 316, navedeni su i podaci za drugi sastav prve stijenke i za sadržaj tricija u litijskom omotaču. Za čelik tipa 316 pretpostavlja se oslobađanje 20% radioaktivnosti, a znatno manje za druge materijale prvih stijenki. Komparativno, na isti način prikazan je i rizik od fisijskih proizvoda tipičnog lakovodnog reaktora.

Tablica 6.13. Glavni radioizotopi i njihove aktivnosti inducirane u prvoj stijenki i izloženim dijelovima od nerđajućeg čelika tokamak reaktora (projektna studija UWMAK-I) iskazano po snazi 1 000 MW (e)*

Izotop	Vrijeme poluraspada $T_{1/2}$	Aktivnost/10^{18} Bq	
		nakon obustave rada ($t=0$)	$t=10\,000$ s nakon obustave rada
Mn-56	2,5 h	44,4	21
Fe-55	2,6 god.	24	24
Cr-51	27,8 d	12,2	12,2
Co-58	71,3 d	11,1	11,1
Mn-54	303 d	6,66	6,66
V-52	3,75 min	4,44	0
Mo-99	66,7 h	3,55	3,44
Tc-99**	6,87 h	3,55	2,7
Al-28	2,3 min	1,63	0
Co-60**	10,5 min	1,23	0
Mo-101	14,6 min	1,04	0
Tc-100	14 min	1,04	0
Co-60	5,26 god.	0,6	0,6
Ni-57	36 h	0,444	0,40

*Nakon dvogodišnjeg rada reaktora
**Nuklearna izomerna stanja

Da bi se izračunalo kolike bi doze djelovale na stanovništvo u okolišu, potrebno je načiniti niz pretpostavki o širenju te radioaktivnosti u okoliš i njezinom djelovanju. Prema studiji WASH-1400 glavni doprinos neposrednom akcidentalnom riziku dolazi od radioaktivnog oblaka, izravnim ozračenjem ili inhalacijom. Korištenjem razvijene metodologije [pregled npr. u WASH-1400] izračunate su doze na granici elektrane pri srednjim meteorološkim i drugim uvjetima, uz oslobađanje radioaktivnosti kao što je navedeno u tablici 6.14.

U tablici 6.15. prikazani su rezultati za različite materijale prve stijenke, tricij te lakovodni fisijski reaktor. U zaključku studije naglasak se stavlja na relativne odnose, budući da apsolutni iznosi bitno ovise o meteorološkim uvjetima i drugim pretpostavkama. Prema relativnim odnosima razabire se potencijalno znatno veći rizik od inducirane radioaktivnosti nego od tricija. Taj je rizik značajno ovisan o materijalu prve stijenke. Ako je materijal čelik, posljedice pretpostavljenog oslobađanja usporedive su s posljedicama teškog akcidenta na fisijskim reaktorima. Prema promatranim mehanizmima koji bi mogli voditi do taljenja prve stijenke preporuča se korištenje litija u manje reaktivnom obliku.

Autor uopće ne procjenjuje vjerojatnost pretpostavljenih oslobađanja radioaktivnosti. Autori koji su ranije promatrali isti problem [Sa 78] dobili su konzistentne rezultate za posljedice pretpostavljenog (100%) oslobođenja radioaktivnosti, ali su i primijenili probabilističku analizu pri ocjeni vjerojatnosti. Oni zaključuju da je oslobađanje radioaktivnosti neplauzibilno, odnosno da se oslobađa mnogo manji postotak radioaktivnosti pri požaru litija [Ka 81] [Ka 83].

Tablica 6.14. Opasnost od radioaktivnosti oslobođenih pri teškoj nesreći fuzijskog i fisijskog reaktora snage 1 500 MW (e). Opasnosti od pojedinih radioaktivnih izotopa izražene su volumenom zraka potrebnim za razrjeđenje oslobođene radioaktivnosti do maksimalne dopuštene koncentracije (MDK).

Izotop	Vrijeme poluraspada	Aktivnost 10^{18} Bq	Dio aktivnosti koji se oslobađa	MDK Bq/m³	Volumen zraka/10^6 km³ $t=0$	$t=30$ dana
Fuzijski uređaj s prvom stijenkom od nerđajućeg čelika						
Cr-51	27,8 d	18,5	0,20	2 960	1,3	0,6
Mn-54	313 d	10	0,20	37	54	51
Mn-56	2,58 h	66,6	0,20	740	18	0
Fe-55	2,6 a*	36,3	0,04	1 110	1,3	1,3
Co-58	71,3 d	16,7	0,20	74	45	34
Mo-99	66,74 h	5,2	0,20	260	4,0	0
H-3	12,3 a	34,4	0,80	7 400	3,7	3,7
Fisijski lakovodni reaktor**						
Kr-88	2,81 h	3,7	0,9	740	4,5	0
Sr-89	52,1 d	5,2	0,05	11	23	15
Sb-129	4,3 h	1,8	0,40	3,7	200	0
I-131	8,05 d	4,8	0,70	3,7	910	69
I-132	2,3 h	6,66	0,70	111	42	0
I-133	21 h	9,6	0,70	14,8	460	0
I-135	6,72 h	8,5	0,70	37	160	0
Te-132	3,25 d	6,66	0,40	148	18	0
Cs-134	750 d	0,4	0,40	14,8	11	11
Cs-137	30 a	0,26	0,40	18,5	5,6	5,6
Xe-135	9,22 h	1,8	0,90	3 700	0,5	0
Ba-140	12,8 d	8,9	0,05	37	12	2

*a, znak za godinu.

**Navedenih 12 izotopa daje 85% doze primljene iz radioaktivnog oblaka i udisanjem. Prema novim istraživanjima (vidi str. 226) dio aktivnosti koji se oslobađa pri udesu na fisijskom reaktoru znatno je manji od pretpostavljenog u ovoj tablici. To važi naročito za izotope joda.

6.8.2 Hibridni sustavi

Prema podacima o opasnosti od fuzijskog i fisijskog reaktora navedenim u tablicama 6.14. i 6.15. može se orijentacijski procijeniti opasnost od hibridnog sustava na temelju ovih utvrđenja:

a) Uranski je omotač hibrida potkritičan, te ne mogu nekontrolirano porasti snage u omotaču.

b) Koncentracija snage u uranskom omotaču po kilogramu urana nekoliko je puta niža nego u termičkih reaktora. Predviđeno specifično izgaranje (odgor) relativno je nisko (4 500 MWd/t u sovjetskom projektu hibridnog reaktora), pa je i relativno niska proizvodnja topline zbog radioaktivnog raspada fisijskih proizvoda. Budući da je pri gubitku rashladne tekućine (LOCA), najozbiljnijem akcidentu u fisijskih reaktora, mogućnost taljenja

Tablica 6.15. Uspoređenje ekvivalentnih doza primljenih iz radioaktivnog oblaka i udisanjem na granici elektrane pri teškoj nesreći na fuzijskom i fisijskom reaktoru (dio oslobođene aktivnosti kao u tablici 6.14.; podaci Holdren i suradnici — [Ho 1981]

Izotop	Vrijeme poluraspada	Oslobođena aktivnost / 10^{18} Bq	Doza na granici, radioaktivni oblak / Sv	Doza na granici, udisanje / Sv	Ukupna doza na granici / Sv
		Prva stijenka čelik tipa 316			
Cr-51	27,6 d	3,7	3,1	48	51
Mn-54	313 d	2	4,3	140	140
Mn-56	2,58 h	3,3	13,6	23	37
Fe-55	2,6 a*	1,5	0,9	2	2,9
Co-58	71,3 d	3,34	8,7	144	150
Mo-99	66,7 h	1,04	0,5	7	7,5
H-3	12,3 a	27,5	0	62	62
					Σ 450,4
		Prva stijenka 99,25%Nb+0,75%Zr			
Nb-92 m	10,2 d	1,07	2,7	52	55
Nb-95	35 d	0,026	0,05	0,8	0,85
H-3	12,3 a	27,5	0	62	62
					Σ 117,8
		Lakovodni fisijski reaktor**			
Kr-88	2,81 h	3,3	8,7	0,3	9
Sr-89	52,1 d	0,25	0	47	47
Sb-129	4,3 h	0,72	1,5	1,2	2,7
I-131	8,05 d	3,36	3,9	27	31
I-132	2,3 h	4,66	12,9	5,5	18
I-133	21 h	6,72	11,7	32	34
I-135	6,72 h	5,95	21	22	43
Te-132	3,25 d	2,66	2	132	134
Cs-134	750 d	0,16	0,9	44	45
Cs-137	30 a	0,104	0,2	18	18
Xe-135	9,22 h	1,62	1,2	0,15	1,4
Ba-140	12,8 d	0,445	0,25	50	50
					Σ 443,1

*a, znak za godinu.

**12 izotopa koji daju 85% doze. Primjedba o pretpostavljenom oslobađanju izotopa uz tablicu 6.14. važi i ovdje.

oksidnog goriva u reaktorima s prirodnim uranom i odgorom od 7 500 MW d/t vrlo malena, sigurnost se postiže zadržavanjem dovoljno ispod tih granica. U takvim uvjetima gubitkom rashladne tekućine samo bi se oslobodile aktivirane nečistoće, proizvodi korozije i eventualno tricij sadržan u rashladnoj tekućini. S velikom sigurnošću ove konstatacije vrijede za omotač sa potisnutom fisijom, gdje je gustoća fisijske snage daleko manja.

c) Oslobađanje velikih količina radioaktivnosti iz fisijskog omotača zamislivo je tek ako nastaje taljenje energijom vanjskih kemijskih procesa, natrijskim ili litijskim reakcijama. To su situacije, bez obzira na njihovu vjerojatnost ili nevjerojatnost, u kojima bi došlo do *zajedničkog taljenja i fuzijskog i fisijskog dijela*. Vjerojatno je da se u takvoj situaciji ipak ne bi moglo osloboditi toliko fisijskih radioaktivnosti koliko bi se oslobodilo pri teškom akcidentu fisijskog reaktora.

d) Pretpostavimo li oslobađanje fisijskih proizvoda kao u reaktorskom akcidentu, obzirom na c) to je ujedno i pretpostavka o zajedničkom taljenju čitavog sustava. U požaru i taljenju hibridnog uređaja oslobađa se i fuzijska i fisijska radioaktivnost, a ukupna emisija jest njihov zbroj. No, budući da je i ukupna snaga hibrida zbroj snage fuzijskog i fisijskog dijela, a njihovi doprinosi emisiji radioaktivnosti podjednaki (tablica 6.13), ne treba očekivati za istu snagu znatniju razliku u radioaktivnoj emisiji hibrida prema čistom fuzijskom uređaju.

Postoji, dakako, niz mogućnosti da se opasnost od požara smanji ili ukloni. Zamislivo je izdvajanje proizvodnje tricija i litija iz hibridnog sustava, ili korištenje litija u kemijski inertnom obliku.

e) Ako se isključi mogućnost taljenja hibridnog sustava u natrijskom ili litijskom požaru bilo na temelju ocjene mogućnosti ili vjerojatnosti [Ka 83], odnosno na temelju odgovarajućih tehničkih modifikacija, hibridni je sustav sigurniji od fisijskog reaktora zbog razloga navedenih u točki b). Možemo zaključiti da tvrdnja kako hibridni sustav objedinjuje najgore karakteristike fuzijskih i fisijskih reaktora nije utemeljena na činjenicama. Također možemo zaključiti da bi korištenje energije urana-238 bilo sigurnije u hibridnom sustavu nego u brzom oplodnom reaktoru.

6.9. Ekonomičnost fuzijskih elektrana

Budući da još ni prema jednoj fuzijskoj koncepciji nije ostvareno samoodržanje fuzije, promatranje ekonomičnosti fuzijskih elektrana znatnim dijelom mora biti spekulativno. Ipak za pojedine konfiguracije, npr. za tokamak uređaje, načinjen je niz projektnih studija, pa se i ekonomičnost može procijeniti s većom određenošću. Znatne neodređenosti za fuziju s inercijalnim ograničenjem plazme u vezi s tipom i karakteristikama laserskog sustava odnosno elektronskog ili ionskog akceleratora, odražavaju se i u neodređenostima investicijskih troškova.

Konvencionalni dio fuzijske elektrane, tj. parogenerator i turbogenerator neće se znatno razlikovati od tih dijelova u fisijskoj elektrani. Sam fuzijski reaktor mnogo je kompleksniji pa treba očekivati veće investicijske troškove.

Pri magnetskom ograničenju plazme cijenu će znatno povećati skupi supravodički magneti te uređaji za grijanje plazme. Odlučujući ekonomski parametar pri magnetskom ograničenju jest trajnost prve stijenke, odnosno njezino dozvoljeno opterećenje. Pri laserskoj fuziji analogno djelovanje imat će trajnost optičkih komponenata laserskog uređaja.

Studije u kojima se procjenjuju ekonomske karakteristike fuzijskog uređaja i utjecaji pojedinih parametara na njih, najrazrađenije su za tokamak uređaje. To je razumljivo budući da je već niz uređaja izgrađen.

U ekstrapolacijama na fuzijske reaktore koriste se razne teorijske i empirijske veze između fizikalnih i geometrijskih parametara reaktora. Kod zatvorenih sustava najvažnije su empirička ovisnost

vremena ograničenja o polumjeru i gustoći plazme: $\tau_E \propto a^2 N$, te ovisnost gustoće plazme o parametru β

$$N \propto \beta B^2.$$

Kako se parametar β mijenja ovisno o fizikalnim karakteristikama plazme, nije potpuno objašnjeno, iako i o tome postoje određene indikacije.

Istodobno, specijalne parametarske studije pokazuju važnost postizanja vrijednosti parametra β u području 0,05 — 0,1. Zasad su postignute vrijednosti samo oko 0,01.

Razabire se nadalje da na ekonomičnost utječe vrlo značajno materijal prve stijenke, ponajviše stupnjem otpornosti prema oštećenju zračenjem i ionskom bombardiranju, izraženim integralnim protokom energije. Utjecaj tih i niza drugih parametara na ekonomičnost elektrane istraživan je u različitim projektnim studijama.

6.9.1. Ekonomske procjene za tokamak uređaje

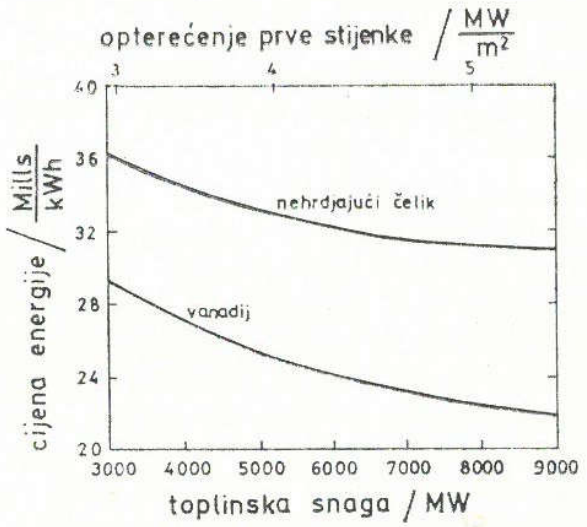
Detaljne studije utjecaja osnovnih fizikalno-tehničkih parametara na cijene energije u fuzijskoj elektrani tipa tokamak napravljene u Argonne National Laboratory [Ab 1978] pokazuju kritične tehnološke probleme o rješenju kojih ovisi ekonomičnost tokamak fuzijske elektrane. U kompleksnoj studiji glavni promatrani parametri bili su:

a) snaga elektrane,
b) toroidalno magnetsko polje,
c) parametar β,
d) omjer između polumjera plazme i glavnog polumjera,
e) elongacija plazme,
f) debljina unutrašnjeg štita i moderatora, te
g) neutronsko opterećenje stijenke reakcijske komore.

U čitavom području variranja parametara cijena energije kretala bi se između 25 i 50 mills/kW h u vrijeme dok su elektrane na ugljen odnosno fisijske nuklearne elektrane davale energiju po cijeni od 14 do 20 mills/kW h (mills: tisućiti dio jednog dolara).

Specifične investicije prema studiji bile bi od 1 200 do 2 500 $/kW(e), što nije daleko od procjena specifičnih investicija za oplodne reaktore s tekućim natrijem u to vrijeme. Specifične investicije za termičke reaktore istodobno su bile oko 700 $/kW(e) [Mitre izvještaj str. 116].

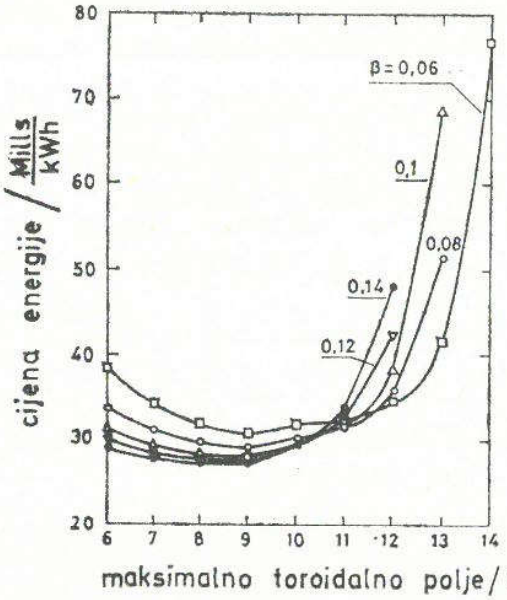
Iako su neodređenosti velike, razabire se da bi cijena energije mogla biti oko 2 do 3 puta viša nego iz termičkih reaktora. Za investicije faktor je sličan ili veći. Studije su korisne jer identificiraju parametre o kojima ekonomičnost bitno ovisi te nalaze njihove optimalne vrijednosti.



Slika 6.34. Ovisnost cijene energije o materijalu prve stijenke i veličini elektrane (Ab 1978)

Slika 6.34. pokazuje ovisnost cijene energije o toplinskoj snazi elektrane za dva različita materijala prve stijenke. Razabire se da se značajno smanjenje postiže sve do snage oko 10 000 MW(t), tj. povoljna ekonomičnost tokamak reaktora ostvarila bi se tek u vrlo velikim elektroenergetskim sustavima koji bi mogli prihvatiti jedinice od 2 000 MW(e) ili više.

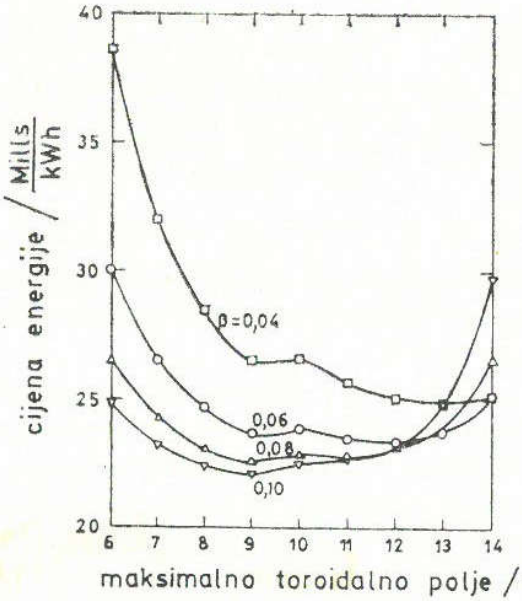
Slika 6.35. pokazuje ovisnost cijene energije o maksimalnom toroidalnom polju i parametru plazme β za fuzijski reaktor snage 3 000 MW(t) s prvom stijenkom od legure vanadija. Prema



Slika 6.35. Ovisnost cijene energije (u mills/kW h) o maksimalnom toroidalnom polju i parametru β za fuzijski reaktor snage 3 000 MW(t) s prvom stijenkom od legure vanadija

vrijednostima parametra β koje se očekuju u velikim uređajima (u području od 0,06 do 0,14) optimalne vrijednosti toroidalnog polja bile bi u intervalu od 6 T do 9 T.

Slika 6.36. za elektrane snage 7 000 MW(t) s prvom stijenkom od legure vanadija ističe veliku ovisnost cijene energije o parametru β. Istodobno raspon krivulje za pojedine vrijednosti



Slika 6.36. Ovisnost cijene energije u mills/kW h o toroidalnom polju i parametru β za tokamak elektranu snage 7 000 MW (t) s prvom stijenkom od legure vanadija (Projektna studija ANL)

parametra β pokazuje da se s povećanjem iznad β=0,08 ne postiže mnogo. Međutim mnogo se gubi ako je β manji od 0,06. Kompenzacija je moguća s dosta većim toroidalnim poljem sve do 14 T.

Vrlo je značajna ovisnost cijene energije o opterećenju prve stijenke, (izraženom u megavatima po četvornom metru, MW/m²) i o ukupnom protoku energije megavatgodini po četvornom metru (MWa*) koju prva stijenka može podnijeti prije no što se mora zbog radijacijskog i toplinskog oštećenja zamijeniti. Veće opterećenje prve stijenke omogućuje veću gustoću snage u plazmi i tako smanjuje investicije.

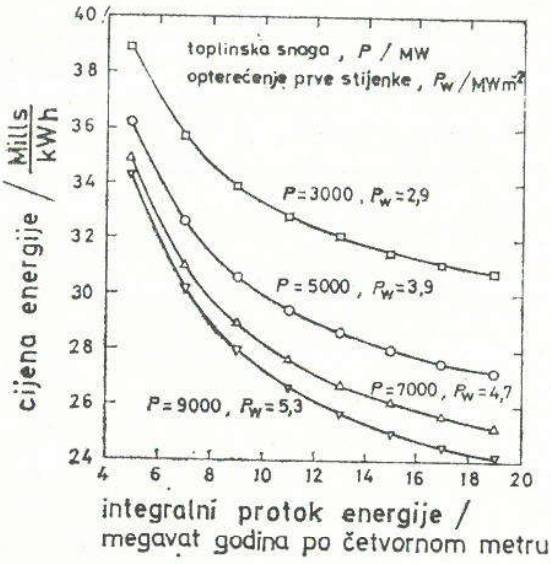
Međutim, tako se skraćuje i razmak između obaveznih zamjena prve stijenke. U analizi je uzeto da taj složeni postupak traje 80 dana. Rezultati analize pokazuju da za nerđajući čelik kao prvu stijenku, za koji se integralni protok do zamjene uzima 3,1 MWa/m², nema smisla opterećenje više od 2 MW/m².

Ako je prva stijenka legura vanadija s procijenjenim integralnim protokom snage 34 MW a/m², cijena energije za elektranu određene snage snizuje se i do opterećenja 10 MW/m². Drugim riječima, ograničeni integralni protok snage nerđajućeg čelika kao prve stijenke sprečava da se smanji investicija većom gustoćom snage. To se jasno razabire na slici 6.37.

Očito je da je razvoj materijala za prvu stijenku posebno važan za ekonomičnost fuzijskog reaktora. Opterećenje 3 MW/m² i integralni protok 12 MWa/m² omogućili bi da se postigne režim rada u kojem oštećenja prve stijenke ne bi imala pretjerano velik utjecaj na cijenu energije. Razvoj materijala s integralnim protokom oko 30 MWa/m² smanjio bi cijenu energije za 20%—35% prema cijeni energije reaktora s materijalom za koji bi integralni protok bio oko 5 MWa/m².

Druga parametarska studija tokamak reaktora rađena u Oak Ridge National Laboratory [Re 1978] dobiva slične

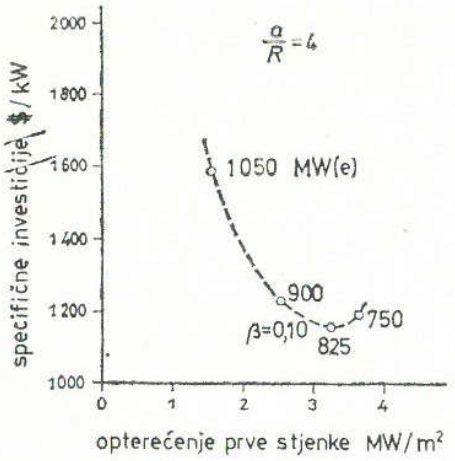
* a, znak za godinu



Slika 6.37. Osjetljivost cijene energije o opterećenju prve stijenke i integralnom protoku energije do zamjene, za različite toplinske snage elektrane i naznačene vrijednosti opterećenja prve stijenke

rezultate za izravne investicijske troškove (sl. 6.38).

Međutim, prema studiji iz ANL ova studija razlikuje se u dobivenoj ovisnosti investicijskih troškova o opterećenju prve stijenke pri stalnoj β vrijednosti. U studiji Oak Ridgea zaključuje se da krivulja specifičnih troškova ovisno o opterećenju prolazi kroz minimum za određenu snagu, i zatim opet raste. Prema studiji iz ORNL najpovoljnije opterećenje prve stijenke bi bilo oko 3 MW/m^2, a specifične investicije imaju minimum pri



Slika 6.38. Ovisnost specifičnih investicija ($/kW(e)) o opterećenju prve stijenke $\beta=0,1$. Pretpostavljen omjer polumjera plazme i polumjera torusa $a/R=4$ i eliptičnost presjeka plazme (omjer poluosi) 1.6.

električnoj snazi oko 800 MW, ako se pretpostavi vrijednost $\beta=0,1$.

Sažeti važniji zaključci studije:

a) investicijski troškovi bili bi 1 000 —2 000 $ (dolari 1976);

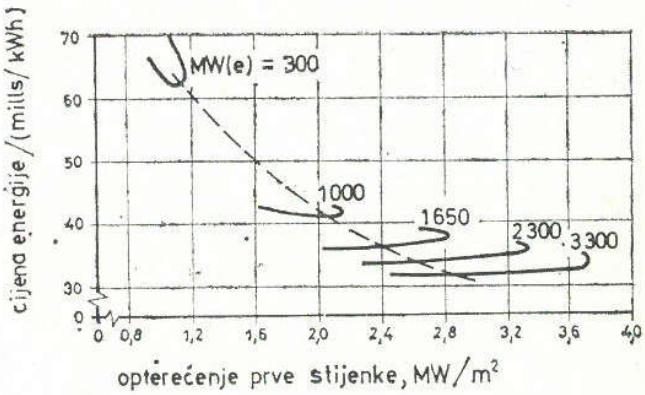
b) potrebni polumjeri plazme bili bi 1 m do 2 m, a toroidalna polja od 6 T — 11 T;

c) snage uređaja mogu biti od 500 MW (e) — 1 000 MW (e);

d) za razliku od fisijskih elektrana, tokamak elektrane velikih snaga ne moraju biti nužno povoljnije;

e) investicijski troškovi mogu se značajno smanjiti izgradnjom nekoliko jedinica na istoj lokaciji koje bi koristile zajedničku opremu;

f) opterećenje prve stijenke od 2 MW/m^2 do 4 MW/m^2 s integralnim protokom 10 MW a/m^2 — 20 MW a/m^2 optimalno je za troškove.



Slika 6.39. Ovisnost cijene energije (mills/kW h) o snazi elektrane u analizi MD 1978. (pretpostavljeno: $B_{maks}=8,66$ T i izdržljivost prve stijenke do 5 megavatgodina po četvornom metru

Manje snage mogle bi imati prednost iako specifične investicije padaju s povećanjem snage.

Na slici 6.39. prikazana je ovisnost cijene energije o opterećenju prve stijenke s različitim snagama elektrane kao parametrom, dobivena u analizi načinjenoj u kompaniji McDonnell Douglas [MD 1978]. Pri povećanju snage od 1 000 na 2 300 MW(e) smanjuju se troškovi energije za 15%, a slično se smanjuju i investicijski troškovi po jedinici snage. Međutim, kako se ukupni investicijski

troškovi za takve elektrane udvostručuju, u analizi se zaključuje da bi bilo povoljnije smanjiti snagu elektrane, koncentrirati projekt i izradu opreme na odabranu snagu i ostvariti smanjenje troškova višestrukom proizvodnjom takvih jedinica.

Takvo se shvaćanje može potkrijepiti iskustvom gradnje velikih fisijskih nuklearnih elektrana.

Cijena energije jako ovisi o raspoloživosti elektrane, i ako se izgradnjom većih jedinica znatnije gubi na raspoloživosti, ukupan ekonomski učinak može vrlo lako postati negativan. Kvantitativne ekonomske studije o toj međuovisnosti mogle bi vjerojatno naći granice opravdanog smanjenja specifičnih investicija izgradnjom sve većih jediničnih snaga.

6.9.2. Ekonomske procjene za linearne sustave

Parametarska analiza i preliminarna koncepcijska projektna studija tandemskog zrcalnog sustava rađena je u Livermoru (Lawrence Livermore National Laboratory), [Mo 1978].

Na početku projektne studije usvajaju se vrijednosti parametra β od 1 i 0,7 za središnju zavojnicu i zrcalni magnet, na temelju povoljnih rezultata u 2 X II B eksperimentu te se izabiru vrijednosti magnetskog polja i različitih efikasnosti (toplinske konverzije, izravne konverzije, umnažanja energije u moderatorskoj oblozi, generiranje neutralnih snopova).

Nakon izbora električne snage sustava utvrđeni su optimalni tehničko-fizikalni parametri, (npr. energija ubrizgavanja čestica u zrcalni magnet, temperatura iona u središnjoj zavojnici, zrcalni omjer da bi se mogli odrediti minimalni izravni investicijski troškovi.

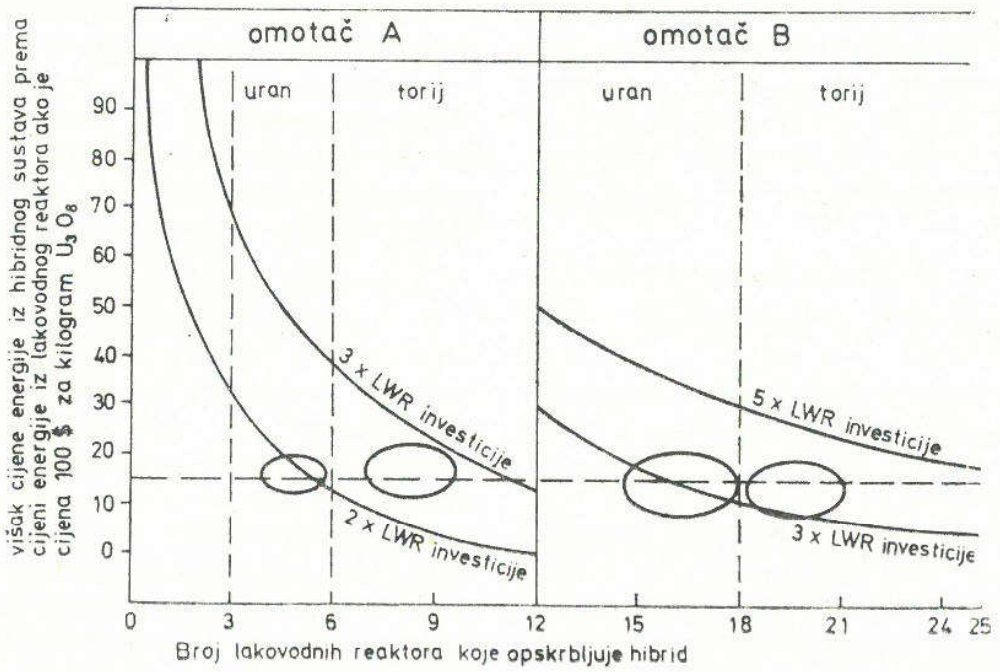
U tablicama 6.3. i 6.4. navedene su fizikalno-tehničke karakteristike optimalnog projekta, a u tablici 6.5. struktura troškova. Ukupne izravne troškove — 1 300 $/kW(e), tj. otprilike dva puta više nego za termički fisijski reaktor, ne treba uzeti suviše ozbiljno jer se kao i u tokamak reaktoru samoodržanje fuzije u linearnom sustavu tek treba ostvariti. Međutim struktura troškova pokazuje osjetljiva mjesta sustava. To su uređaji za generiranje neutralnih snopova i izravnu konverziju, te magnetska zrcala.

Ekonomska procjena linearnog sustava u ovoj studiji temelji se na koncepciji elektrostatske barijere. Uspješno uvođenje toplinske barijere smanjilo bi zahtjeve za tehnologiju završne ćelije, odnosno omogućilo povećanje faktora umnažanja energije Q. Što se očekuje prikazano je na dijagramu 6.21. Međutim, iako je jasno da se povoljnije ekonomske karakteristike moraju dobiti, koncepcija završne ćelije u sustavu s toplinskom barijerom još se mijenja, te se kvantitativna procjena relativne ekonomičnosti prema sustavu s elektrostatskom barijerom još ne može napraviti.

6.9.3. Ekonomičnost i uvođenje fuzijsko-fisijskog hibrida

U fuzijsko-fisijskom sustavu hibridna instalacija u prvom redu proizvodi fisibilne nuklide za fisijske reaktore, pa u procjeni ekonomičnosti valja promatrati čitav sustav koji se sastoji od hibridne instalacije i fisijskih reaktora koje ona opskrbljuje fisibilnim nuklidima. Već je istaknuto da hibridni sustav bitno smanjuje fizikalno-tehničke zahtjeve za fuzijski dio, relativno prema čistom fuzijskom uređaju. Ovdje želimo istaknuti značajnu ekonomsku prednost hibridnog sustava prema čistom fuzijskom uređaju. Kao što se vidi iz poglavlja 9.2.1. i 9.2.2. za ekonomičnost čistih fuzijskih uređaja bit će odlučni investicijski troškovi. Bez obzira na jeftino i obilato gorivo zbog visokih investicijskih troškova proizvedena energija bila bi skupa.

Situacija je pomalo slična procjeni za brze oplodne reaktore, gdje visoko iskorištenje urana bar u dogledno vrijeme neće imati ekonomske prednosti prema termičkim reaktorima, ako su investicijski



Slika 6.40. Cijena energije iz fuzijsko-fisijskog sustava prema cijeni energije iz lakovodnog reaktora u ovisnosti o broju lakovodnih reaktora koje opskrbljuje jedan hibrid.

Prikazane su varijante s uranom i torijem kao plodnim materijalom i s dodatnim nefisijskim slojem za umnažanje neutrona između fuzijskog uređaja i omotača. Ta varijanta ima veće investicijske troškove, ali i veću proizvodnju fisibilnog materijala

troškovi veći za 30% ili više naprama investicijama za termičke reaktore.

Ekonomska prednost hibridnog sustava prema čistom fuzijskom uređaju proizlazi iz diobe investicijskih troškova hibridne instalacije na fisijske reaktore sustava. Jasno je da je pri tome odlučan broj fisijskih reaktora (S) koje hibridna instalacija opskrbljuje fisibilnim nuklidima. Na temelju približne procjene razabire se da današnji teškovodni reaktori omogućuju da ih bude i više od 8. S naprednim ciklusima goriva moguća su znatna povećanja broja fisijskih reaktora za jednu hibridnu instalaciju iste toplinske snage.

Nadalje, u zadnjih nekoliko godina razrađuje se koncepcija fisijskog omotača u kojem se smanjuje brza fisija, ali povećava proizvodnja fisibilnih nuklida. Takvi hibridi, iako uz povećane investicije, prema objavljenim studijama [Ma 1981], mogli bi opskrbljivati gorivom do 25 lakovodnih reaktora, ili odgovarajuće veći broj teškovodnih.

Detaljno je metodologija procjene ekonomičnosti hibridnog sustava razvijena u [Be 1981].

Metodologija je primijenjena najprije na hibridni sustav s laserskim fuzijskim uređajem, a zatim općenitije u [Ma 1981], gdje su specificirani investicijski troškovi za hibridne instalacije relativno prema lakovodnim reaktorima uzeti kao promjenljivi parametar.

Na slici 6.40. prikazano je povećanje cijene energije proizvedene u hibridnom sustavu prema cijeni energije iz lakovodnog termičkog fisijskog reaktora ovisno o broju lakovodnih reaktora opskrbljenih iz hibridne instalacije. Prikazani su rezultati za dvije koncepcije omotača u hibridnoj instalaciji. Pretpostavljena je cijena urana 100 \$/kg U_3O_8 i investicijski troškovi za lakovodni reaktor 1 133 \$/kW(e). Za omotač s reduciranom fisijom učinak znatno povećanog broja reaktora koji se mogu opskrbljivati gorivom iz hibrida umanjen je povećanim

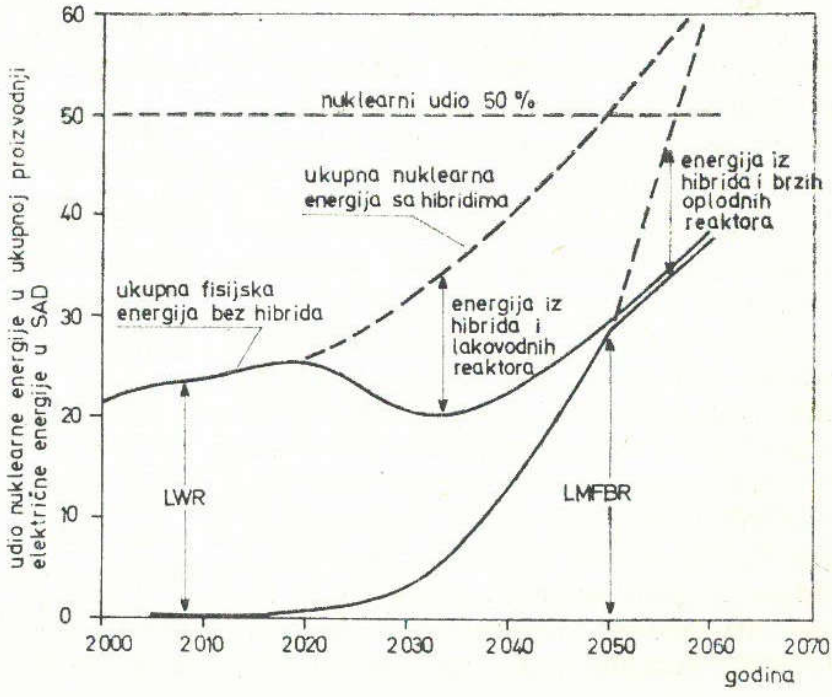
investicijskim troškovima. Međutim, taj tip omotača ima i važne tehničke, odnosno sigurnosne prednosti koje nisu vidljive iz ekonomske analize, a proizlaze iz smanjene fisijske snage hibrida.

Zaključak detaljne studije, nakon promatranja statusa pojedinih fuzijskih koncepcija, jest da hibridni sustavi omogućuju dobivanje energije u neograničenim količinama po cijeni koja nije viša od 20% od cijene energije iz lakovodnog termičkog reaktora. To je nedvojbeno vrlo značajan zaključak, prema kojemu valja ocjenjivati različite varijante dugoročnog razvoja energetike, odnosno nuklearne energetike.

Studija također pokazuje da hibridni sustav nije u svojem uvođenju ograničen kao brzi oplodni reaktor s raspoloživim količinama plutonija. Analiza za SAD koja polazi od raspoloživih rezervi urana i pretpostavke da se sav plutonij proizveden u termičkim reaktorima koristi za pokretanje brzih oplodnih reaktora, te da je njihovo vrijeme udvostručenja 18 godina, određuje postotni udio nuklearne fisijske energije u ukupnoj proizvodnji energije u SAD (sl. 6.41). Iako su se hibridi počeli razvijati 10 do 15 godina poslije brzih oplodnih reaktora, njihova izuzetno velika proizvodnja fisibilnih nuklida omogućuje veću proizvodnju nuklearne energije (crtkana linija), budući da se uklanja ograničenje za gradnju termičkih fisijskih reaktora koje inače proizlazi iz ograničenja u raspoloživoj količini fisibilnih nuklida.

6.10. Perspektiva iskorištavanja fuzije u zemljama u razvoju

Novi izvori energije osobito su važni za velik broj zemalja u razvoju koje nemaju velike rezerve konvencionalnih goriva. Kao što je poznato, i ranije istaknuto, zbog mnogo subjektivnih i objektivnih razloga mnoge nedovoljno razvijene zemlje razvijaju se polaganije nego što se predviđalo i nego što je neophodno da bi se premostio raskorak između bogatih i siromašnih zemalja svijeta. Prema sadašnjim tendencijama razvoja taj se raskorak neće bitno smanjiti na prijelazu stoljeća pa će industrijska razvijenost danas nerazvijenih zemalja biti i tada ispod današnje razine industrijski razvijenih zemalja. Prema tome treba očekivati da će se fuzijska energija zbog svoje kompleksnosti u tim zemljama početi koristiti tek niz godina nakon početka korištenja u visokorazvijenim zemljama. Koliko će to zakašnjenje biti ovisit će i



Slika 6.41. Projekcije razvoja proizvodnje nuklearne energije u SAD pri ograničenim rezervama urana (pretpostavlja se 3 milijuna tona) s uvođenjem fuzijsko-fisijskih hibrida i bez njih (Ma 1981)

o nekim budućim tehničkim rješenjima, čije razjašnjenje leži u budućnosti. Jedan od tih bit će opredjeljenje za fuziju magnetskim ograničenjem ili za inercijalno ograničenje.

Ako budući razvoj dade prednost magnetskom ograničenju plazme, tada će vrlo važna biti veličina fuzijskog uređaja. U raspravljanju o tokamak uređajima naveli smo tehnološke probleme povezane uz tu koncepciju magnetskog ograničenja. Važne spoznaje o tome možemo očekivati oko 1987. godine.

Male zemlje, odnosno zemlje u razvoju učinit će dobro ako se u međuvremenu budu pripremale za budućnost praćenjem fizikalnih problema kontrolirane fuzije i onih tehnoloških problema koji nisu posebno ovisni o koncepcijama fuzijskog uređaja. Neovisno o izboru magnetskog ili inercijalnog ograničenja plazme mogu se istraživati materijali sposobni da podnose intenzivne neutronske tokove, od velike važnosti u obje osnovne orijentacije.

Za magnetsko ograničenje gotovo svake konfiguracije problem su uređaji za zagrijavanje plazme i supravodički magneti.

Takva istraživanja i tehnologija, osim pri magnetskom ograničenju plazme, mogu se primijeniti i u nizu drugih područja i tehnike.

Usporedno s objašnjenjem perspektive pojedinih fuzijskih koncepcija takva će istraživanja moći postajati određenija i specifičnija i svakako pomoći da se smanji zaostajanje u korištenju fuzije u razvijenim zemljama.

Fuzija može dugoročno riješiti energetske potrebe svijeta, pa tako i zemalja u razvoju. Rad na razvijanju fuzije očito je vrlo važan, ali naravno ne važniji od razvoja onih izvora koji trebaju pokrivati energetske potrebe tih zemalja u podužem razdoblju do razvoja fuzijskih elektrana. Vjerojatno optimistički procijenjeno 30-godišnje razdoblje za razvoj termonuklearne fuzije dobiva se ako se predvidi 5 godina do postizavanja samoodržanja fuzije, 10 godina za izgradnju demonstracijske fuzijske elektrane, još deset za izgradnju prve komercijalne termonuklearne elektrane, te još 5 godina do izgradnje takvih objekata i u zemljama u razvoju. Još barem 15 godina nakon toga bit će potrebno da izgradnjom niza fuzijskih elektrana proizvodnja fuzijske energije znatnijim dijelom sudjeluje u ukupnoj proizvodnji energije. Tako će još barem 45 godina biti potrebni drugi izvori energije.

Ipak valja napomenuti da su to ekstrapolacije prema današnjem stanju, a iznenađenja s ubrzanjem razvoja također nisu isključena. Spor razvoj velikim dijelom uzrokuju glomazne instalacije koje su potrebne i za magnetsko i za inercijalno ograničenje. No, ako bi npr. uređaj s obrtanjem polja bio uspješan, mogli bi se graditi reaktori male snage i malih dimenzija To bi znatno olakšalo razvoj i ubrzalo primjenu fuzije, ali i činilo mnogo realnijima mogućnosti zemalja u razvoju, odnosno malih zemalja.

Prognoze o „čistim" fuzijskim sustavima može također demantirati razvoj fuzijsko-fisijskih hibrida. Valja napomenuti da za razvoj hibridnih sustava, interesi nuklearnih zemalja i zemalja u razvoju ne moraju biti istovjetni, te je stoga nužno obratiti pažnju na ovu perspektivu i na reperkusije takvog razvoja.

Hibridni sustavi mogu biti osobito interesantni za zemlje u razvoju zbog nekoliko razloga:

a) Oni mogu postati međunarodni ili regionalni proizvođači fisibilnih nuklida, što će omogućiti da osnovni teret proizvodnje energije nose termički fisijski reaktori u znatno daljoj, odnosno neograničenoj budućnosti.

b) Mogu se uvesti i ranije, zbog reduciranih zahtjeva za fuzijski dio sustava.

c) Transformacijom urana-238 u plutonij-239 oni omogućuju dugoročno rješenje energetskih problema s relativno malim udjelom fuzijske tehnologije i bitnim udjelom razvijene fisijske tehnologije.

Fuzija; dostignuća i perspektive

Nakon petnaestak godina istraživanja u fizici visokotemperaturne plazme prvi značajan napredak u ograničenju plazme postignut je krajem 60-ih godina s toroidalnim uređajima u SSSR-u, odnosno na tokamaku T-3 i kasnijoj varijanti T-3A. Niz uređaja takvog tipa izgrađen je u početku 70-ih godina u više zemalja.

Za istraživanje fuzije u 70-im godinama karakterističan je znatni napredak u približavanju fuzijskim uvjetima u uređajima tipa tokamak. Rekordna temperatura oko 70 milijuna stupnjeva postignuta je u PLT uređaju u Princetonu, a najveća vrijednost umnoška $N\tau_E$ postignuta je američkim uređajem ALCATOR. Utvrđene su parametarske ovisnosti vremena ograničenja plazme o karakteristikama plazme i uređaja koje omogućuju ekstrapolaciju za fuzijske uvjete i reaktorsku plazmu.

Vrlo je važan napredak postignut u metodama grijanja plazme u tokamacima, u kojima je omsko grijanje ograničeno uvjetima stabilnosti. Osnovni problem istraživanja s tokamak uređajima bit će razumijevanje anomalnog prijenosa energije normalno na linije magnetskog polja. Pitanje je da li će ekstrapolacija parametarskih ovisnosti vremena ograničenja plazme τ_E vrijediti i pri gustoćama i temperaturama fuzijske plazme. Značajan su problem i makroskopske nestabilnosti određenog tipa (disruption) i njihova ovisnost o gustoći plazme i faktoru q. Odgovore na ta pitanja dat će sljedeća generacija tokamak uređaja (TFTR, JT-60, T-15, JET) u idućih nekoliko godina. Pri kraju 70-ih godina postignut je napredak i u linearnom sustavu s magnetskim ograničenjem, koji — iako dalje od postizavanja samoodržanja fuzije— zbog povoljnije konfiguracije ponovo postaje realna perspektiva u magnetskom ograničenju.

Nova perspektiva temelji se na povoljnim rezultatima s američkim uređajem 2 XII-B, te na prijedlozima tandemskog zrcalnog sustava s elektrostatskom i toplinskom barijerom. Te će se koncepcije također provjeriti u nekoliko godina, najprije s uređajem TMX-U. Najznačajniji uređaj tog tipa u gradnji jest TMFR-B u Livermoru, LLNL.

Na temelju uspjeha s 2 XII B uređajem intenziviran je rad i na koncepciji ograničenja plazme s obrnutim poljem. Iako ima otvorenih pitanja u vezi sa stabilnošću plazme, koncepcija je atraktivna jer bi omogućila gradnju reaktora male snage, čak od 5 MW do 10 MW. U 70-im godinama razvija se teorijski i eksperimentalno inercijalno ograničenje plazme. U tom razdoblju najviše su se istraživali laseri kao izvor energije za zagrijavanje i kompresiju plazme. Pred kraj 70-ih godina počinje i razvoj drugih mogućnosti, osobito grijanja i kompresije plazme elektronskim snopovima. Za fuziju s inercijalnim ograničenjem perspektiva nije tako određena kao za magnetsko ograničenje, s kojim se približavanje fuzijskim uvjetima ili njihovo postizanje očekuje u nekoliko velikih uređaja što se grade. Eksperimentalno istrativanje fizikalnih procesa pri kompresiji goriva tek je nedavno započelo izgradnjom lasera energije oko 10 kJ. Na temelju tih studija moći će se optimalno odrediti kuglica goriva. Laseri koji će ući u pogon idućih godina s energijom pulsa reda 100 kJ trebali bi omogućiti faktor kompresije reda 10^3. Postizanje fuzijskih uvjeta s Nd-laserima ostavilo bi i dalje otvoreno pitanje o načinu grijanja i kompresiji plazme u reaktorskom sustavu. To su pitanja na koja će se dobiti odgovor s pomoću velikih CO_2-lasera *(Antares)* i velikih uređaja s elektronskim snopovima *(Angara*-V). Tek tada moći će se realnije postaviti koncepcija fuzijskog reaktora s inercijalnim ograničenjem plazme.

Približno oko godine 1987. razjasnit će se perspektiva različitih pristupa nuklearnoj fuziji; neki će otpasti ili zbog fizikalnih razloga, ili zato što neće moći biti polazište u razvoju do ekonomski prihvatljivog reaktora. S manje kandidata u idućem razdoblju, gradnjom nove generacije fuzijskih uređaja, moći će se detaljnije procijeniti ekonomičnost i razviti tehnologija svih dijelova termonuklearne elektrane, uključivši proizvodnju i ekstrakciju tricija.

Istodobno s približavanjem fuzijskim uvjetima sve se detaljnije određuju i procjenjuju tehnički i tehnološki problemi izgradnje fuzijske elektrane. Obavljaju se pripreme za ubrzanje razvoja nakon postizanja fuzijskih uvjeta, a nastoje se indentificirati one fuzijske koncepcije i geometrijski oblici koji postavljaju manje tehničke i tehnološke zahtjeve, odnosno one u kojih su oni suviše teški, bez obzira na povoljnu mogućnost postizanja fuzijskih uvjeta.

Zato su načinjene različite projektne studije za niz geometrijskih oblika i koncepcija, no najdetaljnije za tokamak reaktore. Projektne studije omogućuju i prethodne procjene investicijskih troškova, te uočavanje dijelova i parametara o kojima oni osobito ovise. Zasad procjene nisu povoljne za fuzijske elektrane. Skupi uređaji za grijanje plazme i skupi supravodički magneti daju i visoke investicije za uređaje s magnetskim ograničenjem, barem 2 puta više od specifičnih investicija za fisijske elektrane tipa PWR.

Za inercijalno ograničenje plazme situacija je manje jasna, ali nema razloga očekivati da će biti povoljnija. Niska djelotvornost lasera rezultira visokim troškovima laserskog sustava za grijanje i kompresiju plazme. Povoljnije je grijanje i kompresija elektronskim snopovima.

Međutim, koliko je takvo zagrijavanje povoljno i prema karakteristikama pulsa treba tek objasniti.

U sadašnjem trenutku može se reći da se projektne studije temelje na ovisnostima vremena ograničenja o parametrima plazme i karakteristikama uređaja, utvrđenim u uvjetima vrlo rezličitim od fuzijskih uvjeta. Iako se ekstrapolacije na fuzijske uvjete mogu smatrati optimističkim, ipak ne daju povoljne ekonomske karakteristike fuzijskih elektrana To je možda najkritičnije pitanje za perspektivu nuklearne fuzije, za oba načina ograničenja plazme.

Situacija se, međutim, značajno mijenja ako se umjesto „čiste" fuzijske elektrane promatra hibridni fisijsko-fuzijski sustav, koji dijeli visoke investicijske troškove fuzijske elektrane na sustav fisijskih elektrana koje opskrbljuje uranom-233 ili plutonijem-239. Može ga se ekonomski procijeniti u konkurenciji s brzim ili termičkim oplodnim reaktorima, odnosno s akceleratorskom proizvodnjom fisibilnih nuklida. Valja napomenuti da je fuzijsko-fisijski sustav s reduciranim zahtjevima za fuzijski dio, veoma pogodna etapa i polazište za razvoj čistog fuzijskog sustava u budućnosti. Kroz fuzijsko-fisijski sustav fuzija može dati prilog rješavanju energetskih problema znatno prije postizanja ekonomičnosti u čistim fuzijskim uređajima u daljoj budućnosti.

Valja, međutim, zapamtiti i to da bi fuzijsko-fisijski sustav kao obilat proizvođač fisibilnih nuklida u razvoju mogao biti podložan svim ograničenjima i preprekama kao i šira upotreba fisijske energije jer još nema napretka u nuklearnom razoružanju.

Literatura

[Ab 78] Abdau, M. A., D., Ehst, V., Maroni, V. M., Starey; *Impact of Major Design Parameters on the Economics of Tokamak Power Plants*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA, Vienna, 1978.

[Av 78] Avery R., et al.: *Fusion-fission hybrid study*, Argonne National Laboratory, Argonne, Il., July 1978.

[Ba 79] Baldwin, D.E., B.G., Logan, T.K., Fowler: *An Improved Tandem Mirror Fusion Reactor*, UCID — 18156, LLNL Livermore, Ca. 1979.

[Ba 80] Badger, B., et. al.: *WITAMIR-I*, a University of Wisconsin Tandem Mirror Reactor Design, UWFDM — 400

[Be 78] Bender D.I., et al.: *The Mirror hybrid (fusion-fission) reactor*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA Vienna 1978.

[Be 81] Berwald, D.H., J.A., Maniscalco: *An Economic Method for Symbiotic Fusion — Fission Electricity Generation Systems*, Nuclear Technology, January (1981) 128

[Be 81] Berwald, D.H., I.A., Maniscalco: *Performance and Economics Analysis of Several Laser Fusion Breeder Fueled Electricity Generation Systems*, Nuclear Technology / Fusion, Jan. (1981) 137

[Bo 49] Bohm, D., *The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields*, Mc Graw Hill, 1949.

[Bo 79] Boghosian, D.M., D.A., Lappa, B.G., Logan: *Physics Parameters Calculation for a Tandem Mirror Reactor with Thermal Barriers* UCID — 18314, LLNL, 1979.

[Br 74] Brueckner, K.A., S., Jorna: *Laser-driven fusion*, Rev. Mod. Physics 46, (1974) 325

[Ca 81] Campbell, E.M.: *Wavelength scaling experiments at the Argus laser facility*, Spring College on Fusion Energy, ICTP, Trieste, 26 May — 1. June 1981.

[Co 78] Conn R.W., et al: *The SOLASE Laser Fusion Reactor Design and its Technological Implications*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA, 1987. 269

[Di 76] Dimov, G.I., V.V., Zaksifskov, M.E., Krišnievski: *Open Trap with Ambipolar Mirrors*, Fizika Plazmi 2, (1976) 597

[Em 74] Emmet, I.L., I., Nuckalls, I., Wood: *Fusion power by laser implosion*, Scientific American, June (1974) 24

[Fe 81] Fedorov, M.V.: *FEL: Amplification, Multiphoton Transitions, Saturation and Geometry*, IEEE Journal of Quantum Electronics, August (1981)

[Fo 77] Fowler T.K., B.G., Logan: *Tandem Mirros Reactor*, Comments on Plasma Pyhsics 2, (1977), 167

[Go 78] Golovin I.N., et al.: *The nuclear fuel problem and fusion-fission hybrid reactors*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA, Vienna, 1978.

[Gr 83] Gritton D.H., et al: *Novette Pulse Power System Description*, Nuclear Technology Vol. 4, Sept. (1983) 955

[Ha 77] Hagler, M.O., M., Kristiansen: *An introduction to controlled thermonuclear fusion*, Lexington Books, Lexington, Massachusetts, Toronto, 1977.

[Ha 81] Hays, G.N., G.A., Fisk: *Chemically Pumped Iodine Laser as Fusion Driver*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Sept. (1981)

[Ho 81] Holdren, I.P.: *Contribution of Activation Products to Fusion Accident Risk*, Part I A Preliminary Investigation, Nuclear Technology, Jan. (1981) 79

[Im 77] *Proceedings of an Infornmation Meeting on Accelerator Breeding*, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, Jan. 18—19, 1977, CONF — 770107

[IN 80] INTOR: *Report on Int. Tokamak Reactor Workshop*, Vienna, Feb., June, Oct., Dec. 1979, IAEA, Vienna 1980.

[Ka 75] Kamash., T.: *Fusion reactor physics*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan, 1975.

[Ka 81] Kazimi, M.S.: *Comment on Contribution of Activation Products to Fusion Accident Risk* — Part I A Preliminary Investigation, Nuclear Technology / Fusion, July (1981)

[Ka 83] Kazimi, M.S.: *Risk Considerations for Fusion Energy*, Nuclear Technology, Vol. 4, Sept. (1983) 527

[Kr 81] Kroll, N.B., P.L., Morton, M.N., Rosenbluth: *FEP with Variable Parameter Wigglers*, IEEE Journal of Quantum Electronics, August (1981)

[Lo 80] Logan B.G., et al: *Tandem Mirror Reactors with Thermal Barriers*, UCRL — 83505, LLNL 1980.

[Lo 81] Lowdermilk, W.H., D., Milam: *Laser Induced Surface and Coating Damage*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Spt. (1981)

[Lo 81] Lowenthal, D.D., et al.: *Conceptual Design of an Angular Multiplexed 50 kJ Kr F Amplifier for ICF*, IEEE Journal of Quantum Electronics, Sept. (1981)

[Ma 81] Maniscalco, J.A., D.H., Berwald, R.B., Campell, R.W., Moir, J.D., Lee: *Recent Progress in Fusion—Fission Reactor Desing Studies*, Nuclear Technology/Fusion, Oct. (1981) 419

[Ma 78] McKone, T.E.: *Environmetal Effects of Normal and Off-Normal Releases of Tritium from CTR Systems*, ER — 879, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1978.

[Md 78] Freece, D.A., McDonnel Douglas AC: *Fusion Energy; Utility Requirements and Economics of Fusion*, Reactor Design Concepts, IAEA, Vienna, 1978.

[Mo 78] Moir, R.W., et al.: *Tandem Mirror Reactor*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA, Vienna, 1978.

[Mo 78] Moir, R.W., et al.: *The tandem mirror reactor*, Fusion reactor design concepts, Proc. tech. comm, meeting and workshop, Madison, 10-21 Oct. 1977. IAEA, Vienna, 1978.

[Mo 74] Morse, R.: *Laser fusion, high energy lasers and their applications*, Ed. Jacobs et al., Addison — Wesley, (1974) 391

[Mu 79] Murakomi, M., H.P., Eubank: *Recent progress in tokamak experiments*, Physics Today, May (1979)

[Nu 82] Nuckols, J.H.,: *The feasibility of intertial confinement fusion*, Physics Today, Sept. (1982) 24

[PT 77] Editorial: *Tests show CO_2 Laser is suitable for fusion*, Physics Today, Sept. (1977) 19

[PT 78] Editorial: *Foster group urges more engineering, more physics of fusion*, Physics Today, Sept. (1978) 85

[Re 78] Ready, I.F.: *Industrial application of lasers*, Academic Press, New York, 1978.

[Re 78] Reid, R.L., O., Steiner, ORNL: *An Economic Evaluation of Tokamak Power Plant*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA, Vienna, 1978.

[Sa 78] Sawdue, R.W., M.S., Kazimi: *Application of Probabilistic Consequence Analysis to the Assessment of Potential Radiological Hazards of Fusion Reactors*, MITNE — 220, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1978.

[Se 80] Seka W., et al.: *Demonstration of high efficiency third harmonic generatoin of high power Nd glass laser radiation*, Opt. Communication Vol 34, Sept. (1980)

[Si 81] Simmons, W.W., J.T., Hunt, W.E., Warren: *Light Propagation Trough Large Laser Systems*, IEEE Jaurnal of Quantum Electronics, Sept. (1981)

[St 81] Stenholm, S.T., A., Bambini: *Single particle theory of FEL in a moving frame*, IEEE Journal of Quantum Electronics, August (1981)

[UC 76] *Laser Fusion Hybrid Reactor Systems Study*, UCRL — 13720, Bechtel Co for LLNL, 1976.

[UW 75] Badger B., et al.: *UWMAK-II, A conceptual Tokamak Power Reactor Design*, UWFDM — 112, Nuclear Engineering Department, The University of Wisconsin, 1975.

[Ve 78] Velikhov, E.P., et al.: *Fusion-fission hybrid Tokamak reactor for the production of fissile fuel and electric energy*, Fusion Reactor Design Concepts, IAEA, Vienna, 1978.

[Ya 80] Yamanaka, C.: *Intertial Confinement*, Nuclear Fusion, Vol. 20, No 9, (1980) 1084

[Ya 80] Yamanaka, C.: *Advances in Intertial-Confinement Systems*, Nuclear Fusion, Vol. 20, No 4, (1980) 507

[Yo 78] Yonas, G.: *Fusion power with particle beams*, Scientific American, Nov. (1978)

Opća literatura o fuziji

Kamash, T.: *Fusion Reactor Physics*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Midrigan, 1975.

Chen, F.F.: *Introduction to Plasma Physics*, Plenum Press, New York, London, 1974.

Hagler, Kristiansen: *An Introduction to Controlled Thermonuclear Fusion*, Lexington Books, Lexington 1977.

Fusion Energy — 1981, Selected Lectures, International Centre for Theoretical Physics, Trieste, 1981.

Motz, H.: *The Physics of Laser Fusion*, Academic Press, New York, 1979.

Dolan, T.I.: *Fusion Research*, Pergamon Press, New York, 1982.

Kazalo

A

akceleratorsko-fisijski sustav, 322
aktualizacija energije, 244
aktualizirani troškovi, 243
akumulatori, 104
ALARA princip, 213
albedo, 50
Alfvenovi valovi, 279
alge, 137
Američko fizikalno društvo, 219
američki zakoni o nešírenju nuklearnog oružja, 258
američki zakon o razvoju fuzije, 296
AM 0, 57
anaerobična fermentacija, 138
Angström-Pageova relacija, 62
anomalna difuzija, 277
„Atomi za mir", 257
apsorber, 72
— omjer selektivnosti 79
apsorbirana doza, 207
apsorpcijski faktor (apsorptancija), 49, 75, 78
apsorpcijski sistem za hlađenje, 120
apsorpcijski udarni presjek, 153

B

Banka za nuklearno gorivo, 260
bilanca snage ravnog kolektora, 83
biokonverzija, 134
biomasa, 134
biološki efekti zračenja, 206
— doze, 207
— genetski, 208, 209
— kasni, 207
— rani, 207
— somatski, 207, 209
bioplin, 138
Birkhoferov izvještaj o sigurnosti, 224
Bohmova difuzija, 277
Bouguer-Lambertov zakon, 57
British Thermal Unit, BTU, 7
brzi oplodni reaktori, FBR, 155
brzi oplodni reaktori, 173, 252
— bilanca goriva, 177
— glavne karakteristike, 176
— omotač, 173
— pregled, 176
— vanjski faktor oplodnje, 173
„Buchsbaumov izvještaj", 296
β—faktor, 273

C

Calvinov ciklus, 135
CANDU reaktor, 154
C4 biljke, 135
Centar za nuklearnu sigurnost, NSAC, 230
cijena energije, 243
cijena energije, pogonske vrijednosti
— Sjedinjene Države, 248
— usporedba cijena energije za različite elektrane, 247
— Velika Britanija, 247
ciklus goriva, 179
Collares-Pereirova formula, 65
Commonwealth Edison kompanija, 248
crni krom, 80
crni nikal, 80
C3 biljke, 135

D

defekt mase, 39
deklinacija Sunca, 53
difuzija iz plinske plazme, 269
difuzija u plinskoj plazmi, 276
dijamagnetizam plinske plazme, 272
direktna konverzija, 289
direktno pasivno zagrijavanje, 118
dobivanje tople vode, 105
„drvo kvarova", 217

E

efektivne relativne investicije FBR/PWR, 252
efektivne relativne investicije PHWR/PWR, 252
efikasnost kolektora, 83, 86
egzitancija, 49
ekonomičnost nuklearnih elektrana, 247
ekonomičnost solarnog sustava, 115
ekonomske procjene fuzijskih elektrana
— s linearnim uređajima, 331
— s tokamak uređajima, 328
ekstraterestrička ozračenost plohe, 56
ekstraterestričko ozračenje, 52
ekstraterestričko zračenje, 51, 52
ekvivalentna doza, 207, 210, 213
elektrane na ugljen prema nuklearnim, 245
električna energija iz sunčane 122
elektronsko ciklotronsko rezonantno grijanje, 279
elementi goriva, 187, 189
emisija CO_2
— porast koncentracije, 27
— važnost problema, 27
— vjerojatni efekti, 27
— vremenska skala, 27
emisija sumpor-dioksida, 205
emisijski faktor (emitancija), 50, 78
energetske sirovine
— nafta, 25, 26
— ugljen, 25, 26
— uran, 38, 238
— zemni plin, 26
energetski koeficijent, 10
energetski sadržaj
— granita, 42
— uranske rudače, 42
— vode, 42

energija
— prognoza potrošnje, 9, 17
— specifična potrošnja po stanovniku, 8, 17
— stope rasta, 10, 17
— ukupna godišnja potrošnja, 14
energija i dohodak
— opća ovisnost, 15
— ograničenja, 16
energija iz biomase, 136, 137
energija i zemlje u razvoju
— moguća uloga nuklearne energije, 18
— nafta u planovima razvoja, 17
— razlike u potrošnji, 8
— stopa rasta potrošnje energije, 16
energija vezanja
— jezgre atoma, 39
— po nukleonu, 40
energija zračenja, 49
EPRI, 223
ERDA, 212
Ergenova komisija, 216
etanol kao pogonsko gorivo, 137

F

f-dijagrami, 112
faktor biološke djelotvornosti, (modifikacije), 207
faktor konverzije, 151
faktor multiplikacije, 149
faktor raspoloživosti, 158
faktor upadnog kuta, 91
faze ciklusa goriva, 179
feredoksin, 136
fisibilne jezgre, 147
fisibilni nuklidi
— plutonij-239, 147
— plutonij-241, 147
— uran-233, 147
— uran-235, 147
fisijska nuklearna energija, 40
— po jednoj fisiji, 41
— po kilogramu urana, 41
— potencijal, 42
— prognoze razvoja, 18
— raspodjela, 41
fosilna goriva, konačno iskoristive rezerve, 26
fotonaponska konverzija, 122
fotorespiracija, 135
fotosfera, 50
fotosinteza, 135
fuzija, 38
— brzina reakcije, 267
— gustoća snage, 268
— kritična masa, 271
— najvažnije reakcije, 265, 266
— *Q*-faktor pojačanja, 270, 301
— udarni presjek, 266
fuzija elektronskim snopovima, 315
fuzija snopovima teških iona, 317
fuzijska mikroeksplozija, 297
fuzijska nuklearna energija, 40
— po kilogramu D, T smjese, 41
— potencijal, 41, 42
fuzijsko-fisijski hibrid, 317
— dugoročna perspektiva, 321
— ekonomski parametri, 319, 331
— energetski odnosi, 318
— fizikalni principi, 317
— projektne studije, 320
fuzijsko-fisijski hibridi s potisnutom fisijom, 322
fuzijsko-fisijski hibridni sustav, 317
— glavne reakcije, 318
— fisijska obloga, 318

G

galij-arsenid, 131
geotermička energija
— iskorištavanje, 29
— podzemnih fluida, 30, 31
— procjene potencijala, 30
— prognoze, 30
geotermička energija suhih stijena, 31
— iskorištavanje, 32
— kritičke procjene, 32, 33
— teorijski potencijal, 31, 33
gospodarenje gorivom, 189
granična cijena urana za uvođenje brzog oplodnog reaktora, 254
granična cijena urana za uvođenje termičkog oplodnog reaktora, 256
granični Q-faktor, 290

H

heliograf, 58
helikoidalno polje, 276
heliostati, 94
heterogeni reaktori, 153, 187
hipoteza vruće čestice, 214
Hirošima, Nagasaki, 256
HWR, 154

I

IADA, 257
implozija kuglice goriva, 300
indeks prozračnosti, 66
inercijalno ograničenje plazme, 269, 297
projektna studija SOLASE, 313
inicirajući kvarovi, 217
INPO, 230
insolacija, 58
instalacije za obogaćenje urana
— difuzijske, SAD, 183
— u svijetu, 185
Institut „Boris Kidrič", 43
Institut „Jože Štefan", 43
Institut „Ruđer Bošković", 43
Institut za pogon NE, 43
inverzno zakočno zračenja, 299
ionsko ciklotronsko rezonantno grijanje, 279
izvještaj WASH-1400, 217

izvori energije, 21
— dugoročne promjene, 23
— konvencionalni, 21
— nekonvencionalni, 21
— obnovljivi, 23
— procjene potencijala, 24

J

jednadžba ravnog kolektora, 84
Jin-Jang zavojnice, 291, 294

K

kadmij-sulfid, 131
karte raspodjele zračenja, 63
Kemenyjeva komisija, 229
klasifikacija zaliha urana, 237
klorofil, 135
koeficijent difuzije, 277
koeficijent toplinskih gubitaka, 81, 90
kolektor, 72, 81
— koncentrirajući, 93
— omjer koncentriranja, 94
Komisija za nuklearno zakonodavstvo, SAD, 212
kompjutorska simulacija rada solarnih sustava, 111
kompresijski sistem za hlađenje, 120
kontrola reaktora, 150
konverzija goriva, 150
korona, 50
košuljica goriva, 188, 189
kritična masa, 149
kromosfera, 50
kumulativna raspoloživost, 160
kut izlaska (zalaska) Sunca, 55
kuglica goriva (za fuziju), 297

L

lakovodni reaktori, LWR, 153
lakovodni reaktori
— energetske karakteristike, 162, 164
— karakteristike goriva, 162, 164
— karakteristike jezgre, 162, 164
— potrošnja urana, 163, 164
— proizvodnja plutonija, 163, 164
lančana reakcija
— divergentna, 149
— konvergentna, 149
— kritična masa, 150
laseri za fuziju
— CO_2 laseri, 306
— najvažnije instalacije, 309, 310
— nelinearni optički efekti, 306
— neodimski laseri, 306
— sa slobodnim elektronima, 309
— superfluorescencija, 305
laserska kompresija goriva, 299
latentna toplina, 101
Lawsonov kriterij, 270
Lilienthal-Baruchov plan, 257
linearni sustavi, 288
linearni sustav s termičkom barijerom, 293
Liu, Jordanova, Lleinova relacija, 66
— modificirana za naše područje, 67
LMFBR reaktor, 155
LOFT uređaj, 216
logaritamsko smanjenje energije, 152
Londonski klub, 258

M

MAAE, 257
magnetska jama, 275
magnetski tlak, 271
magnetsko ograničenje plazme, 271
Međunarodna agencija za atomsku energiju, 257
Međunarodna procjena ciklusa goriva, INFCE, 234, 259
megavatdan, 7
metan, 138
metode uskladištenja energije, 96
mikrobalon goriva (za fuziju), 301
mikronestabilnosti plazme, 277
mjesno vrijeme, 53
modeliranje laserskog pulsa, 300
moderator, 149, 153
moderacija neutrona, 152
MRC, Velika Britanija, 214
MW godina, 7

N

nafta
— dokazane iskoristive rezerve, 25
— proizvodnja, 25
— trajnost rezervi, 25
narodni dohodak
— stope rasta, 12, 13
nekonvencionalni izvori urana
— fosfati, 240
— morska voda, 241
— ugljen, 241
— uljni škriljci, 241
NE *Otok tri milje*
— nesreća na, 229
— utjecaj na okoliš, 229
neutralni snopovi čestica, 278
neutronski prinos, 148
neutronski fisijski spektar, 148
niže hibridno rezonantno grijanje, 279
Noel-Baker, 257
nominalne relativne investicije FBR/PWR, 251
nominalne relativne investicije PHWR/PWR, 251
NRPB, Velika Britanija, 214
Nuklearna elektrana *Krško*, 44
nuklearna energija, 38, 40, 203
— dugoročni potencijal, 38
nuklearna fisija, 145
— fuzija, 285
nuklearne reakcije
— defekt mase, 39
— fisije, 40
— fuzije, 40
— Q vrijenost, 39
— udarni presjek, 145
— zakoni sačuvanja, 39

nuklearne transformacije, 38
nuklearni rizici, 200, 204
— Cohen, 233
— drugi rizici, 225, 231, 232, 233
— laseri, 304
— prema njemačkoj studiji sigurnosti, 225
— prema WASH-1400, 219
— Pochin, 232
— Sjedinjene Države, 219
— SR Njemačka, 225
— Ujedinjeni Narodi, 232
— Velika Britanija, 213, 231
nuklearni reaktor, 150
nuklearno zakonodavstvo, 228
njemački sigurnosni izvještaj, 224

O

obogaćenje urana, 181
— aerodinamičke metode, 182
— centrifugalna metoda, 182
— difuzijska metoda, 181
— kemijske metode, 184
— separacijski efekt, 182
— separacijski rad, 182
— specifični potrošak energije, 184
obnovljivi izvori energije, 23
— ostvariv potencijal, 24
— teorijski potencijal, 24
odlaganje radioaktivnog otpada, 192
— oceansko, 196
— procjene rizika, 200
— sigurnost, 199
— u geološke formacije, 197
— u ležišta soli, 197
omjer selektivnosti, 79
oplodni nuklidi,
— uran-238, 150
— torij-232, 150
Oppenheimer, 257
optička masa zraka, 57
osjetljive tehnologije, 261
oslobađanje radioaktivnosti u kvarovima
— NE *Otok tri milje*, 229
— reaktor SL-1, 226
— reaktor SNAPTRAN, 226
— reaktor SPERT, 226
— simulacija, 227
OTEC elektrane, 133
otvoreni fuzijski sistem, 273
ovisnost doza — učinak
— kvadratična, 208
— linearna, 208
— prirodno zračenje, 213
— medicinsko ozračenje, 213
ozračenost (iradijacija), 49
ozračenje (iradijancija), 49

P

parabolični kolektori, 93
pasivni solarni sustav, 117
piranometar, 59
pirheliometar, 59
piroliza, 138
plinom hlađeni reaktori, GCR 154
plinska plazma, 266
Plowshare program, 31
plutonij, 150
— dopuštena emisija, 215
— nastajanje, 150
— opasnost od, 214
— proizvodnja, 157, 163, 164, 168, 173
— svojstva, 150
plutonij-240, 178
p-n spoj, 123
podzemne nuklearne eksplozije 31
podzemno ispiranje urana 240
prerada goriva, 190
prividno gibanje Sunca, 53
prizemno Sunčevo zračenje, 56
probabilistička metoda, 217
projekcije rasta nuklearne energije, 235
proračun solarnih sistema, 111
proračun Sunčeva zračenja na nagnutu plohu, 68
protonsko-protonski lanac, 50
pucanja brana, 205
Purex postupak, 191

Q

Q jedinica za energiju, 7
Q-faktor 270, 290, 301
Q-faktor umnažanja, 317
Q-vrijednost reakcije, 39

R

Rablova formula 65
radioaktivni otpad, 192
— aktivnost, 193, 194, 195
— hlađenje, 193, 194
— količina, 193
— odlaganje, 196
radioaktivno zračenje
— genetski efekti, 206
— kasni, 207
— neposredni, 207
— somatski efekti, 206
— apsorbirana doza, 207
— ekvivalentna doza, 207
radioaktivnost prve stijenke, 324
Rasmussenov izvještaj, 217
raspršeno (difuzno) zračenje, mjerenje, 59
— procjena, 66
ravni kolektor, 72, 81, 89
Rayleigh-Taylorova nestabilnost, 302
reakcije u tami, 135
reaktivnost, 150
reaktor s tekućom uranskom soli, 170
reaktori s kipućom vodom, BWR, 154
reaktori s vodom pod pritiskom, PWR, 153

reaktorski kvarovi, 215
reaktorsko gorivo
— godišnja izmjena, 163, 164, 168
— početna jezgra, 163, 164, 168
— za radni vijek, 163, 164, 168
— reflektor, 150
recikliranje energije, 289
refleksijski faktor (reflektancija), 49
relativne investicije
— elektrane na ugljen prema nuklearnim, 245
rezervoar za spremnik, 99

S

samoodržanje fisije, 149
samoodržanje fuzije, 269
satni kut Sunca, 53
Savezna komisija za nuklearnu energiju, 43
Savjetodavna komisija za fuziju s magnetskim ograničenjem, 296
selektivni apsorberi, 77
selektivnost, 79
separacija teške vode
— amonijačni postupak, 186
— Girdler—sulfidni postupak, 186
— instalacije, 187
separacijski rad, tablica, 183
sigurnosni aspekti fuzijske elektrane
— čisti fuzijski uređaj, 323
— fuzijsko-fisijski hibrid, 325
silicij, 122
solarni apsorpcijski faktor, 79
solarna konstanta, 51
solarne elektrane, 131
solarni bazen, 103
solarni doprinos, 112, 115
solarni kolektori, koncentrirajući, 93
solarni kolektori, ravni, 72
— efikasnost, 83, 86
— izvedba, 73
— koeficijent toplinskih gubitaka, 90
— koncentrirajući, 93
— pokrov, 74
— spajanje, 77
— s tekućinom, 73
— testiranje, 89
— teorija, 83
— vremenska konstanta, 90
— zračni, 73
solarni sistemi za hlađenje, 120
solarni sustav s crpkom, 106
solarni sustavi za grijanje vode, 105, 108
— za grijanje prostora, 108
solarno grijanje, 105
solarno hlađenje, 119
spajanje kolektora, 77
spektar Sunčeva zračenja, 52
spremanje goriva, 190
spremnici, 98
spremnik s vodom, 98
— s kamenjem, 98
srednje dnevne ozračenosti, 60, 62
standardna nafta, 7
standardni ugljen, 7
stelarator, 275
stimulirano Brillouinovo raspršenje, 301
Sunce, 50
sunčana peć, 95
sunčane ćelije, 122
— efikasnost, 127
— ekvivalentni sklop, 126
— elektromotorna sila, 127
— faktor punjenja, 127
— *I-U* karakteristika, 127
— od amorfnog silicija, 131
— od polikristaliničnog silicija, 131
— primjene, 129
— sadašnje stanje i perspektive razvoja, 129
— snaga, 127
— spektralna osjetljivost, 128
— teoretska efikasnost, 128
sunčana energija, 33, 47
Sunčevo vrijeme, 53
Sunčevo zračenje, 48
— apsorpcija u atmosferi, 56
— ekstraterestričko, 51, 52
— izravno, 48, 58
— mjerenje, 58
— odbijeno, 48, 58
— prizemno, 56
— proračun, 62
— raspršenje u atmosferi, 56
— raspršeno, 48, 58
— tablice, 60
Super-Phenix 175
supertermički elektroni 301
supravodički magneti, 286, 292
sustav za hlađenje jezgre u nuždi, 216
sustavi s centralnim prijemnikom, 132
sustavi s raspoređenim kolektorima, 132
Svjetska energetska konferencija, WEC, 235

Š

štapovi goriva, 188, 189

T

tandemski zrcalni sustav, 291
— projektne studije, 292, 294
— s povećanim *Q*-faktorom, 293
— s termičkom barijerom, 293
tehnološki problemi laserske fuzije, 310
temperatura Sunca, 51
termička shema ravnog kolektora, 82
termički reaktori, 152
termosifonski sustav, 106
testiranje kolektora, 89
teška voda, 186
teškovodni reaktori, 164
— energetske karakteristike, 167
— karakteristike goriva, 167
— karakteristike jezgre, 167
— potrošnja urana, 167
— proizvodnja plutonija, 167
teškovodni reaktori, HWR, 154
teškovodni reaktor s praškastim gorivom, 172

theta-pinch kompresija, 278
tlak ablacije, 300
tlakovodni reaktori, PWR, 153
tlak plinske plazme, 273
Tlatelolco ugovor, 260
tokamak reaktori
— glavne instalacije, 281
— planovi razvoja, 283
— projektne studije, 287
— tehnološki problemi, 285
— uređaji u gradnji, 283
tok zračenja, 49
tokamak uređaji, 275, 281
toplina otapanja, 102
toplinski emisijski faktor, 79
toplinski gubici ravnog kolektora, 81
— spremnika, 99
— zgrade, 109
toplinski gubici zgrade, 109
toplinski otpori, 81
toplinski tok, 81
toplinski učinci na okoliš, 212
Torex postupak, 192
toroidalni sistem, 275
trajanje Sunčeva dana, 55
transmitancijski faktor (transmitancija), 50, 74
stakla, 75, 76
trenutna efikasnost kolektora, 89
TRNSYS, 111
Trombeov zid, 119
troškovi goriva, 242, 246
troškovi pogona, 242
troškovi proizvodnje energije, 242

U

udarni presjek
— za apsorpciju, 145
— za fisiju, 147
— za fuziju, 266
— za raspršenje, 145
ugljen, poznate i moguće rezerve, 25
Ugovor o neširenju nuklearnog oružja, 258, 260
uran, 234
— dobivanje iz fosfata, 241
— dobivanje iz mora, 241
— geopolitički raspored, 238
— klasifikacija zaliha, 237
— moguće zalihe, 238
— nekonvencionalni izvori, 240
— projekcije potreba, 235
— zalihe, 236, 259
uređaj za testiranje kolektora, 89
uređaji s obrnutim poljem, 289, 295
usavršeni plinom hlađeni reaktori, AGR, 155
uskladištenje električne energije, 104
uskladištenje energije metodom latentne topline, 101
uskladištenje energije zagrijavanjem materijala, 97
uskladištenje sunčane energije, 95
uskladištenje vodika, 104
USNRC, 223
utjecaj na okoliš
— proizvodnje energije, 203
— direktan, 203
— indirektan, 203
— na zaposlene, 204
utjecaj vjetra na gubitke kolektora, 83
uvjet Kruskala i Šafranova, 276

V

vakuumski kolektor, 77
visina Sunca, 54
vodografitni reaktor s tlačnim cijevima, 154
vodeni spremnik, 98
vodik, 104

W

WASH — 1400, 217
Washingtonska deklaracija, 257
Westinghouse kompanija, 43, 188

Z

zakočno zračenje, 269
zatvoreni fuzijski sistem, 274
zemlje u razvoju
— i fuzijska energija, 333
— ograničenja na mirnodopsku upotrebu nuklearne energije, 256, 258, 261
— potrošnja energije, 8, 17
— stope razvoja, 10, 17
zenitna udaljenost, 54

24

ŠKOLSKA KNJIGA ZAGREB

KNJIŽNICA
FAKULTETA
ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA
ZAGREB - Unska 3