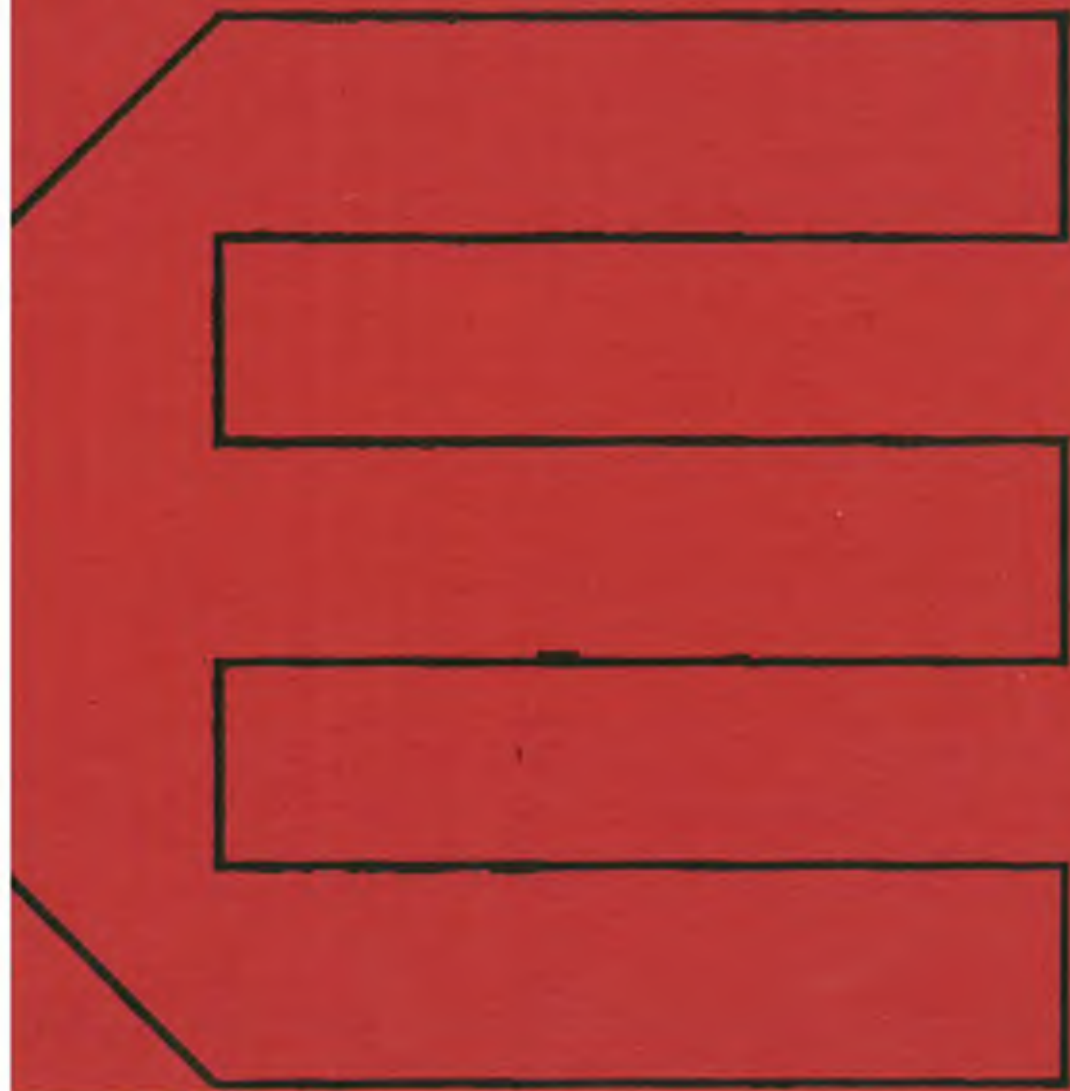


Hrvoje Požar

Izvori energije

SNZ



HRVOJE POŽAR

IZVORI ENERGIJE

SNL

ZAGREB
1980

Prvo poglavlje

KLASIFIKACIJA
OBLIKA
ENERGIJE

1. KRATAK POVIJESNI PREGLED

Drvo je sigurno najstariji oblik energije koji je čovjek upotrijebio, ponajprije za pripremanje hrane i grijanje. U prvom stadiju razvoja rasvjeta je imala malo značenje, najvjerojatnije je za prvu umjetnu rasvjetu poslužila drvena baklja.

Asfalt je prvo fosilno gorivo. Već su Sumerani (oko 6000 godina prije n. e.) upotrebljavali asfalt iz nalazišta blizu Ararata.

Kasnije su goriva služila za proizvodnju cigle i vapna, zatim za dobivanje bakra i željeza, a oko 3000. godine prije n. e. za glaziranje i emajliranje lončarskih proizvoda, za proizvodnju porculana i stakla. Za rasvjetu su se upotrebljavale životinjske i biljne masti.

Razdoblje Babilonskog Carstva (2500. do 538. godine prije n. e.) prvi je povijesni period upotrebe fosilnih goriva. Tada su, naime, u znatnoj mjeri upotrebljavani asfalt i sirova nafta za proizvodnju cigle (za zgrade, mostove, pregrade) i vapna. Žbuka iz toga doba sadrži osim vapna i asfalt.

Koliko je poznato, ugljen je u tom razdoblju (oko 1100. godine prije n. e.) iskorištavan samo u Kini, gdje je u to doba ostvaren znatan tehnološki napredak. Za proizvodnju metala, papira, šećera i baruta bilo je potrebno gorivo, a drveta nije bilo dovoljno, pa je ono zamijenjeno ugljenom i zemnim plinom. Postojale su, naime, bušaće garniture za eksploataciju plitkih nalazišta zemnog plina, koji je transportiran cijevima od bambusa do mjesta upotrebe.

U to vrijeme Feničani su izradili prve voštane svijeće.

Unatoč upotrebi fosilnih goriva, drvo je ostalo glavni oblik energije. Zbog toga je potrošnja drveta bila vrlo velika. Tako su npr. u Indiji potpuno uništene šume, što je zemlju pretvorilo u pustinju. U slijedećim stoljećima životinjske izmetine glavno su gorivo, a to je uvjetovalo smanjenje plodnosti zemljišta. To bi se dogodilo i u drugim područjima da nije nastalo usporavanje, pa i stagnacija tehnološkog razvoja.

To je posljedica propasti Babilonskog Carstva, pobjede Konfucijeve filozofije u Kini, stvaranja kasta u Indiji. U Grčkoj tehnološki razvoj prestaje u četvrtom stoljeću prije n. e.

Tada, oko 500 godina prije n. e., počinje dugo razdoblje industrijske stagnacije. Paradoks je da baš tada počinje razvoj apstraktnih ideja koji kulminira u modernoj znanosti. Grci su, naime, položili temelje industrijskom progresu do kojega će doći tek dvije tisuće godina kasnije.

U tom dugom razdoblju rasle su potrebe za mehaničkom energijom. Rimljani su prvi iskorištavali vodne snage (mlinsko kolo). To je, osim upotrebe energije vjetra za pogon brodova, jedina mehanička energija koja u to doba nije dobivena ljudskim ili životinjskim mišićima. Mehanička energija, međutim, bila je potrebna za gradnju kuća i cesta, za obradu polja, za transport, za manufakturu. Robovi i životinje bili su tada jedino sredstvo za zadovoljenje tih potreba. Nema podataka o broju stanovnika u antičkim zemljama, ali je sigurno da je bilo više robova nego slobodnjaka. Tada su robovi bili glavni plijen u ratovima.

Na području Bliskog istoka Perzijanci su nakon 500. godine prije n. e. napustili upotrebu asfalta, a zatim i vapna, pa je prevladala upotreba nepečene cigle. Oko 1000. godine n. e. Arapi su iskorištavali vodne snage i vjetrenjače, ali nisu upotrebljavali fosilna goriva, iako su na tom području u prošlosti bila poznata nalazišta asfalta i sirove nafte.

Maje u Srednjoj Americi nisu poznavali metale. Drvo je bilo osnovna sirovina i energetski izvor. Kad su šume bile iskrčene, došao je i kraj njihova carstva.

U Velikoj Britaniji upotrebljavan je ugljen prije dolaska Rimljana. Zanimljivo je da su indijanska plemena u današnjoj Arizoni iskorištavala ugljen dvije stotine godina prije Kolumbova dolaska. U Velikoj Britaniji i u Evropi upotreba ugljena bila je ograničena zbog neznanja i predrasuda. Kralj Eduard I (1306. godine) zabranio je loženje ugljenom — uz prijetnju smrtnom kaznom — s obrazloženjem da su plinovi izgaranja otrovni. Jedna je smrtna kazna i izvršena. Takva je kazna poslije ukinuta, ali su predrasude ostale. Sve do 17. stoljeća u nekim je gradovima bila zabranjena upotreba ugljena, uz preporuku da se loži drvom. U Francuskoj su kažnjavani kovači koji su upotrebljavali ugljen bez posebne dozvole.

I pored toga, tehnologija je napredovala. Godine 1587, kada je odрубljena glava Mariji Stuart, prvi put je upotrijebljen koks za grijanje stanova, a 1620. godine (godina plovidbe Mayflowera) izdan je Britanski patent br. 15 za postupak koksiranja ugljena. Iako je stoljećima stagnirala, potražnja goriva je porasla, ne samo za grijanje i kuhanje nego i za proizvodnju željeza. Taj je porast tražio zamjenu drveta ugljenom. Zamjena nije bila znatna u područjima s malim brojem sta-

novnika (Amerika) i u područjima bez industrije (veći dio Evrope, Azija). U Engleskoj i u dijelu Francuske, otkrićem koksa i zamjenom drvenog ugljena koksom, spriječeno je pustošenje tih područja. Tek početkom 18. st. afirmirana je upotreba ugljena i koksa, a plin, kao produkt isplinjavanja ugljena, prvi put je upotrijebljen za rasvjetu u Irskoj 1691. godine. Bilo je, međutim, potrebno još oko sto godina da takav plin dostigne komercijalnu vrijednost.

I u drugim područjima postepeno je ostvarivan napredak u iskorištavanju primarnih oblika energije.

Godine 1627. otkriven je »izvor« sirove nafte u SAD (država New York). U Modeni (Italija) bila je dovršena bušotina za dobivanje sirove nafte 1640. godine. To je nalazište eksploatirano oko 200 godina. Petrolej iz te bušotine upotrijebljen je za rasvjetu ulica u Genovi i Parmi 1803. Eksploatacija nalazišta nafte u Rumunjskoj, počinje 1650. godine, a u Galiciji 1750. Petrolej iz Galicije poslužio je za rasvjetu praških ulica 70 godina kasnije. Smatra se, međutim, da industrijsko iskorištavanje nalazišta sirove nafte počinje 1859. godine, kada je načinjena prva bušotina veće izdašnosti u Pennsylvaniji (SAD).

Prvo tekuće gorivo iz uljnih škriljavaca proizvedeno je 1694. godine u Velikoj Britaniji, a tek 120 godina kasnije, 1815. (godina bitke kod Waterlooa), počinje komercijalna proizvodnja u Kanadi. Između 1850. i 1860. godine postojalo je oko 50 postrojenja u SAD za preradu uljnih škriljavaca uvezenih iz Kanade. Ta su postrojenja napuštena kad se razvila eksploatacija sirove nafte.

Stoljećima su za rasvjetu upotrebljavane drvene baklje, vosak, biljne i životinjske masti. Polovicom 18. st. proizvedeno je ulje za rasvjetu iz kitove glave. To je rasvjetno gorivo dominiralo gotovo sto godina, dok ga nije istisnulo tekuće fosilno gorivo. Plamen takvih goriva bio je nestabilan i neugodna mirisa. Prijelom nastaje 1784. godine kad je Argand prvi put upotrijebio stakleni cilindar. Znatno poboljšanje pri upotrebi plina za rasvjetu postignuto je tek 1886. izumom plinske mrežice (Auer von Welsbach) koja je izrađena od tekstila i impregnirana cezijem, torijem ili magnezijem.

Godine 1760. Watt počinje eksperimente s parnim strojem, da bi 1790. ostvario tehnički upotrebljiv stroj za pretvorbu energije goriva u mehaničku energiju. Taj se događaj smatra početkom industrijske revolucije. Od tada se, naime, mehanička energija može proizvoditi neovisno o mjestu pojave primarnog oblika energije (vodne snage) i neovisno o intenzitetu pojave (protoci u rijekama, brzine vjetra).

Razvoj upotrebe parnog stroja tražio je povećanje eksploatacije ugljena, a ono je bilo omogućeno baš s pomoću takvog stroja. Zanimljivo je spomenuti da su za pogon prvih parnih strojeva upotrebljavani drvo i drveni ugljen. Prvi parni strojevi postavljeni su u ugljenokopima, a prva parna lokomotiva, izgrađena 1803. godine, upotrijebljena je za transport ugljena.

Takav razvoj uvjetovao je sve veću potrošnju ugljena. Tako je u SAD 1820. godine proizvedeno 300 tona ugljena, a dvadeset godina kasnije više od milijun tona.

Ugljen je upotrebljavan i za proizvodnju plina. Godine 1812. postoji u Londonu plinska mreža dugačka oko 200 km. Plin se upotrebljava za rasvjetu. U Londonu se 1817. proizvodi dnevno nešto manje od 10 000 m³ plina isplinjavanjem ugljena, što je dovoljno za 75 000 rasvjetnih plamenika.

Prva upotreba zemnog plina u suvremeno doba ostvarena je u Fredoniji (država New York, SAD) gdje su plinom grijani stanovi. Potrošnja je bila malena. Iskorištavanje zemnog plina u većem opsegu započelo je tek 1884. godine, kada je plin doveden plinovodom dugačkim 23 km u Pittsburgh. Tamo je upotrebljavan za rasvjetu, grijanje i toplinske procese.

Parni stroj bio je dugo vremena jedini stroj za proizvodnju mehaničke energije koji se mogao postaviti na mjesto gdje je ta energija bila potrebna. Njezino iskorištavanje, međutim, moguće je samo u neposrednoj blizini stroja (remenski prijenos, transmisija). To vrijedi i za iskorištavanje vodnih snaga pretvaranjem energije vodotoka u mehaničku energiju, ali opet uz ograničenje da je ono moguće samo na vodotoku.

Tek otkrićem električne energije, koja se može lako i bez većih uređaja pretvoriti u mehaničku energiju (električni motor), postalo je moguće energiju transportirati na veće udaljenosti. Dug je, međutim, bio put razvoja. Već 1799. godine pronađen je električni kemijski element (Volta), 1834. konstruiran je prvi upotrebljivi električni motor (Jacobi), 1866. izrađen je električni generator (Siemens, Wheatstone), a 1879. električna žarulja s ugljenom niti (Edison). Međutim, tek se otkrićem trofazne struje i okretnog magnetskog polja (Tesla, 1887) ostvaruje jednostavna mogućnost pretvorbe električne energije u mehaničku. Tesla (1895) gradi prvu veliku elektranu na slapovima Niagare, a 1891. prvi put se prenosi električna energija na veću udaljenost (elektrotehnička izložba u Frankfurtu na Majni).

Razvoj proizvodnje električne energije omogućen je konstrukcijom vodnih i parnih turbina. Prva moderna vodna turbina (Fourneyron) izgrađena je 1837. godine (snaga 45 kW). Poboljšanjem njezine konstrukcije konstruirana je Francisova turbina (1847), koja se i danas gradi. Poslije su pronađeni i drugi tipovi vodnih turbina: Peltonova (1878) za velike padove i Kaplanova (1922) za male padove. Iskorištavanje kemijske energije goriva u velikom opsegu postalo je moguće tek kad su parne turbine zamijenile parni stroj. Prva jednostepena parna turbina izgrađena je 1883. (Laval), a prva višestepena parna turbina 1884. godine (Parsons).

Otkriće parnog stroja uvjetovalo je razvitak željezničkog prometa i zamjenu jedrenjaka parobrodima, ali tek izgradnja motora s unutrašnjim izgaranjem dovela je do ekspanzije cestovnog i zračnog prometa.

Prvi motor s unutrašnjim izgaranjem patentiran je 1860. (Lenoir). To je dvotaktni plinski motor. Četvorotaktni plinski motor s kompresijom smjese konstruiran je 1877. godine (Otto). Po konstruktoru se danas benzinski motori nazivaju Otto-motori. Godine 1883. izgrađen je benzinski automobilski motor, a 1897. prvi motor s kompresijom čistog zraka u koji se uštrcava gorivo (dizel-motor, nazvan po konstruktoru Dieselu). Na razvoj zračnog prometa znatno je utjecala konstrukcija mlaznog motora (1939), koji je specijalno izvedena plinska turbina koja se razvijala usporedo s parnom turbinom.

Novo je poglavlje u razvoju energetike otkriće nuklearne energije.

Godine 1942. (Fermi) prvi put je ostvaren kontrolirani, umjetno izazvan raspad jezgara urana. Prva eksperimentalna nuklearna elektrana stavljena je u pogon 1954. (Obinsk kod Moskve). Iste godine isplovila je prva podmornica (»Nautilus«) na nuklearni pogon. Dvije godine kasnije puštena je u pogon prva komercijalna nuklearna elektrana (Calder Hall u Velikoj Britaniji), a 1959. godine krenuo je na prvo putovanje prvi površinski brod na nuklearni pogon (ledolamac »Lenin«).

2. ENERGIJA U DANAŠNJEM SVIJETU

Energija je osnova današnjeg tehnički visoko razvijenog svijeta. Ugljen je omogućio ulazak u industrijsku epohu, nafta je revolucionirala transport i smanjila udaljenosti, nuklearna energija omogućit će dalji razvitak, dok ne postane moguće iskorištavanje praktički neiscrpivih izvora energije kao što su zračenje Sunca i fuzija lakih atomskih jezgara.

Da bi se dobila predodžba o važnosti i o opsegu iskorištavanja energije u današnjem trenutku, valja spomenuti da je u posljednjih 25 godina iskorišteno više energije nego u toku čitavog povijesnog razdoblja prije toga. Unatoč tome, ne zapaža se smanjenje porasta iskorištavanja energije, a čini se da se s tim ne može računati ni u daljoj budućnosti. To je uvjetovano s jedne strane porastom stanovništva, a s druge strane razvojem zemalja koje se danas smatraju zemljama u razvoju. Pri tome se ne smije zaboraviti da treba očekivati znatno brži porast broja stanovnika u danas nerazvijenim područjima. Danas, naime, postoji vrlo velika razlika među zemljama u potrošnji energije. U SAD se troši godišnje oko 11 tona ekv. ugljena po stanovniku, u Aziji (bez SSSR-a) oko 0,6 tona, a u Africi manje od 0,4 tona ekv. ugljena po stanovniku. Svakako da će razvoj zemalja u razvoju utjecati na porast potrošnje energije, pogotovo zbog sve većeg udjela tih zemalja u ukupnom broju stanovnika (1950. godine u zemljama u razvoju živjelo je oko 65% svjetskog stanovništva, a računa se da će krajem stoljeća njihov udio porasti na gotovo 80%).

Zadovoljenje potreba za energijom zahtijeva velika ulaganja i znatnu proizvodnju opreme za energetska postrojenja, ali ono može izazvati i političke komplikacije zbog nejednolike geografske raspodijeljenosti nalazišta pojedinih oblika energije. Problem opskrbe fosilnim gorivima (ugljen, sirova nafta, zemni plin), a to vrijedi i za sve druge sirovine (minerali, rudače i sl.), postao je opći problem, koji će se još više

zaoštriti u budućnosti, jer su rezerve svih sirovina ograničene. U prošlosti nije se vodilo računa o toj ograničenosti zaliha. To je imalo i opravdanja sve dok je iskorištavanje sirovina bilo malo u odnosu na rezerve. Danas, međutim, kad je iskorištavanje sirovina dostiglo takvu razinu da se ocjenjuje da će zalihe nekih od njih biti iscrpene u slijedećih stotinjak godina, mora se postupati oprezno i racionalno. Za ilustraciju razine potrošnje može se navesti podatak da je u proteklih 15 godina potrošeno više sirove nafte nego u cijelom dotadašnjem povijesnom razdoblju, te da će se u idućih 13 godina to ponovno dogoditi.

Za održanje današnje civilizacije — prema nekim mišljenjima — presudno je ispuniti slijedeća dva zahtjeva: a) valja izbjeći iscrpljivanje prirodnih izvora koji se ne obnavljaju (minerali i sl.) i b) mora se spriječiti onečišćenje prirodnih izvora koji se ciklički iskorištavaju (zrak, voda i sl.), kako ono ne bi premašilo granicu prirodne regeneracije.

Problem očuvanja, odnosno smanjenja trošenja rezerva svodi se na problem opskrbljenosti energijom. U principu, naime, sve osnovne tvari mogu se iskorištavati u zatvorenom ciklusu, ali je za njihovu ponovnu pripremu potrebna energija. Isti se problem javlja pri prečišćavanju zraka i dobivanju novih količina slatke vode (npr. iz mora desalinizacijom). To vrijedi i za povećanje proizvodnosti u poljoprivredi (natapanje, mehanizacija, proizvodnja umjetnih gnojiva), jer će se u budućnosti — uz povećani broj stanovnika — pojaviti i pitanje dovoljne proizvodnje hrane.

Prema nekim procjenama, dodatna količina energije koja je potrebna da bi se omogućila ponovna upotreba materijala i da bi se spriječilo onečišćenje prirodnih izvora koji se ciklički iskorištavaju iznosi otprilike onoliko po stanovniku koliko se danas troši u SAD.

Zbog ključne pozicije energije kao — moglo bi se reći — univerzalnog izvora i zbog razvoja nedovoljno razvijenih područja, potrebe energije po stanovniku još će dugo rasti, vjerojatno i nakon što se — iz bilo kojih razloga — stabilizira broj stanovnika na našoj planeti.

Problem opskrbe energijom izbio je u prvi plan već nakon drugog svjetskog rata, ali je potenciran nakon izbijanja tzv. energetske krize 1973. godine, kada je započelo povišenje cijena sirove nafte. Tome je više razloga, a mogu se svesti uglavnom na ove:

- a) Nedovoljna opskrbljenost energijom za vrijeme rata i u poratnim godinama, zatim u doba tzv. sueske krize (1957) te u razdoblju nakon sukoba na Bliskom istoku (1973) pokazala je da je normalan život današnjeg društva ugrožen već relativno malim pomanjkanjem energije, te da i najmanja ograničenja u potrošnji energije uzrokuju velike teškoće u industriji, prometu i kućanstvima;
- b) Postoji čvrsta korelacijska veza između potrošnje energije u svakoj zemlji, s jedne strane, i ukupne industrijske proizvodnje, a posebno proizvodnje teške industrije, vojne snage i nje-

zina bogatstva, s druge strane. Te korelacije lako je protumačiti, jer sveukupna industrijska proizvodnja ovisi o raspoloživoj energiji, pa se često u energiji vidi bitan preduvjet za prosperitet i snagu;

- c) Na kraju, opskrba energijom uzročnik je velikog razvoja međunarodne trgovine gorivima (sirova nafta, zemni plin, ugljen), što znatno utječe na bilance deviznih sredstava i na sigurnost opskrbe potrošača na vlastitom području.

3. OBLICI ENERGIJE

3.1. Pojava oblika energije

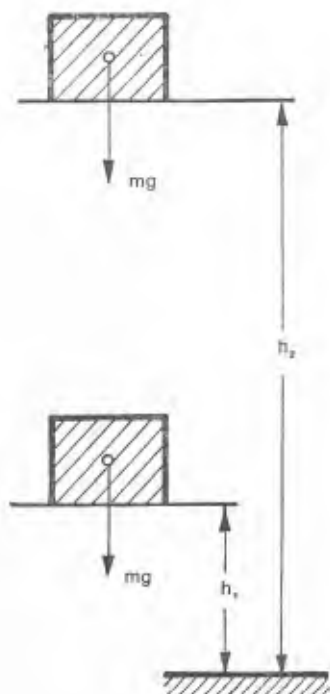
Energija se pojavljuje u različitim oblicima. Oni su svrstani u dvije skupine: nagomilani (sakupljeni, akumulirani) oblici i prijelazni oblici energije. Nagomilani oblik energije može se održavati u svom obliku po volji dugo, a za prijelazne oblike karakteristična je kratkotrajnost pojave. Prijelazna se energija pojavljuje kad nagomilana energija mijenja svoj oblik ili kad nagomilana energija prelazi s jednog tijela na drugo.

U nagomilane oblike energije ubrajaju se: potencijalna, kinetička i unutrašnja energija.

Za podizanje tijela mase m s razine h_1 na razinu h_2 (sl. 1.1) potrebna je energija

$$W_p = m g (h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

gdje je g ubrzanje Zemljine sile teže ($g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$). Masa m je u kg, a h_1 i h_2 u metrima. Energija potrebna za podizanje mase nije izgubljena, jer se iz podignute mase može ponovno dobiti ako se tijelo pod djelovanjem sile teže spusti na razinu h_1 . Prema tome, u podignutom tijelu nagomilana je energija. Ta se energija naziva energija položaja ili potencijalna energija. Ona je zapravo posljedica međusobne privlačnosti Zemljine mase i mase m podignute u Zemljinu gravitacijskom polju. Nagomilana potencijalna energija u sustavu Zemlja — masa m ovisna je o međusobnom položaju tih dviju masa. Brojčana vrijednost potencijalne energije ovisi, prema (1.1), a izboru razine h_1 , koja se može — što se vidi i na sl. 1.1 — odabrati po volji, pa će se za istu masu i za istu razi-



Sl. 1.1. Uz definiciju potencijalne energije

nu h_2 dobiti različite vrijednosti potencijalne energije. To nas, međutim, ne smeta, jer su u tehničkim problemima važne razlike potencijalnih energija. Zbog toga je potrebno da se u toku proračuna ostane pri konstantnoj referentnoj razini h_1 , bez obzira na to koja je razina odabrana kao referentna. Obično se površina Zemlje uzima kao referentna razina.

Ubrzanje Zemljine sile teže g nije konstantno, jer ovisi o udaljenosti od Zemljine površine i o geografskom položaju. Za tehničke procese koji se odvijaju na Zemljinoj površini ili u njezinoj blizini, dovoljno je točno ako se ubrzanje sile teže smatra konstantnim i ako se računa s već spomenutom vrijednošću.

Da bi se ubrzalo tijelo mase m koje miruje i postigla brzina v , mora se privesti energija

$$W_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1.2)$$

Ta se energija može vratiti iz mase m ako se ona zaustavi. Ta je energija nagomilana u masi tijela koje se giba u obliku kinetičke energije. Za ubrzanje tijela mase m od brzine v_1 na brzinu v_2 bilo bi potrebno — prema (1.2) — privesti energiju

$$W_k = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (1.3)$$

I brojčana vrijednost kinetičke energije relativna je vrijednost, jer ovisi o koordinatnom sustavu u kojemu je definirana brzina promatranog tijela. Najčešće se brzina mjeri u odnosu na mirujuću Zemljinu površinu.

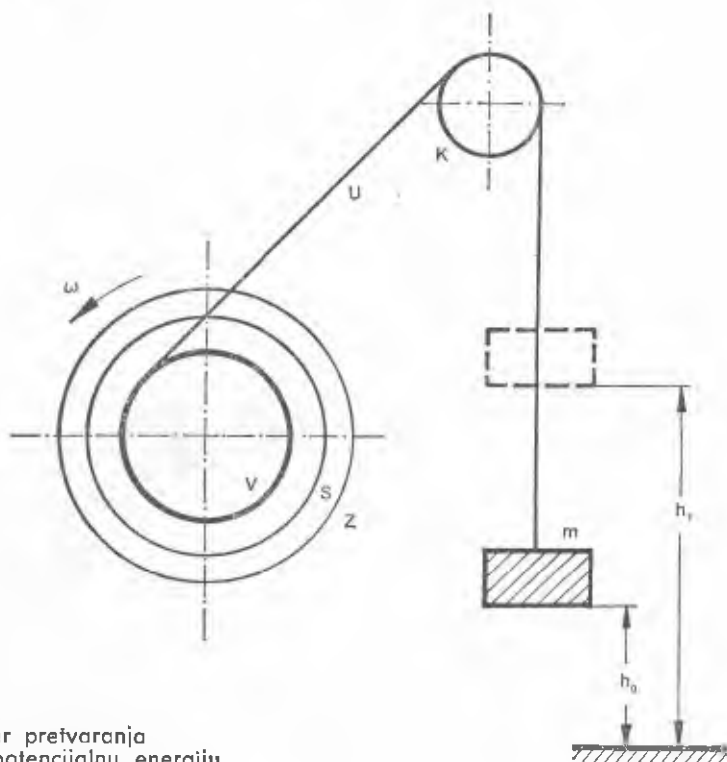
Potencijalna i kinetička energija mogu se nagomilati ne samo u tijelima kao cjelini već i u njihovim najmanjim sastavnim dijelovima. Molekule plinova u stalnom su gibanju. Među njima djeluju privlačne i odbojne sile, što upućuje na postojanje potencijalnih energija. Te se potencijalne energije gibanjem molekula transformiraju u kinetičke energije molekula, a nakon sudara s drugim molekulama — ponovno u potencijalnu energiju. Molekule krutih tijela titraju oko svojih srednjih položaja, pa i tu postoji stalna pretvorba potencijalne energije u kinetičku i obrnuto. Kad nema vanjskih utjecaja, konstantan je zbroj tih energija. I među atomima djeluju sile, pa je to također znak da postoji poseban oblik energije kojemu se iznos mijenja s promjenom vezâ među atomima, odnosno s promjenom kemijskog spoja. Osobito velike količine energije nagomilane su u atomskim jezgrama. Svi takvi oblici energije — bili oni na razini molekula, atoma ili jezgara — čine zajedno unutrašnju energiju tvari.

Unutrašnja energija na razini molekula mijenja se dovođenjem ili odvođenjem topline. Time se, naime, mijenjaju brzine kretanja molekula. Ta unutrašnja energija nazvana je unutrašnja kalorička energija tvari.

Unutrašnja energija na razini atoma kemijska je energija, jer se mijenja promjenom kemijskog spoja (npr. izgaranjem goriva). Pri tome valja razlikovati kemijske promjene, odnosno promjene kemijskog spoja pri kojima se smanjuje kemijska energija — pa se ta promjena manifestira u povećanju unutrašnje kaloričke energije tvari — i one kemijske promjene koju mogu nastati samo onda ako se dovodi određena količina energije. Svakako da su za opskrbu energijom zanimljive samo prvospomenute kemijske promjene.

Unutrašnja energija na razini atomskih jezgara naziva se nuklearna energija. Razlikuje se nuklearna energija spajanja jezgara (energija fuzije) i nuklearna energija razbijanja jezgara (energija fisije). I tu valja razlikovati slučajeve kad se promjenama u jezgrama smanjuje unutrašnja energija jezgara, pa se razlika pojavljuje najčešće u obliku topline kojom se povećava unutrašnja kalorička energija, od slučajeva kad je potrebno dovesti energiju da bi se ostvarila promjena u jezgama. Za energetske iskorištenje nuklearne energije interesantne su one promjene kojima se smanjuje unutrašnja energija na razini jezgara, a to su: spajanje jezgara lakih atoma i razbijanje jezgara teških atoma.

Mehanička energija pojavljuje se npr. pri pretvorbi kinetičke energije zamašnjaka (mase koja rotira) u potencijalnu energiju utega (sl. 1.2). U zamašnjaku je nagomilana kinetička energija jer se on giba.



Sl. 1.2. Primjer pretvaranja kinetičke u potencijalnu energiju

Vitlo V, na koje je učvršćeno uže U, može se s pomoću spojke S spojiti na zamašnjak Z. Ako se to učini, vitlo će se vrtjeti zajedno sa zamašnjakom, pa će preko užeta i koloturnika K podići uteg s razine h_0 na razinu h_1 . Pri dizanju tereta obavlja se u svakom trenutku mehanički rad koji odgovara povećanju potencijalne energije podignutog utega, ali na račun smanjenja kinetičke energije zamašnjaka koji će se zbog toga usporavati. Ukupna smanjena kinetička energija zamašnjaka jednaka je povećanoj potencijalnoj energiji utega — naravno, uz pretpostavku da nema trenja ni u ležajevima ni u užetu. Kinetička energija transformirana je, dakle, u potencijalnu energiju, ali je ta pretvorba izvršena preko mehaničke energije (mehaničkog rada). Kinetička je energija, naime, najprije transformirana u mehaničku energiju, koja je upotrijebljena za podizanje tereta, pa je na taj način postepeno pretvarana u poten-

cijalnu energiju. Prema tome, mehanička energija prijelazna je energija ona se ne može nagomilati, nego se iskorištava istodobno kad se pojavljuje.

I električna energija je prijelazna energija. Može se, naime, zamisliti da je vitlo spojeno s električnim motorom mjesto sa zamašnjakom. Tada motor preuzima električnu energiju iz električne mreže, ona se u njemu pretvara u mehaničku energiju, koja pokreće vitlo, a ono preko užeta podiže uteg. Električna energija proizvodi se u elektrani u trenutku kad je potrebna, pa je zbog toga prijelazna energija.

Toplina je također prijelazna energija, jer ona prelazi npr. od plinova izgaranja u sobnoj peći na zrak u sobi. Zbog prijelaza topline smanjuje se unutrašnja kalorička energija plinova izgaranja, a povećava se unutrašnja kalorička energija zraka u sobi.

Osim toga, oblici energije — s obzirom na pojavu u prirodi i s obzirom na upotrebu — mogu se klasificirati u primarne, transformirane i korisne oblike energije.

Primarni su oblici energije oni koji se nalaze u prirodi ili se u njoj pojavljuju. Samo se neki od njih mogu upotrijebiti u svome prirodnom obliku. Većinom se transformiraju u pogodniji energetske oblik, zbog toga što ne mogu poslužiti u primarnom obliku, ili zbog toga što je iskorištenje u transformiranom obliku tehnički pogodnije i ekonomičnije, ili zato što transport u primarnom obliku nije moguć. Konačno, potrošači trebaju određeni oblik energije, što ovisi o njezinoj namjeni.

3.2. *Primarni oblici energije*

Primarni se oblici energije mogu podijeliti na konvencionalne i nekonvencionalne.

Danas se u konvencionalne oblike energije, dakle one koji se najčešće i obično upotrebljavaju, ubrajaju: drvo, treset, ugljen, sirova nafta i zemni plin, koje se obično naziva gorivima (ugljen, sirova nafta i zemni plin nazivaju se i fosilnim gorivima), zatim vodne snage (potencijalna energija vodotoka) i nuklearna goriva (uran i torij). U nekonvencionalne primarne oblike energije ubrajaju se: geotermička energija (unutrašnja energija Zemlje koja se pojavljuje i ona koja se ne pojavljuje na površini), energija plime i oseke, energija vjetra, energija zračenja Sunca (neposredno iskorištavanje), unutrašnja energija mora (iskorištavanje razlike temperature mora na površini i u većim dubinama), energija morskih valova i energija fuzije lakih atoma.

Fizički promatrano, primarni oblici energije mogu se podijeliti na: nosioce kemijske energije (drvo, treset, ugljen, sirova nafta, zemni plin), nosioce potencijalne energije (vodne snage, energija plime i ose-

ke, energija morskih valova), nosioce nuklearne energije (nuklearna goriva, laki atomi za fuziju), nosioce kinetičke energije (vjetar), nosioce unutrašnje kaloričke energije (geotermička energija, energija mora) i na nosioce energije zračenja (energija Sunčeva zračenja).

3.3. Transformacije oblika energije

Kemijska energija drveta i fosilnih goriva najčešće se transformira u unutrašnju kaloričku energiju, ali je moguća i neposredna pretvorba u električnu energiju (gorive ćelije). Nekad se, nakon posebne pripreme (npr. koksiranje ugljena), iskorištava neposredno kao kemijska energija (u obliku metalurškog koksa).

Proces transformacije kemijske energije u unutrašnju kaloričku energiju naziva se izgaranjem. Izgaranje je spajanje izgorivih sastojaka goriva (ugljik, vodik, sumpor) s kisikom, pri čemu se pojavljuju plinovi izgaranja koji su nosioci unutrašnje kaloričke energije. Postrojenja za takvu pretvorbu kemijske u unutrašnju kaloričku energiju nazivaju se ložištima. Takva unutrašnja energija može se neposredno upotrijebiti za grijanje prostorija, za kuhanje i pripremu tople vode, za tehnološke procese kad su potrebne visoke temperature (keramička, cementna industrija i sl.). Nosilac unutrašnje energije predaje tu energiju posredstvom topline zraku, vodi ili sirovinama u tehnološkim procesima. Unutrašnja energija plinova izgaranja može se, osim toga, u parnim kotlovima (generatorima pare) prijelazom topline predati vodi, odnosno vodenoj pari, koja tako postaje nosilac energije, jer se prijelazom topline povećava unutrašnja kalorička energija vode, odnosno pare. Tako zagrijanom vodom ili parom mogu se grijati prostorije ili ona može služiti za tehnološke procese kad su potrebne relativno niske temperature (do nekoliko stotina °C). Vodena para proizvedena u parnim kotlovima može se upotrijebiti za pogon parnih turbina, u kojima se unutrašnja energija pare transformira najprije u kinetičku energiju a ona u mehaničku energiju. Unutrašnja kalorička energija plinova izgaranja može se neposredno, bez sudjelovanja drugog nosioca energije, pretvoriti u mehaničku energiju u plinskim turbinama i u motorima s unutrašnjim izgaranjem.

Za loženje u kotlovima većeg učina danas se normalno troši ugljen u onom obliku u kojem dolazi iz rudnika (rovni ugljen), jer ga prije upotrebe ionako treba samljeti u ugljenu prašinu. Ugljen koji će poslužiti u druge svrhe (loženje u kotlovima malih učina, loženje u pojedinačnim ložištima u kućanstvima, za koksiranje itd.) treba da ima određene dimenzije, pa se mora sortirati. Tada se preostali sitni ugljen upotrebljava u kotlovima većeg učina. Ponekad se iz ugljena proizvode plinovi različitog sastava.

Za metaluršku industriju od vrlo velike je važnosti proizvodnja metalurškog koksa. To je jedna od mogućih preradba ugljena za koju se mogu upotrijebiti samo određene vrsti ugljena. Pri koksiranju se kao nusproizvod dobiva koksni plin, koji služi kao gorivo.

Sirova nafta ne upotrebljava se u prirodnom obliku, već se podvrgava postupku destilacije (rafinerije sirove nafte), da bi se odijelili naftni derivati, koji se obično grupiraju u četiri skupine: plin (rafinerijski plin), ukapljeni plin, laki i teški derivati. Transformacija sirove nafte u derivate omogućuje raznoliku upotrebu tog primarnog oblika energije. Danas se rafinerijski plin i ukapljeni plin upotrebljavaju u ložištima, laki derivati u ložištima (ekstralako loživo ulje u kućanstvima), za pogon motora s unutrašnjim izgaranjem (benzinski i dizelski motori) i za pogon plinskih turbina, a teški derivati u ložištima i parnim kotlovima.

Iz zemnog plina najčešće se postupkom degazolinaže odvajaju laki ugljikovodici (svega nekoliko postotaka), a preostali »suhi« zemni plin upotrebljava se u ložištima, parnim kotlovima i plinskim turbinama.

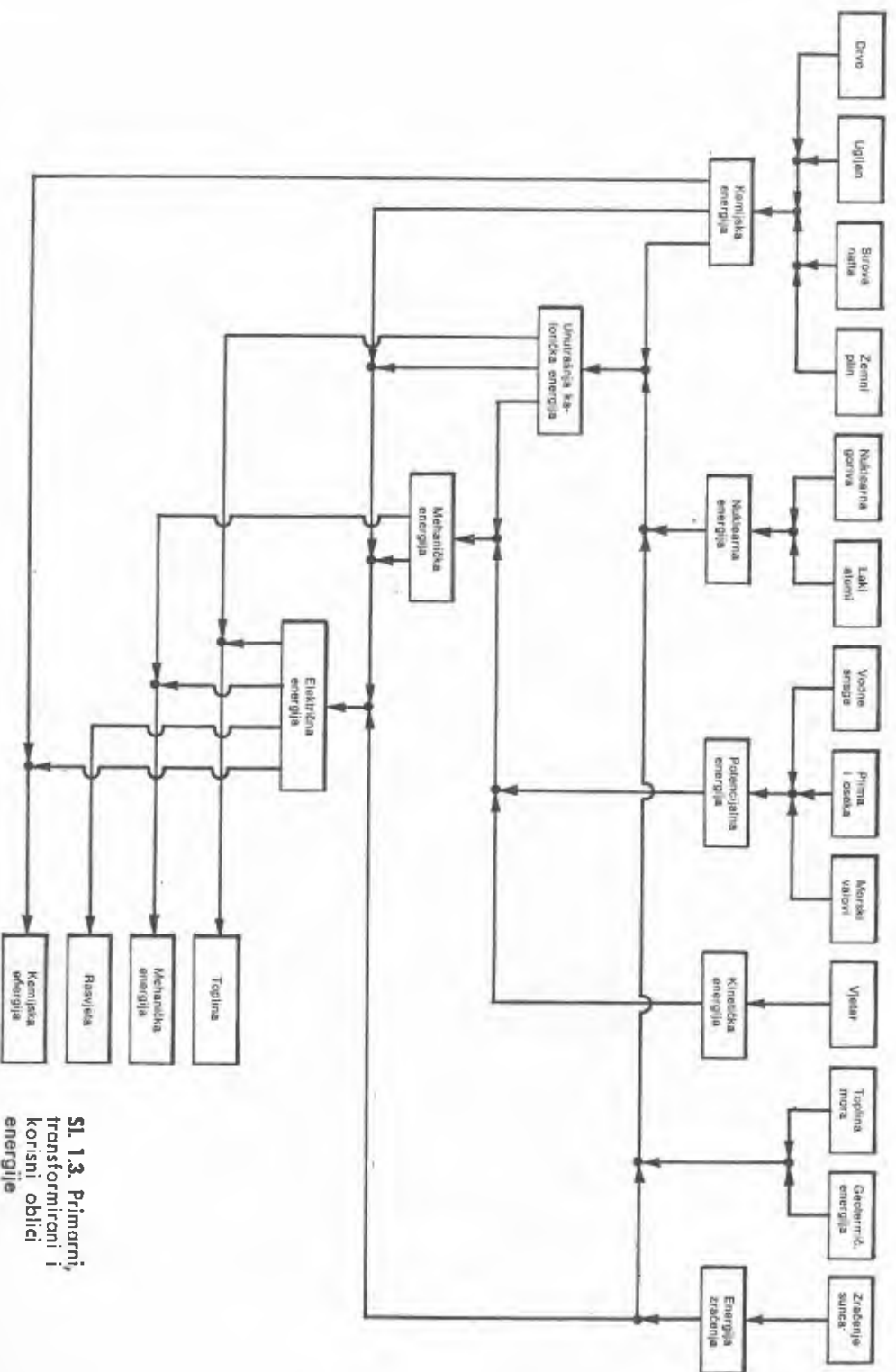
Nuklearna energija, prema današnjem stanju razvoja tehnike, transformira se u unutrašnju energiju nosilaca energije (voda, vodena para), a zatim u mehaničku i električnu energiju pomoću parnih turbina i električnih generatora. Pri tome nuklearni reaktori, dakle, preuzimaju funkciju parnih kotlova. U budućnosti valja očekivati i takve nuklearne reaktore u kojima će se mjesto vodene pare zagrijavati plinovi (helij), pa će kao stroj za transformaciju unutrašnje kaloričke u mehaničku energiju poslužiti plinska turbina. Uran kao nuklearno gorivo može biti u svom prirodnom obliku (prirodna smjesa U-235 i U-238) ili kao obogaćeni uran (s povećanim postotkom U-235).

Ako se uspješno riješi kontrolirana nuklearna fuzija, vjerojatno će se primijeniti ista transformacija oblika energije kao i pri energetsom iskorištavanju nuklearne fisije.

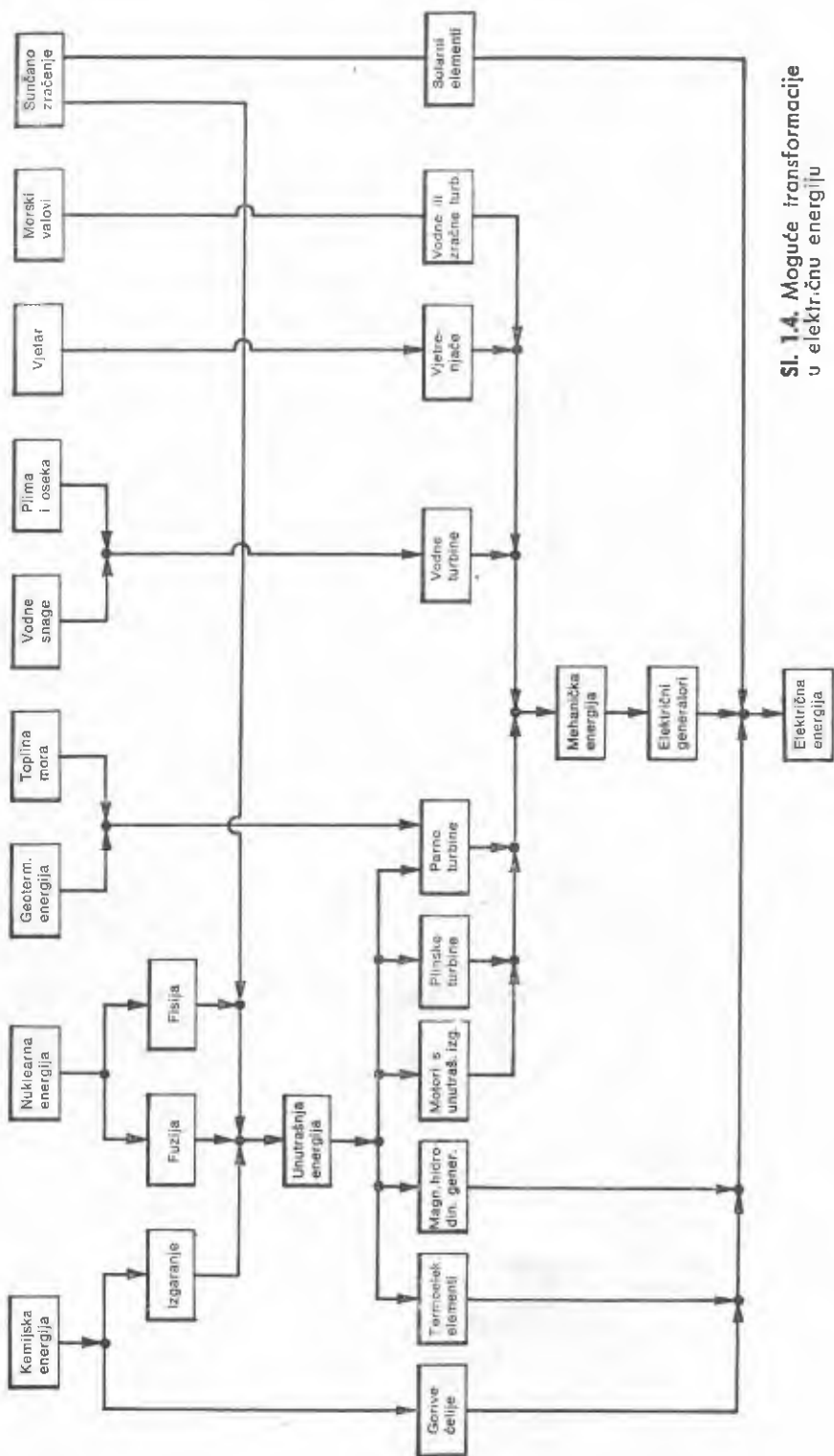
Za iskorištavanje potencijalne energije vode u vodotocima i potencijalne energije plime i oseke dolazi u obzir samo njihova pretvorba u mehaničku energiju pomoću vodnih turbina, a zatim u električnu energiju. To vrijedi i za kinetičku energiju vjetra te za unutrašnju kaloričku energiju vrućih izvora i mora, s tom razlikom, naravno, što za iskorištavanje energije vjetra treba upotrijebiti vjetrenjaču (zračnu turbinu), a za iskorištavanje energije vrućih izvora i mora parnu turbinu.

Energija zračenja Sunca može se transformirati u unutrašnju kaloričku energiju nosioca energije (voda, vodena para) ili izravno u električnu energiju s pomoću solarnih poluvodičkih elemenata.

Na sl. 1.3. vide se primarni oblici energije, njihove moguće transformacije i upotreba za dobivanje potrebne korisne energije, a na sl. 1.4. moguće transformacije oblika energije u električnu energiju.



Sl. 1.3. Primarni, transformirani i korisni oblici energije



Sl. 1.4. Moguće transformacije u električnu energiju

3.4. *Korisni oblici energije*

Potrošačima je potrebna energija u jednom od ovih oblika: toplinska, mehanička, rasvjetna i kemijska energija.

Izgaranjem drveta i fosilnih goriva u ložištima (pojedinačno u kućanstvima, u poslovnim prostorijama, tehnološke peći) mogu se potrošači opskrbiti toplinskom energijom. Toplinska energija može se potrošačima dovesti također vodenom parom ili vrelom vodom, kao nosiocima unutrašnje kaloričke energije. Pri tome su potrebni izmjenjivači topline (radijatori i sl.), a nekad se primjenjuje postupak miješanja pare ili vode (npr. u kupkama za bojenje u tekstilnoj industriji). Toplini dovedenoj na taj način, temperatura je ograničena temperaturom nosioca energije. Konačno, potrošači se mogu opskrbiti toplinskom energijom pomoću električne energije (otporne i indukcione peći).

Za opskrbu mehaničkom energijom danas praktički dolazi u obzir samo električna energija (električni motori). To vrijedi za sve potrošače koji su s obzirom na smještaj stabilni (kućanstva, industrija). Znaatan dio mehaničke energije, međutim, potreban je za transport. U te svrhe upotrebljavaju se u prvom redu motori s unutrašnjim izgaranjem (cestovni i zračni promet). Za željeznički i brodski promet upotrebljavaju se uz motore s unutrašnjim izgaranjem i parni kotlovi s parnim strojevima, odnosno s parnim turbinama. Za željeznički i cestovni gradski promet dolazi u obzir i električna energija.

Stabilni potrošači mogu se neposredno opskrbiti mehaničkom energijom služeći se bilo kojim pogonskim strojem (parna turbina, plinska turbina, vodna turbina, motor s unutrašnjim izgaranjem) i bez međutransformacije u električnu energiju. To, međutim, nije pogodno, s jedne strane zbog kompliciranog održavanja u pogonu (vođenje pogona, doprema goriva), a s druge strane zato što je racionalnije električnu energiju proizvesti agregatima velike snage i s pomoću električne mreže dovesti je električnim motorima, u kojima se ona pretvara u mehaničku energiju.

Kao što je već spomenuto, upotreba pogonskih strojeva za proizvodnju mehaničke energije kao konačnoga korisnog oblika energije, normalna je pojava u prometnim sredstvima, iako se i tu ponekad upotrebljava transformacija u električnu energiju, a zatim ponovno u mehaničku energiju (dizel-električne lokomotive, brodski pogoni).

Za opskrbu potrošača rasvjetnom energijom danas služi samo električna energija. U tu skupinu mogu se uključiti i potrebe energije za elektrokomunikacijske uređaje.

Za redukcijske peći (visoke peći za proizvodnju sirovog željeza, lučne peći za proizvodnju karbida i ferolegura, za elektrolizu aluminija i sl.), kojih se rad zasniva na kemijskim procesima, potreban je ili koks

ili električna energija, ili oba ta oblika energije zajedno. U novije doba u visokim pećima koks se djelomično zamjenjuje zemnim plinom ili loživim uljem. Korisni oblik energije u redukcijskim pećima u prvom je redu kemijska energija, iako se u tim pećima pojavljuje i toplinska energija kao korisni oblik energije.

4. MJERNE JEDINICE ZA ENERGIJU I SNAGU

4.1. Osnovne jedinice u SI sistemu jedinica

Međunarodni sistem jedinica (kratica SI upotrebljava se u svim jezicima prema francuskom nazivu *Système International d'Unités*) polazi od osnovnih jedinica: metar (m) za duljinu, kilogram (kg) za masu i sekunda (s) za vrijeme.

Metar je danas definiran kao duljina jednaka 1 650 763,73 duljine vala narančastog zračenja atoma kriptona. Tom definicijom zamijenjena je 1960. godine starija definicija (iz 1889), prema kojoj je jedinica duljine metar definirana razmakom između dvije crtice pri temperaturi 0°C na pramjeri metra pohranjenog u Međunarodnom uredu za mjere i utege u Sèvresu (Francuska).

Kilogram je masa međunarodne pramjere koja je pohranjena u Međunarodnom uredu za mjere i utege. To je jedina preostala pramjera neke polazne mjerne jedinice. Sve se druge reproduciraju na temelju prirodnih zakonitosti.

Jedinica vremena — sekunda definirana je pomoću zračenja cezija 133. Sekunda je trajanje 9 192 631 770 perioda zračenja toga elementa. Time je (1967) zamijenjena astronomska definicija koja se osnivala na trajanju godine.

Trima osnovnim veličinama mogu se potpuno obraditi pojave koje razmatra mehanika. Za prikaz pojava u termodinamici potrebna je temperatura kao četvrta osnovna jedinica, a za prikaz onih u elektromagnetizmu jakost struje kao četvrta osnovna mjerna jedinica.

Kao referentna točka termodinamičke temperature odabrana je temperatura trojne točke vode koja iznosi 273,16 kelvina (K). Trojna točka je stanje u kojem sva tri agregatna stanja (kruto, tekuće, plinovito) postoje istodobno. Prema tome, jedinica termodinamičke temperature kelvin je 273,16-ti dio termodinamičke temperature trojne točke. Treba naglasiti da je kelvin jednak stupnju Celzija (°C).

Jedinica za jakost struje je amper (A). Amper je ona struja koja prolazeći dvama paralelnim, ravnim, neizmjereno dugačkim vodovima, zanemarivo malena kružnog presjeka, razmaknutim 1 metar u vakuumu, uzrokuje među njima silu od $2 \cdot 10^{-7}$ njutna po metru duljine. Ta je jedinica definirana, dakle, s pomoću sile među vodičima, a o pojmu sile bit će još riječi.

4.2. Sila, masa i težina

Da se ubrza gibanje nekog tijela, potrebno je da na njega djeluje sila u smjeru njegovog kretanja. Brzina v definirana je omjerom prevaljenog puta l u vremenu t , pa je

$$v = \frac{l}{t} \quad (1.4)$$

što znači da se brzina izračunava dijeljenjem puta u metrima prevaljenog u vremenu izraženom u sekundama. Relacija (1.4) vrijedi kad je gibanje jednoliko, s konstantnom brzinom. Kad je gibanje nejednoliko, brzina se s vremenom mijenja, a određuje se tada kao omjer vrlo malog dijela puta (diferencijala puta dl) prevaljenog u vrlo kratkom vremenu (diferencijalu vremena dt), pa je tada $v = dl/dt$.

U SI sistemu jedinica brzina ima dimenziju

$$[v] = \frac{\text{metar}}{\text{sekunda}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} = \text{m s}^{-1} \quad (1.5)$$

pa se kaže da je dimenzija brzine metar u sekundi ili metar sekunda na minus jedan.

Ubrzanje je povećanje brzine v u vremenu t . Ono je određeno omjerom

$$a = \frac{v}{t} \quad (1.6)$$

To vrijedi za jednoliko ubrzano gibanje koje je karakterizirano konstantnim ubrzanjem. Ako je gibanje s nejednolikim ubrzanjem (ne-

jednoliko ubrzano gibanje), ubrzanje se izračunava iz omjera promjene brzine (diferencijala brzine dv) u vrlo kratkom vremenu (diferencijalu vremena dt). Tada je ubrzanje $a = dv/dt$.

Kad se uzme dimenzija brzine iz (1.5), dimenzija je ubrzanja

$$[a] = \frac{\text{metar}}{\text{sekunda}} \cdot \frac{1}{\text{sekunda}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{m s}^{-2} \quad (1.7)$$

Sila je proporcionalna masi tijela m i njegovom ubrzanju a . Ona se izračunava iz relacije

$$F = ma \quad (1.8)$$

a njezina je dimenzija

$$[F] = \text{kg m s}^{-2} \quad (1.9)$$

U SI sistemu jedinica za silu je njutn (newton, kratica N). To je sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od 1 m s^{-2} , što znači da se djelovanjem sile od 1 N tijelu mase od 1 kg povećava brzina za 1 m s^{-1} u sekundi.

Poznavajući značenje sile, moguće je ukazati na razliku između mase i težine. To je potrebno jer se često ta dva pojma zamjenjuju, što može izazvati nesporazume.

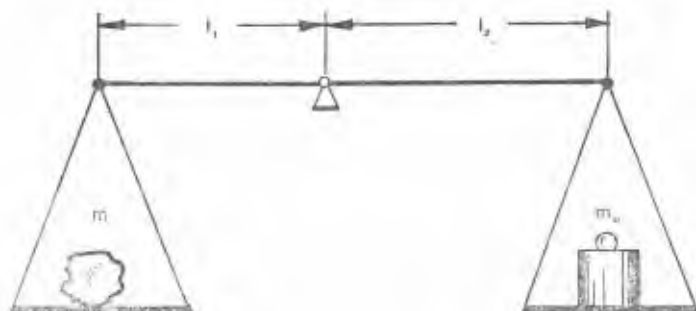
Težina tijela koje miruje na nekom mjestu na Zemlji jest sila kojom tijelo pritišće na svoju podlogu. Za najpreciznija mjerenja težine potrebno je da se tijelo nalazi u zrakopraznom prostoru. Ta je sila posljedica zakona gravitacije, prema kojemu između dva tijela djeluje privlačna sila koja je proporcionalna masama tih tijela, a obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti među njima. Na svako tijelo na Zemlji djeluje masa Zemlje svojom privlačnom silom, koja je proporcionalna njezinoj masi. Ako se, naime, tijelo nalazi iznad površine Zemlje i pusti da slobodno pada, privlačna sila Zemlje ubrzavat će padanje toga tijela. Ubrzanje će iznositi g (približno $9,81 \text{ m s}^{-2}$). Prema tome, sila koja će djelovati na tijelo ili sila kojom će tijelo pritiskati na podlogu, jednaka je produktu njegove mase i ubrzanja g koje se naziva ubrzanjem Zemljine teže. Tijelo mase m ima dakle težinu

$$G = mg \quad (1.10)$$

Ubrzanje Zemljine teže, međutim nije konstanta, jer ovisi o geografskoj širini i duljini, o položaju iznad površine Zemlje, o razmještaju Zemljine tvari i njejoj gustoći itd. Zemlja, naime, nije kugla već spljošteni elipsoid, a mase unutar planete nisu jednoliko raspodijeljene. Najveći je utjecaj geografske širine: ubrzanje Zemljine teže na razini mora na ekvatoru iznosi $g = 9,780\,49$, a na polovima $g = 9,832\,21$

m s^{-2} . Prema tome, težina nekog tijela nije nepromjenljiva karakteristika tijela, jer ona ovisi o njegovom položaju u prostoru. Još veća bi se razlika zapazila kad bi se određivala težina nekog tijela na Mjesecu. Zbog njegove manje mase (oko $1/6$ mase Zemlje) na Mjesecu bi težina bila znatno manja. Naravno da bi težina istog tijela bila znatno veća na nekoj planeti znatno veće mase.

Obično se kaže da se vaganjem određuje težina. Pogledajmo da li je ta tvrdnja točna. Neka polužna vaga (sl. 1.5) ima krakove l_1 i l_2 . Na



Sl. 1.5. Polužna vaga

jednu stranu postavlja se tijelo kojem se želi odrediti »težina«, a na drugu stranu postavljaju se utezi poznate mase m_u , sve dok se ne postigne ravnoteža. Poluga vage je horizontalna, što znači da je produkt sile okomite na jedan krak vage i duljine toga kraka jednak produktu takve sile na drugi krak vage i duljine toga kraka. Sila na desni krak vage (duljine l_1) upravo je jednaka težini ($m g$) vaganog tijela, a sila na lijevi krak (duljine l_2) težini ($m_u g$) utega, pa je za stanje ravnoteže

$$m g l_1 = m_u g l_2 \quad (1.11)$$

a odatle

$$m = m_u \frac{l_2}{l_1} \quad (1.12)$$

Masa je, dakle, jedino svojstvo tijela koje je vaganjem utvrđeno. Vagom se mjeri masa tako da se uspoređuje s poznatom masom utega. Težina se ne može izmjeriti vaganjem jer se ubrzanje Zemljine teže na mjestu vage ne može utvrditi vaganjem. Istina je, međutim, da vaga reagira na silu, odnosno na produkt sile i kraka, ali to nije predmet mjerenja, jer se ni sila ni produkt sile i kraka ne mogu odrediti vaganjem.

Težina je, dakle, sila koja djeluje na tijelo mase m , a ta sila ovisi o mjestu na kojem se tijelo nalazi. Njegova masa, međutim, ne ovisi o mjestu i ona je nepromjenljivo svojstvo tijela u području gdje vrijedi klasična (nerelativistička) mehanika.

4.3. Jedinice za energiju i snagu

U SI sistemu jedinica za energiju je džul (joule, kratica J), koja se definira kao energija ili rad što ga izvrši sila od 1 njutna (N) kad se njezino hvatište pomakne 1 metar u smjeru sile. Prema tome je

$$[J] = N \, m = kg \, m \, s^{-2} \quad (1.13)$$

Tom jedinicom mjere se svi oblici energije. To je osnovna jedinica za energiju.

Na sve jedinice, pa i na džule, primjenjuju se decimalni i dekadski višekratnici (tabl. 1.1). Tako npr. mJ (milijoule, milidžul) znači 10^{-3} džula, a TJ (terajoule, teradžul) znači 10^{12} džula.

Snaga je brzina iskorištavanja energije ili brzina transformacije energije iz jednog oblika u drugi. Snaga se može shvatiti i kao energij-

Tabl. 1.1.

Decimalni i dekadski višekratnici jedinica

Naziv	Kratica	Višekratnik
atto	a	10^{-18}
femto	f	10^{-15}
piko	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
mikro		10^{-6}
mili	m	10^{-3}
centi	c	10^{-2}
decí	d	10^{-1}
deka	da	10
hekto	h	10^2
kilo	k	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}

ja u jedinici vremena, promatra li se dovoljno kratki vremenski interval u kojemu se brojčana vrijednost energije može smatrati konstantnom. Snaga P je dakle omjer energije W i vremena, pa je

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.14)$$

Ako se energija brzo mijenja s vremenom, snaga se određuje iz omjera dW/dt gdje je dW promjena energije u vrlo kratkom vremenskom intervalu dt .

U SI sustavu jedinica za snagu je vat (watt, kratica W). To je snaga koja u jedinici vremena iskoristi energiju od 1 J. Prema tome je

$$[W] = J s^{-1} = kg m^2 s^{-3} \quad (1.15)$$

Iz relacije (1.15) izvodi se i jedinica za energiju 1 vatsekunda (Ws), koja je upravo jednaka 1 džulu.

Jedinica J, odnosno Ws, premalena je za praktičnu upotrebu u energetici, pa je vrlo često u upotrebi jedinica kilovatsat (kWh), koja se upotrebljavala znatno prije nego što je uveden SI-sustav. Jedinica kWh ne pripada ni jednom sustavu jedinica, jer ni u jednom od njih sat (h) nije među osnovnim (polaznim) jedinicama. Budući da je $1 kW = 10^3 W$, a $h = 3600 s$, to je

$$kWh = 3,6 \cdot 10^6 Ws = 3,6 \cdot 10^6 J = 3,6 MJ \quad (1.16)$$

Korisno je navesti i često upotrebljavane višekratnike jedinice kWh, jer upotreba dekadskih višekratnika može izazvati zabunu. Tako npr. 1 MWh znači $10^3 kWh$, jer se kratica M odnosi na Wh, pa je

$$MWh = 10^6 Wh = 10^3 kWh = 3,6 GJ \quad (1.17)$$

Analogno tome gigavatsat (GWh) je

$$GWh = 10^9 Wh = 10^6 kWh = 3,6 TJ \quad (1.18)$$

a teravatsat (TWh)

$$TWh = 10^{12} Wh = 10^9 kWh = 3,6 PJ \quad (1.19)$$

U fizici se još danas često upotrebljavaju jedinice CGS-sustava, koji polazi od osnovnih jedinica centimetar-gram-sekunda. U tom je sustavu jedinica za silu dyn (din), definirana kao sila koja masi od 1 g daje ubrzanje od $1 cm s^{-2}$. Prema tome je

$$dyn = g cm s^{-2} = 10^{-3} kg \cdot 10^{-2} m s^{-2} = 10^{-5} N \quad (1.20)$$

pa je dyn za 100 000 puta manja jedinica od N. U CGS-sustavu erg je jedinica za energiju. To je energija sile od 1 dyna na putu od 1 cm u smjeru djelovanja sile, pa je

$$\text{erg} = \text{dyn cm} = 10^{-5} \text{ N} \cdot 10^{-2} \text{ m} = 10^{-7} \text{ N m} = 10^{-7} \text{ J} \quad (1.21)$$

Tehnički sustav jedinica, koji se uglavnom razvio u okviru strojarstva, polazi od osnovnih jedinica: za duljinu — metar, za vrijeme — sekunda, za silu — kilopond (kp). Pod jedinicom kilopond razumijeva se sila koja tijelu mase od 1 kg daje ubrzanje $g = 9,806\,65 \text{ m s}^{-2}$, koje odgovara normiranom ubrzanju sile teže, pa je

$$\text{kp} = 9,806\,65 \text{ kg m s}^{-2} = 9,806\,65 \text{ N} \quad (1.22)$$

Jedinica za energiju u tehničkom sustavu jedinica je kilopondmetar (kpm), koji je jednak energiji sile od 1 kp na putu od 1 m u smjeru djelovanja sile, pa je

$$\text{kpm} = 9,806\,65 \text{ N m} = 9,806\,65 \text{ J} \quad (1.23)$$

U istom sustavu jedinica, pomoću jedinice za energiju kpm definira se jedinica za snagu kilopondmetar u sekundi (kpm s^{-1}), pa je

$$\text{kpm s}^{-1} = 9,806\,65 \text{ J s}^{-1} = 9,806\,65 \text{ W} \quad (1.24)$$

U termodinamici razvio se u prošlosti sustav jedinica koji je kombinacija tehničkog sustava i dviju osnovnih jedinica nauke o toplini: kalorija (cal) — jedinica za količinu topline, i kelvin (K) — jedinica za temperaturu. Kalorija je bila definirana na nekoliko načina. U starijoj literaturi najčešće se upotrebljava tzv. kalorija petnaestog stupnja (cal_{15}), definirana kao količina topline (energije) potrebna da se 1 g vode pri normiranom atmosferskom tlaku (1 atm) zagrije od 14,5 do 15,5°C. Zbog nepreciznosti mjerenja tako definirana jedinica nije bila točna, pa je poslije uvedena tzv. kalorija parnih tablica, definirana kao 860-ti dio vatsata (Wh), ali koji je tada bio drukčije definiran nego u SI-sustavu. Prema tadašnjoj definiciji Ws nije bila jednaka džulu, pa se danas kalorija definira samo kao višekratnik jedinice džul.

$$\text{cal} = 4,186\,8 \text{ J (točno)} \quad (1.25)$$

dakle, bez obzira na toplinska svojstva vode.

Najčešće se susreće tisuću puta veća jedinica: kilokalorija (1 kcal = 10^3 cal). Pri upotrebi dekadskih višekratnika treba voditi računa da se prefiks, koji označava višekratnik, odnosi na jedinicu cal. Tako npr. znači

$$\text{Tcal} = 10^{12} \text{ cal} = 10^9 \text{ kcal} \quad (1.26)$$

U atomskoj i nuklearnoj fizici upotrebljava se jedinica energije elektronvolt (eV), gdje je e oznaka za elementarni električni naboj, a V (volt) je jedinica za električni potencijal i napon. Elektronvolt se definira kao kinetička energija elektrona koju on dobije prošavši kroz električno polje razlike potencijala 1 V. Budući da elementarni električni naboj iznosi $1,602 \cdot 10^{-19}$ As (ampersekunda), elektronvolt je energija

$$eV = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (1.27)$$

jer je $\text{As} \cdot \text{V} = \text{Ws} = \text{J}$.

Kad se razmatraju primarni oblici energije često se upotrebljavaju jedinice za energiju: tona ekvivalentnog ugljena (t ekv. ugljena, neki upotrebljavaju kraticu tec — *ton equivalent carbon*) i tona ekvivalentne nafte (t. ekv. nafte, neki upotrebljavaju kraticu tep — *ton equivalent petroleum*). Tona ekvivalentnog ugljena je energija koju ima 1 tona ugljena ogrijevne moći 7 000 kcal po kg, pa je

$$\begin{aligned} \text{t ekv. ugljena} &= \text{tec} = 7 \cdot 10^3 \text{ kcal kg}^{-1} \cdot 10^3 \text{ kg} = \\ &= 7 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 29,307 \text{ GJ} \end{aligned} \quad (1.28)$$

Tona ekvivalentne nafte je energija koju ima 1 tona sirove nafte ogrijevne moći 10 000 kcal po kg, pa je

$$\begin{aligned} \text{t ekv. nafte} &= \text{tep} = 10^4 \text{ kcal kg}^{-1} \cdot 10^3 \text{ kg} = \\ &= 10^7 \text{ kcal} = 41,868 \text{ GJ} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Vrlo je česta jedinica za snagu konjska snaga (KS), koja je 75 puta veća od jedinice za snagu u tehničkom sustavu jedinica

$$\text{KS} = 75 \text{ kpm s}^{-1} = 735,499 \text{ W} \quad (1.30)$$

Danas se jedinicom konjska snaga označuje snaga pogonskih strojeva (motori s unutrašnjim izgaranjem, vodne turbine).

4.4. Neke angloameričke jedinice

U Velikoj Britaniji i Sjedinjenim Američkim Državama, pa i u područjima pod njihovim utjecajem, u upotrebi su sustavi jedinica koji se obično nazivaju angloamerički sustavi jedinica. Oni postepeno nestaju, zbog uvođenja SI-sustava, ali se danas još mnogo susreću, pa ih je potrebno poznavati.

U engleskom govornom području često se kao jedinica za količinu upotrebljava British thermal unit (kratica: Btu, a u starijoj literaturi i BTU). Ta je jedinica, kao i kalorija, bila definirana pomoću toplinskih svojstava vode, polazeći od jedinice mase pound (lb) i stupnja Fahrenheita (°F). Danas se upotrebljava jedinstvena British thermal unit definirana pomoću relacije (1.25), ali preračunata na lb i °F, pa je

$$\text{Btu} = 1\,055,06 \text{ J} \quad (1.31)$$

Uzevši u obzir opet (1.25) dobiva se odnos između Btu i kcal

$$\text{Btu} \cong 0,252 \text{ kcal} \quad (1.32)$$

Za snagu pogonskih strojeva upotrebljava se angloamerička »konjska snaga« (horse power, kratica hp), koja je jednaka

$$\text{hp} = 745,7 \text{ W} \quad (1.33)$$

Ona je izvedena iz jedinice za snagu u angloameričkom tehničkom sustavu jedinica. Ona se nešto razlikuje od jedinice KS, pa se te dvije jedinice ne smiju zamjenjivati.

Vrlo često se nailazi na jedinicu barel (petroleum barrel) kao jedinicu za volumen sirove nafte. Ona je izvedena iz jedinice za volumen US gallon (3,785 4 dm³), pa je

$$\text{petroleum barrel} = 42 \text{ US gallon} = 158,99 \text{ dm}^3 \quad (1.34)$$

Može se približno računati da u 1 toni sirove nafte ima 7,5 barela, što odgovara gustoći sirove nafte od 0,839 kg/dm³.

Jedinica za masu u SAD je US short ton

$$\text{US short ton} = 907,185 \text{ kg} \quad (1.35)$$

a u Velikoj Britaniji UK ton

$$\text{UK ton} = 1\,016,05 \text{ kg} \quad (1.36)$$

Drugo poglavlje

PRIMARNI KONVENCIONALNI OBLICI ENERGIJE

1. KLASIFIKACIJA PRIMARNIH OBLIKA ENERGIJE

Pored klasifikacije na konvencionalne i nekonvencionalne primarne oblike energije, koja je navedena u prvom poglavlju, primarni oblici energije mogu se svrstati, s obzirom na njihovu obnovljivost, u dvije skupine: primarni oblici koji se prirodno obnavljaju i oni koji se ne obnavljaju.

U prvu skupinu ubrajaju se: Sunčevo zračenje koje se može neposredno iskoristavati (to je energija Sunca u užem smislu, jer su gotovo svi oblici energije na Zemlji u krajnjoj liniji posljedica Sunčeve aktivnosti), vodne snage, energija vjetra, energija plime i oseke, energija morskih valova, toplina mora. Drugoj skupini pripadaju: fosilna (ugljen, sirova nafta i zemni plin) i nuklearna goriva, Zemljina unutrašnja toplina koja se pojavljuje na površini (vrući izvori), toplina u Zemljinoj unutrašnjosti, te laki atomi potrebni za fuziju.

Primarni oblici energije koji se obnavljaju ne mogu se tokom vremena istrošiti jer se obnavljaju neprestano (promjena atmosferskih prilika izaziva vjetar, isparavanjem vode stvaraju se oblaci, a iz njih oborine, koje se slijevaju u vodotoke i mora itd.), iako je moguće da se potpuno iskoriste neki primarni obnovljivi oblici energije. To se događa npr. izgradnjom toliko hidroelektrana na nekom vodotoku da se njima obuhvati ukupna potencijalna energija vodotoka. Tada nije moguće na tom vodotoku izgraditi nijednu novu hidroelektranu. Time je naravno ograničeno iskorištavanje vodnih snaga, pa se energetske iskoristavanjem toga vodotoka može u nekom vremenskom intervalu dobivati samo ograničena količina energije, ali zbog toga iskorištavanje nije vremenski ograničeno. Ono bi moglo trajati neizmjereno dugo, ako bi se stalno obnavljala postrojenja za energetske iskoristavanje potencijalne energije vodotoka. Nasuprot tome, energija koja je npr.

namnogom u ugljenu, ma kako bila velika, ipak je ograničena, pa će jednog dana te rezerve biti iscrpljene. Svakako da trajanje rezerva ovisi o intenzivnosti iskorištavanja.

Između primarnih oblika energije koji se obnavljaju i onih koji se ne obnavljaju postoje razlike u konstantnosti, mogućnosti uskladištenja i transporta, ali i u pogledu investicija za izgradnju postrojenja i potrebnih troškova za njihov pogon i održavanje.

Potencijalne mogućnosti primarnih oblika energije koji se obnavljaju mijenjaju se s vremenom, što znači da je snaga tih energetske izvora funkcija vremena i da ona nije konstantna. Te promjene mogu biti: vrlo brze (snaga vjetera ovisi o trećoj potenciji njegove brzine), brze (snaga plime i oseke proporcionalna je koti morske razine, vremenski razmak između dvije plime na Atlantskom oceanu iznosi nešto više od 12 sati, intenzitet zračenja Sunca ovisi o dijelu dana i o oblačnosti, a ima dnevni ciklus), polagane (vodne snage su proporcionalne količini vode koja protječe vodotokom, a količina vode najčešće se malo mijenja tokom dana) i vrlo polagane (toplina mora, jer snaga ovisi o temperaturama na površini i u većim dubinama koje se mijenjaju s promjenom godišnjih doba).

Većinu oblika energije koji se obnavljaju nije moguće akumulirati u onom obliku u kojem se pojavljuju u prirodi (vjetar, plima i oseka, zračenje Sunca), pa ih treba iskoristiti u času kad se pojavljuju. Akumuliranje vode tehnički je moguće (akumulacijski bazeni), ali su za to najčešće potrebna velika ulaganja. Zbog promjenljivosti snage ne mogu se takvim primarnim oblicima energije zadovoljiti potrebe potrošača, jer se one najčešće vremenski ne poklapaju s mogućnostima iskorištavanja, pa su potrebni drugi oblici energije da bi se uskladile potrebe i proizvodnja.

Nasuprot tome, primarni oblici energije koji se ne obnavljaju mogu se iskorištavati prema potrebama. Osim toga, oni oblici koji se u svome prirodnom obliku mogu transportirati (drvo, fosilna i nuklearna goriva) daju se uskladištiti bez većih teškoća i uz prihvatljive troškove.

Nijedan od primarnih oblika energije koji se obnavljaju nije moguće transportirati onakav kakav se pojavljuje u prirodi, a većina primarnih oblika koji se ne obnavljaju transportira se u prirodnom obliku. To vrijedi naročito za fosilna i nuklearna goriva, koja danas čine znatan dio međunarodne trgovine. Ostali primarni oblici koji se ne obnavljaju (unutrašnja energija Zemlje) mogu se prema današnjem stanju razvika tehnike transportirati na veće udaljenosti samo nakon transformiranja u električnu energiju.

Pri izgradnji postrojenja na fosilna i nuklearna goriva kao primarnim oblicima energije potrebna su — po jedinici snage — većinom manja sredstva nego za ona koja se oslanjaju na ostale primarne oblike energije. Za pogon postrojenja potrebno je osigurati odgovarajuće gorivo, što su dodatni izdaci. Takvih troškova, međutim, nema kad se upotrebljavaju primarni oblici energije koji se obnavljaju.

Mogućnost prilagodbe potrebama, mogućnost uskladištenja i transporta u prirodnom obliku, te manje investicije koje su pri tom potrebne razlozi su zbog kojih se danas više upotrebljavaju neobnovljivi oblici energije.

Ima, dakle, raznovrsnih primarnih oblika energije, ali za njihovo praktično iskorištavanje nije mjerodavno samo njihovo postojanje nego tehnička mogućnost i ekonomska opravdanost njihovog iskorištavanja. S obzirom na te zahtjeve primarni oblici energije mogu se podijeliti u tri skupine: a) oblici energije za koje nije ni tehnički riješen način iskorištavanja; b) oblici energije za koje je riješen način iskorištavanja, ali su oni ipak — prema današnjem shvaćanju — ekonomski nepovoljni; c) energetske oblici kojih je upotreba i ekonomski opravdana.

U prvu skupinu ubrajaju se unutrašnja toplina Zemlje koja se ne pojavljuje na površini i fuzija lakih atoma, a drugoj pripadaju: neposredno iskorištavanje Sunčeva zračenja u velikim postrojenjima, energija vjetra u većem opsegu, energija plime i oseke, toplina mora. U treću skupinu od oblika energije koji se obnavljaju dolaze samo vodne snage, a od oblika koji se ne obnavljaju fosilna i nuklearna goriva, te topli izvori.

Drvo je primarni oblik energije koji se obnavlja jer ga je moguće trajno — bez vremenskog ograničenja — dobivati iz nekog šumskog kompleksa ako je sječa usklađena s prirastom. Pri tom je bitan intenzitet sječe, što nije slučaj kad se promatraju mogućnosti ostalih obnovljivih oblika energije. Naime uz znatan intenzitet iskorištavanja (znatno veći od prirasta) mogu se vrlo brzo iscrpiti sve rezerve, ali se, jednako tako, malim intenzitetom iskorištavanja (manjim od prirasta) mogu zalihe povećati. Prema tome, drvo kao primarni energetske oblik nalazi se s obzirom na obnovljivost između oblika koji se obnavljaju i onih koji se ne obnavljaju — o načinu eksploatacije ovisi treba li drvo smatrati obnovljivim ili neobnovljivim primarnim oblikom energije.

Od primarnih oblika energije samo se vrući izvori mogu neposredno upotrijebiti npr. za grijanje prostorija. Dovoljno je vrelu vodu pustiti da struji kroz radijatore. U svim drugim slučajevima potrebno je transformirati primarni oblik energije u neki drugi, pogodniji oblik. Unatoč tome smatra se da je drvo i fosilna goriva moguće neposredno iskorištavati jer se mogu dostaviti potrošačima u prirodnom obliku. Ipak ih se mora prilikom upotrebe transformirati u drugi energetske oblik. Ona, naime, izgaraju u ložištima, a pri tom se kemijska energija preko unutrašnje energije plinova izgaranja transformira u toplinu.

2. UGLJEN

2.1. *Karakteristike ugljena*

Ugljen se dijeli na lignit, mrki i kameni ugljen.

Ogrjevná moć je osnovno obilježje ugljena. Razlikuju se gornja i donja ogrjevná moć. Gornja ogrjevná moć je količina topline koja se oslobađa potpunim izgaranjem (pretvorbom kemijske energije u toplinsku) 1 kg ugljena, ako se nakon izgaranja, koje se događa pri višim temperaturama, produkti izgaranja (plinovi i pepeo) ohlade do temperature od 20°C koju je imalo gorivo i zrak potreban za izgaranje prije procesa, pri čemu se pretpostavlja da se sva vodena para kondenzirala. Vodena para u produktima izgaranja nastala je izgaranjem vodika iz goriva i od vlage koja se nalazila u ugljenu. Donja ogrjevná moć razlikuje se od gornje samo za toplinu kondenzacije pare, jer se tada računa da voda u plinovima izgaranja ostaje u obliku vodene pare. Kad se navode podaci o ogrjevnoj moći ugljena, normalno se misli na donju ogrjevnú moć jer se vodena para u ložištima ne kondenzira.

Ni donja ni gornja ogrjevná moć goriva, međutim, ne predstavljaju stvarnu količinu topline koja se može iskoristiti prilikom izgaranja; npr. plinovi izgaranja ne smiju se u parnom kotlu ohladiti do temperature okoline jer bi tada zbog kondenzacije nastala korozija metalnih dijelova.

Nema opće prihvaćene klasifikacije vrsta ugljena, pogotovo za ugljene niže ogrjevne moći. U statistikama koje objavljuje Ekonomska komisija za Evropu kamenim ugljenom smatra se onaj kojemu je gornja ogrjevná moć 5 700 kcal/kg (23,87 MJ/kg) ili veća od toga, pri čemu

se ne uzima u obzir količina pepela, što znači da se ogrjevnna moć određuje po kilogramu tvari u koju nije uključena količina pepela. Takva granica između lignita i mrkog ugljena nije definirana, pa se u većini statistika zajednički prikazuju količine tih dviju vrsta. Ponekad se u lignite ubrajaju ugljeni koji imaju još vidljivu strukturu drveta. Može se ocijeniti da je granica između mrkog ugljena i lignita ogrjevnna moć od 3 000 kcal/kg (12,56 MJ/kg).

Sadržaj vlage u ugljenu smanjuje njegovu ogrjevnnu moć. Kameni ugljen ima redovito mali postotak vlage (manje od 10%), mrki ugljen znatno veći (i do 40%), a u lignitu je taj postotak vrlo visok (i do 60%). Naravno da postotak vlage u ugljenu — nakon što je izvađen — ovisi o obradi (pranje ugljena) i o atmosferskim utjecajima kojima je on izvrgnut za vrijeme uskladištenja i prijevoza.

Sadržaj pepela definiran je kao količina neizgorivih sastojaka po kg ugljena. On u kamenom ugljenu prije separacije (rovni ugljen) iznosi 5 do 15%, ovisno o primjesama jalovine u sloju. Krupnije vrste, nakon separacije i ispiranja, sadrže manje pepela. Mrki ugljen i lignit imaju veće količine pepela, koje mogu — u vrlo nepovoljnom slučaju — iznositi i više od 60%.

Sadržaj sumpora u ugljenu može u nepovoljnom slučaju biti i do 9%. Danas, kad se sve više pazi na zaštitu okoline, sadržaj sumpora postaje sve važniji jer se sumporni dioksid iz plinova izgaranja ne može jednostavno ukloniti.

Gorivi sastojci ugljena mogu se podijeliti na hlapljive sastojke i na tzv. fiksni ugljik. Hlapljivi sastojci su onaj dio koji se pojavljuje u obliku plinova ili para pri ugrijavanju do temperature od 875°C; fiksni ugljik i pepeo čine tada kokсни ostatak.

Prema postotku hlapljivih sastojaka klasificira se kameni ugljen na: antracit — do 10%, mršavi ugljen 10—14%, masni ugljen 19—28%, plinski ugljen 28—35% i plameni ugljen — s više od 35% hlapljivih sastojaka. Taj udio je kod mrkog ugljena 45—55%, a kod lignita 55—65%.

Masni, plameni i dio plinskog ugljena mogu se upotrijebiti za proizvodnju metalurškog koksa. To se svojstvo ugljena zove svojstvo za pečenja (koksiranja). Na temperaturi između 360 i 430°C ugljen postaje najprije plastičan, zatim omekša i slije se. Zapečenje ima za posljedicu promjenu zrnate strukture, pa i od sitnog ugljena nastaju veći ili manji komadi. Ostale vrste kamenog ugljena, pa ni mrki ugljen ni lignit, ne mogu poslužiti za proizvodnju metalurškog koksa, jer preostali koks ili nije dovoljno čvrst ili se javlja kao prašina. Takav se koks ne može upotrijebiti za visoke peći.

Ugljen se sastoji od ostataka biljaka, a nastao je od tresetišta iz daleke prošlosti. Najprije se, naime, počinje stvarati treset, koji nastaje kad močvarna voda ili materijal drugih biljaka izolira ostatke biljaka od zraka. Treset prelazi u lignit nakon što je prekriven gline-nim ili pješćanim slojevima, koji su geološki mlađi. Tada se djelova-

njem tlaka smanjuje postotak vode, pa treset postaje sve tvrdi i kompaktniji. Pougljenjivanje će napredovati ako se poveća tlak i temperatura. Tlak može porasti zbog daljeg taloženja sedimenata ili spuštanja slojeva treseta i lignita u veće dubine učinkom tektonskih sila, a temperatura se povećava s povećanjem dubine i vulkanskom aktivnošću. Djelovanjem tlaka i temperature tvrdoća raste, a postotak se vlage smanjuje na 20—30%. To je već mrki ugljen bez sjaja. Ako tlak i temperatura dovoljno dugo intenzivno djeluju, još će više opasti postotak vlage, pa će nastati sjajni mrki ugljen. Još dugotrajniji učinak tlaka i temperature stvara kameni ugljen.

Smatra se da je za pretvorbu mrkog ugljena u kameni potrebna temperatura od 300°C. U tom procesu najprije nastaje kameni ugljen u kojemu je postotak hlapljivih sastojaka znatan, zatim je on sve manji, pa se kao krajnji produkt pougljenjivanja dobiva antracit. Prema nekim procjenama, za stvaranje mršavog kamenog ugljena potrebna je temperatura od 360°C, a za antracit oko 500°C. U rudnicima kamenog ugljena, normalno, opada postotak hlapljivih sastojaka od gornjih slojeva prema donjima.

Na sjevernoj hemisferi najveći dio kamenog ugljena nastao je u geološkoj formaciji karbona (prije 270 do 350 milijuna godina), a na južnoj u permu (prije 225 do 270 milijuna godina). Najviše mrkog ugljena i lignita nastalo je u tercijaru (prije manje od 70 milijuna godina).

Sama starost slojeva nije uvijek mjerilo »dozrijevanja« ugljena. Tako je mrki ugljen u području Moskve, nastao prije oko 250 milijuna godina, stariji od kamenog ugljena u SR Njemačkoj. Tu nije nastao prijelaz u kameni ugljen jer nije bilo tektonskog djelovanja.

2.2. Rezerve ugljena

Pod rezervama neke iskoristive materije razumijeva se dovoljna koncentracija koja je nastala djelovanjem geoloških i fizičko-kemijskih faktora. Svi su, naime, kemijski elementi raspodijeljeni na Zemlji, ali se samo njihova koncentracija može označiti kao rezerva.

Za sve rezerve odlučujuća je mogućnost ekonomičnog iskorištavanja, koja ovisi o više činilaca: o količini, koncentraciji (udio tvari u toni materijala koji treba preraditi), o dubini smještaja, debljini slojeva, proizvodnim troškovima, udaljenosti nalazišta od potrošača itd.

Rezerve ugljena određuju se na osnovi geoloških istraživanja i u toku same eksploatacije. Svakako da je riječ samo o procjenama jer se točno stanje može utvrditi tek kad se izvadi posljednja tona ugljena. To, naravno, vrijedi za sve rude. Procjena rezerva podvrgnuta je promjenama jer ovisi o opsegu istražnih radova.

U statistikama o rezervama ugljena koje objavljuje Svjetska konferencija za energiju razlikuju se iskoristive, poznate i ukupne (geološke) rezerve. Iskoristivim se rezervama smatraju one količine koje se mogu eksploatirati uz današnju tehnologiju i današnje ekonomske uvjete. U poznate rezerve ubrajaju se sve količine za koje se može pretpostaviti da se nalaze u poznatim nalazištima, i kojima su rudarskim radovima i bušenjem određene kvaliteta i debljina slojeva. Svakako da poznate rezerve obuhvaćaju i iskoristive rezerve. U ukupne rezerve spadaju osim iskoristivih i poznatih rezerva još i dodatne rezerve koje su procijenjene na osnovi općeg poznavanja geoloških uvjeta, istražnih radova manjeg opsega i sličnosti geoloških prilika s onima u poznatim nalazištima. Treba, međutim, naglasiti da količine ugljena deklarirane kao iskoristive rezerve nisu količine ugljena koje se stvarno mogu dobiti iz nalazišta, jer će dio ugljena — pri bilo kakvom načinu eksploatacije — ostati neiskorišten u nalazištu. Koliko će od iskoristivih rezerva ostati u nalazištu ovisi, osim o geološkim uvjetima (broj, debljina i nagib slojeva, postojanje jalovih slojeva i sl.), o načinu eksploatacije. Pri jamskoj eksploataciji (eksploatacija slojeva na većoj dubini) ostvaruje se iskorištenje od oko 35% iskoristivih rezerva ako se primijeni metoda komora i stupova, a iskorištenje od 60 do 80% kad se primijene modernije metode eksploatacije. Pri površinskoj eksploataciji ostvaruje se iskorištenje od 80 do 90% iskoristivih rezerva ugljena.

Tabl. 2.1.

Razvoj procjene svjetskih rezerva ugljena (10⁹ tona ekv. ugljena)

Godina	Iskoristive rezerve	Ukupne rezerve
1974.	471	8 223
1976.	560	9 045
1977.	635	10 126

Procjene rezerva ugljena stalno se korigiraju, a to se naročito dogodilo nakon 1973. godine, kad su cijene sirove nafte naglo povišene, što je izazvalo povišenje cijena i drugih goriva. To je utjecalo i na intenziviranje istraživanja u oblasti ugljena, ali i na reviziju do tada izvršenih procjena iskoristivih i ukupnih rezerva ugljena. To pokazuju podaci [5] o procjenama svjetskih rezerva ugljena navedeni u tabl. 2.1. Vidi se da su u tri godine iskoristive rezerve porasle za oko 35%, a ukupne rezerve za oko 23%.

U tabl. 2.2. i 2.3. nalaze se podaci o iskoristivim, poznatim i ukupnim rezervama ugljena objavljeni 1974. [4] i 1977. godine [5].

Tabl. 22.

Rezerve ugljena (podaci objavljeni 1974. godine), 10⁶ tona ekv. ugljena

	Iskorištive rezerve			Poznate rezerve			Ukupne rezerve			Udio %
	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno	
Afrika	130	0,1	13,1	25,2	0,1	25,3	48,8	0,3	49,1	0,6
Amerika bez SAD	6,6	0,3	6,9	15,1	0,4	15,5	101,2	11,1	112,3	1,4
Azija bez SSSR-a	91,5	2,1	93,6	325,9	4,2	330,1	1 074,1	6,4	1 080,5	13,1
Evropa bez SSSR-a	54,0	30,7	84,7	175,3	58,7	234,0	426,8	63,3	490,1	5,0
Oceanija	13,4	3,2	16,6	24,0	15,4	39,4	104,8	27,4	132,2	1,6
SSSR	61,6	22,2	83,8	123,2	44,5	167,7	2 966,5	712,7	3 679,2	44,7
SAD	158,1	14,6	172,7	316,1	29,1	345,2	2 276,3	403,2	2 679,5	32,6
Svjeta	398,2	73,2	471,4	1 004,8	152,4	1 157,2	6 998,5	1 224,2	8 222,9	100,0
10 ⁶ tona ugljena	430,8	160,3	591,1	1 077,8	342,6	1 420,4	8 122,7	2 623,9	10 746,6	
Ugrijevna moc (kcal/kg)	6 470	3 197	5 582	6 526	3 114	5 703	6 031	3 266	5 356	
	27,09	13,39	23,37	27,32	13,04	23,88	25,25	13,67	22,42	

Tabl. 23.

Rezerve ugljena (podaci objavljeni 1977. godine), 10⁶ tona ekv. ugljena

	Iskorištive rezerve			Ukupne rezerve			Udio %
	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno	
Afrika	31,7	0,1	31,8	172,7	0,2	172,9	1,7
Amerika bez SAD	13,6	6,5	20,1	121,3	28,4	149,7	1,5
Azija bez SSSR-a i Kine	37,4	2,6	40,0	76,3	6,7	83,0	0,8
Evropa bez SSSR-a	95,0	33,8	128,8	535,7	53,7	589,4	5,8
Oceanija	18,2	9,3	27,5	213,9	49,0	262,9	2,6
SSSR	82,9	27,0	109,9	3 993,0	867,0	4 860,0	48,0
SAD	113,2	64,4	177,6	1 190,0	1 380,4	2 570,4	25,4
Kina	98,9	—	98,6	1 424,7	13,4	1 438,1	14,2
Svjeta	490,9	143,7	634,6	7 727,6	2 398,8	10 126,4	100,0

Najveće rezerve kamenog ugljena nalaze se na sjevernoj polukugli i to na području koje polazi od središnjeg dijela sjevernoameričkog kontinenta, preko Evrope i Sovjetskog Saveza do Kine. Ukupne svjetske rezerve kamenog ugljena procjenjuju se danas na skoro 8 000 milijardi, a iskoristive rezerve na oko 600 milijardi tona ekv. ugljena. Poznate rezerve su oko 2,5 puta veće od iskoristivih rezerva. Najveće su iskoristive rezerve kamenog ugljena u SAD, Kini, Evropi i SSSR-u (nešto više od 80% iskoristivih svjetskih rezerva). Geografska raspodjela ukupnih rezerva ugljena još je neravnomjernija. SSSR-u pripada nešto manje od 52% svih ukupnih svjetskih rezerva kamenog ugljena, Kini nešto više od 18%, SAD nešto više od 15%, a Evropi oko 7%. Ostala područja vrlo su siromašna rezervama kamenog ugljena — imaju tek 9,2% svjetskih rezerva kamenog ugljena.

U Evropi su rezerve kamenog ugljena također nejednoliko raspoređene (tabl. 2.4.). U tri zemlje (SR Njemačka, Velika Britanija i Poljska) nalazi se 94% iskoristivih, a 96% ukupnih rezerva kamenog ugljena.

Najveće rezerve mrkog ugljena i lignita nalaze se između 35. i 70. stupnja sjeverne geografske širine. Mrki ugljen i lignit nalaze se obično u područjima koja nisu bila izvrgnuta znatnijim tektonskim promjenama. Podaci o rezervama mrkog ugljena i lignita koji se mogu pronaći u literaturi nisu sasvim pouzdani, pogotovo u pogledu prera-

Tabl. 2.4.

Iskoristive i ukupne rezerve ugljena u evropskim zemljama s većim rezervama ugljena (10⁹ tona ekv. ugljena)

	Iskoristive rezerve			Ukupne rezerve		
	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki i lignit	ukupno
SR Njemačka	23,92	10,50	34,42	230,30	16,50	246,80
Velika Britanija	45,00	—	45,00	163,58	—	163,58
Poljska	20,80	0,99	21,79	121,00	3,00	124,00
Čehoslovačka	2,49	2,32	4,81	11,57	5,91	17,48
Njemačka DR	0,10	7,56	7,66	0,20	9,20	9,40
Jugoslavija	0,02	3,79	3,81	0,09	6,91	7,00
Mađarska	0,23	0,72	0,95	0,71	2,84	3,55
Nizozemska	1,43	—	1,43	2,90	—	2,90
Bugarska	0,02	2,18	2,20	0,03	2,60	2,63
Francuska	0,43	0,01	0,44	2,33	0,04	2,37
Španjolska	0,32	0,22	0,54	1,79	0,51	2,30
Rumunjska	0,05	0,36	0,41	0,59	1,29	1,88
Grčka	—	0,40	0,40	—	0,90	0,90
Belgija	0,13	—	0,13	0,25	—	0,25

čunavanja u količine ekvivalentnog ugljena, jer se računa s prosječnom ogrjevnom moći, a stvarne ogrjevne moći mrkog ugljena i lignita u pojedinim područjima znatno se razlikuju od prosjeka.

Ukupne rezerve mrkog ugljena i lignita u svijetu (tabl. 2.3) iznose nešto manje od 2 400 milijarda tona, a iskoristive oko 150 milijarda tona ekvivalentnog ugljena. Od ukupnih svjetskih rezerva, u SSSR-u i SAD nalazi se skoro 94% mrkog ugljena i lignita, a od iskoristivih rezerva nešto je više od 87% na području SAD, Evrope i SSSR-a.

U Evropi, u četiri zemlje (SR Njemačka, Njemačka DR, Jugoslavija i Čehoslovačka) koncentrirano je preko 71% ukupnih i iskoristivih rezerva mrkog ugljena i lignita.

Kad se promatraju ukupne rezerve svih vrsta ugljena, još je očiti-ja nejednolikost raspodjele tih rezerva. U SSSR-u, SAD i Kini nalazi se, naime, skoro 88% ukupnih rezerva ugljena, u Evropi manje od 6%, a na sve ostale zemlje (Afrika, Latinska Amerika, južna Azija, Oceanija) otpada tek 6% od ukupnih rezerva svih vrsta ugljena.

Razlika u rezervama ugljena između sjeverne i južne hemisfere vjerojatno je posljedica i manje površine kontinenta na južnoj hemisferi, ali i dosadašnje nedovoljne istraženosti tih područja. S druge strane, u nekim područjima južnog dijela globusa takve su geološke prilike koje isključuju postojanje većih nalazišta ugljena i lignita. Veće rezerve postoje samo u Južnoafričkoj Republici i Australiji, a izgleda da su na području Botsvane otkrivene velike rezerve ugljena (najavljuje se otkriće rezerva od oko 1 000 milijardi tona ugljena; te količine nisu uključene u pregled rezerva u tabl. 2.3).

Bolja slika o rezervama dobiva se ako se izračunaju iskoristive i ukupne rezerve po stanovniku (tabl. 2.5). I na taj način pokazuju

Tabl. 2.5.

**Iskoristive i ukupne rezerve ugljena po stanovniku
(tona ekv. ugljena po stanovniku u 1974. godini)**

	Iskoristive rezerve	Ukupne rezerve
Afrika	81,4	442,4
Amerika bez SAD	60,1	447,9
Azija bez SSSR-a i Kine	28,7	59,6
Evropa bez SSSR-a	273,2	1 250,3
Oceanija	1 328,5	12 700,5
SSSR	435,8	19 270,4
SAD	534,2	12 130,3
Kina	123,6	1 797,6
Svijet	163,9	2 615,8

se vrlo velike razlike u rezervama ugljena u pojedinim dijelovima svijeta. Najveće rezerve po stanovniku ima SSSR, vrlo velike SAD i Oceanija, a najmanje Azija, ako se isključe SSSR i Kina.

Tabl. 2.6.

Rezerve ugljena u Jugoslaviji

	Ukupne rezerve svi rudnici		Bilančne rezerve veći rudnici		Eksploataбилne rezerve veći rudnici	
	10 ⁶ t ugljena ekv. uglj.	10 ⁶ t ugljena ekv. uglj.	10 ⁶ t ugljena ekv. uglj.	10 ⁶ t ugljena ekv. uglj.	10 ⁶ t ugljena ekv. uglj.	10 ⁶ t ugljena ekv. uglj.
Kameni ugljen						
Hrvatska	66	63	26	22	23	20
Srbija	33	28	5	4	3	3
Ukupno	99	91	31	26	26	23
Mrki ugljen						
Bosna i Hercegovina	1 459	823	1 370	708	1 033	532
Slovenija	315	157	171	78	60	27
Srbija	195	117	77	39	57	29
Ukupno	1 969	1 097	1 618	825	1 150	588
Lignit						
Bosna i Hercegovina	3 020	1 251	1 601	591	1 021	377
Crna Gora	280	123	167	59	132	46
Hrvatska	860	307	—	—	—	—
Makedonija	475	169	239	59	202	49
Slovenija	460	172	344	116	229	77
Srbija	14 640	3 700	12 739	3 354	9 996	2 632
(od toga Kosovo)	(9 000)	(2 437)	(8 585)	(2 275)	(6 192)	(1 641)
Ukupno	19 735	5 722	15 090	4 179	11 580	3 181
Ugljen						
Bosna i Hercegovina	4 479	2 074	2 971	1 299	2 054	909
Crna Gora	280	123	167	59	132	46
Hrvatska	926	370	26	22	23	20
Makedonija	475	169	239	59	202	49
Slovenija	775	329	515	194	289	104
Srbija	14 868	3 845	12 821	3 397	10 056	2 664
(od toga Kosovo)	(9 000)	(2 437)	(8 585)	(2 275)	(6 192)	(1 641)
Ukupno	21 803	6 910	16 739	5 030	12 756	3 792

Zapaža se da su iskoristive rezerve vrlo male u odnosu na ukupne rezerve. One, naime, iznose tek oko 6% ukupnih rezerva. To je, izgleda, posljedica vrlo oštrog kriterija koji se primjenjuje pri procjeni iskoristivih rezerva. U mnogim zemljama, kao u Sjedinjenim Američkim Državama, računa se s iskoristivim rezervama na malim dubinama i u slojevima znatne debljine. To pokazuje da je dopušteno zaključivati da je moguće znatno povećati iskoristive rezerve, pogotovo u uvjetima stalnog porasta cijena sirove nafte i zemnog plina.

Treba, međutim, napomenuti da ne postoji općeprihvaćena metoda za izračunavanje rezerva ugljena. Tako se u većini zemalja u rezerve ugljena računaju one količine koje se nalaze na dubini manjoj od 1200 m (kameni ugljen) odnosno 500 m (mrki ugljen i lignit) i to samo kad se radi o slojevima debljim od 30 cm. U SAD uračunavaju se u iskoristive rezerve samo one količine kamenog ugljena koje su na dubini manjoj od 305 m, u slojevima debljine veće od 71 cm, a u ukupne rezerve količine kamenog ugljena na dubinama manjim od 914 m, u slojevima debljim od 35 cm. U SAD za izračunavanje ukupnih rezerva mrkog ugljena i lignita vrijede granice 914 m dubine i 76 cm debljine sloja. Za istovrsne rezerve u SSSR-u te su granice još strože: 600 m dubine i 100 cm debljine sloja.

U Jugoslaviji (tabl. 2.6) najveće su rezerve lignita, znatno manje rezerve mrkog ugljena, a vrlo male rezerve kamenog ugljena. Ako se rezerve promatraju prema količini energije, struktura je ukupnih rezerva: kameni ugljen 1,3%, mrki ugljen 15,9%, a lignit 82,8%. Detaljnije su proučene rezerve u većim rudnicima ugljena u kojima se nalazi 89,1% ukupnih rezerva, pa su u tabl. 2.6. navedeni i podaci za rezerve u tim rudnicima. Pri promatranju rezerva ugljena u Jugoslaviji upotrijebljena je klasifikacija rezerva kako je u nas uobičajeno. Ukupne rezerve odgovaraju ukupnim rezervama kako ih definira Svjetska konferencija za energiju, bilančne rezerve odgovaraju iskoristivim rezervama, a eksploataбилne su rezerve one koje se — prema današnjem stanju tehnike rudarenja — mogu dobiti iz rudnika. One su manje od bilančnih za gubitke u eksploataciji, odnosno za one količine koje ostaju u nalazištima.

Ako se promatraju eksploataбилne rezerve u većim rudnicima, a one su u krajnjem slučaju mjerodavne za opskrbu potrošača, struktura je rezerva ugljena u Jugoslaviji: kameni ugljen 0,6%, mrki ugljen 15,5%, a lignit 83,9%. Najveći je dio rezerva u obliku lignita i to vrlo niske ogrjevne moći (prosječno 1 923 kcal/kg), pa je i prosječna ogrjevna moć svih eksploataбилnih rezerva ugljena u Jugoslaviji 2 081 kcal/kg.

U usporedbi sa svjetskim rezervama ugljena i s rezervama u pojedinim dijelovima svijeta, ukupne rezerve ugljena u Jugoslaviji nisu velike kad se računa s rezervama po stanovniku. Te specifične ukupne rezerve u Jugoslaviji iznose 324 tone ekv. ugljena po stanovniku u

1974. godini. One u usporedbi sa svjetskim rezervama iznose 12,4% po stanovniku, a u usporedbi s evropskim rezervama 25,9% po stanovniku. Usporedba prema iskoristivim rezervama (u tabl. 2.6. označene kao bilančne rezerve) nije moguća, jer u Jugoslaviji iskoristive (bilančne rezerve iznose skoro 73% od ukupnih rezerva, a udio iskoristivih rezerva u svijetu iznosi tek 6,3%. To pokazuje da je znatan bio ukupnih rezerva u Jugoslaviji klasificiran kao iskoristive rezerve, što u mnogim drugim zemljama nije slučaj.

Geografska raspodjela rezerva ugljena u Jugoslaviji vrlo je nepovoljna, jer se 94% svih eksploatacionih rezerva nalazi u dvije republike (70,3 u Srbiji, a 24,0% u Bosni i Hercegovini). Ta je koncentracija nalazišta još i veća kad se zna da se najveći dio rezerva nalazi u zapadnoj užoj Srbiji, istočnoj Bosni i na Kosovu.

S obzirom na način eksploatacije nalazišta ugljena, rezerve u Jugoslaviji vrlo su povoljne. Oko 83% bilančnih rezerva ugljena nalazi se blizu površine pa se na njih može primijeniti površinska eksploatacija, što znatno povećava ekonomičnost eksploatacije.

2.3. Proizvodnja i potrošnja ugljena

Način eksploatacije ugljena ovisi u prvom redu o geološkim uvjetima. U osnovi se razlikuje: a) jamska ili podzemna i b) površinska eksploatacija.

Jamska se eksploatacija primjenjuje kad su ugljeni slojevi na većoj dubini, pa je tada potrebno izgraditi podzemne roveve radi pristupa nalazištu. Karakteristike su jamske eksploatacije: znatna sredstva za otvaranje rudnika, nekoliko godina pripremnih radova, trajanje eksploatacije 30 do 40 godina, za koje se vrijeme može u prosječnim prilikama eksploatirati nalazište u polumjeru od oko 5 km, i na kraju nužnost trajnog održavanja proizvodnje, jer prekid uzrokuje urušavanje materijala u oknima i oštećenje uređaja.

Površinska eksploatacija primjenjuje se kad su slojevi blizu površine, pa je ekonomičnije odstraniti sloj humusa i stijena da se dođe do slojeva ugljena nego izgraditi podzemne pristupne hodnike i okna. Kao karakteristika površinske eksploatacije često se navodi omjer jalovine (popratnog materijala) koju treba odstraniti i količine ugljena koja se može proizvesti. Taj je omjer npr. u rudnicima mrkog ugljena u SR Njemačkoj iznosio 1:1 1950. godine, a 2:1 1969. godine; u SAD se danas površinska eksploatacija kamenog ugljena obavlja i uz omjer 8:1. Tome je uzrok što su potrebni znatno manji pripremnici radovi nego pri jamskoj eksploataciji i mnogo su manja ulaganja za tu pripremu. Osim toga, proizvodnja se bolje prilagođuje promjenama potražnje.

Ekonomičnost jamske eksploatacije ovisi u prvom redu o kvaliteti ugljena, pa se takva eksploatacija niskokaloričnih vrsta (manje od 2500 kcal/kg, 10,47 MJ/kg) ne smatra ekonomičnom. Na to utječe i više drugih činilaca: dubina i debljina slojeva, njihov nagib, svojstva okolnih stijena, tektonski poremećaji, pojava plinova i dotok vode. S povećanom dubinom slojeva rastu izdaci za izgradnju pristupnih okana i troškovi transporta, ali i tlak na stijenje, što sve povećava izdatke za podgrađivanje da bi se spriječilo urušavanje. Osim toga, s dubinom raste i temperatura, pa to zahtijeva dodatne uređaje za pojačanu ventilaciju. Eksploatacija slojeva debljine manje od 80 cm vrlo je otežana, a najjednostavnija je kad su slojevi debeli od 1,20 do 2 m. Deblji se slojevi eksploatiraju u dva sloja ili više slojeva debljine otprilike 3 m. Specifični troškovi eksploatacije, najčešće su to manji što su slojevi deblji. U vrijeme nastanka svi su slojevi ležali vodoravno, ali su tektonskim djelovanjem presavijeni i ispremiješani. Zbog toga ugljeni slojevi mogu biti u vrlo raznolikim položajima. Njihov nagib do 20° čini nalazište još uvijek povoljnim, a slojevi nagnuti više od 40° vrlo su neprikladni za iskorištavanje. Znatne količine plinova (najčešće metana) u rudnicima mogu omesti brzinu eksploatacije i povećati troškove zbog dodatnih uređaja za ventilaciju. Dotok većih količina vode također otežava radove, zbog potrebe posebnih uređaja za evakuaciju vode, ali i zbog pogoršanja klime u rudniku te omeđavanja stijena.

Prirodni uvjeti, dakle, imaju presudan utjecaj na ekonomičnost iskorištavanja nalazišta ugljena. Tako se u SAD dubina slojeva kreće između 50 i 200 m (u prosjeku 100 m), u Velikoj Britaniji od 300 do 400 m, u SR Njemačkoj prosječno 700 m (s maksimalnim dubinama do 1200 m), a u Poljskoj dubina slojeva ne premašuje 400 m. Slojevi u SAD i u Velikoj Britaniji najčešće su vodoravni, a u SR Njemačkoj su položeni znatno nepovoljnije. U SAD, SSSR-u i Kini ima slojeva debljine i do 200 m, a prosječna je debljina u Velikoj Britaniji oko 2,5 m, u SR Njemačkoj oko 1 m, u Poljskoj oko 2 m. Lignit se ponajviše proizvodi uz primjenu površinske eksploatacije, a najveći dio kamenog ugljena dobiva se jamskom eksploatacijom. Ima primjera površinskog iskorištavanja kamenog ugljena u SAD, SSSR-u, Velikoj Britaniji, Australiji i južnoj Africi; u kontinentalnim evropskim zemljama kameni ugljen se dobiva samo jamskom eksploatacijom. U Jugoslaviji se može više od 90 % eksploatacionih rezerva lignita iskoristiti površinskom eksploatacijom, što predstavlja vrlo povoljnu karakteristiku rezerva ugljena. S druge strane, uvjeti za eksploataciju kamenog ugljena su izrazito nepovoljni, a za eksploataciju mrkog ugljena dosta nepovoljni.

Proizvodnja kamenog ugljena (tabl. 2.7) u posljednjih dvadeset i sedam godina rasla je po prosječnoj godišnjoj stopi od 2,09%. Najveći je porast ostvaren u Kini (nešto manje od 10% godišnje) uz znatne oscilacije kao posljedice političkih prilika u toj velikoj zemlji. Ako se, međutim, ne uračuna proizvodnja u Kini, porast proizvodnje u svim ostalim zemljama svodi se na samo 1,1% prosječno godišnje. U raz-

Tabl. 2.7.

Proizvodnja kamenog ugljena (10⁶ tona ugljena)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1975.	1976.	1977.	Porast %
Afrika	30	38	43	54	60	75	81	86	3,98
Amerika bez SAD	21	18	16	17	22	35	35	39	2,32
Azija bez SSSR-a i Kine	79	94	126	156	162	183	192	194	3,38
Ist. Evropa bez SSSR-a	104	123	143	159	179	211	219	224	2,88
Zap. Evropa	451	489	450	424	323	265	256	251	-2,15
Oceaniija	17	20	31	22	46	62	70	73	5,55
Kina	43	98	420	299	383	470	480	500	9,51
SAD	505	442	391	475	550	568	586	608	0,69
SSSR	167	254	305	339	360	485	494	500	4,15
Svijet	1 417	1 576	1 916	1 954	2 085	2 354	2 413	2 475	2,09

Tabl. 2.8.

Proizvodnja mrkog ugljena i lignita (10⁶ tona ekv. ugljena)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1975.	1976.	1977.	Porast %
Afrika	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Amerika bez SAD	1	1	—	1	1	1	2	3	4,15
Azija bez SSSR-a i Kine	—	1	5	4	6	10	11	12	9,64
Ist. Evropa bez SSSR-a	68	102	124	153	170	169	170	172	3,50
Zap. Evropa	36	43	50	56	57	68	74	73	2,65
Oceaniija	4	5	7	8	9	11	10	11	3,82
Kina	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SAD	1	1	1	1	2	6	13	15	10,55
SSSR	53	78	88	91	90	97	91	97	2,26
Svijet	163	231	275	314	335	362	371	383	3,21

doblju prije prvog svjetskog rata u Evropi i SAD proizvodilo se više od 85% svjetske proizvodnje kamenog ugljena. Taj postotak polagano opada, ali je neposredno prije drugog svjetskog rata iznosio oko 75%. Danas je udio Evrope (bez SSSR-a) i SAD oko 44% svjetske proizvodnje kamenog ugljena.

U Evropi su najveći proizvođači Poljska (u 1975. godini 36,3% evropske proizvodnje), Velika Britanija (27,0%) i SR Njemačka (19,5%). Prema tome, danas se u te tri zemlje proizvodi 82,8% ukupne evropske proizvodnje kamenog ugljena. U Zapadnoj Evropi maksimalna je proizvodnja ostvarena oko 1955. godine, a od tada proizvodnja postepeno opada. To je smanjenje veće u zemljama s malom proizvodnjom u kojima su i uvjeti eksploatacije nepovoljniji (Francuska, Belgija, Nizozemska). To pokazuje i podatak da je udio najvećih proizvođača (Velika Britanija i SR Njemačka) porastao od 76,9% u 1955. na 83,7% u 1975. godini u proizvodnji kamenog ugljena u Zapadnoj Evropi. U Istočnoj Evropi (bez SSSR-a) praktički se ukupna proizvodnja kamenog ugljena ostvaruje u Poljskoj (u 1975. godini 81,7% od proizvodnje u Istočnoj Evropi) i Čehoslovačkoj (13,3%).

Svjetska proizvodnja mrkog ugljena i lignita brže je rasla u posljednjih dvadeset i sedam godina nego proizvodnja kamenog ugljena. Prosječni godišnji porast iznosio je 3,21%. Evropa je glavni proizvođač mrkog ugljena i lignita (tabl. 2.8). Na tom području danas se proizvodi oko 2/3 ukupne svjetske proizvodnje. Ako se proizvodnji u Evropi doda proizvodnja u SSSR-u, dobiva se podatak da se u ta dva područja proizvodi skoro 93% ukupne proizvodnje mrkog ugljena i lignita.

U Evropi su najveći proizvođači mrkog ugljena i lignita: Njemačka DR (u 1975. godini 31,4% evropske proizvodnje), Čehoslovačka (21,6%), SR Njemačka (15,7%) i Jugoslavija (7,4%).

U Jugoslaviji je prije dvadesetak godina prevladavala proizvodnja kamenog i mrkog ugljena (tabl. 2.9). Postepeno je rastao udio lignita uz opadanje proizvodnje kamenog ugljena i stagnaciju proizvodnje mrkog ugljena. U razdoblju od 1956. do 1957. godine ostvaren je prosječni porast od 4,0% po količini ugljena, odnosno porast od 2,5% kad se računa s energijom u proizvedenom ugljenu. To znači da se sve više eksploatira ugljen slabije kvalitete, što odgovara i strukturi rezerva ugljena u nas.

Promatrano globalno, proizvodnja je praktički jednaka potrošnji (razlike u pojedinim godinama nastaju samo zbog razlika u skladištima ugljena kod proizvođača i potrošača na početku i na kraju promatrane godine), ali promatrajući svaku zemlju ili područje posebno, potrošnja se znatno razlikuje od proizvodnje, pogotovo kamenog ugljena. Međunarodna je trgovina mrkim ugljenom i lignitom, naime, relativno vrlo malena, jer troškovi prijevoza ovise o masi ugljena, pa su specifični troškovi transporta po jedinici količine energije znatno veći za mrki ugljen i lignit nego za kameni ugljen.

Tabl. 2.9.

Proizvodnja ugljena u Jugoslaviji

	kameni ugljen	mrki ugljen	lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki ugljen	lignit	ukupno
	10 ⁶ tona ugljena				10 ⁶ tona ekvivalent. ugljena			
1956.	1,23	8,44	7,43	17,10	1,06	4,71	2,73	8,50
1960.	1,28	9,63	11,80	22,71	1,11	5,44	4,38	10,93
1965.	1,17	10,51	18,28	29,96	1,00	5,84	6,53	13,37
1970.	0,64	8,98	18,79	28,41	0,56	5,07	5,98	11,61
1973.	0,58	9,14	22,73	32,45	0,49	5,15	7,11	12,75
1975.	0,60	9,43	25,51	35,54	0,48	5,07	7,81	13,36
1976.	0,59	9,11	27,15	36,85	0,47	4,90	8,31	13,68
1977.	0,51	8,96	29,61	39,08	0,41	4,82	9,06	14,29

Početkom stoljeća (tabl. 2.10) Evropa je bila najveći potrošač ugljena; u njoj je utrošeno više od polovice (55%) svjetske potrošnje ugljena. Ako se evropskoj potrošnji doda ona u SAD, vidi se da je u ta dva područja utrošeno skoro 9/10 (89%) cjelokupnog ugljena. Kroz prva četiri desetljeća situacija se nije mnogo promijenila, jer pred drugi svjetski rat ta dva područja (Evropa i SAD) troše skoro 8/10 (78%) od ukupno utrošenog ugljena u svijetu. I pored znatnog porasta potrošnje u SSSR-u, Kini i ostaloj Aziji, Evropa i SAD ostaju veliki potrošači ugljena; njihov udio u svjetskoj potrošnji u 1977. iznosi nešto preko 48%.

Potrošnja ugljena rasla je od početka ovog stoljeća po prosječnoj stopi od 1,7%. U tom razdoblju zabilježen je prosječni godišnji porast od 0,8% u Evropi, nešto više od 1,0% u SAD, 4,2% u SSSR-u, a 3,9% u Aziji (bez SSSR-a i Kine).

I pored toga što se u međunarodnoj trgovini pojavljuju znatne količine ugljena (tabl. 2.11) te količine predstavljaju samo mali postotak utrošenog ugljena (oko 7,3% u 1974. godini). Izgleda da je povišenje cijena sirove nafte posljednjih godina djelovalo na povećanje međunarodnog prometa ugljenom. Pad međunarodne trgovine u šezdesetim godinama bio je posljedica supstitucije ugljena derivatima nafte.

Najveći su izvoznici ugljena: SAD (1976. godine 28,5% od ukupnog izvoza ugljena), Poljska (20,3%), Australija (16,3%), SSSR (14,1%), i SR Njemačka (6,6%). Oni zajedno izvoze oko 86% ugljena koji se pojavljuje u međunarodnoj trgovini. Izgleda da postoji tendencija porasta toga postotka. Posljednjih godina raste udio Australije i Poljske u ukupnom izvozu.

Tabl. 2.10.

Potrošnja kamenog i mrkog ugljena te lignita (10⁶ tona ekv. ugljena)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika	1	8	15	18	28	38	43	53	59	70	74	77
Amerika bez SAD	34	34	41	38	49	39	32	32	38	39	46	45
Azija bez SSSR-a i Kine ¹	14	35	85	107	79	98	144	151	217	241	250	261
Ist. Evropa bez SSSR-a ²	...	...	...	...	148	209	257	307	338	345	359	367
Zap. Evropa ³	397	579	633	614	491	567	539	517	448	389	368	394
Oceanija	8	12	12	14	21	25	28	32	35	40	40	44
Kina	...	...	...	...	43	98	420	325	382	449	469	479
SSSR	21	48	48	118	228	336	384	411	430	474	471	485
SAD	244	507	507	430	447	404	359	426	471	493	524	544
Svjeta	719	1243	1341	1339	1534	1814	2206	2255	2418	2540	2600	2696

¹ Bez Kine od 1950.

² Do 1937. Evropa ukupno

Tabl. 211.

Uvoz i izvoz kamenog ugljena (10⁴ tona)

Zemlje- uvoznice		Zemlje izvoznice						Ukupna
		SAD	Poljska	SSSR	SR Nje- mačka	Austra- lija	Ostale zemlje	
Japan	1960.	5,2	—	0,5	—	1,6	1,4	8,7
	1969.	19,4	1,2	3,2	—	15,8	2,2	41,8
	1974.	24,8	1,1	3,2	—	23,2	11,6	63,9
	1975.	23,1	1,1	3,3	0,4	23,0	12,0	62,9
	1976.	17,1	1,0	3,2	0,1	24,7	12,7	58,8
Fran- cuska	1960.	0,7	0,3	0,8	10,4	—	3,3	15,5
	1969.	2,0	1,1	1,4	8,8	—	2,1	15,4
	1974.	2,4	3,3	1,6	6,6	0,8	1,4	16,1
	1975.	3,3	3,8	1,7	5,5	1,0	1,8	17,1
	1976.	3,2	5,8	1,6	4,6	0,9	2,7	18,8
Kanada	1960.	11,9	—	—	—	—	—	11,9
	1969.	15,9	—	—	—	—	—	15,9
	1974.	12,9	—	—	—	—	—	12,9
	1975.	15,7	—	—	—	—	—	15,7
	1976.	15,4	—	—	—	—	—	15,4
Belgija- -Luksem- burg	1960.	1,0	—	—	5,6	—	1,9	8,5
	1969.	0,9	0,5	0,3	7,3	—	2,6	11,6
	1974.	1,0	1,8	0,4	4,6	0,3	1,3	9,4
	1975.	0,6	1,1	0,2	3,8	0,1	1,0	6,8
	1976.	2,0	0,3	0,4	3,8	0,3	1,0	7,8
Njemačka DR	1960.	—	4,4	6,0	0,4	—	1,4	12,2
	1969.	0,1	3,8	4,3	0,8	—	1,6	10,6
	1974.	—	2,0	4,1	0,1	—	0,7	6,9
	1975.	—	0,8	4,1	0,1	—	0,6	5,6
	1976.	—	1,2	4,2	0,2	—	0,5	6,1
Italija	1960.	4,5	0,8	0,5	3,6	—	0,9	10,3
	1969.	3,4	2,2	2,1	3,5	—	0,9	12,1
	1974.	3,6	2,8	1,6	3,4	1,1	0,2	12,7
	1975.	4,1	3,0	1,2	3,0	1,1	0,1	12,5
	1976.	3,8	3,3	1,3	2,4	0,9	0,4	12,1
Ukupno	1960.	34,8	21,0	14,6	29,1	1,9	30,6	132,0
	1969.	53,0	29,8	26,9	27,9	16,4	27,2	181,2
	1974.	55,0	40,1	26,2	16,7	29,4	33,5	190,9
	1975.	60,2	38,5	26,1	14,5	30,4	23,6	193,3
	1976.	54,5	38,9	26,9	12,7	31,2	26,8	191,0

Danas je Japan najveći uvoznik ugljena. U tu zemlju dolazi skoro 31% svjetskog uvoza ugljena. Francuska je drugi po veličini uvoznik ugljena, a zatim slijede Kanada, Italija, Belgija-Luksemburg i Njemačka DR.

U Jugoslaviji je potrošnja ugljena (tabl. 2.12) veća od proizvodnje (tabl. 2.9) zbog uvoza kamenog ugljena (tabl. 2.13) potrebnog za koksiranje. Izvoz ugljena iz Jugoslavije iznosi tek mali dio proizvodnje (samo oko 1%).

Tabl. 2.12.

Potrošnja ugljena u Jugoslaviji

	kameni ugljen	mrki ugljen	lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki ugljen	lignit	ukupno
	10 ⁶ tona ugljena				10 ⁶ tona ekvivalentnog ugljena			
1956.	2,47	8,03	7,28	17,78	2,43	4,44	2,68	9,55
1960.	2,69	9,09	11,89	23,67	2,48	5,14	4,42	12,04
1965.	3,12	10,20	18,28	31,60	2,98	5,67	6,53	15,18
1970.	2,58	9,52	18,17	30,27	2,48	5,36	5,77	13,61
1973.	2,52	9,42	23,25	35,19	2,17	5,14	7,35	14,66
1975.	2,67	9,18	25,19	37,04	2,57	4,93	7,79	15,29
1976.	3,50	9,10	26,91	39,51	3,37	4,89	8,32	16,58
1977.	3,37	8,68	29,25	41,30	3,24	4,66	9,04	16,94

Tabl. 2.13.

Uvoz i izvoz ugljena u Jugoslaviji (10⁶ tona ekv. ugljena)

	Uvoz ugljena				Izvoz ugljena			
	kameni ugljen	mrki ugljen	lignit	ukupno	kameni ugljen	mrki ugljen	lignit	ukupno
1956.	1,42	—	—	1,42	0,05	0,05	—	0,10
1960.	1,38	—	—	1,38	0,11	0,00	0,00	0,11
1965.	2,19	—	—	2,19	0,08	0,01	0,01	0,10
1970.	1,82	—	—	1,82	0,06	0,02	0,05	0,13
1973.	1,96	—	—	1,96	0,00	0,09	0,13	0,22
1975.	2,13	—	—	2,13	0,01	0,01	0,10	0,12
1976.	2,51	—	—	2,51	—	0,01	0,12	0,13
1977.	2,73	—	—	2,73	—	0,10	0,01	0,11

U posljednjih dvadesetak godina potrošnja ugljena u Jugoslaviji rasla je prosječno godišnje po stopi od 2,8%, ali je tokom posljednjih desetak godina ta potrošnja stagnirala, s padom u sedamdesetim godinama. Ta se stagnacija ne zapaža kad se promatraju mase utrošenog ugljena jer je trošeno sve više lignita vrlo niske ogrjevne moći. 1956. godine trošen je ugljen prosječne ogrjevne moći od 3 760 kcal/kg, a 1976. onaj s prosječnom ogrjevnom moći od 2 870 kcal/kg.

2.4. Pokušaj procjene razvoja proizvodnje ugljena u daljoj budućnosti

Usporedba ukupnih i iskoristivih rezerva ugljena s ostvarenom proizvodnjom pokazuje da je moguće znatno povećati proizvodnju ugljena, te da se rezervama ugljena mogu zadovoljiti potrebe i u daljoj budućnosti. Ako se pođe od iskoristivih rezerva (tabl. 2.3) i proizvodnje ostvarene 1975. godine (tabl. 2.7. i 2.8), može se konstatirati da iskoristive rezerve osiguravaju toliku proizvodnju u trajanju od približno 240 godina. Toliko trajanje rezerva, međutim, a to treba naglasiti, moguće je samo uz pretpostavku da u tijeku cijelog razdoblja proizvodnja ostane na razini iz 1975. godine. Svakako da bi povećanje proizvodnje znatno skratilo trajanje rezerva.

Te rezerve ugljena predstavljaju, dakle, osnovicu za sigurnu opskrbu potrošača, ali uz uvjet da su dovoljne količine ugljena proizvedene i raspoložive na tržištu oblika energije. Zbog toga pri ocjeni razvoja proizvodnje treba poći od predviđanja proizvodnje u pojedinim zemljama, pogotovo u zemljama s velikim rezervama ugljena. Pri tom treba razmotriti prilike na nalazištu, kvalitetu ugljena, potrebnu infrastrukturu za proizvodnju ugljena i za njegovu dopremu do potrošača, potrebne količine za opskrbu na vlastitom području i za eventualni izvoz u druga područja, potrebnu radnu snagu i financijska sredstva, utjecaj na okoliš, način eventualne energetske transformacije ugljena u pogodniji energetski oblik. Takva analiza provedena je u [5] za zemlje s velikim rezervama ugljena, u kojima se nalazi 92% iskoristivih rezerva. Podaci o predvidivoj proizvodnji ugljena koji se nalaze u tabl. 2.14, osnivaju se na toj analizi. Analiza je bazirana na anketi kojom su bile obuhvaćene zemlje s većom proizvodnjom ugljena. Neke zemlje nisu bile u mogućnosti da procijene proizvodnju do 2000. godine, a samo tri zemlje među glavnim proizvođačima ugljena imale su razrađene prognoze za 2020. godinu. U nekim slučajevima iskorišteni su podaci iz literature, a u nekim je buduća proizvodnja procijenjena na bazi rezerva.

Tabl. 2.14.

Procjena razvoja proizvodnje ugljena (10⁶ tona ekv. ugljena)

	1975.	1985.	2000.	2020.	Porast % 1975/2020.
SAD	524	842	1 340	2 400	3,4
SSSR	471	851	1 100	1 800	3,0
Kina	469	725	1 200	1 800	3,0
Indija	73	135	235	500	4,4
Južnoafrička Republika	69	119	233	300	3,3
Australija	69	130	200	300	3,3
Poljska	181	200	270	290	1,1
Kanada	23	35	115	200	4,9
Velika Britanija	129	137	173	173	0,7
SR Njemačka	126	129	145	155	0,5
Čehoslovačka	80	93	100	110	0,7
Njemačka DR	75	80	90	100	0,6
Ostale zemlje	311	322	449	561	1,3
Ukupno	2 600	3 798	5 650	8 689	2,7
	3,7	2,7	2,2		

Prema spomenutoj analizi trebalo bi očekivati slijedeći prosječni godišnji porast proizvodnje ugljena:

1975—1985.	3,7%
1985—2000.	2,7%
2000—2020.	2,2%
1975—2020.	2,7%

Prema mišljenju autora analize [5], proizvodnju ugljena predviđenu za 2000. i 2020. godinu treba smatrati maksimalno ostvarivom uzevši u obzir danas poduzete mjere i zahvate. Takva procjena osniva se na činjenici da će proizvodnja ugljena, a također i njegova potrošnja, naći na zapreke koje će vjerojatno u budućnosti biti smanjene, ali koje je danas nemoguće kvantificirati.

U većini zemalja s većim rezervama ugljena intenzivirana su istraživanja i pristupa se otvaranju novih rudnika ugljena. Znatno povećanje proizvodnje u mnogim zemljama koje su veliki proizvođači ugljena bit će, međutim, moguće tek premještanjem proizvodnih centara u područja koja su manje razvijena i manje industrijalizirana. U SAD npr. već se zapaža premještanje proizvodnje ugljena iz istočnog dijela zemlje u područja s velikim nalazištima u srednjozapadnom i zapadnom dijelu (sl. 2.1). Takvu pojavu u ne tako dalekoj budućnosti treba očekivati i u Sovjetskom Savezu. Rezerve ugljena zapadno od Urala prilično su

ograničene da bi mogle osigurati potrebnu proizvodnju u budućnosti. Zbog toga će se u slijedećim desetljećima proizvodnja ugljena sve više premještati u područja istočno od Urala (sl. 2.2).



Sl. 2.1. Premještanje središta proizvodnje ugljena u SAD u budućim desetljećima



Sl. 2.2. Premještanje središta proizvodnje ugljena u SSSR-u u budućim desetljećima

Pri razmatranju povećanja proizvodnje ugljena ne smije se zaboraviti da je dug period između početka eksploatacije nekog nalazišta i dostizanja predviđene proizvodnje. Tome treba dodati da je potrebno izgraditi objekte infrastruktura i osigurati transport proizvedenog ugljena. U mnogim slučajevima računa se s transformacijom energije ugljena u pogodnije oblike energije (npr. u električnu energiju), pa je potrebno — osim pripremnih radova za proizvodnju ugljena — predvidjeti i gradnju takvih postrojenja, što traži i vremena ali i znatna financijska sredstva. Budući da danas nije moguće odrediti trenutak kad će početi naglo rasti potrebe za ugljenom, očito je da ulaganja u proizvodnju ugljena, u postrojenja za njegov transport i u postrojenja za transformaciju u pogodnije oblike energije nisu atraktivna. Ulaganja, međutim, u momentu pomanjkanja sirove nafte i zemnog plina, neće imati željeni efekt, jer će ona djelovati sa zakašnjenjem zbog dugotrajnih pripremnih radova, što je karakteristika rudarske proizvodnje. To će, vjerojatno, biti ozbiljna zapreka za pravodobno iskorištavanje rezerva ugljena.

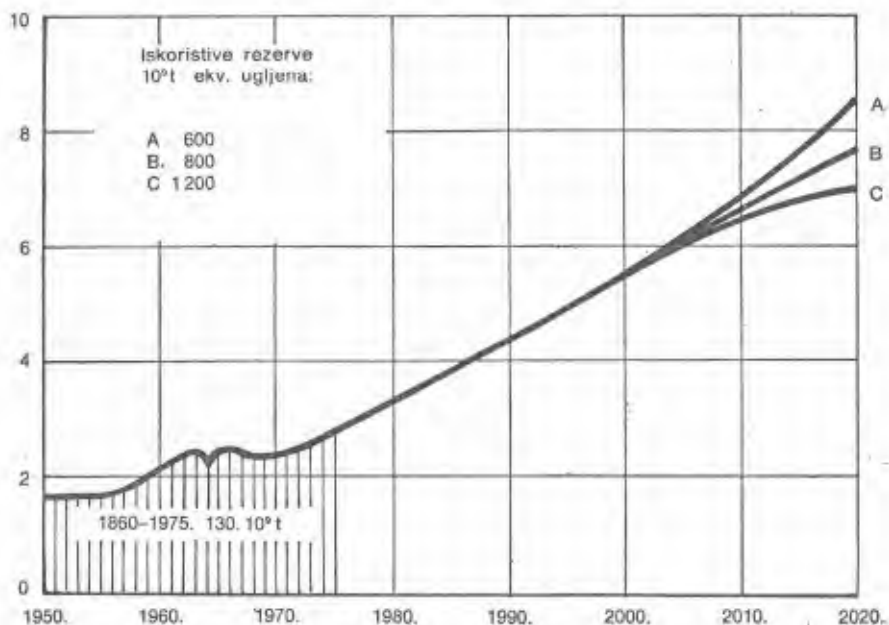
Naglo povećanje proizvodnje ugljena traži i angažiranje kvalificiranih radnika. Prema dosadašnjem iskustvu, to će predstavljati znatne poteškoće u većini zemalja s većom proizvodnjom ugljena, pogotovo u područjima gdje je predviđena jamska eksploatacija na velikim dubinama i u područjima koja su neindustrijalizirana i s malim brojem stanovništva, a u koja će se u budućnosti premjestiti središta proizvodnje ugljena.

Zahtjevi zaštite okoliša tražit će povećane napore pri eksploataciji rezerva ugljena. Kad se ugljen eksploatira površinskim kopom, nužno je predvidjeti obnovu oštećenih površina. Postojeća struktura potrošnje oblika energije i nastojanje da se ostvari što udobniji način življenja, tražit će i u budućnosti takve oblike energije koji su pogodni za upotrebu. To će najčešće biti električna energija, ali i plinovita i tekuća goriva. To će, međutim, tražiti da postrojenja za energetske transformacije zadovolje sve strožije zahtjeve zaštite okoliša, naročito u pogledu emisije sumpornog dioksida i oksida dušika.

Poseban problem predstavlja proizvodnja ugljik-dioksida (CO_2), koji nije otrovan, ali se pojavljuje pri izgaranju svih fosilnih goriva. Danas se, međutim, ne zna da li će povećanje sadržaja ugljik-dioksida u atmosferi imati utjecaja na klimatske prilike na globusu. Sigurno je, naime, da je u posljednjih petnaestak godina, od kada se sistematski mjeri sastav atmosfere, povećan postotak ugljik-dioksida u atmosferi. Prema nekim mišljenjima, to bi povećanje moglo imati za posljedicu povišenje temperature na Zemlji, što bi moglo izazvati topljenje leda na polovima i porast razine mora sa svim neugodnim posljedicama. To bi mogao postati ograničavajući faktor za energetske iskorištavanje fosilnih goriva, a pogotovo ugljena kao fosilnog goriva s najvećim rezervama.

Programi i predviđanja razvoja proizvodnje ugljena, navedeni u tabl. 2.14, osnivaju se u prvom redu na zadovoljenju potreba zemalja proizvođača, a tek se usput predviđa proizvodnja namijenjena za izvoz u druge zemlje. Tako se računa da u budućnosti, prema današnjem saznanju izvoz u druge zemlje neće premašiti 9% od ukupne proizvodnje ugljena. Ako se usporedi današnji izvoz sirove nafte s predvidivim izvozom ugljena, može se zapaziti da izvoz ugljena 2020. godine neće biti veći od 25% izvoza sirove nafte i zemnog plina. Takav razvoj proizvodnje ugljena u zemljama velikim proizvođačima ugljena neće moći pokriti potrebe zemalja s malim rezervama ili bez njih.

Danas se smatra da postoji određena zakonitost u razvoju neke proizvodnje ili potrošnje koja je funkcija rezerva. Razvoj proizvodnje može se prikazati krivuljom normalne distribucije (Gaussova krivulja) s tim da površina ispod te krivulje predstavlja raspoložive rezerve. Pokazuje se (sl. 2.3) da se s iskoristivim rezervama od $600 \cdot 10^9$ t ekv. ugljena ne može očekivati potrebna proizvodnja u 2020. godini od $8,7 \cdot 10^9$ t ekv. ugljena (tabl. 2.14), već da je za toliku proizvodnju potrebno povećati iskoristive rezerve na $1\,200 \cdot 10^9$ t ekv. ugljena. Poznavajući ukupne rezerve, može se pretpostaviti da će biti moguće udvostručiti iskoristive rezerve ugljena, što će omogućiti povećanje proizvodnje ugljena i dugo nakon 2020. godine.



Sl. 2.3. Procjena razvoja proizvodnje ugljena u svijetu za različite iskoristive rezerve

Svakako je korisno naglasiti da se sve te hipoteze o budućem razvoju proizvodnje ugljena osnivaju na današnjim saznanjima i na akcijama koje se poduzimaju ili koje su predviđene. Znatnije promjene na tržištu energijom, kao što je znatnije povišenje cijena zbog pomanjkanja drugih oblika energije, sigurno će izazvati povećanje proizvodnje i izvoza. Pitanje je, međutim, da li će na vrijeme biti poduzete sve mjere za takav razvoj proizvodnje, jer su — kako je već spomenuto — potrebne opsežne i dugotrajne pripreme znatno prije nego što nastupi to pomanjkanje kao uzrok povećanja proizvodnje ugljena.

3. SIROVA NAFTA I ZEMNI PLIN

3.1. *Postanak i nalazišta*

Sirova nafta i zemni plin smjese su različitih ugljikovodika kojih se molekule sastoje uglavnom od ugljika i vodika, a ponekad od spojeva s dušikom, kisikom i sumporom. Pri određenim tlakovima i temperaturama pojedini spojevi prelaze iz plinovitog u tekuće agregatno stanje i obrnuto. U nalazištima mogu biti u plinovitom, tekućem, pa i u krutom stanju.

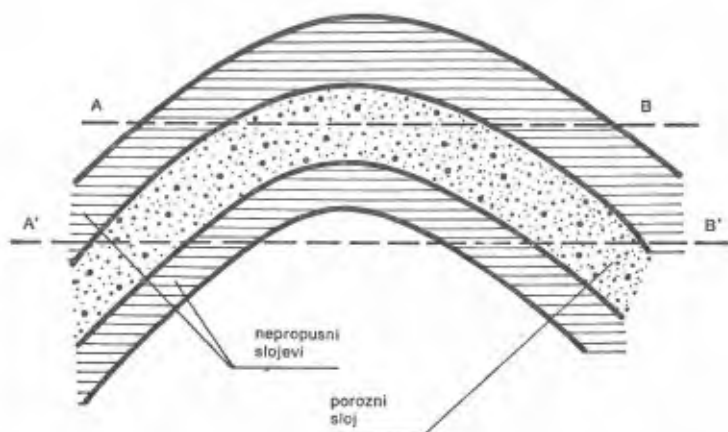
Sirova nafta i zemni plin nastali su od bjelančevina, masti i ugljikohidrata, kao ostataka niskorazvijenih biljnih i životinjskih planktona i bakterija koje su živjele u vodi ili moru. Ti organski ostaci mogu se u posebnim geokemijskim uvjetima procesom bitumeniziranja pretvoriti u sirovu naftu i zemni plin. Taj se proces odvija u mirnoj vodi s malim količinama kisika. Takve prilike postoje danas u Crnom moru na dubini od oko 150 m, gdje u istaloženom mulju ima i do 30% organskih sastojaka. Godišnja proizvodnja organskih tvari u Crnom moru iznosi $21 \cdot 10^9$ t, od kojih se oko $0,4 \cdot 10^9$ t taloži u mulju. Taj organski talog sastoji se od oko 13% planktona, oko 57% bakterija koje žive u vodi, oko 29% bakterija koje žive u mulju, a samo od 1% ostataka većih organizama. Takav je mulj polazna supstancija za stvaranje ugljikovodika koji čine sirovu naftu i zemni plin. Zbog nestašice zraka organske se tvari raspadaju i djelovanjem bakterija masti se pretvaraju u lakše ugljikovodike, polaznu supstanciju za stvaranje ugljikovodika koji čine sirovu naftu. Osim bakterija, pri tome je prisutno i katalitičko djelovanje spojeva u tlu. Glina i silikatni spojevi kao katalizatori ubrzavaju taj proces, pogotovo pri nižim tlakovima i nižim tempe-

raturama. S obzirom na činjenicu da organske tvari čine samo malen dio ukupnog taloga, sedimentno stijenje koje nastaje iz taloga može se smatrati nosiocem sirove nafte. U njemu je nafta raspršena u sitnim porama, pa je ima od 5 do 5 000 grama po toni. Takvo stijenje, u kojemu su sirova nafta i zemni plin raspršeni, taložilo se u svim geološkim periodima, naročito u onim toplijima, kad je u vodama bujao život. To osobito vrijedi za područja s izmiješanom slatkom i morskom vodom, uz relativno malu dubinu.

S vremenom, sedimenti postaju stijenje, nafta i plin iscjeduju se iz slojeva u kojima su nastali i skupljaju se u gornjim dijelovima poroznih slojeva smještenim među nepropusnim slojevima. Nalazišta sirove nafte i zemnog plina nisu poput ugljena u slojevima, već su to slojevi više ili manje impregnirani sirovom naftom ili zemnim plinom. Da bi se eksploatirala nafta ili plin, nije dovoljno bušenjem doći do smjese slane vode, nafte i plina (uz naftu i plin redovito se pojavljuje i slana voda), već treba prodrijeti do područja gdje su nafta i plin odvojeni od slane vode, gdje je fiksiran položaj nafte i plina, ili, ako su oni pokretni, do točke kojoj teže nafta i plin. Na sreću, priroda potpomaže stabiliziranje, separaciju i koncentraciju stvarajući »zamke« za naftu i plin, koji se skupljaju u gornjim dijelovima poroznih slojeva (sl. 2.4). Separacija nafte i plina nastaje npr. na razini A'B'. Pri tome se odijeljeni plin nalazi npr. iznad razine AB, a odijeljena nafta ispod nje. Tako je njihov položaj fiksiran, iako je moguće da se njihovo sakupljanje nastavi, ali vrlo polagano, uz postepeno sniženje razina A'B' i AB. Zbog tektonskih poremećaja poremetilo se primarno stanje, pa su zbog toga rijetki dugi pravilni, horizontalni slojevi, ali u svim slučajevima plin i nafta se nalaze u najvišim dijelovima poroznih slojeva. Iz istih razloga rijetka su nalazišta s velikim rezervama, ali su ona i rijetko izolirana. Otkriće jednog nalazišta upućuje na postojanje poroznog naftonosnog sloja i dopušta pretpostavku da su u istom području, u neposrednoj blizini, i druga ležišta.

Omjer plina i nafte u pojedinim nalazištima u prvom redu ovisi o uvjetima pod kojima se oni nalaze, jer o tome ovisi volumenski udio plina u nafti. Nema mnogo nalazišta sirove nafte bez zemnog plina. U onima koja su najsiriomašnija plinom ima nekoliko m³ plina po toni nafte, a neka nalazišta uz tonu nafte daju i stotinjak m³ plina (Venezuela, Irak).

Zemni plin je smjesa plinova u kojoj su najvažniji ugljikovodici. Osim plinovitog metana (CH₄), koji je najvažniji sastojak zemnog plina, ima etana (C₂H₆), propana (C₃H₈), butana (C₄H₁₀) i težih ugljikovodika. Pri atmosferskom tlaku teži su ugljikovodici u tekućem agregatnom stanju, a za propan i butan potreban je nešto veći tlak da bi prešli u tekuće agregatno stanje. Samo je metan u plinovitom stanju i pri visokim tlakovima. Zemni se plinovi dijele na »suhe« i »vlažne«. Vlažni zemni plin je onaj s više od 60 g kondenziranih ugljikovodika po m³



Sl. 2.4. Primjer smještaja naftonosnog sloja. A'B' razina odjeljivanja vode i nafte, AB razina odjeljivanja nafte i plina

plina. Uz ugljikovodike, u zemnom plinu mogu se pojaviti i drugi plinovi, kao dušik i ugljik-dioksid, te sumpor-dioksid i helij, koji smanjuju njegovu ogrjevnu moć.

Zemni plin nastaje ili zajedno sa sirovom naftom, na već opisani način, ili se pojavljuje za vrijeme stvaranja ugljena. U toku cijelog procesa pougljenjivanja stvara se 300—400 m³ metana po toni konačnog ugljena.

Sirova nafta i zemni plin pojavljuju se, kako je već spomenuto, u sedimentnim naslagama, pa su uz to jedina područja zanimljiva za njihovu eksploataciju. Velika sedimentna područja obuhvaćaju oko 55.10⁶ km² kopna, ili oko 38% ukupne Zemljine površine. Ako se tome dodaju područja ispod morske površine do dubine od 200 m, dobiva se površina od oko 63.10⁶ km² na kojoj se može očekivati mogućnost eksploatacije nafte i plina, odnosno nafte ili plina. Ta se potencijalna nalazišta nalaze na slijedećim područjima (navedeni su podaci o površinama u 10⁶ km²):

Afrika	13,0	(20,5%)
Amerika (bez SAD i Kanade)	12,4	(19,6%)
Azija (bez Kine i Bliskog istoka)	4,9	(7,7%)
Evropa (bez SSSR-a)	3,4	(5,4%)
Oceanija	4,0	(6,3%)
Bliski istok	3,1	(4,9%)
Kanada	4,9	(7,7%)
Kina	2,3	(3,6%)
SAD	6,4	(10,1%)
SSSR	9,0	(14,2%)
Svijet	63,4	(100,0%)

U tablici su navedene površine mogućih nalazišta sirove nafte i plina, uključujući i podmorska područja do dubine od 200 m, iako je danas moguće bušenje i eksploatacija i do dubine od 1 000 m ispod morske površine. Sedimentna područja do dubine od 300 m obuhvaćaju površinu od $27,5 \cdot 10^6$ km², ili 7,6% površine oceana, a do dubine od 1 000 m zahvaćaju $34,10^6$ km² površine. Računa se da samo 1,8% tih površina daje odlične izgleda za nalaženje nafte i zemnog plina, 15,3% dobre izgleda, a 50% ne daje nikakve nade.

Računa se da s debljinom sedimentnih slojeva raste mogućnost formiranja nafte i zemnog plina. Sedimentni slojevi dosižu u nekim područjima i debljinu od 20 000 m (Meksički zaljev), a s obje strane mlađih planinskih masiva (Ande, Alpe, Kavkaz, Himalaja i Rocky Mountains) može se računati s debljinom mlađih sedimentnih slojeva od 5 000 do 10 000 m. S povećanom dubinom najčešće se pojavljuju nalazišta sve lakših ugljikovodika, što je posljedica povećanih tlakova i povišenih temperatura, jer u takvim uvjetima s vremenom teže molekule prelaze u lakše. U većim dubinama je osim toga bolje brtvljenje, što omogućuje održanje plina i pri visokim tlakovima.

Izgleda da je većina rezerva sirove nafte u gornjim dijelovima sedimentnih slojeva. Tako u sedimentnom sloju debljine 10 000 m u Texasu u donjih 5 000 m nema nalazišta sirove nafte. U sloju u Meksičkom zaljevu oko 54% svih ugljikovodičnih supstancija nalazi se iznad 2 400 m dubine, a samo ih je 10% u dubinama većim od 4 800 m. Prema podacima za nalazišta koja su eksploatirana 1963. godine od ukupnih rezerva nalazilo se:

2%	do 300 m dubine
18%	300 do 900 m dubine
50%	900 do 1 800 m dubine
26%	1 800 do 2 700 m dubine
4%	više od 2 700 m dubine

Od ukupnih rezerva sirove nafte i zemnog plina 80% ih se nalazi na 20% površine sedimentnih slojeva, što upućuje na različitu raspodjelu rezerva sa znatnom koncentracijom na pojedinim područjima. U najbogatija nalazišta danas se ubrajaju: Bliski istok, Kalifornija, Sibir i Venezuela sa 10 000 tona po m² površine, zatim područja južne Francuske, Pensilvanije, Oklahome, Meksičkog zaljeva i Indonezije sa 2 000 do 10 000 tona po km², te područja Kanade, Nizozemske i Alžira koja imaju od 500 do 2 000 tona po km². Najbogatija nalazišta zemnog plina s više od $10 \cdot 10^6$ m³ po km² nalaze se u zapadnoj Virginiji, Kaliforniji i Nizozemskoj, a u Italiji, Meksiku, na Bliskom istoku, u Alžiru, Venezueli, Texasu i Pensilvaniji dolazi između 1 i $10 \cdot 10^6$ m³ po km².

Izdašnost nalazišta pokazuje i podatak o količini sirove nafte po jednoj bušotini. Najniža prosječna izdašnost postiže se u SAD (manje od 100 000 t po bušotini). Više od milijun tona postiže se u Venezueli,

Tabl. 2.15.

Podaci za četiri najveća svjetska nalazišta zemnog plina

	Dubina m	Površina km ²	Rezerve 10 ⁹ m ³	Sadržaj plina 10 ⁶ m ³ /km ²
Urengoi (SSSR)	1 080	2 100	2 600	1 238
Pandhandle — Hugoton (SAD)	800	16 800	1 950	116
Slochteren (Nizozemska)	3 000	1 500	1 650	1 100
Hassi Rmel (Alžir)	2 100	3 500	1 400	400

Indoneziji, Libiji, Alžiru i na Bliskom istoku. U posljednjem od spomenutih područja prosjek iznosi čak 60 milijuna tona po bušotini.

Da bi se uočile karakteristike nalazišta, mogu poslužiti podaci o tome za SAD. U toj zemlji u 5% nalazišta koncentrirano je 50% rezerva nafte, u 35% njih — daljih 45%, a u ostalih 60% samo 5% rezerva. Slično je i s nalazištima zemnog plina. U Sovjetskom Savezu u samo 9% nalazišta koncentrirano je 81% rezerva (to su nalazišta s rezervom većom od $20 \cdot 10^9$ nm³ plina), 37% nalazišta (rezerva 1 do $20 \cdot 10^9$ nm³) nalazi se 18% rezerva, a u ostalih 54% nalazišta (rezerve manje od 1 milijarde nm³ po nalazištu) samo je 1% ukupnih rezerva zemnog plina.

U tabl. 2.15. nalaze se podaci za četiri najveća nalazišta zemnog plina. U najvećem cvropskom nalazištu, u Nizozemskoj, plin je pod tlakom od 360 bara, a sadrži 82% metana i 14% dušika, a ostatak su teži ugljikovodici. Sa 200 bušotina na tom nalazištu postiže se godišnja proizvodnja od $28 \cdot 10^9$ m³, a u Pandhandle-Hugotonu potrebno je za to oko 5 900 bušotina. U Slochterenu (Nizozemska) jedna bušotina daje oko 400 tisuća m³ na dan, bušotina u Pandhandle-Hugotonu nešto manje od 20 tisuća m³ na dan, a ona u Italiji samo 10 tisuća m³ dnevno.

3.2. Rezerve sirove nafte i zemnog plina

»Da bismo bili sigurni da postoji nalazište sirove nafte, valja načiniti bušotinu...« to je osnovno pravilo istraživača nalazišta nafte. I pored znatnog razvoja istraživačkih metoda sve do upotrebe satelita u takve svrhe, ne postoje nikakve druge metode za potvrdu o postojanju sirove nafte i zemnog plina osim one koja bi se mogla nazvati »izbušiti da se utvrdi«. Odatle trajni naponi i uvijek ponovna bušenja i istraživanja na svim potencijalnim nalazištima. Odatle također slabo poznavanje rezerva sirove nafte i zemnog plina, kako u pojedinim područjima tako i u svijetu kao cjelini.

Utvrđivanje rezerva, kako je već spomenuto, znatno je teže za naftu i plin nego za ugljen. Ugljen je, naime, ostao na mjestu postanka, ako se zanemare tektonski poremećaji, i njegova nalazišta koji put se protežu, praktički neporemećena, na površini od više stotina kilometara. Ugljikovodici nasuprot tome, zbog svojeg tekućeg i plinovitog agregatnog stanja, normalno napuštaju stijenje u kojima su nastali i sakupljaju se u relativno malim količinama na pogodnim mjestima u gornjim dijelovima sedimentnih slojeva. Iznimke su nalazišta s velikim rezervama, kao što su Ghawar u Saudijskoj Arabiji, Burgan u Kuvajtu ili nalazište Prudhoe Bay na Aljaski, pa se ona mogu smatrati geološkim anomalijama.

Poznavanje rezerva sirove nafte ima, međutim, osnovno značenje za određivanje razvoja energetike. To ne vrijedi za petrolejske kompanije koje eksploatiraju nalazišta. Za njih je, naime, dovoljno da imaju osigurane rezerve za 10 do 15 godina, a najdulje za 30 godina, jer je to razdoblje dovoljno za planiranje dugoročnog razvoja na razini industrije. Jasno je, međutim, da je to prekratko razdoblje, ili bi to trebalo biti, za planiranje razvoja energetike na razini država, a pogotovo je prekratko kad se razmatraju problemi buduće opskrbe energijom na svjetskoj razini. To je u posljednje vrijeme shvaćeno u zemljama u kojima je ekonomski razvoj ovisan o sirovoj nafti i u kojima su rezerve male ili su u znatnoj mjeri već iscrpene.

Potreba definiranja energetske strategije uvjetovala je težnju za poznavanjem potencijalnih rezerva sirove nafte i zemnog plina. U tu svrhu razvijene su metode za procjenu tih rezerva. One se mogu podijeliti u nekoliko skupina.

Prva od njih osniva se na ekstrapolaciji postignutih rezultata eksploatacije. Ona se koristi statističkim podacima dosadašnjih istraživanja, bušenja i proizvodnje, da bi se iz njih izveli zaključci o potencijalnim rezervama. Privlačna radi svoje jednostavnosti i prividne točnosti, ona, međutim, zanemaruje utjecaj progresa pogotovo u pogledu poboljšanja metoda eksploatacije. Osim toga, njezina je najveća mana u tome što se osniva na podacima o nalazištima koja su već razvijena, ili koja su čak na kraju svojih mogućnosti, te za koja postoje opsežni i karakteristični statistički podaci.

Druga se metoda osniva na geološkim analogijama. Ona se koristi podacima koji vrijede za geološki istražena i poznata područja, na osnovu kojih se određuju ekvivalentni podaci za područja koja su malo ili nikako istražena ali geološki poznata, ili za koja se pretpostavlja da su analogna s geološkog stajališta. Ta se metoda često primjenjuje na područja koja su nastavak već poznatih područja (podmorje, Arktik). Rezerve se određuju pomoću količina na poznatim područjima preračunatih na jedinicu površine ili jedinicu volumena sedimentnog sloja. Ta metoda najčešće daje prevelike vrijednosti rezerva, pa su zbog

toga uvedeni korekcijski faktori (US Geological Survey). Teškoća je u određivanju tih korekcijskih faktora u tome što ne postoje dva potpuno slična bazena, i takva metoda dala je u nekim slučajevima nezadovoljavajuće rezultate.

Poznate su zatim metode koje se osnivaju na geološkim ekspertizama i na subjektivnim procjenama, te metode na bazi statističkih postupaka i kvalitativnih modela. Te su metode u punom razvoju.

Često se kombiniraju različite metode za određivanje rezerva ugljikovodika. Pojavljuje se, osim toga, tendencija da se rezultati prikazuju pomoću krivulja vjerojatnosti, pa se utvrđuje da postoji npr. vjerojatnost od 90% da rezerve sirove nafte iznose neku količinu ili više.

Zanimljiv je pokušaj primjene metode Delfi (prema proročistu u antičkoj Grčkoj) za procjenu podataka o svjetskim rezervama sirove nafte, koji su nesigurni ali vrlo važni, kako je već spomenuto, za definiranje dugoročne energetske politike. To su podaci o konačnim iskoristivim količinama sirove nafte i o njihovom geografskom rasporedu, o budućim investicijama za otkrivanje nalazišta i njihovu eksploataciju, o budućim troškovima proizvodnje, o međusobnom odnosu rezerva na kopnu i pod morem, o iskoristivosti nalazišta, o vremenskoj dinamici otkrivanja novih rezerva itd. To su pitanja na koja je teško dobiti odgovore na bazi proračuna ili produljenjem krivulja koje predstavljaju dosadašnja ostvarenja, već treba pribjeći kombinaciji poznavanja problema, iskustva i procjena. Da se dobiju odgovori na postavljena pitanja, provedena je anketa na bazi detaljno izgrađenog upitnika. Nakon što su prikupljeni odgovori, analizirana su prikupljena mišljenja i dostavljena svim sudionicima u anonimnom obliku, da bi ili potvrdili svoje već dostavljeno mišljenje ili ga modificirali sa željom da se dobiju, ako je to moguće, što jednoznačniji odgovori. Bila su razasлана 42 upitnika, na koje je primljeno 29 odgovora i to: 2 od javnih službi, 18 od petrolejskih kompanija, a 9 od nezavisnih eksperata i poduzeća. Nije primljen nijedan odgovor iz socijalističkih zemalja ni iz zemalja velikih proizvođača nafte. Anketu je organizirao Institut Français du Pétrole [13] prema zaključku Svjetske konferencije za energiju.

Ako se promatra razvoj procjena rezerva sirove nafte u posljednjih tridesetak godina (tabl. 2.16), može se konstatirati da se procjene izvršene u istom razdoblju kojiput znatno međusobno razlikuju i da se s vremenom povećavaju procijenjene rezerve. Konačne iskoristive rezerve navedene u tabl. 2.16. obuhvaćaju kumuliranu proizvodnju u prošlosti i danas poznate rezerve, što ukupno čini 151 milijardu tona, te rezerve koje će u budućnosti biti otkrivene na kopnu, uz pretpostavku određenog stupnja iskorištenja zaliha u nalazištima. Treba napomenuti da procjena Sickler (Shell) iz 1975. godine ne obuhvaća SSSR, Kinu i zemlje Istočne Evrope. Ta je procjena zanimljiva jer je prvi put u takvim procjenama upotrijebljena vjerojatnost za definiranje rezerva.

Autor, naime, navodi da postoje izgledi od 75% za rezerve od 170 milijarda tona, a izgledi od 25% za rezerve od 201 milijardu tona.

U tabl. 2.17. nalaze se podaci o rezervama u pojedinim područjima. U prvom stupcu podataka nalaze se utvrđene rezerve kojima su dodane pridobivene količine do 1. siječnja 1975. godine, u drugom i trećem stupcu su količine koje će se tek otkriti, i to prosjek procjena u trećem, a donja i gornja granica u četvrtom stupcu. U posljednjem stupcu su ukupne rezerve dobivene kao zbroj prvog i drugog stupca. Ta tablica zanimljiva je jer daje interval procjena za potencijalne rezerve. Koliko su nesigurne procjene potencijalnih rezerva pokazuje omjer između minimalnih i maksimalnih podataka. Taj omjer iznosi oko 10 za SSSR i Kinu, oko 4 za Bliski istok, a oko 3 za SAD. Za cijeli svijet taj omjer iznosi 2,33. Autor tih procjena — Moody (Mobil) — naglašava da prosječna vrijednost potencijalnih rezerva može biti udvostručena, ali on pridaje malu vjerojatnost takvoj eventualnosti. Najveća je nesigurnost u tim procjenama povezana s rezervama u dubljim područjima pod morem.

Tabl. 2.16.

Procjene konačnih svjetskih rezerva sirove nafte (uključena i već ostvarena eksploatacija) (10⁹ tona)

Autor, organizacija	Godina	Rezerve
Pratt, Weeks, Stebinger	1942.	86
Duce	1946.	57
Pogue	1946.	79
Weeks	1948.	87
Levorsen	1949.	214
Weeks	1949.	144
Mac Naughton	1953.	143
Hubbert	1956.	179
Weeks	1958.	214
Weeks	1959.	286
Hendricks (USGS)	1965.	354
Ryman (Esso)	1967.	299
Shell	1968.	257
Weeks	1968.	314
Hubbert	1969.	193 ... 300
Moody (Mobil)	1970.	257
Warman (BP)	1971.	171 ... 286
Weeks	1971.	327
Moody (Mobil)	1972.	257 ... 271
Adams, Kirby	1975.	286
Sickler (Shell)	1975.	170 ... 201
Moody (Mobil)	1975.	290

Tabl. 2.17.

Iskoristive rezerve sirove nafte 1. I 1975. (10⁹ tona)

	Poznate rezerve (uključeno iskorišteno)	Neotkrivene rezerve			Ukupno iskoristive rezerve
		Srednja vrijednost procjena	Gornja i donja granica procjena		
Afrika	12,2	9,7	4,4 ... 17,0		21,9
Amerika (bez SAD i Kanade)	11,4	11,2	5,8 ... 19,8		22,6
Azija (bez Bliskog istoka, SSSR-a i Kine)	5,6	12,3	5,2 ... 23,2		17,9
Evropa (bez SSSR-a)	0,5	1,6	0,9 ... 2,3		2,1
Bliski istok	70,0	20,5	10,2 ... 38,2		90,5
Kanada	2,2	9,6	5,5 ... 15,0		11,8
SAD	21,4	11,6	6,8 ... 20,5		33,0
SSSR i Kina	24,3	40,9	9,5 ... 95,5		65,2
Sjeverno more	3,2	6,1	2,7 ... 10,9		9,3
Antarktik	—	2,7	0,7 ... 6,8		2,7
Svijet	150,8	126,2	81,9 ... 191,0		277,0

Prema tome, ako se prihvate vrijednosti rezerva prema posljednim procjenama, koje neki smatraju konzervativnima, ukupne rezerve sirove nafte iznose 260 do 280 milijarda tona. Ako se od toga odbiju 43 milijarde tona koliko je do sada eksploatirano i potrošeno, ostaje 220 do 240 milijarda tona, od čega je danas oko stotinu i deset milijarda tona već otkriveno.

S obzirom na potencijalne mogućnosti otkrića još neotkrivenih rezerva, u najpovoljnijem položaju se nalaze SSSR i Kina (prema podacima u tabl. 2.17), jer se na tom području može očekivati otkrivanje još 63% ukupnih iskoristivih rezerva i pored toga što su poznate i iskoristene rezerve znatne. U nepovoljnoj situaciji su SAD i Bliski istok, jer se tamo može očekivati otkrivanje 35%, odnosno 23% ukupnih iskoristivih rezerva nafte.

Primjenom metode Delfi [13] procijenjeno je da je najvjerojatnije da iskoristive rezerve sirove nafte iznose 257 milijarda tona, u što nisu uključene već iskorištene količine (43 milijarde tona). To su maksimalne tehnički iskoristive količine, po proizvodnoj cijeni do 20 \$ po barilu (današnja proizvodna cijena iznosi u prosjeku 5 \$ po barilu, dok je prodajna cijena oko 15 \$), a uz pretpostavku da budu ispunjeni svi povoljni financijski i politički uvjeti. Pri tom je, također, pretpostavljeno da će se iskoristivost nalazišta povećati od današnjih 25% do 40% pri kraju ovog stoljeća.

Svakako da se mišljenja anketiranih razlikuju. Većina anketiranih (oko 2/3) procjenjuje da iskoristive rezerve iznose oko 239.10^9 tona, prema optimističkim mišljenjima te su rezerve oko 347.10^9 tona, a prema pesimističkim oko 174.10^9 tona. Iz tih podataka vidi se da postoje znatne razlike u procjenama rezerva sirove nafte.

Polazeći od procjene rezerva na 257.10^9 tona, raspodjela rezerva po dijelovima svijeta prema istoj anketi vidi se u tabl. 2.18. Najveće konačno iskoristive rezerve nalaze se na području Bliskog istoka i sjeverne Afrike (42% svjetskih rezerva). Rezerve na području SSSR-a, Kine i ostalih socijalističkih zemalja u istočnoj Evropi (23% svjetskih rezerva) vjerojatno su dovoljne za zadovoljenje vlastitih potreba. Ostala područja bit će u budućnosti deficitna u pogledu opskrbe sirovom naftom.

Spomenute rezerve nalaze se — prema procjenama — ispod kontinenata i ispod morske površine na dubini do 200 m. Pretpostavlja se mogućnost postojanja rezerva i na većim dubinama ispod morske površine i u polarnim područjima. Mišljenje velike većine anketiranih je da su rezerve na većim dubinama male i procjenjuju ih na 7 do 15% od svjetskih rezerva, dio anketiranih misli da ih se može potpuno zanemariti, a samo 7% od njih vjeruje da one predstavljaju 1/3 svjetskih rezerva. Naravno da samo bušenja mogu dati odgovor na te dileme, ali ostaje velika nesigurnost u odnosu na troškove istraživanja i eksploatacije. Istraživanja i eksploatacija u polarnim područjima kao i transport iz tih područja predstavljaju vrlo velike probleme, pa je malo vjerojatno da će takva nalazišta biti eksploatirana prije kraja ovoga stoljeća.

Iskoristive poznate rezerve sirove nafte prema stanju od 1. siječnja 1973. godine navedene su u tabl. 2.19. Podaci u spomenutoj tablici unekoliko se razlikuju od onih u tabl. 2.17. jer se radi o različitim izvorima i jer su u podacima u tabl. 2.17. uključene i količine koje su već eksploatirane. U tabl. 2.19. nalaze se i podaci o proizvodnji u 1975. godini, pa se može ocijeniti intenzivnost eksploatacije u pojedinim područjima. Kao karakteristika te intenzivnosti, izračunat je broj godina do iscrpljenja iskoristivih rezerva, uz pretpostavku da se trajno održava ona proizvodnja koja je postignuta u 1975. godini. Uz takvu pretpostavku sve poznate svjetske rezerve bile bi iscrpene kroz 35 godina. To je, međutim, statičko trajanje rezerva. Ono je još i kraće ako se računa s porastom proizvodnje, što je do sada stalno ostvarivano. Treba upozoriti na činjenicu da su iskoristive poznate rezerve sirove nafte uvijek, i u prošlosti, iskazivane kao relativno male i da su stalno pokrivala statičku potrošnju (potrošnja bez porasta) za period od oko 40 godina. Često se, naime, kaže da već 40 godina poznate rezerve nafte pokrivaju potrebe u slijedećih 40 godina. Razlog za takvo stanje treba tražiti u činjenici da se istražni radovi oko utvrđivanja rezerva koje će se iskorištavati u daljoj budućnosti ne isplate zbog velikih troškova. Zato sva poduzeća koja se bave eksploatacijom nafte (a to vrijedi i za zemni plin) obavljaju istražna bušenja samo u onom opsegu koji je potreban

da se osigura kontinuiranost proizvodnje. S druge strane, ne želi se doći u situaciju da se prikaže mogućnost proizvodnje znatno veće od potreba, kako bi se održala što viša razina cijena.

Na Bliskom istoku nalazi se više od polovice poznatih svjetskih rezerva sirove nafte, a ako se tome dodaju rezerve u Alžiru, Libiji i Egiptu, dolazi se do zaključka da se na području arapsko-islamskih država nalazi oko 63% svih danas poznatih rezerva sirove nafte. Najveće su rezerve u Saudijskoj Arabiji (gotovo 20% svjetskih rezerva, tabl. 2.20), zatim u SSSR-u (oko 11%), u Kuvajtu (skoro 10%) i u Alžiru (nešto manje od 9,5%).

Tabl. 2.18.

**Iskoristive rezerve sirove nafte (bez iskorištenih količina)
(metoda Delfi) (10⁹ tona)**

Afrika južna od Sahare	11,6
Amerika (bez SAD i Kanade)	23,1
Azija (bez Bliskog istoka, SSSR-a i Kine)	15,4
Zapadna Evropa	11,6
Bliski istok i sjeverna Afrika	107,9
SAD i Kanada	28,3
SSSR, Kina i Istočna Evropa	59,1
Svijet	257,0

Tabl. 2.19.

Iskoristive poznate rezerve sirove nafte, stanje 1. I 1973. (10⁹ tona)

	Iskoristive poznate rezerve	Proizvodnja u 1975. god.	Trajanje rezerva godina ¹
Afrika	13,98	0,239	58
Azija (bez SSSR-a i Bliskog istoka)	7,79	0,168	46
Amerika bez SAD	5,62	0,292	19
Evropa bez SSSR-a	1,84	0,047	39
Oceanija	0,30	0,020	15
Bliski istok ²	48,24	0,976	49
SAD	4,96	0,413	12
SSSR	10,27	0,491	21
Svijet	93,00	2,647	35

¹ Trajanje rezerva uz proizvodnju u 1975. godini

² Irak, Saudijska Arabija, Izrael, Jordan, Ujedinjeni Arapski Emirati i Iran

U proteklim godinama intenzivno se tragalo za zemnim plinom. Zbog toga su se poznate iskoristive rezerve zemnog plina od kraja 1964. do 1975. godine povećale od 25 na skoro 60 tisuća milijarda m³ (tabl. 2.21). Prema najnovijim procjenama, najveće su iskoristive rezerve na Bliskom istoku, u sjevernoj Africi (oko 40%) i u SSSR-u (oko 34% svjetskih rezerva). Promatrano po zemljama, (tabl. 2.22) najveće poznate rezerve zemnog plina postoje u SSSR-u, SAD i Iranu, te one predstavljaju više od 50% poznatih svjetskih rezerva.

Pokušalo se procijeniti [15] još neotkrivene iskoristive rezerve zemnog plina. Te se procjene osnivaju na procjenama u pojedinim zemljama i na podacima objavljenim od Institute of Gas Technology, koje se baziraju na poznatim iskoristivim rezervama, pri čemu je računato da veće rezerve postoje na područjima gdje je već otkriven zemni plin.

Tabl. 2.20.

Iskoristive poznate rezerve sirove nafte (stanje 1. I 1973) u zemljama s najvećim rezervama (više od 500 10⁶ tona)

	Iskoristive poznate rezerve 10 ⁶ tona	Proizvodnja u 1975. god. 10 ⁶ tona	Trajanje rezerva godina
Saudijska Arabija	18 568	325,4	53
SSSR	10 271	491,0	21
Kuvajt	8 980	105,2	85
Iran	8 746	267,6	33
Alžir	5 980	45,1	133
SAD	4 964	413,1	12
Tajland	4 372	0,0	...
Libija	4 026	71,5	56
Irak	3 895	111,2	35
Ujedinjeni Arapski Emirati	5 149	80,5	64
Nigerija	2 035	88,4	23
Venezuela	1 945	122,2	16
Kina	1 726	80,0	22
Kanada	1 373	69,9	20
Indonezija	1 358	64,1	21
Sirijska	993	9,6	103
Katar	911	21,1	43
Egipat	751	8,4	89
Argentina	701	20,8	34
Velika Britanija	687	10,2 ¹	67
Oman	680	17,1	40
Kongo	667	1,8	371

¹ 1976.

Tabl. 2.21.

Poznate iskoristive i neotkrivene iskoristive rezerve zemnog plina (10^{12} m³)

	Iskoristive poznate rezerve	Neotkrivene iskoristive rezerve	Eksplatacija do 1975. god.
Afrika, južno od Sahare	0,1	0,3	0,0
Amerika (bez SAD i Kanade)	1,1	10,1	0,4
Azija (bez SSSR-a, Kine, Bliskog istoka i Japana)	0,9	4,1	0,1
Zapadna Evropa	3,8	7,9	1,1
Bliski istok i sjev. Afrika	24,0	69,5	2,2
SAD i Kanada	7,8	41,0	15,9
SSSR i Istočna Evropa	19,9	55,6	3,5
Kina	0,5	9,5	0,1
Oceanijska i Japan	1,0	5,8	0,1
Svijet	59,1	203,8	23,4

Te procjene nalaze se u tabl. 2.21. Najeveće potencijalne neotkrivene rezerve — prema toj procjeni — postoje na Bliskom istoku i u sjevernoj Africi (34%), u SSSR-u (27%) i u SAD (20% od ukupnih svjetskih neotkrivenih rezerva).

Iskoristive rezerve sirove nafte u Jugoslaviji, prema stanju potkraj 1974. godine, iznose $94,1 \cdot 10^6$ tona, od čega je $65,0 \cdot 10^6$ t na području SR Hrvatske, a $29,1 \cdot 10^6$ t na području SAP Vojvodine. Prema procjenama na temelju dosadašnjih i planiranih istraživanja, očekuje se da neotkrivene iskoristive rezerve iznose oko $205 \cdot 10^6$ tona, a od toga da se $158 \cdot 10^6$ tona nalazi u SR Hrvatskoj ($68 \cdot 10^6$ t na području između Save i Drave, $90 \cdot 10^6$ t u podmorju Jadranskog mora) a $47 \cdot 10^6$ t u SAP Vojvodini.

Prema stanju potkraj 1974. godine, iskoristive rezerve zemnog plina u Jugoslaviji iznose $50 \cdot 10^9$ m³, od čega je $27 \cdot 10^9$ m³ u SR Hrvatskoj, a $23 \cdot 10^9$ m³ u SAP Vojvodini. Očekuje se da su još neotkrivene rezerve $260 \cdot 10^9$ m³, od toga na području SR Hrvatske $238 \cdot 10^9$ m³ ($170 \cdot 10^9$ m³ u podmorju Jadranskog mora, a ostatak u području između Save i Drave), a $22 \cdot 10^9$ m³ na području SAP Vojvodine.

I na drugim područjima Jugoslavije postoje sedimenti koji ukazuju na mogućnost postojanja sirove nafte i zemnog plina, ali dosadašnjim istražnim radovima, koji nisu bili opsežni, nisu utvrđene iskoristive rezerve tih fosilnih goriva.

Tabl. 2.22.

Iskoristive poznate rezerve zemnog plina (stanje 1. I 1973) u zemljama s najvećim rezervama (više od $300 \cdot 10^9 \text{ nm}^3$)

	Iskoristive poznate rezerve 10^9 nm^3	Proizvodnja u 1975. god. 10^9 nm^3	Trajanje rezerva godina
SSSR	17 993	311,4	58
SAD	7 687	544,1	14
Iran	5 663	22,6	251
Alžir	2 973	9,9	300
Nizozemska	2 492	83,9	30
Tajland	1 954	---	---
Kanada	1 557	76,1	20
Saudijska Arabija	1 416	3,3	429
Velika Britanija	1 274	37,6	34
Nigerija	1 133	0,4	2 833
Australija	1 026	5,0	205
Venezuela	980	12,2	80
Kuvajt	934	5,4	173
Libija	779	3,3	236
Irak	708	4,7	151
Kina	680	6,9	99
Novi Zeland	481	0,5	962
Pakistan	453	4,8	94
SR Njemačka	360	17,6	20
Meksiko	326	14,1	23

3.3. Proizvodnja i potrošnja sirove nafte i zemnog plina

Nalazištu se prilazi bušenjem pomoću posebno konstruiranih bušaćih garnitura. Može se bušiti i do dubine od nekoliko tisuća metara. Najčešće se upotrebljava Rotary-bušilica, montirana u tornju visine 30—50 m. Svrdlo, koje rotira sa 80 do 200 okretaja u minuti, izrađuje se ili od specijalnih čelika ili s ugrađenim dijamantima. Brzina bušenja ovisi o kvaliteti stijena i kreće se od 0,5 m dnevno u tvrdoj do 35 m na dan u mekoj stijeni. Trajanje bušenja ovisi i o dubini bušotine. U prosjeku se može računati da je potrebno 5 do 10 dana za bušotinu dubine od 1 500 m, 60 do 90 dana za dubinu 3 500 m, a za bušotinu od 5 000 m trebat će 100 do 150 dana. Troškovi bušenja rastu od oko 25 dolara (cijene iz 1972. godine) po metru za bušotinu do 1 000 m dubine do 250 dolara za onu od 5 000 m. Bušenja u moru skuplja su najmanje

dvostruko od onih na kopnu. Troškovi jedne takve bušaće garniture su 15—20 tisuća dolara dnevno. Danas u svijetu (bez SSSR-a i Kine, za koje podaci nisu poznati) radi oko 3 000 bušaćih garnitura, od čega oko 80% u SAD, a oko 10% su uređaji za bušenje u moru. U tabl. 2.23. su podaci o broju bušotina izvedenih do kraja 1975. godine. Najviše je bušeno u SAD i SSSR-u (preko 90% svih bušotina na svijetu). Karakterističan je podatak o malom broju bušotina na području Bliskog istoka, što ukazuje na izdašnost nalazišta, jer se na tom području ostvaruje, kako će se vidjeti, znatan dio svjetske proizvodnje sirove nafte. Podaci o broju bušotina na 1 000 km² potencijalnih površina (tabl. 2.23) daju uvid u istraženost pojedinog područja. Postepeno se buši sve dublje, ali su rijetke bušotine na dubini većoj od 4 500 m (u 1969. godini u SAD takvih je bušotina bilo samo 1% od ukupno preko 30 000 bušotina).

Kao što je već spomenuto, mišljenja o mogućim rezervama sirove nafte pod morem na dubinama većim od 200 m znatno se razlikuju. Oni koji procjenjuju da se na tim dubinama nalaze veće rezerve nafte osnivaju svoje procjene na činjenici da se u Zemljinoj kori koja je 200 do 1 000 m ispod morske površine nalazi oko 90.10⁶ km² sedimentnih slojeva — potencijalnih nosilaca sirove nafte. Takvi sedimentni slojevi protežu se na površini od oko 65.10⁶ km² ispod kontinenata, a na površini od oko 15.10⁶ km² ispod površine mora na dubini do 200 m. Zbog toga se sve više istražuju područja na većim dubinama, što pokazuju podaci o broju bušotina (tabl. 2.24). Troškovi proizvodnje sirove

Tabl. 2.23.

Broj bušotina (do kraja 1975. godine) i broj bušotina na 1 000 km² potencijalne površine

	Broj bušotina 10 ³	Broj bušotina na 1000 km ²
Afrika	15,0	1,2
Amerika (bez SAD i Kanade)	100,0	8,1
Azija (bez Kine i Bliskog istoka)	16,0	3,3
Evropa (bez SSSR-a)	25,0	7,4
Oceanija	2,5	0,6
Bliski istok	10,0	3,2
Kanada	100,0	20,4
Kina	9,0	3,9
SAD	2 425,1	378,9
SSSR	530,0	58,9
Svijet	3 232,6	51,0

Tabl. 2.24.

Broj bušotina u moru na većoj dubini od 200 m

	200 do 300 m	300 do 500 m	500 do 1000 m	1000 m
1967.	1	—	—	—
1968.	3	1	—	—
1969.	1	6	—	—
1970.	6	3	—	—
1971.	5	5	—	—
1972.	5	4	—	—
1973.	4	2	—	—
1974.	6	2	3	—
1975.	22	5	2	—
1976.	12	12	7	1

nafte iz tih bušotina svakako bi bili znatno veći od onih koji su potrebni za proizvodnju iz bušotina na kopnu ili na dubinama do 200 m, ali se smatra da bi i znatno povećane cijene takve nafte bile prihvatljive. Današnje su prodajne cijene sirove nafte i naftinih derivata visoke, jer su takse i porezi u zemljama proizvođačima i u zemljama potrošačima vrlo visoki. Tako npr. u cijeni naftinih derivata u Francuskoj troškovi istraživanja i eksploatacije sirove nafte sudjeluju samo sa 2% (tabl. 2.25). Takva struktura troškova nastaje zbog toga što se većina sirove nafte nabavlja s Bliskog istoka, gdje su troškovi istraživanja i eksploatacije vrlo niski (oko 5 \$ po toni). Nasuprot tome, troškovi proizvodnje sirove nafte iz nalazišta u britanskom dijelu Sjevernog mora iznose između 22 i 67 \$ po toni.

Buši se u dvije etape. U prvoj su istražna bušenja, s bušotinama u velikim razmacima, da bi se utvrdila rasprostranjenost i vrsta sedimentata koji sadržavaju ugljikovodike. Prije istražnih bušenja valja provesti prethodna geološka istraživanja i geofizička mjerenja. Obično su potrebne jedna do dvije godine da bi se dobili podaci o redoslijedu slojeva i tektonici područja, a pogotovo o debljini, svojstvima i prostiranju slojeva. Cilj je prve etape bušenja da se izračuna količina ugljikovodika. Tada je, naime, moguće odrediti ekonomičnost eventualne eksploatacije, pri čemu se računa da ona traje 20 do 30 godina. Za eksploataciju nalazišta potreban je znatno gušći raspored bušotina, što ujedno čini drugu etapu bušenja. Razmak između bušotina za eksploataciju ovisi o svojstvima sedimentnog sloja (propusnost, tlak). U SAD i u Evropi najčešća je udaljenost bušotina 300—500 m, a na Bliskom istoku 1 000—3 000 m. Istraživanja i pripreme za eksploataciju traju dvije do šest godina. U ukupnim investicijama bušenje sudjeluje u prosjeku sa 60%, a ostatak je za transportne uređaje.

Pošto je dovršeno bušenje, bušotina se priprema za eksploataciju izradom cementirane cijevi za održanje bušotine i polaganjem cijevi manjeg promjera (5 do 12 cm) za izvlačenje sirove nafte ili zemnog plina. Ako je tlak u nalazištu veći od hidrostatskog tlaka sirove nafte u cijevi, govori se o eruptivnom nalazištu, pa tada nisu potrebni dodatni uređaji ni energija za izvlačenje nafte na površinu. To je najekonomičniji način eksploatacije i on se nastoji održati što je dulje moguće; tlak se, međutim, smanjuje s povećanim iskorištenjem u nalazištu. Kad tlak nije dovoljan, ili više nije dovoljan, za eruptivni način eksploatacije, valja primijeniti pogodan postupak s pomoću pumpa koje se postavljaju na razini nalazišta. Ako ima dovoljno plina, on se dovodi iz vanjske u unutrašnju cijev i na taj se način smanjuje gustoća nafte, a time i potreban tlak za podizanje, što ima djelovanje kao kod eruptivnog nalazišta.

Eksploatacijom nalazišta sirove nafte tlak u nalazištu postepeno opada, pa se smanjuje dotok nafte koji potpuno prestaje i prije nego što se nalazište posve iscrpe.

Ukupne, geološke rezerve sirove nafte koje se nalaze u nalazištu ne mogu se iskoristiti. Omjer između eksploatirane količine i ukupnih geoloških rezerva nazvan je koeficijentom ekstrakcije, koji se obično navodi u postocima. Postignuta vrijednost toga koeficijenta nakon iscrpljenja nalazišta ovisi o točnosti procjene geoloških rezerva, a pogreške u tim procjenama mogu biti veće i od 10%. U odnosu na postig-

Tabl. 2.25.

Troškovi proizvodnje, transporta i prerade sirove nafte te distribucije naftinih derivata za potrošače u Francuskoj (u 1977. godini)

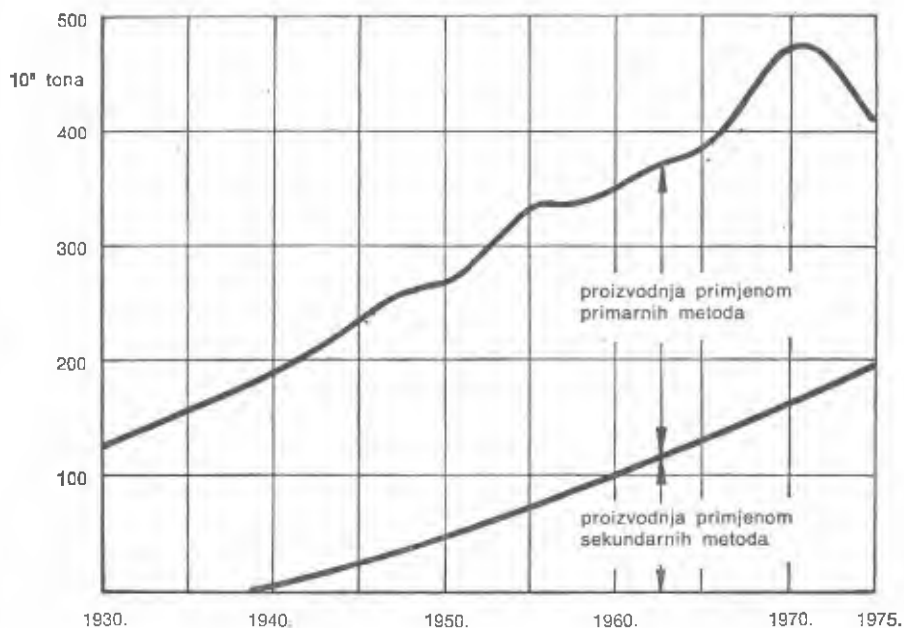
Troškovi proizvodnje i transporta		
istraživanje i eksploatacija	2,0 %	5,1 \$/t
takse i porezi u zemlji proizvođača	37,0 %	94,9 \$/t
transport	4,0 %	10,2 \$/t
Ukupno	43,0 %	110,2 \$/t
Troškovi prerade i distribucije		
prerada	6,5 %	16,7 \$/t
distribucija	13,5 %	34,6 \$/t
takse i porezi u zemlji potrošača	37,0 %	94,9 \$/t
Ukupno	57,0 %	146,2 \$/t
Sveukupno	100,0 %	256,4 \$/t
Sveukupno bez taksa		66,6 \$/t

nute koeficijente ekstrakcije, mogu se razlikovati četiri etape razvoja eksploatacije nalazišta. U prvoj etapi, koja ide do kraja prvog desetljeća ovog stoljeća, postizavan je koeficijent ekstrakcije reda veličine od 10%, što znači da je na površinu došlo samo 10% od ukupne količine sirove nafte koja se nalazila u području eksploatacije. U drugoj etapi, koja se proteže do kraja trećeg desetljeća, postignuti su koeficijenti ekstrakcije do 15 i 20% u zemljama s razvijenom petrolejskom industrijom. Do kraja petog desetljeća koeficijent ekstrakcije se povećavao, pa je negdje dostignuta vrijednost i 30%. Nakon drugog svjetskog rata razvoj novih metoda obećava dalje povećanje koeficijenta ekstrakcije.

Metode za povećanje koeficijenta ekstrakcije dijele se na pasivne i aktivne. Među pasivne metode ubrajaju se: bušenje dodatnih bušotina, njihova obnova, povećanje dubine, konsolidacija zona u okolini bušotina itd. Iako važnost pasivnih metoda opada, one još igraju znatnu ulogu u povećanju koeficijenta ekstrakcije. Aktivne su metode: mehanička ekstrakcija, ubrizgavanje vode, ubrizgavanje drugih tekućina, termičke metode i ubrizgavanje plinova. Za mehaničku ekstrakciju upotrebljavaju se pumpe različitih tipova (centrifugalne pumpe, stapne pumpe). Pasivne metode i mehanička ekstrakcija nazivaju se često primarnim metodama eksploatacije. Te metode najviše pridonose povećanju koeficijenta ekstrakcije; njihovom primjenom postiže se u SSSR-u koeficijent ekstrakcije oko 25%, a u SAD oko 18%. Ubrizgavanje vode smatra se sekundarnom metodom pri eksploataciji nalazišta, a sve ostale tercijarnim metodama. Smatra se da ubrizgavanje vode od početka eksploatacije nalazišta povećava trajanje konstantne izdašnosti nalazišta i da produljuje period eruptivne eksploatacije, koja je ekonomičnija. Ubrizgavanje vode, naime, osigurava bolje ispiranje stijena nosilaca nafte, čime se smanjuje potrebna gustoća bušotina. Postoje, međutim, i mišljenja da je povoljnije ubrizgavati vodu nakon inicijalne eksploatacije nalazišta. Voda se ubrizgava ili na rubu nalazišta ili u centralnom dijelu. U nekim nalazištima pokazalo se povoljno pulzacijsko ubrizgavanje vode. U tabl. 2.26. nalaze se podaci o primjeni ubrizgavanja vode u nalazištima u SSSR-u, o utjecaju takve eksploatacije, te o količinama ubrizgane vode, a na sl. 2.5. vidi se utjecaj primjene ubrizgavanja vode na proizvodnju sirove nafte u SAD.

Ubrizgavanjem kemikalija može se povećati koeficijent ekstrakcije, jer kemikalije djeluju na tekućinu u nalazištu i na stijenje u kojem se nalazi sirova nafta. To omogućuje poboljšanje dinamičkih svojstava sirove nafte, sposobnost njezina kretanja i odjeljivanje od vode. Upotrebljavaju se polimeri, kiseline, otopine bazičnih silikata, alkoholi itd. Koncentracija tih dodataka u vodi iznosi 0,01 do 0,1%.

Termičke metode obuhvaćaju ubrizgavanje vodene pare ili vrela vode, stvaranje ložišta u samom nalazištu i upotrebu eksploziva. Smatra se da termičke metode valja primijeniti kad je nafta gusta, jer za-



Sl. 2.5. Utjecaj primjene sekundarnih metoda na proizvodnju sirove nafte u SAD

Tabl. 2.26.

Upotreba metode ubrizgavanja vode u nalazišta sirove nafte u SSSR-u

	1950.	1970.	1975.	1980. ¹
Broj nalazišta s ubrizgavanjem vode	—	> 220	> 250	...
Ukupna proizvodnja tih nalazišta (10 ⁶ t)	16	257	414	544 ... 576
Postotak od ukupne proizvodnje	41	73	85	85 ... 90
Povećanje proizvodnje ubrizgavanjem (10 ⁶ t)	9	152	305	403 ... 435
Postotak od ukupne proizvodnje	23	59	62	63 ... 65
Volumen ubrizgane vode (10 ⁶ m ³)	9	559	984	1390 ... 1500

¹ Procjena

grijavanje poboljšava dinamička svojstva nafte. Čini se da će u slijedećim godinama ubrizgavanje vodene pare imati prioritet među termičkim metodama. Najčešće je potrebno 2 do 6 tona pare po toni dodatne proizvodnje sirove nafte, ali nekada je potrebno i do 45 tona pare. Tlak pare iznosi 40 do 90 bara. Zagrijavanje izgaranjem u blizini dna nalazišta posebno se primjenjuje kad je nafta gusta i kad se nalazi na dubini većoj od 1 800 do 2 000 m. Izgaranje se održava ubrizgavanjem zraka, često obogaćenog kisikom, pod tlakom od 100 bara. Za dodatnu proizvodnju jedne tone nafte potrebno je oko 2 000 m³ zraka. Takvom metodom može se povećati koeficijent ekstrakcije za 20 do 30% kad je gustoća nafte mala, a za 20 do 40% kad je nafta gusta. Izgaraju u prvom redu teške frakcije nafte, a za održavanje izgaranja nije potrebno više od 15% geoloških rezerva.

Ubrizgavanje plinovitih ugljikovodika jedna je od najstarijih aktivnih metoda. Njezina je primjena naročito povoljna kad je nafta rijetka i stijenje malo propusno. Danas se proučava mogućnost ubrizgavanja ugljičnog dioksida, cikličkog ubrizgavanja plinova ugljikovodika pod tlakom od 250 do 300 bara i ubrizgavanja vode.

Sve češće se primjenjuju istodobno različite metode, a efikasnost njihove primjene ovisi o prirodnim karakteristikama nalazišta i o svojstvima sirove nafte. U tabl. 2.27. nalaze se podaci o koeficijentu ekstrakcije koji se danas ostvaruje primjenom različitih metoda te o njevoj vrijednosti koja se može očekivati između 1980. i 1990. godine. Prilikom određivanja budućih vrijednosti koeficijenta ekstrakcije u SAD računato je da se veliki dio neiskorištenih rezerva nalazi u nalazištima kojih je eksploatacija već dovršena, pa je malo vjerojatno da će se ta nalazišta ponovno eksploatirati. Na području koje obuhvaća Evropu, SAD i SSSR danas se ostvaruje koeficijent ekstrakcije između

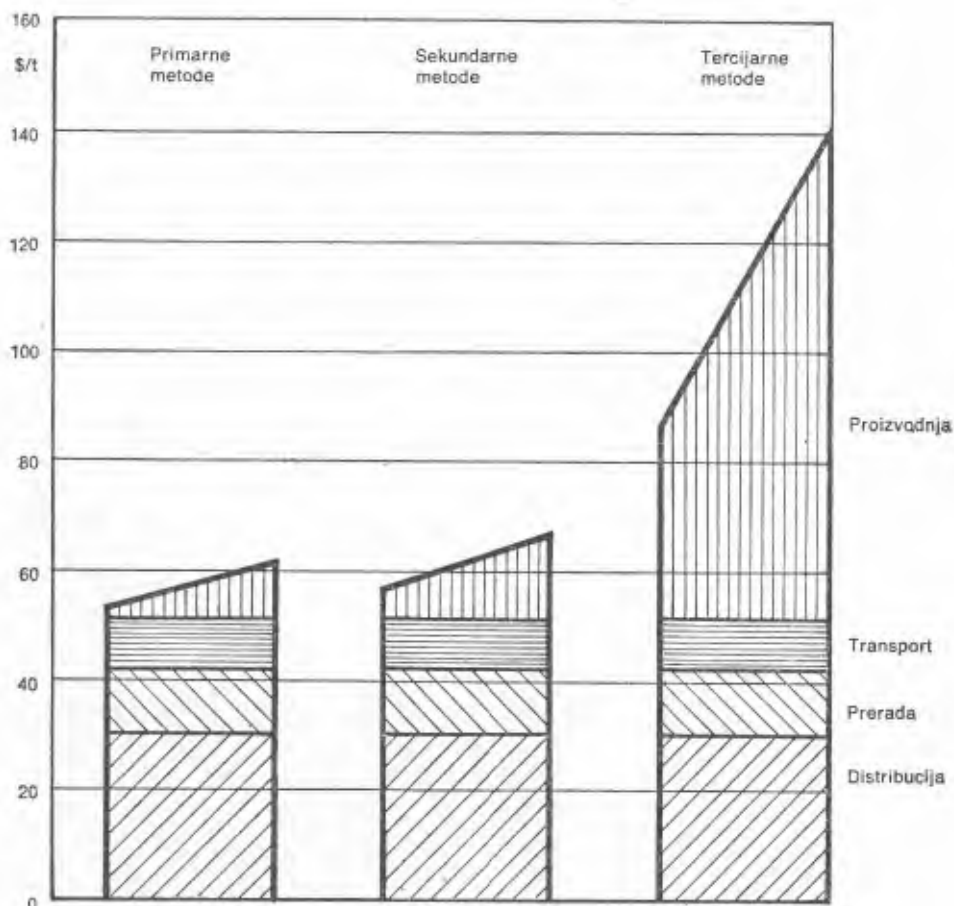
Tabl. 2.27.

Vjerojatni razvoj koeficijenata ekstrakcije (%)

	Praktički ostvarivo				Teorijski ostvarivo
	Današnje stanje		Stanje koje se može očekivati između		
			1980. i 1990. god.		
	SSSR	SAD	SSSR	SAD	
Pasivne metode i mehanička ekstrakcija	25	18	26...30	19...21	< 90
Ubrizgavanje vode	24	10	27...33	12...14	< 40
Nove metode	1	5	7...15	6...12	100
Ukupno	45...50	32...33	60...65	38...45	

35 i 40%, a računa se da će primjenom novih metoda oko 1990. godine biti ostvaren koeficijent od 45%, s tim da je maksimalna moguća vrijednost 60%. Prema tome, tek oko polovicu geoloških rezerva sirove nafte moguće je iskoristiti, a druga polovica ostaje u nalazištima.

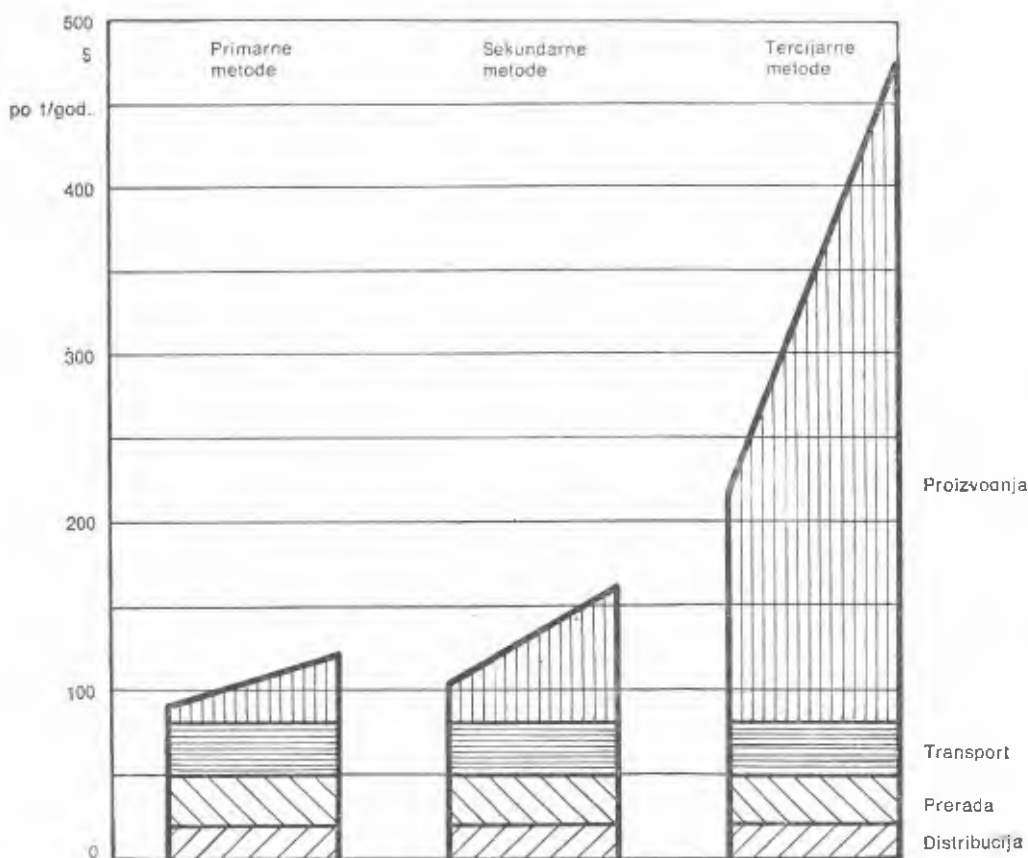
Primjenom sekundarnih, a pogotovo primjenom tercijarnih metoda za povećanje koeficijenta ekstrakcije, povisuju se troškovi proizvodnje (sl. 2.6) i potrebne investicije za ostvarenje proizvodnje (sl. 2.7) [17]. To povišenje troškova i investicija nastaje zbog povećanog broja



Sl. 2.6. Troškovi proizvodnje, transporta i prerade sirove nafte, te distribucije naftnih derivata u ovisnosti o metodama za povećanje koeficijenta ekstrakcije

bušotina i ubrizgavanja vode, plinova, vodene pare ili u vodi otopljenih kemikalija. Pri ubrizgavanju vode potrebna je npr. masa vode dvostruko veća od mase nafte koja se proizvodi.

Iako su mnogi elementi eksploatacije zemnog plina zajednički s elementima eksploatacije nafte, iskorištenje geoloških rezerva zemnog plina, karakterizirano koeficijentom ekstrakcije, znatno je bolje. Mehanizam odvođenja plina znatno je povoljniji, jer plin zbog svojih fizičkih svojstava brže i lakše prodire kroz stijene i stiže do bušotine. Već upotrebom pasivnih metoda za povećanje ekstrakcije zemnog plina postižu se vrijednosti koeficijenta ekstrakcije dvostruko veće od



Sl. 2.7. Specifične investicije za proizvodnju, transport i preradu sirove nafte, te distribuciju naftnih derivata u ovisnosti o metodama za povećanje koeficijenta ekstrakcije

onih koje se mogu ostvariti pri eksploataciji sirove nafte. U SAD i u SSSR-u danas se postiže koeficijent ekstrakcije između 85 i 88%. Za područje Evrope, SAD i SSSR-a koeficijent ekstrakcije iznosi između 60 i 95%; sredinom devedesetih godina može se očekivati prosječna vrijednost od 80%, s maksimalnom vrijednošću do 85 i 90%.

Kako je već spomenuto obično se smatra da industrijska eksploatacija nafte počinje 1859. godine, kad je u Pensilvaniji načinjena prva bušotina dubine 23 m, koja je dala nekoliko kubičnih metara sirove nafte. Otkriće prvog izdašnjeg nalazišta poslužilo je u prvom redu za opskrbu petrolejem kao sredstvom za rasvjetu, ali je sirova nafta dobila na značenju tek onda kad su konstruirani motori s unutrašnjim izgaranjem. Početkom ovog stoljeća najveći su proizvođači sirove nafte SAD i carska Rusija — područje oko Kaspijskog jezera (tabl. 2.28), a kasnije, sve do drugog svjetskog rata, u SAD se proizvodi gotovo 2/3 svjetske proizvodnje sirove nafte, što je posljedica razvoja motorizacije. Tek nakon drugog svjetskog rata počinje proizvodnja u zemljama na Bliskom istoku, koje su danas — promatrajući ih zajedno — najveći proizvođači (tabl. 2.29). Još 1950. godine u SAD je proizvedeno nešto više od polovice svjetske proizvodnje sirove nafte, a danas se tamo proizvodi samo nešto manje od 14%. Tridesetih godina ovog stoljeća samo su u malom broju zemalja eksploatirana nalazišta sirove nafte, da bi se — zbog sve veće potražnje — ta eksploatacija proširila na sve kontinente i na područja o kojima se ranije nije ni mislilo da su potencijalna nalazišta sirove nafte. Kako je već spomenuto, najveća proizvodnja sirove nafte ostvaruje se na Bliskom istoku (u 1977. godini 37,0% svjetske proizvodnje), u SSSR-u (18,4%) i SAD (13,7%). Od zemalja Bliskog istoka najveću proizvodnju ima Saudijska Arabija (u 1977. godini 41,6% od proizvodnje na tom području), Iran (25,7%), Irak (10,1%), Kuvajt (8,8%) i Ujedinjeni Arapski Emirati (9,0%). Na američkom kontinentu Venezuela je, nakon SAD, najveći proizvođač nafte, a u Africi su najveći proizvođači Nigerija, Libija i Alžir. Udio evropskih zemalja (bez SSSR-a) u svjetskoj proizvodnji nafte vrlo je mali i iznosi tek 3,0% svjetske proizvodnje; to vrijedi i za zapadne i za istočne evropske zemlje. U Rumunjskoj, koja je nekad smatrana zemljom s velikom proizvodnjom sirove nafte, proizvedeno je u 1977. godini samo 17% evropske proizvodnje, odnosno 0,5% svjetske proizvodnje sirove nafte.

Svjetska proizvodnja nafte u tri četvrtine ovog stoljeća porasla je za oko 150 puta, što odgovara prosječnom godišnjem porastu od 6,7% godišnje, ili udvostručenju proizvodnje svakih 10,5 godina. Karakteristično je da je praktički jednak prosječni godišnji porast proizvodnje ostvaren i za posljednjih 25 godina i pored pada proizvodnje u 1975. godini u odnosu na 1974, što je vjerojatno posljedica racionalnije potrošnje, ali i stvaranja sigurnosnih zaliha u 1973. i 1974. godini. U te dvije godine uskladišteno je, naime, nešto preko 61 milijun tona nafte. U 1976. i 1977. godini, međutim, ponovno je povećana proizvodnja.

Tabl. 2.28.

Proizvodnja sirove nafte u zemljama s najvećom proizvodnjom

	1900.	1920.	1930.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1973.	1974.	1975.	1976.	1977.
SSSR	9,8	3,8	18,6	37,9	70,8	147,9	242,9	335,0	429,0	458,9	491,0	519,7	545,8
SAD	8,7	60,7	123,1	266,7	335,7	348,0	384,9	475,3	454,2	432,8	413,1	401,2	406,0
Saudijska Arabija	—	—	—	26,6	47,7	64,5	104,6	188,4	377,5	421,4	352,4	425,8	455,0
Iran	—	—	... ²	32,6	16,4	53,5	94,1	191,3	292,8	300,9	267,6	295,1	281,0
Venezuela	—	0,1	20,2	77,9	113,0	149,4	182,4	194,3	175,8	165,8	122,2	120,2	119,0
Irak	—	...	...	6,6	33,2	47,5	64,5	76,5	99,4	96,9	111,2	112,3	110,8
Kuvajt	—	—	—	17,2	55,1	84,8	118,5	150,6	151,8	128,1	105,2	108,0	96,0
Nigerija	—	—	—	—	—	0,8	13,5	54,2	101,8	111,6	88,4	103,5	105,3
Ujedinjeni Arapski Emirati	—	—	—	—	—	—	13,6	37,6	74,1	81,1	80,5	95,3	98,7
Kina	—	—	—	0,2	1,0	5,5	10,0	20,1	50,0	65,0	80,0	85,0	95,0
Libija	—	—	—	—	—	—	58,5	159,7	104,9	73,4	71,5	93,5	99,0
Kanada	...	...	...	3,9	17,4	25,5	39,9	61,9	88,0	82,5	69,9	64,5	62,7
Indonezija	0,3	2,4	5,5	6,7	12,2	20,2	24,0	42,3	66,2	68,0	64,1	74,2	82,8
Alžir	—	—	—	0,0	0,1	8,6	26,0	47,2	49,6	48,7	45,1	50,4	47,6
Evropa	... ³	... ²	... ³	9,8	22,2	29,0	36,6	37,0	38,0	38,9	47,7	62,3	88,1
Oceanija	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0,3	8,5	19,3	19,1	20,3	21,0	21,7
Ostale zemlje	1,0	29,0	29,1	34,3	45,4	66,9	95,2	172,3	204,8	210,3	216,6	231,5	244,5
Svijet	19,8	96,9	196,5	520,4	770,2	1052,1	1509,5	2270,2	2777,2	2793,4	2646,8	2863,5	2959,0

¹ Obuhvaćeno proizvodnjom u SAD² Obuhvaćeno u ostalim zemljama

Tabl. 2.29.

Proizvodnja sirove nafte

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	1977.	Porast %
Afrika	2,7	2,0	13,8	106,6	292,2	266,4	239,4	286,9	298,5	19,04
Amerika bez SAD	105,7	160,2	219,8	279,8	330,8	332,9	291,8	289,7	295,1	3,88
Azija bez SSSR-a i Bliskog istoka	11,8	19,7	32,3	42,7	78,9	155,8	167,9	188,3	208,9	11,23
Istočna Evropa										
bez SSSR-a	5,8	12,8	13,9	16,0	17,9	19,6	19,8	20,0	20,3	4,75
Zapadna Evropa	4,0	9,4	15,1	20,6	19,1	19,3	27,9	42,3	67,8	11,05
Oceanija	0,0	0,0	0,0	0,3	8,5	19,1	20,3	21,0	21,7	14,33
Bliski istok	85,8	159,6	261,3	415,7	694,5	1088,6	975,6	1094,4	1094,9	9,89
SAD	266,7	335,7	348,0	334,9	475,3	432,8	413,1	401,2	406,0	1,57
SSSR	37,9	70,8	147,9	242,9	353,0	458,9	491,0	519,7	545,8	10,38
Svijet	520,4	770,2	1052,1	1509,5	2270,2	2793,4	2646,8	2863,5	2959,0	6,65

1970—1977

Tabl. 2.30.

Potrošnja sirove nafte

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	2,7	3,9	6,2	22,5	32,5	44,3	50,6	52,6	12,10
Amerika bez SAD	90,4	133,4	182,7	238,8	319,3	387,3	345,8	369,7	5,57
Azija bez SSSR-a i Bliskog istoka	12,2	27,4	56,3	122,6	274,3	396,9	396,6	423,6	14,62
Istočna Evropa bez SSSR-a	6,4	14,2	19,9	34,2	56,9	82,6	88,8	97,5	11,04
Zapadna Evropa	42,8	107,4	183,4	350,0	617,0	690,3	601,5	667,1	11,14
Oceanija	0,7	4,9	11,3	19,0	28,1	31,6	31,7	33,2	16,00
Bliski istok	37,2	35,8	62,4	81,9	116,2	121,1	114,2	125,0	4,77
SAD	287,5	373,1	401,8	448,5	539,4	603,0	615,5	661,8	3,26
SSSR	37,9	69,5	131,2	199,5	289,7	382,8	404,2	415,3	9,65
Svijet	517,8	769,6	1055,2	1517,0	2273,4	2740,0	2648,9	2845,8	6,77

Ne postoje potpuni podaci o proizvodnji iz nalazišta ispod morske površine za razdoblje prije 1970. godine. U posljednjim godinama postepeno raste ta proizvodnja. Ona je u 1970. godini iznosila 16,1%, a u 1976. godini 16,3% ukupne svjetske proizvodnje. Najveći dio te proizvodnje ostvaruje se na Bliskom istoku, u Venezueli i u SAD.

U Jugoslaviji je ostvaren znatan razvoj proizvodnje sirove nafte, koja je iznosila (u milijunima tona):

1950.	0,110
1955.	0,257
1960.	0,944
1965.	2,063
1970.	2,854
1975.	3,692
1976.	3,880
1977.	3,951

Ostvarena je, dakle, visoka stopa porasta proizvodnje (8,8% prosječno godišnje u razdoblju od 1960. do 1977. godine), ali to nije bilo — kako će se još vidjeti — dovoljno za zadovoljenje potreba za tekućim gorivima.

Sirova nafta ne upotrebljava se neposredno kao gorivo, već ju je potrebno preraditi u rafinerijama nafte u naftine derivate. To su oblici energije koji se iskorištavaju u uređajima i strojevima potrošača. Zbog toga kad se govori o potrošnji sirove nafte valja smatrati da se misli na njezinu preradu, ali to ne znači da su derivati nafte utrošeni na području u kojem je prerađena nafta, jer su derivati nafte kao i sirova nafta predmet međunarodne trgovine.

Geografski raspored potrošnje sirove nafte, odnosno geografski raspored prerade sirove nafte u derivate, ne poklapa se s geografskim rasporedom proizvodnje. Ta se razlika uočava iz usporedbe podataka o proizvodnji u pojedinim područjima (tabl. 2.29) s podacima o potrošnji (tabl. 2.30). Najveća je razlika između potrošnje i proizvodnje u Zapadnoj Evropi u kojoj je potrošnja u 1976. godini iznosila 667,1 milijuna tona (23,4% od svjetske potrošnje) a proizvodnja samo 42,3 milijuna tona (1,5% od svjetske proizvodnje). To znači da je u Zapadnu Evropu bilo potrebno uvesti oko 620 milijuna tona sirove nafte. S druge strane, na Bliskom istoku proizvedeno je 1 094,4 milijuna tona (38,2% svjetske proizvodnje) a prerađeno je u rafinerijama na tom području 125,0 milijuna tona (4,4% svjetske prerade sirove nafte). S Bliskog istoka isporučeno je drugim područjima oko 970 milijuna tona sirove nafte. Osim toga, višak proizvodnje nad potrošnjom pojavljuje se u

Africi (oko 230 milijuna tona), i u SSSR-u (oko 100 milijuna tona). Pored Zapadne Evrope deficitna su još područja: Azija bez SSSR-a i Bliskog istoka (manjak oko 250 milijuna tona), Istočna Evropa bez SSSR-a (oko 70 milijuna tona), SAD (oko 260 milijuna tona) i Amerika bez SAD (oko 70 milijuna tona).

Zanimljivi su podaci o postocima proizvodnje u odnosu na potrošnju sirove nafte po područjima svijeta (tabl. 2.31), pogotovo kad se promatra razvoj u posljednjih dvadeset pet godina. U 1950. godini proizvodnjom na vlastitom području pokrivale su SAD gotovo 93% svojih potreba, a 26 godina kasnije samo oko 60%. Početkom promatranog razdoblja, u Istočnoj Evropi bilo je potrebno uvesti sirove nafte samo oko 10% od ukupnih potreba (zahvaljujući proizvodnji u Rumunjskoj), a 1976. godine moralo se uvoziti gotovo 80% potrebne sirove nafte. Amerika bez SAD postepeno je od suficitnog postala deficitno područje. Ovisnost Zapadne Evrope o uvozu sirove nafte neprestano je rasla u proteklih četvrt stoljeća; u 1950. godini uvozi se gotovo 91%, a u 1974. više od 97% potrebne sirove nafte. Taj postotak se smanjuje u posljednjim godinama zahvaljujući povećanju proizvodnje u Velikoj Britaniji. Sovjetski Savez postepeno postaje sve veći izvoznik nafte.

Razvoj prerade sirove nafte u Jugoslaviji vidi se u tabl. 2.32. Prosječni godišnji porast prerade u razdoblju od 1950. do 1977. godine iznosio je 14,2%. Uvoz sirove nafte održava se na konstantnoj razini do 1960. godine, jer je do tada porast proizvodnje pratio porast prerade; nakon toga počinje nagli porast uvoza da bi se u 1977. godini uvozom pokrivalo oko 70% ukupne prerade.

Međunarodna trgovina sirovom naftom u godinama nakon drugog svjetskog rata naglo se razvijala. U razdoblju od 1950. do 1976. godine međunarodna trgovina sirovom naftom povećavala se s prosječnom godišnjom stopom od 9,8%, pa je izvoz od oko $140 \cdot 10^6$ tona u 1950. porastao na oko $1600 \cdot 10^6$ tona u 1976. godini.

Neposredno nakon drugog svjetskog rata Venezuela je bila najveći izvoznik sirove nafte (tabl. 2.33) i iz nje se tada izvozilo skoro polovicu od ukupnog izvoza. Dvadeset i pet godina kasnije ostvaruje se izvozom iz zemalja Bliskog istoka (najviše iz Saudijske Arabije, Irana, Iraka, Ujedinjenih Arapskih Emirata i Kuvajta) oko 63% od ukupnog izvoza. (tabl. 2.33).

Visoko industrijalizirane zemlje ujedno su i najveći uvoznici sirove nafte (tabl. 2.34). Među njima nema jedino Sovjetskog Saveza, iz kojeg se izvoze znatne količine sirove nafte (tabl. 2.33). Japan i SAD najveći su kupci sirove nafte, a iza njih su zemlje Zapadne Evrope (Francuska, Italija, Velika Britanija, SR Njemačka i Nizozemska). Tih sedam zemalja preuzele su oko 61% ukupne sirove nafte koja je bila u 1976. godini predmet međunarodne trgovine.

Tabl. 2.31.

Postotak proizvodnje u odnosu na potrošnju sirove nafte (%)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika								
Amerika bez SAD	100,0	195,0	222,6	473,8	899,1	601,4	457,7	545,4
Azija bez SSSR-a i Bliskog istoka	116,9	120,1	120,3	117,2	103,6	86,0	84,8	78,4
Istočna Evropa bez SSSR-a	96,7	71,9	57,4	34,8	28,8	39,3	42,4	44,5
Zapadna Evropa	90,6	90,1	69,8	46,8	31,5	23,7	22,3	20,5
Oceanija	9,3	8,8	8,2	5,9	3,1	2,8	4,6	6,3
Bliski istok	0,0	0,0	0,0	1,6	30,2	60,4	59,9	66,2
SAD	230,6	445,8	418,8	507,8	579,7	898,2	858,8	854,3
SSSR	92,8	90,0	86,6	85,8	88,1	71,8	67,1	60,6
	100,0	101,9	112,7	121,8	121,9	119,9	121,4	125,1

Tabl. 2.32.

Proizvodnja i prerada sirove nafte u Jugoslaviji

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	1977.	Porast %
Proizvodnja	0,110	0,257	0,944	2,063	2,854	3,458	3,692	3,880	3,951	14,18
Uvoz	0,405	0,483	0,435	1,107	4,539	7,422	7,398	8,103	9,650	12,46
Izvoz	—	—	0,001	0,145	0,114	—	—	0,202	—	—
Prerada	0,515	0,740	1,378	3,025	7,279	10,980	11,090	11,781	13,601	12,89

Tabl. 233.

Izvoz sirove nafte iz zemalja s najvećim izvozom (10⁶ tona)

	1950.	1960.	1970.	1974.	1975.	1976.
Saudijska Arabija	20,0	50,8	159,3	394,4	328,2	397,9
Iran	11,7	33,4	165,1	268,6	233,7	260,9
Kuvajt	16,1	77,8	129,4	111,5	90,9	90,1
Nigerija	—	0,9	51,2	108,8	84,9	100,4
Venezuela	64,5	104,6	127,6	92,5	76,7	71,6
Irak	6,1	45,2	73,3	90,9	101,9	102,9
SSSR	0,3	17,8	66,8	85,2	103,1	119,3
Ujedinjeni Arapski Emirati	—	—	37,6	81,7	82,1	95,4
Libija	—	—	159,4	72,1	69,2	89,3
Indonezija	0,3	10,9	29,9	51,3	48,8	59,3
Alžir	0,0	8,0	42,4	41,9	41,0	44,3
Kanada	—	5,7	32,1	40,3	31,2	19,8
Katar	1,6	8,1	17,4	24,6	20,7	23,5
Oman	—	—	16,6	14,5	17,1	18,4
Svijet	140,6	381,9	1161,9	1544,1	1416,9	1594,4

Tabl. 234.

Uvoz sirove nafte u zemlje s najvećim uvozom (10⁶ tona)

	1950.	1960.	1970.	1974.	1975.	1976.
Japan	1,2	26,8	170,4	237,2	222,4	227,3
SAD	24,9	53,0	66,2	173,9	202,0	261,7
Francuska	14,1	31,0	101,3	132,7	105,0	121,1
Italija	5,3	29,5	114,1	120,0	95,0	102,8
Velika Britanija	9,4	45,2	103,0	114,8	90,0	90,5
SR Njemačka	2,2	23,3	100,3	103,5	91,0	105,3
Nizozemska	5,1	18,9	60,1	63,8	63,0	63,9
Španjolska	1,5	6,5	30,9	43,8	41,5	48,6
Kanada	11,4	17,7	29,3	41,5	41,4	36,6
Brazil	0,1	5,7	15,7	32,7	35,0	41,0
Belgija	0,4	6,8	29,9	30,9	29,5	29,2
Njemačka DR	0,2	1,9	10,3	16,4	17,0	18,0
Južna Koreja	—	—	8,9	15,5	16,0	18,3
Čehoslovačka	0,2	2,3	9,8	14,7	15,8	17,1
Indija	—	5,7	11,7	14,6	13,6	14,0
Grčka	—	1,7	5,0	12,2	12,9	14,4
Južnoafrička Republika	—	1,3	8,8	14,0	15,0	...
Poljska	0,2	0,7	7,0	10,6	13,3	15,1
Bugarska	—	0,0	5,7	10,6	10,5	10,8
Švedska	0,9	2,6	11,8	10,1	12,1	13,6
Australija	0,7	11,3	16,2	8,6	7,7	7,5

Tabl. 2.35.

Uvoz i izvoz sirove nafte (10⁶ tona)

Područja i zemlje uvoznice	Godina	Područja i zemlje izvoznice								Ukupno uvoz	
		Afrika	Vene- zuela	Saud. Arabija	Iran	Kuvajt	Ostali Bliski istok	Indo- nezija	SSSR		Ostale zemlje
Afrika	1960.	--	0,2	--	1,3	--	--	--	0,7	--	2,2
	1972.	2,9	--	5,0	10,2	--	5,8	--	2,3	--	26,2
	1974.	5,9	--	5,0	14,9	0,2	6,5	--	1,0	4,3	33,6
	1976.	2,3	--	4,4	17,2	--	5,6	--	0,8	0,7	31,0
Azija bez SSSR-a i Japana	1960.	--	0,2	12,3	4,8	3,9	3,5	1,4	--	4,9	31,0
	1972.	0,8	--	32,9	24,3	28,2	9,6	1,7	--	6,9	104,4
	1974.	0,5	--	51,2	21,2	22,0	17,9	0,3	1,0	1,7	115,8
	1976.	3,1	--	45,7	25,3	22,2	25,2	3,8	1,8	0,7	127,8
Amerika bez SAD	1960.	--	65,1	4,8	2,1	3,6	0,6	0,1	1,7	1,8	79,8
	1972.	33,4	63,6	20,1	17,5	4,8	15,7	--	5,3	28,7	189,1
	1974.	27,9	69,7	51,1	22,9	3,2	20,6	5,2	5,6	7,0	213,2
	1976.	27,3	71,2	32,6	28,2	8,5	20,0	6,9	6,2	2,5	203,4
Istočna Evropa bez SSSR-a	1960.	--	--	--	0,0	--	--	--	6,8	0,1	6,9
	1972.	2,3	--	--	5,2	--	1,9	--	45,2	0,2	54,4
	1974.	0,7	--	--	3,5	0,2	3,9	--	55,5	0,2	63,6
	1976.	3,2	--	--	4,0	1,6	6,5	--	63,0	--	78,3

Zapadna Evropa	1960.	9,7	14,1	23,2	20,9	48,0	42,1	0,1	7,4	4,2	169,7
	1972.	191,6	16,8	155,8	71,8	81,0	102,8	1,0	14,0	5,9	656,7
	1974.	156,1	10,0	204,7	115,4	54,6	123,0	—	18,1	6,9	688,8
	1976.	128,3	7,1	173,3	121,9	34,1	125,9	0,2	38,6	15,1	644,5
Oceanija	1960.	—	—	1,6	1,6	1,5	2,8	2,4	—	1,4	11,3
	1972.	—	—	1,9	0,9	5,7	4,1	0,2	—	0,5	13,3
	1974.	—	—	3,0	0,9	5,0	4,0	0,2	—	0,5	13,6
	1976.	—	—	4,5	2,5	2,5	1,8	0,1	—	0,1	11,5
Japan	1960.	—	—	4,8	1,0	12,0	3,7	3,1	1,2	1,0	26,8
	1972.	5,0	0,4	46,5	82,9	26,5	19,9	17,2	0,4	5,1	213,9
	1974.	8,7	0,4	57,8	66,8	25,3	33,7	31,6	4,1	8,8	237,2
	1976.	2,6	0,3	76,6	46,6	20,7	39,4	26,5	6,1	8,5	227,3
SAD	1960.	0,0	25,0	4,1	1,7	8,8	1,5	3,8	—	8,1	53,0
	1972.	24,0	12,8	8,7	6,8	1,8	4,2	7,7	—	44,9	110,9
	1974.	47,9	16,7	21,7	23,1	0,9	5,2	13,9	—	44,5	173,9
	1976.	94,2	11,8	60,9	15,3	0,6	21,4	21,7	0,1	35,7	261,7
SSSR	1960.	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2	1,2
	1972.	3,4	—	—	—	—	4,1	—	—	0,3	7,8
	1974.	0,8	—	—	—	0,2	3,2	—	—	0,2	4,4
	1976.	—	—	—	—	—	6,3	—	—	0,1	6,4

Iz tabl. 2.35. mogu se vidjeti tokovi međunarodne trgovine sirovom naftom. U Zapadnu Evropu najviše nafte dolazi sa Bliskog istoka i iz Afrike, a u Istočnu Evropu iz Sovjetskog Saveza. Japan kupuje naftu na Bliskom istoku i u Indoneziji, SAD od svih proizvođača osim od SSSR-a.

Preradom nafte dobivaju se osim energetske derivata i produkti koji služe u neenergetске svrhe. To su: primarni benzin, koji se upotrebljava kao sirovina u petrokemijskoj industriji, bitumen, petrol-koks, ulja za mazanje, parafinski vosak i dr. Udio neenergetskih produkata u ukupnoj proizvodnji naftinih derivata postepeno se povećava, u prvom redu zbog povećanja proizvodnje primarnog benzina. Taj je udio iznosio 6,3% 1950. godine, 7,7% 1974, a prosječni godišnji porast proizvodnje neenergetskih proizvoda u istom razdoblju iznosio je nešto više od 8,3%.

Taj dio produkata na osnovi sirove nafte ne treba, dakle, uračunavati u energetske potrošnje što se normalno i ne čini. Zbog toga, kad se utvrđuje potrošnja energije valja računati samo s energetskim derivatima nafte.

Potrošnja energetske derivata nafte u pojedinim područjima vidi se u tabl. 2.36. Iz podataka o potrošnji isključene su količine koje su preuzeli brodovi i avioni u međunarodnom prometu (bunker). Te su količine, istina, proizvedene u zemlji u kojoj su preuzete ili su uvezene u tu zemlju, ali su utrošene izvan nje. Prema tome, kad se promatra potrošnja u pojedinim zemljama, treba bunker brodova ili aviona isključiti iz razmatranja, ali pri promatranju ukupne svjetske potrošnje valja zbroju potrošnje u pojedinim zemljama dodati bunker brodova i aviona. Tako je i postupljeno u tabl. 2.36.

U posljednjih 26 godina ostvaren je porast potrošnje energetske derivata nafte od 6,48%. U pojedinim područjima porast potrošnje bio je vrlo različit (tabl. 2.36). Najveći porast zabilježen je u Japanu (prosječno 20,9% godišnje), a najmanji u SAD (3,63%). U 1950. godini je u zemljama s najrazvijenijom industrijom (SAD, Zapadna Evropa i Japan) utrošeno više od 2/3 ukupne svjetske potrošnje energetske derivata, a 1976. udio tih zemalja u svjetskoj potrošnji pao je na 58,1%, iako je udio Japana i Zapadne Evrope u ukupnoj potrošnji porastao (tabl. 2.37). Sama Evropa troši skoro četvrtinu ukupne svjetske potrošnje, a Japan dvanaestinu potrošnje. Udio bunkera brodova i aviona polagano opada, što je vjerojatno uzrokovano smanjenjem međunarodnog prometa, ali i bržim porastom potrošnje derivata nafte za cestovni promet i za druge svrhe.

Želi li se odrediti potrošnja tekućih goriva, treba energetskim derivatima nafte dodati prirodni benzin, koji se dobiva iz zemnog plina. To su tekući ugljikovodici koji se odjeljuju iz zemnog plina u posebnim postrojenjima smještenim obično u blizini nalazišta. Prirodni benzin sastoji se uglavnom od primarnog benzina i ukapljenih plinova.

Proizvodnja prirodnog benzina iznosila je u svijetu (u milijunima tona):

1950.	18,2
1960.	34,8
1970.	74,0
1975.	70,0
1976.	82,6

što odgovara oko 3,4% od proizvodnje energetskih derivata nafte.

Ukupna potrošnja tekućih goriva, prikazana u milijunima tona ekvivalentnog ugljena, da bi se mogla usporediti s potrošnjom drugih oblika energije, vidi se u tabl. 2.38. Tijekom dvadesetog stoljeća, kroz proteklih 76 godina, ta je potrošnja porasla gotovo 113 puta, što odgovara prosječnom godišnjem porastu od 6,42%, ili udvostručenju potrošnje svakih 10,9 godina. Početkom stoljeća najveća potrošnja tekućih goriva ostvarena je u SAD i carskoj Rusiji. U godinama pred drugi svjetski rat u SAD i u Zapadnoj Evropi troši se nešto manje od 72% od ukupne svjetske potrošnje. Nakon drugog svjetskog rata udio tih dvaju područja dostiže vrijednost od skoro 75%, ali postepeno opada, da bi u 1976. godini iznosio oko 54%. U tom istom razdoblju naglo raste potrošnja u Aziji, u prvom redu kao posljedica vrlo brzog porasta potrošnje u Japanu.

Proizvodnja zemnog plina razvijala se brže od proizvodnje sirove nafte u razdoblju od 1950. do 1977. godine. Prosječni godišnji porast proizvodnje sirove nafte iznosio je, naime, u tom razdoblju 6,7%, a zemnog plina 7,6% (tabl. 2.39). U pedesetim godinama SAD su najveći proizvođač zemnog plina; tada se u tom području ostvaruje više od 90% svjetske proizvodnje zemnog plina. Tu su poziciju SAD zadržale do danas, ali je njihov udio opao na 42% ukupne proizvodnje. U drugim područjima ostvaren je vrlo veliki porast proizvodnje: u Zapadnoj Evropi 21,1%, u SSSR-u 16,1%, u Americi bez SAD 12,6%, a u Istočnoj Evropi bez SSSR-a 10,5%.

Nakon SAD, najveći je proizvođač zemnog plina Sovjetski Savez (tabl. 2.40). Iza njih slijede Nizozemska i Kanada, koje su u nekoliko posljednjih godina postale veliki proizvođači. Njima se u istom razdoblju pridružila Velika Britanija, iako je eksploatacija velikih nalazišta plina tamo u početnoj fazi. Karakteristično je da veliki proizvođači sirove nafte na Bliskom istoku nisu istodobno veliki proizvođači zemnog plina. Smatra se, naime, proizvedenim onaj zemni plin koji se iskorištava ili kao gorivo ili kao sirovina u industriji. U područjima gdje nema potrošača zemnog plina ili iz kojih se on ne može transportirati do potrošačkih područja, plin proizveden kao nusprodukt uz sirovu naftu izgara nekorisno na bakljama, a tako izgoreni plin ne računa se kao proizveden.

Tabl. 2.36.

Potrošnja energijskih produkata prerade nafte (10⁶ tona)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	8,1	11,4	16,0	20,9	29,0	33,8	37,1	41,5	6,49
Amerika bez SAD	47,6	72,9	98,6	127,1	176,9	205,0	207,2	220,5	6,07
Azija bez SSSR-a, Japana i Bliskog istoka	8,5	18,6	31,3	45,3	87,3	123,2	130,9	146,8	11,58
Istočna Evropa bez SSSR-a	4,0	8,4	12,7	25,6	46,7	65,7	72,0	77,1	12,05
Zapadna Evropa	44,5	87,1	159,7	308,8	506,6	511,5	481,1	521,5	9,93
Oceanija	4,8	8,3	10,9	17,0	25,0	26,4	26,1	27,1	6,88
Bliski istok	3,6	7,2	12,3	19,4	31,6	20,3	34,5	40,1	9,71
Japan	1,3	8,7	24,4	66,0	157,7	181,4	171,1	181,6	20,92
SAD	278,6	357,4	408,7	475,6	605,6	667,2	649,0	703,2	3,63
SSSR	32,4	59,2	102,6	159,3	237,3	286,5	304,3	312,9	9,11
Ukupno	433,4	639,2	877,2	1265,0	1903,7	2121,0	2113,2	2272,3	6,58
Bunker brodova i aviona	39,4	60,1	77,0	105,2	145,6	166,3	153,8	149,7	5,27
Švjet	472,8	699,3	954,2	1370,2	2049,3	2287,3	2267,1	2422,0	6,48

Tabl. 2.37.

Udio potrošnje produkata prerade nafte u svjetskoj potrošnji (%)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika	1,7	1,6	1,7	1,5	1,4	1,5	1,6	1,7
Amerika bez SAD	10,1	10,4	10,3	9,3	8,6	9,0	9,1	9,1
Azija bez SSSR-a, Japana i Bliskog istoka	1,8	2,7	3,3	3,3	4,3	5,4	5,8	6,1
Istočna Evropa bez SSSR-a	0,8	1,2	1,3	1,9	2,3	2,9	3,2	3,2
Zapadna Evropa	9,4	12,5	16,7	22,6	24,7	22,4	21,2	21,5
Oceanija	1,0	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
Bliski istok	0,8	1,0	1,3	1,4	1,5	0,9	1,5	1,7
Japan	0,3	1,2	2,6	4,8	7,7	7,9	7,5	7,5
SAD	58,9	51,1	42,8	34,7	29,6	29,0	28,7	29,0
SSSR	6,9	8,5	10,8	11,6	11,6	12,5	13,4	12,9
Ukupno	91,7	91,4	91,9	92,3	92,9	92,7	93,2	93,8
Bunker brodova i aviona	8,3	8,6	8,1	7,7	7,1	7,3	6,8	6,2
Svijet	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabl. 2.38.

Potrošnja tekućih goriva (10⁶ tona ekv. ugljena)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika	—	—	2	3	13	18	25	32	45	63	67	73
Amerika bez SAD	—	5	21	26	73	112	152	196	273	349	349	346
Azija bez SSSR-a	1	10	12	16	21	53	105	200	423	597	601	645
Istočna Evropa	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
bez SSSR-a	—	—	—	—	6	13	19	39	72	100	110	118
Zapadna Evropa	2	20	24	41	69	134	244	471	772	853	807	868
Oceanija	—	—	2	4	7	13	17	27	39	48	47	49
SAD	14	48	173	193	433	557	638	744	947	1069	1042	1128
SSSR	16	13	20	44	50	91	158	245	365	445	473	486
Svjeta	33	96	254	327	672	991	1358	1955	2936	3524	3496	3733

1 Uključeno u Zapadnu Evropu

Tabl. 2.39.

Proizvodnja zemnog plina (10⁹ m³)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	1977.
Afrika	0,0	0,0	0,0	1,9	3,4	10,1	11,9	16,8	16,8
Amerika bez SAD	4,8	10,5	27,8	59,8	89,6	114,2	116,0	117,1	118,2
Azija bez SSSR-a i	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bliskog istoka	0,9	2,5	4,6	8,5	15,1	23,4	26,7	30,4	31,9
Istočna Evropa bez SSSR-a	3,8	6,8	11,4	20,1	36,6	44,7	47,9	53,0	55,8
Zapadna Evropa	1,0	5,6	12,3	20,4	78,9	163,4	169,1	177,3	175,3
Oceanija	—	—	—	0,0	1,6	4,8	5,4	6,9	8,4
Bliski istok	—	0,6	2,5	4,6	21,8	41,0	41,5	42,6	43,9
SAD	168,8	252,4	345,0	432,9	595,1	591,0	554,7	560,0	571,8
SSSR	5,8	9,0	45,3	127,7	197,9	242,8	269,7	299,0	323,9
Svjeta	185,1	287,4	448,9	675,7	1040,0	1235,4	1242,9	1303,1	1346,0

Tabl. 2.40.

Proizvodnja zemnog plina u zemljama s najvećom proizvodnjom (10^9 m^3)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1975.	1977.
SAD	168,8	252,4	345,0	432,9	595,1	591,0	554,7	560,0	571,8
SSSR	5,8	9,0	45,3	127,7	197,9	242,8	269,7	299,0	323,9
Nizozemska	0,0	0,1	0,3	1,8	31,6	73,4	85,5	90,4	89,1
Kanada	1,9	4,1	14,3	37,4	56,7	73,8	75,5	76,1	77,5
Velika Britanija	—	0,0	0,1	0,2	11,2	37,2	38,7	41,0	42,4
Rumunjska	3,2	5,7	8,9	16,5	24,9	31,5	34,3	37,4	39,6
Iran	—	0,3	1,0	1,2	12,2	23,5	23,2	23,9	24,3
SR Njemačka	0,1	0,6	0,9	3,4	13,0	19,5	18,1	18,3	16,8
Meksiko	0,9	1,9	4,9	7,4	11,7	13,6	14,0	13,6	13,4
Italija	0,5	3,6	6,4	7,8	13,2	15,8	15,1	16,2	14,7
Venezuela	1,1	2,7	4,6	6,5	9,0	13,3	12,8	13,4	13,1
Alžir	—	—	—	1,8	2,8	6,0	6,4	10,6	10,7
Francuska	0,2	0,3	2,8	5,0	6,9	8,0	7,8	7,5	7,9
Argentina	0,8	0,7	1,4	4,2	6,0	6,8	7,2	7,2	7,1

Međunarodna trgovina zemnim plinom razvila se tek posljednjih desetak godina, što pokazuju slijedeći podaci o izvozu zemnog plina u svijetu (u milijardama nm^3):

1950.	0,8
1960.	4,8
1970.	45,1
1974.	110,8
1975.	119,8
1976.	138,3

Uzevši u obzir izvoz i uvoz, promjene stanja u rezervoarima te gubitke u transportu, dobivaju se podaci o potrošnji zemnog plina u pojedinim područjima (tabl. 2.41). Ako se usporede podaci u tabl. 2.39. s onima u tabl. 2.41, mogu se zapaziti područja iz kojih se izvozi i područja u koja se uvozi zemni plin. Prema toj usporedbi zemni plin se izvozi iz Afrike, iz Amerike bez SAD, iz Azije, s Bliskog istoka i iz SSSR-a, a uvozi se u Istočnu i Zapadnu Evropu, te u SAD. Još bolja slika o međunarodnoj trgovini zemnim plinom dobiva se iz tabl. 2.42, u kojoj su pojedinačno navedene zemlje izvoznice i zemlje uvoznice, pa se vidi i međunarodna trgovina zemnim plinom unutar većih područja. Najveći izvoznici zemnog plina su Nizozemska i Kanada; prva opskrbljuje u prvom redu susjedne države (SR Njemačku, Belgiju, Francusku), a druga SAD. SSSR je postao treći po veličini izvoznik zemnog plina; on u prvom redu opskrbljuje istočnoevropske zemlje (Čehoslovačku, Njemačku DR, Poljsku), ali isporučuje zemni plin i nekim zemljama Zapadne Evrope (SR Njemačkoj, Austriji, Italiji i Francuskoj). Kad se točnije pogleda tabl. 2.42, može se konstatirati da je SSSR i preprodavač zemnog plina jer znatne količine uvozi iz Irana i Afganistana. Plin se većinom transportira plinovodima kroz koje struji pod tlakom. Postoji, međutim, transport zemnog plina brodovima. Tako se transportira ukapljeni zemni plin. Da zemni plin prijeđe u kapljevito agregatno stanje, potrebno ga je ohladiti na temperaturu od -161°C . Za brodski transport ukapljenog zemnog plina potrebna su potrojenja za ukapljivanje (hlađenje do potrebne temperature), uređaji za uskladištenje u utovarnoj luci, specijalno građeni brodovi i uređaji za uskladištenje u istovarnoj luci. Spremišta u utovarnim i istovarnim lukama moraju imati velike kapacitete, kako bi se brodovi mogli brzo puniti i prazniti, te osigurati opskrbu potrošača za vrijeme visoke potrošnje u zimskim mjesecima. Potrebno je istaknuti da su glavni nedostatak transporta ukapljenog zemnog plina gubici nastali isparavanjem. Zbog niskog vrelišta zemnog plina, koji se praktički sastoji samo od metana, ti se gubici ne mogu spriječiti ni najboljim termičkim izolacijama. Gubici zbog isparavanja ne mogu se ukloniti povećanjem tlaka u transportnim rezervoarima, jer bi ove trebalo još čvršće graditi, a to ne bi

Tabl. 2.41.

Potrošnja zemnog plina (10⁹ m³)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	0,0	0,0	0,0	1,1	1,5	4,2	3,9	7,5	19,07 ¹
Amerika bez SAD	5,4	11,0	24,3	41,3	66,3	86,7	88,2	90,1	10,19
Azija bez SSSR-a									
i Bliskog Istoka	0,9	2,5	4,6	8,5	13,8	21,9	25,3	29,3	14,33
Istočna Evropa bez SSSR-a	3,9	6,9	11,5	20,5	38,9	52,2	58,0	65,1	11,43
Zapadna Evropa	1,0	5,6	12,3	21,1	80,6	172,8	183,5	196,9	22,53
Oceanija	—	—	—	0,0	1,6	4,8	5,4	6,9	27,58 ²
Bliski istok	—	0,6	2,5	4,6	20,8	31,5	31,4	32,9	17,48 ³
SAD	166,6	249,9	345,4	441,7	605,4	613,8	570,1	590,7	4,99
SSSR	5,7	8,8	45,1	127,3	198,2	236,2	257,8	283,6	16,26
Svijet	183,5	285,3	445,7	666,1	1027,1	1224,1	1223,6	1303,0	7,83

¹ 1965—1976.

² 1970—1976.

³ 1960—1976.

Tabl. 2.42.

Izvoz i uvoz zemnog plina (10³ Tcal)

Zemlje uvoznice	Zemlje izvoznice								Ukupan uvoz	
	Alžir	Libija	Kanada	SAD	Iran	Afganistan	Nizozemska	SSSR		Ostale zemlje
SAD	1971.	0,8	—	229,6	—	—	—	—	5,6	236,0
	1974.	—	—	241,7	—	—	—	—	0,1	241,8
	1976.	2,4	—	240,3	—	—	—	—	—	242,7
Japan	1971.	—	—	—	13,2	—	—	—	—	13,2
	1974.	—	—	—	12,8	—	—	—	29,3	42,1
	1976.	—	—	—	12,9	—	—	—	58,9	71,8
Belgija	1971.	—	—	—	—	—	52,6	—	—	52,6
	1974.	—	—	—	—	—	97,0	—	0,6	97,6
	1976.	—	—	—	—	—	100,6	—	—	100,6
SR Njemačka	1971.	—	—	—	—	—	54,0	—	—	54,0
	1974.	—	—	—	—	—	171,3	17,8	2,4	191,5
	1976.	—	—	—	—	—	199,0	33,0	1,3	233,3
Italija	1971.	—	0,7	—	—	—	—	—	—	0,7
	1974.	—	16,2	—	—	—	16,2	6,6	—	39,0
	1976.	—	24,0	—	—	—	55,8	31,0	—	110,8
Velika Britanija	1971.	8,4	—	—	—	—	—	—	—	8,4
	1974.	6,2	—	—	—	—	—	—	—	6,2
	1976.	10,1	—	—	—	—	—	—	—	10,1
Austrija	1971.	—	—	—	—	—	—	11,9	—	11,9
	1974.	—	—	—	—	—	—	17,5	0,1	17,6
	1976.	—	—	—	—	—	—	23,2	0,2	23,4

bilo ekonomično zbog velikih dimenzija. Zemni plin isparen za vrijeme transporta mora se ispuštati u zrak. Isparavanje se može smanjiti potlađivanjem ukapljenog zemnog plina. Godine 1964. prvi put je transportiran ukapljeni zemni plin brodom iz Alžira u Veliku Britaniju. On se danas transportira iz Alžira u SAD, Francusku, Veliku Britaniju i Španjolsku, iz Libije u Italiju i Španjolsku, te iz indonezijskog područja u Japan. U 1976. godini na taj način prevezeno je oko 15 milijarda m³ zemnog plina.

Potrošnja zemnog plina preračunata u milijune tona ekvivalentnog ugljena za razdoblje od 1900. godine vidi se u tabl. 2.43. U prvih 50 godina ovoga stoljeća gotovo sav proizvedeni zemni plin trošio se u SAD. To praktički vrijedi sve do 1950. godine, kad počinje nagli razvoj plinifikacije na bazi zemnog plina u Evropi, Kanadi i SSSR-u. Promatrajući svijet u cjelini, potrošnja zemnog plina od početka stoljeća do 1976. godine povećana je za oko 150 puta, što odgovara prosječnom godišnjem porastu od 6,9% ili udvostručenju gotovo svakih 10 godina.

Plinifikacija drugih područja naglo se razvijala nakon 1950. godine što je karakterizirano vrlo visokom stopom godišnjeg porasta: Zapadna Evropa 23,7%, Azija bez SSSR-a 18,4%, SSSR 15,8%, Istočna Evropa 11,5%. U tom razdoblju u SAD stopa porasta iznosila je samo 4,8%, a u svijetu 7,9%.

Potrošnja energetskih produkata prerade nafte u Jugoslaviji naglo je rasla (tabl. 2.44). U razdoblju od 1950. do 1976. godine potrošnja je rasla po godišnjoj prosječnoj stopi od 13,7%, što znači da se udvostručivala gotovo svakih 5 godina. Još veći porast zabilježen je nakon 1960. godine, kad je za razdoblje do 1976. godine ostvaren porast potrošnje od 15,1% godišnje.

Slično se događalo i s potrošnjom zemnog plina, ali s još većom stopom porasta. Potrošnja zemnog plina u Jugoslaviji jednaka je proizvodnji, jer nije bilo ni uvoza ni izvoza tog primarnog oblika energije; ona je iznosila (u milijardama m³):

1950.	0,015
1955.	0,034
1960.	0,053
1965.	0,330
1970.	0,977
1975.	1,554
1976.	1,730

Potrošnja zemnog plina povećana je u toku 26 godina gotovo 115 puta, odnosno ostvaren je prosječni godišnji porast od 20,0% što odgovara udvostručenju svake 3,5 godine. Naročiti razvoj potrošnje zemnog plina ostvaren je nakon 1960. godine, pa je od tada do 1976. godine postignut prosječni godišnji porast od 24,3% ili udvostručenje potrošnje svake 2,9 godine.

Tabl. 2.43.

Potrošnja zemnog plina (10⁶ tona ekv. ugljena)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika	—	—	—	—	—	—	—	1	2	5	5	10
Amerika bez SAD	—	2	2	2	8	15	33	56	89	110	112	115
Azija bez SSSR-a	—	—	1	1	1	4	10	17	46	68	73	80
Istočna Evropa bez SSSR-a	—	—	...	...	5	9	15	27	52	68	73	84
Zapadna Evropa	—	—	2	4	1	7	16	28	107	220	234	251
Oceanija	—	—	—	—	—	—	—	—	2	6	7	7
SAD	11	23	72	104	221	333	460	588	806	783	727	753
SSSR	—	—	—	2	8	12	60	170	264	301	329	362
Svijet	11	25	77	113	244	380	594	887	1368	1561	1560	1662

1 Uključeno u Zapadnu Evropu

Tabl. 2.44.

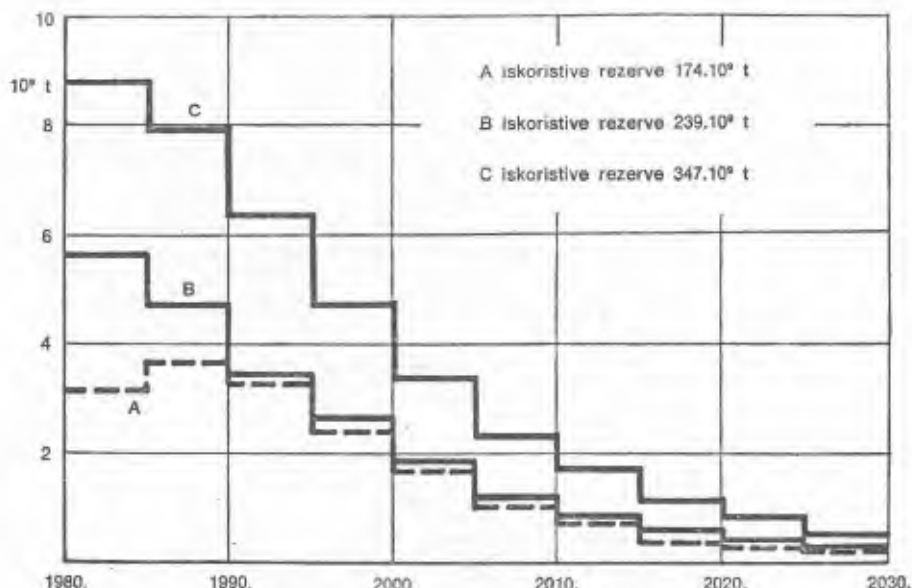
Potrošnja energetske produkcije nafte u Jugoslaviji (10⁶ tona)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Prosjeak %
Proizvodnja	0,384	0,669	1,129	2,781	6,366	9,685	9,868	10,790	13,69
Uvoz	0,055	0,035	0,160	0,188	0,858	1,134	0,786	0,732	10,47
Izvoz	0,026	0,041	0,074	0,181	0,445	0,248	0,194	0,259	9,24
Raspodjela	0,413	0,663	1,215	2,768	6,779	10,571	10,460	11,263	13,56
Bunker brodova i aviona	0,015	0,050	0,040	0,048	0,054	0,052	0,041	0,046	4,40
Potrošnja	0,398	0,613	1,175	2,720	6,725	10,519	10,419	11,217	13,70

3.4. *Pokušaj procjene razvoja proizvodnje sirove nafte i zemnog plina*

Kad se danas razmatra problem opskrbe energijom u budućnosti, uvijek se u prvom redu postavlja pitanje da li će biti dovoljno sirove nafte za zadovoljenje svjetskih potreba u slijedećih 30—40 godina. Na takvo pitanje može se, prema današnjem shvaćanju, odgovoriti afirmativno, ako se promatraju sve tehničke mogućnosti za iskorištavanje rezerva i za proizvodnju tekućih goriva iz bituminoznog pijeska i uljnih škrljavaca, te proizvodnju tekućih goriva iz ugljena. Na takvo pitanje, međutim, mora se odgovoriti negativno, ako se misli na sirovu naftu koja se danas upotrebljava i koja je jeftina ili relativno jeftina. Ako se, naime, potrošnja tekućih goriva bude razvijala dosadašnjim tempom, svjetska potrošnja će u 1990. godini iznositi oko 5.10⁹ tona, a ta količina neće moći podmiriti sve potrebe za tzv. konvencionalnom sirovom naftom. Bit će, međutim, dovoljno sirove nafte za zadovoljenje ograničene potrošnje (transport, petrokemija).

Budući razvoj proizvodnje sirove nafte ovisi o tempu otkrivanja novih rezerva, koji osim o intenzivnosti istraživanja ovisi i o još neotkrivenim rezervama. Pri određivanju tempa otkrivanja treba poći od tih rezerva. Ako se prihvate tri procjene iskoristivih rezerva dobivene metodom Delfi [13], te ako se pretpostavi da će tempo otkrivanja rezerva biti sličan onome koji je već ostvaren u SAD, u zemlji različitog geološkog sastava, u kojoj je već postignut maksimalni tempo otkrivanja rezerva (najprije eksponencijalni, a zatim linearni porast iskoristivih rezerva), može se odrediti dinamika otkrivanja rezerva (sl. 2.8). Proizvodnja ovisi o intenzivnosti eksploatacije otkrivenih rezerva, koja je karakterizirana omjerom poznatih iskoristivih rezerva i godišnje proizvodnje. Taj omjer daje broj godina trajanja rezerva uz proizvodnju u promatranoj godini (trajanje rezerva prema proizvodnji u 1975. godini za pojedine zemlje vidi se u tabl. 2.20). Proizvodnja u budućnosti izračunata je uz tri pretpostavke o intenzivnosti eksploatacije rezerva: intenzivna eksploatacija, koja približno odgovara do sada ostvarivanoj, srednje intenzivna i vrlo intenzivna eksploatacija. Uz intenzivnu eksploataciju računa se sa slijedećim brojem godina trajanja rezerva: Sjeverna Amerika — 10 godina, ostala Amerika — 23, Zapadna Evropa — 15, SSSR i Istočna Evropa — 26, Kina i Daleki istok — 28, Bliski istok i Afrika — 54 godine. Kad se računa sa srednje intenzivnom eksploatacijom, broj godina trajanja iznosi: Sjeverna Amerika i Zapadna Evropa — kao za intenzivnu eksploataciju, ostala Amerika — 15, SSSR i Istočna Evropa — 20, Kina i Daleki istok — 20, a Bliski istok i Afrika — 35 godina. Za vrlo intenzivnu eksploataciju računato je s trajanjem rezerva kao za srednje intenzivnu, osim za Bliski istok i Afriku, za koje je pretpostavljeno trajanje rezerva od 25 godina. Ta se intenzivnost eksploatacije može tehnički postići, ali su mali izgledi da se i ostvari.



Sl. 2.8. Prognoze godišnjeg otkrivanja rezerva sirove nafte

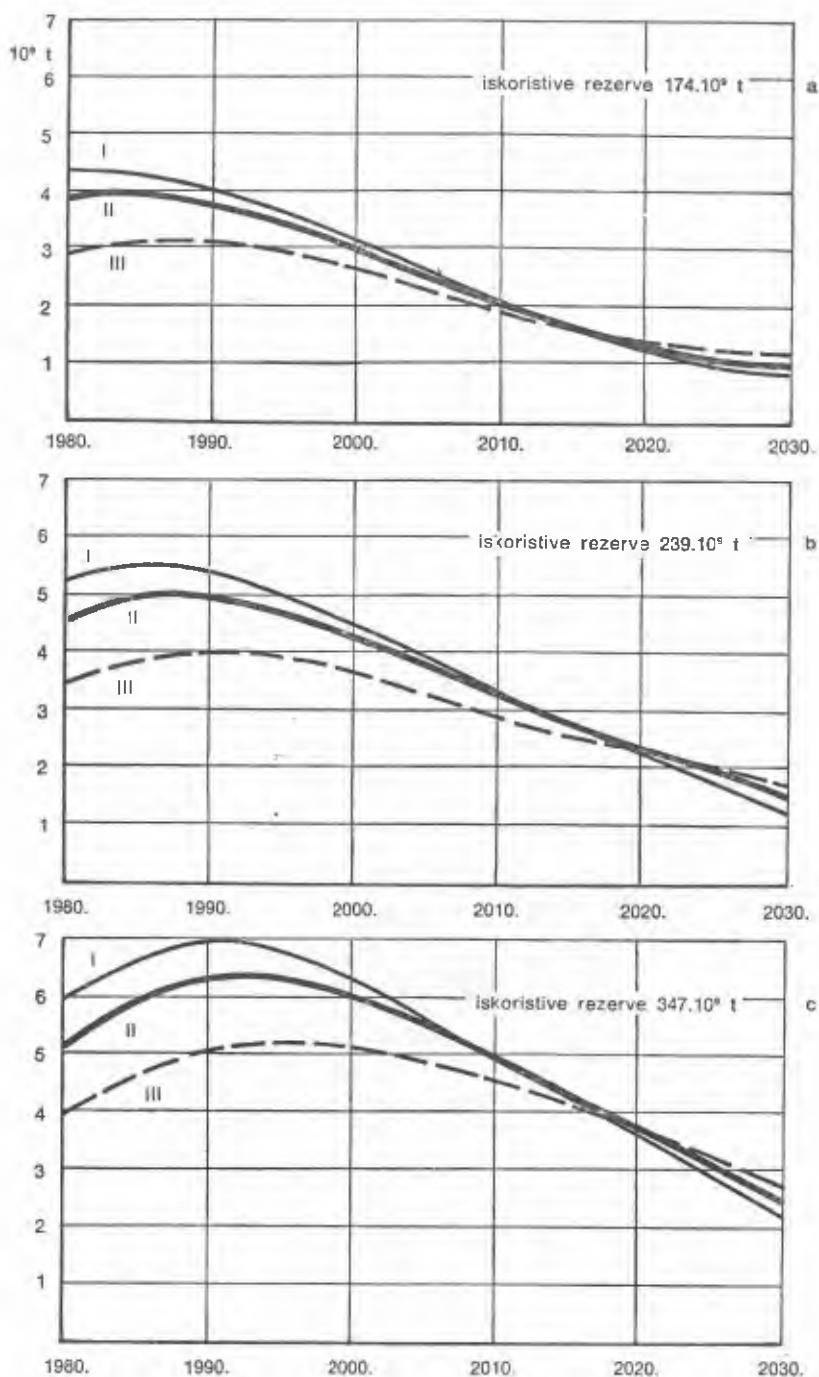
Uz takve pretpostavke izračunata je dinamika proizvodnje sirove nafte prikazana na tri dijagrama na sl. 2.9. Svaki dijagram se odnosi na jednu od procjena konačnih iskoristivih rezerva sirove nafte.

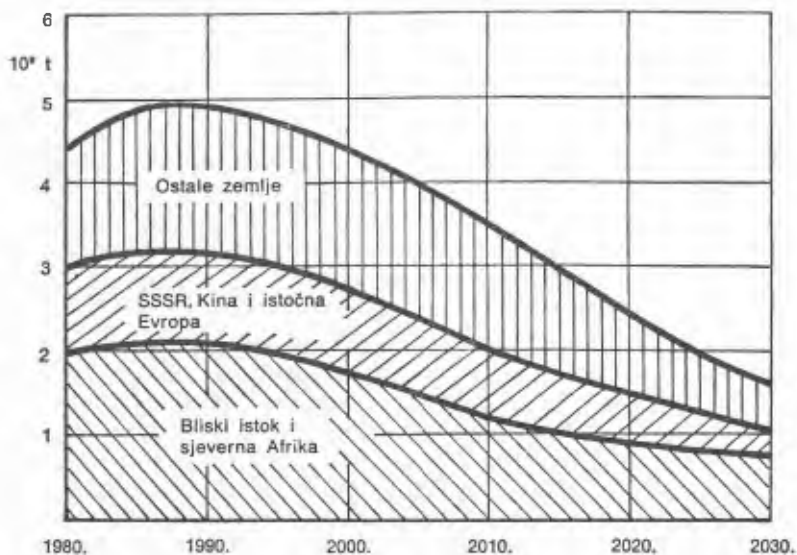
Svakako da je moguće postaviti pitanje koja od tih krivulja predstavlja krivulju najveće vjerojatnosti. Kad se računa s najvećim rezervama (sl. 2.9.c), naime, mora se postaviti pitanje o tehničkoj mogućnosti razvitka tolikih proizvodnih kapaciteta. Dvije krivulje, krivulje I i II na sl. 2.9.b, izgledaju najvjerojatnije. Prema njima, mogla bi se u 1990. godini očekivati proizvodnja između 4 i 5.10^9 tona sirove nafte, proizvodnja između 3,5 i 4.10^9 tona u 2000. godini, a oko $2,5.10^9$ tona u 2020. godini. Ako se te dvije krivulje prihvate kao mjerodavne ne može se, uz dosadašnji porast potrošnje sirove nafte u svijetu, očekivati potpuno zadovoljenje potreba ni u 1990. godini.

Interesantna je također prognozirana proizvodnja u pojedinim područjima (sl. 2.10) koja se osniva na krivulji II na sl. 2.9.b.

Procjena razvoja proizvodnje zemnog plina [15], koja se vidi na tabl. 2.45, osniva se na pretpostavci da će se istraživanja i iskorištavanje odvijati onakvim tempom kakvim se odvijalo u SAD. Prilikom procjene proizvodnje nije se određivalo mjesto potrošnje zemnog plina. Podaci o budućoj proizvodnji mogu se interpretirati samo kao mogućnost proizvodnje na bazi rezerva i prihvaćenih pretpostavki.

Sl. 2.9. Prognoze razvoja proizvodnje sirove nafte za tri pretpostavke a, iskoristivim rezervama; I vrlo intenzivna, II srednje intenzivna, III intenzivna eksploatacija.





Sl. 2.10. Prognoze proizvodnje sirove nafte; iskoristive rezerva 239.10⁹ t, srednje intenzivna eksploatacija rezerva

Tabl. 2.45.

Procjena razvoja proizvodnje zemnog plina (10⁹ m³) — maksimalna i srednja procjena u 2000. i 2020. godini

	1985.	2000.		2020.	
		maks.	srednje	maks.	srednje
Afrika, južno od Sahare	3	5	5	3	3
Amerika (bez SAD i Kanade)	55	112	110	160	153
Azija (bez SSSR-a, Kine, Bliskog istoka i Japana)	15	25	25	58	52
Zapadna Evropa	240	217	210	55	40
Bliski istok i sjeverna Afrika	318	1023	1023	1602	1540
SAD i Kanada	742	682	665	267	187
SSSR i Istočna Evropa	545	1393	1390	712	632
Kina	43	72	72	153	150
Oceanijska i Japan	10	52	52	115	112
Svijet	1971	3581	3552	3125	2869

Procjene za razdoblje do 1985. godine predstavljaju ekstrapolaciju do sada ostvarene proizvodnje, ali i planove razvoja za ona područja za koja su takvi planovi bili poznati. Za razdoblje do 2000, odnosno do 2020. godine dinamika proizvodnje određivana je na bazi omjera predviđenih poznatih rezerva i godišnje proizvodnje, te na bazi pretpostavki o tempu otkrivanja još neotkrivenih rezerva. Prilikom procjene računato je da će se eksploatirati sve iskoristive rezerve zemnog plina, ako cijene energije dostignu razinu koja odgovara cijeni od 150 \$/t sirove nafte (maksimalna hipoteza), a da će se iskoristiti samo 75% iskoristivih rezerva uz cijenu nafte od 105 \$/t (srednja hipoteza). Zbog toga se u tabl. 2.45. nalaze po dva podatka o predviđenoj proizvodnji u kasnijem razdoblju.

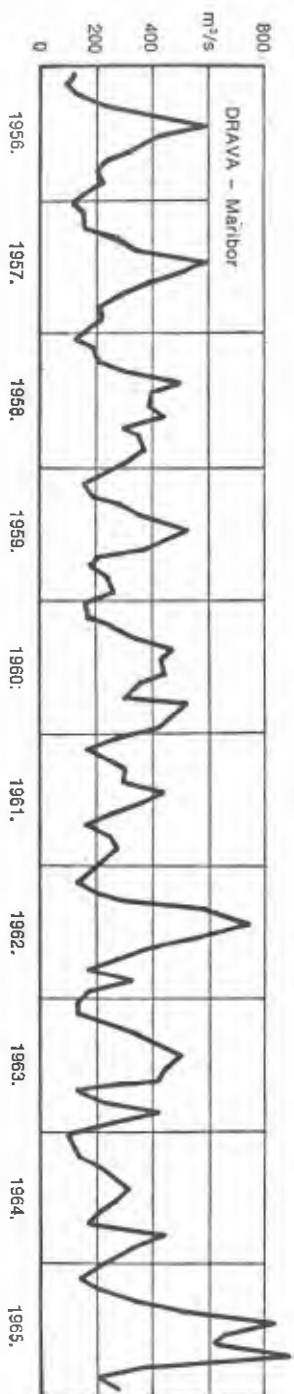
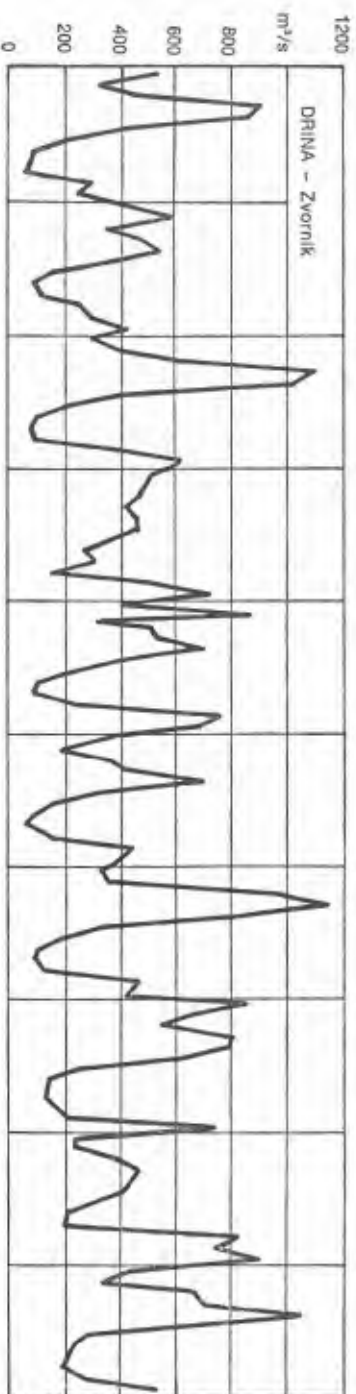
Promatrano u cjelini, maksimalna proizvodnja zemnog plina može se očekivati oko 2000. godine. Do tog razdoblja skoro u svim zemljama trebalo bi računati s porastom proizvodnje zemnog plina. Taj je porast proizvodnje pogotovo velik u područjima s velikim rezervama (SSSR, Bliski istok i sjeverna Afrika). U dva područja (SAD i Zapadna Evropa) može se očekivati smanjenje proizvodnje u 2000. godini u odnosu na 1985. godinu, zbog visoke razine potrošnje i relativno malih rezerva. U slijedećem dvadesetogodišnjem razdoblju — prema tim procjenama — trebalo bi očekivati smanjenje proizvodnje u svim područjima s velikom proizvodnjom, osim na Bliskom istoku.

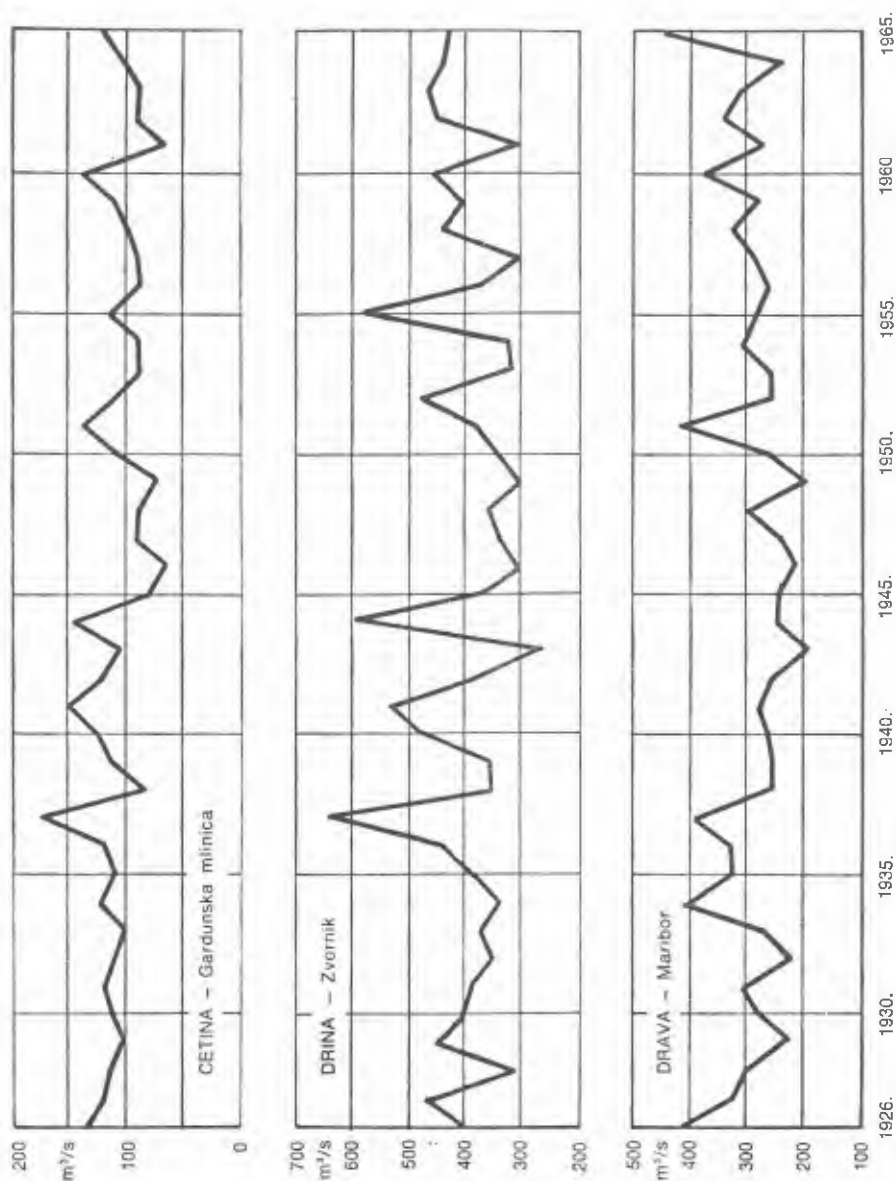
4. VODNE SNAGE

4.1. *Energija vodotoka*

Sunčeva energija koja dopire do Zemljine površine izaziva isparavanje vode na površinama oceana, jezera i rijeka, ali i na površini tla i iz biljaka. Ta se voda podiže u obliku vodene pare od koje se na visinama formiraju oblaci. Tako podignuta voda ima, u odnosu na morsku površinu, vrlo veliku potencijalnu energiju. Ako se, naime, računa da se oborine stvaraju na visini od 3 000 m, da prosječne padaline iznose 0,9 m vodenog taloga u godini odnosno preračunato na ukupnu površinu Zemlje — 459 milijarda m^3 vode, snaga padalina je u prosjeku oko 430 milijarda kW, a godišnja energija oko 3,75 milijuna milijarda kWh ($3,75 \cdot 10^{15}$ kWh). Treba napomenuti, radi usporedbe da svjetska proizvodnja električne energije u 1975. godini iznosi oko 6,5 tisuća milijarda kWh, dakle oko šest stotina puta manje od potencijalne energije oborina. Naravno, ta se energija ne može iskoristiti, niti će to ikada biti moguće.

Oborine padaju na tlo, pa ta voda ima potencijalnu energiju u odnosu prema morskoj razini. Budući da je prosječna nadmorska visina kopna 700 m, da je površina kopna oko 130 milijuna km^2 , uz prosječne godišnje padaline dobiva se snaga od 25 milijarda kW i godišnja energija od oko 220 tisuća milijarda kWh ($220 \cdot 10^{12}$ kWh). Od te potencijalne energije samo se vrlo mali dio može iskoristiti, jer je za to potrebna određena koncentracija protoka vode, a to se ostvaruje u vodotocima (rijeke, potoci). Od oborina, naime, koje padnu na tlo samo dio stiže u vodotoke. Ostalo preuzimaju biljke, ili se neposredno isparava, a dio odlazi u unutrašnjost tla, pa se s većim ili manjim zakašnjenjem pojav-





Sl. 2.12. Srednji godišnji protoci Cetine, Drine i Drave (1926—1965)



Sl. 2.11. Srednji mjesečni protoci Cetine, Drine i Drave (1956—1965), na 112. str.

ljuje na površini u nekom vodotoku, odnosno neposredno otječe u more. Za svaku točku vodotoka (profil vodotoka) moguće je na osnovi topografije zemljišta odrediti površinu tla (oborinsko područje) s kojega voda dotječe u vodotok. Omjer količine vode koja se tijekom godine pojavljuje u vodotoku (na promatranom profilu) i količine padalina na oborinsko područje (koje odgovara promatranom profilu) naziva se faktorom otjecanja. On ovisi o topografskim, geološkim i klimatskim uvjetima, a kreće se u širokim granicama (od 0,25 do 0,95). U strmim područjima, pogotovo u hladnim godišnjim razdobljima, faktor otjecanja može se približiti vrijednosti 1, a u nizinskim područjima u toplim periodima može spasti na vrlo niske vrijednosti.

Količina vode koja protječe vodotokom u jedinici vremena (protok, m^3/s) nije konstantna, već ovisi o oborinama, o topljenju snijega, o količini vode koja podzemnim putovima dotječe vodotoku. Može se računati da je protok u toku dana (24 sata) konstantan (srednji dnevni protok). Aritmetička sredina dnevnih protoka u jednoj godini srednji je godišnji protok, a u nizu godina (25—40 godina) srednji višegodišnji protok. I raspored protoka i srednji godišnji protok razlikuju se od jedne do druge godine (sl. 2.11. i 2.12), što ovisi o vremenskom rasporedu oborina i temperatura (topljenje snijega!), pa — da bi se odredile energetske mogućnosti vodotoka — valja uzeti u obzir protoke u nizu godina, kako bi se u račun uključili svi slučajevi koji se mogu pojaviti.

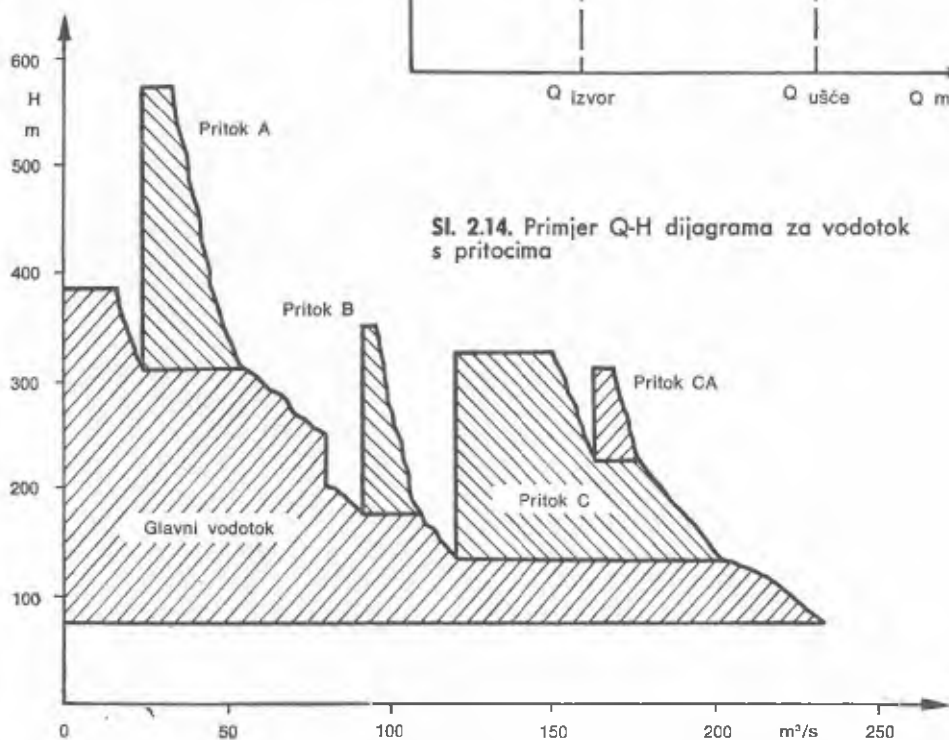
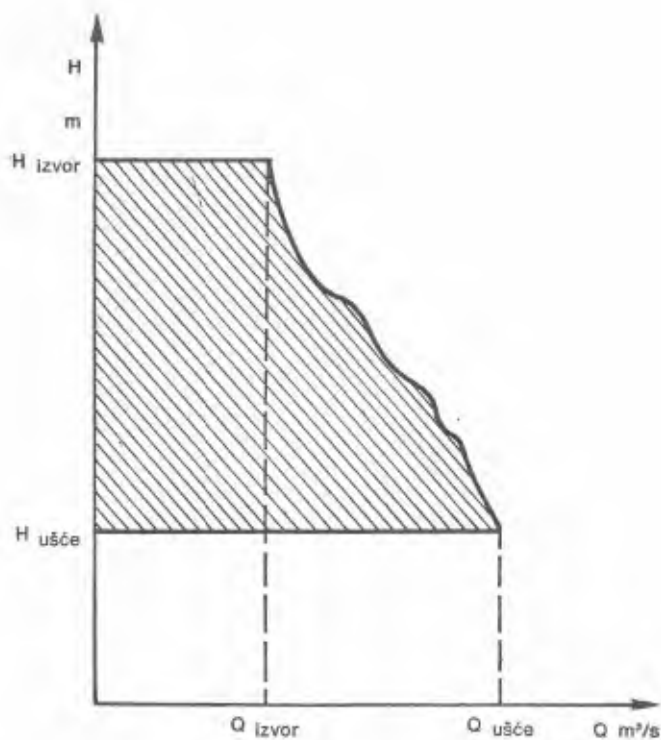
Idući od izvora prema ušću vodotoka, prosječni višegodišnji protok sve više raste jer se povećava oborinsko područje, pa su i količine vode od oborina koje gravitiraju vodotoku sve veće. Istodobno, od izvora prema ušću kota razine površine vode postaje sve manja. Svakom profilu vodotoka odgovara određena kota H (visina iznad površine mora u metrima) i određeni srednji višegodišnji protok Q (m^3/s), pa se svaki vodotok može prikazati $Q - H$ dijagramom vodotoka (sl. 2.13). Kad se iskorištava potencijalna energija vode, govori se o iskorištenju vode na padu koji je jednak razlici kotā. Ako se, dakle, na padu H iskorištava odgovarajući protok Q , dobiva se snaga

$$P = 9,81 Q H \text{ kW} \quad (2.1)$$

uvrsti li se Q u m^3/s , a H u metrima. Iskorištavajući sve dijelove pada od izvora do ušća, dobiva se ukupna snaga vodotoka. To je srednja snaga koju ima voda u promatranom vodotoku, jer je račun proveden sa srednjim višegodišnjim protokom, pa se srednja višegodišnja energija vodotoka dobiva iz produkta srednje snage i broja sati u godini (8 760 sati). Energija vodotoka proporcionalna je površini između krivulje u $Q - H$ dijagramu i ordinate (sl. 2.13). Pomoću $Q - H$ dijagrama mogu se prikazati i vodotoci s pritocima (sl. 2.14).

Tako određena količina energije naziva se bruto-energija vodotoka, odnosno bruto vodne snage, kad se količina energije odnosi na neko područje s više vodotoka.

**Sl. 2.13. Q-H
dijagram
vodotoka**



**Sl. 2.14. Primjer Q-H dijagrama za vodotok
s pritocima**

Pri utvrđivanju srednje snage i godišnje energije iz $Q-H$ dijagrama pretpostavljeno je da je sva voda energetske iskoristivosti, od izvora do ušća (u jednom postrojenju ili u više njih), te da se potencijalna energija vode transformira npr. u električnu energiju bez gubitaka. Osim toga, kad se određuju bruto vodne snage nekog područja, računa se i na iskorištavanje gornjeg dijela vodotoka, gdje su, normalno, male količine vode, s velikim oscilacijama protoka, i na iskorištavanje donjeg dijela vodotoka, gdje se, pogotovo u nizinskim rijekama, pojavljuju mogućnosti iskorištavanja samo malih padova, što je obično neekonomično jer zahtijeva poplavljivanje velikih površina i izgradnju dugih obrambenih nasipa.

U praktičnom iskorištavanju potencijalne energije vodotoka nisu, međutim, ispunjene gore navedene pretpostavke. Protok je vrlo promjenljiv, pa se praktički nikada ne gradi postrojenje (hidroelektrana) tolikog kapaciteta (veličina izgradnje) da bi se moglo iskoristi svu vodu i u doba vrlo velikih protoka, jer u ostalim razdobljima strojevi ne bi mogli raditi punim kapacitetom. Zbog toga je i količina vode koja služi za dobivanje energije manja od količine vode koja protječe vodom, pa je i srednji iskoristivi protok manji od srednjeg višegodišnjeg protoka. Kao što se ne može upotrijebiti sva voda, ne može se računati ni sa cijelim raspoloživim padom, zbog gubitaka u dovodima vode do strojeva (gubici u tunelu, tlačnom cjevovodu) i gubitaka u strojevima, koji se mogu također smatrati gubicima pada. Zbog svega toga treba računati da se voda iskorištava na padu manjem od onoga koji odgovara razlici kotā razine vode na ulazu i na izlazu iz hidroelektrane. Zbog svega toga energija koja se može dobiti iz realnog postrojenja manja je od one prema $Q-H$ dijagramu. Tako definirana energija naziva se tehnički iskoristivom energijom, a promatrajući cijeli vodotok — tehnički iskoristivom energijom vodotoka. Zbroj tehnički iskoristivih energija vodotoka na nekom području daje njegove tehnički iskoristive vodne snage.

Ima manje ili više takvih postrojenja kojih izgradnja nije ekonomična. Energija koja bi se mogla proizvesti izgradnjom ekonomičnih postrojenja naziva se ekonomski iskoristivom energijom vodotoka, odnosno ekonomski iskoristivim vodnim snagama područja. Iznos ekonomski iskoristivih vodnih snaga ovisi o razvitku tehničkih mogućnosti gradnje, o kriterijima za određivanje ekonomičnosti postrojenja i o cijenama goriva za pogon termoelektrana, a oni se mijenjaju s razvojem tehnike i potrošnje električne energije. Tako je u 1898. godini ocijenjeno da ekonomski iskoristive vodne snage u Švicarskoj iznose 4,5 TWh, 15 TWh u 1914, 20 TWh u 1934, a procjene iz 1946. govore o 27 TWh energije godišnje ekonomski iskoristivih vodnih snaga. Godine 1974. ostvarena je, međutim, u hidroelektranama proizvodnja od 28,9 TWh, što pokazuje da je današnja procjena ekonomski iskoristivih vodnih snaga u Švicarskoj viša od one iz 1946. godine. Slično se dogodilo

u Švedskoj. Ekonomski iskoristive vodne snage procijenjene su 1923. godine sa 32 TWh, 1938. povećane su na 40 TWh, a danas se računa sa 80 TWh.

Obično se u pregledima vodnih snaga navode podaci o bruto i tehnički iskoristivim vodnim snagama. Najčešće su samo podaci o bruto vodnim snagama međusobno usporedivi, ali oni pokazuju samo teorijske mogućnosti iskorištenja vodnih snaga. S druge strane, ocjena tehnički iskoristivih vodnih snaga ovisi o razrađenosti projekata za energetsko iskorištavanje vodotoka i o kriterijima prema kojima su projekti razrađeni, pogotovo u odnosu na iskorištavanje vodnih snaga u nizinama. U nekim slučajevima nisu uzete u obzir tehnički izvedive hidroelektrane koje bi se smatrale neekonomičnima, a nekada su uključena samo postrojenja iznad neke minimalne snage (npr. iznad 2 MW).

4.2. Tehnički iskoristive i iskorištene vodne snage

Ima više procjena tehnički iskoristivih vodnih snaga u svijetu, međusobno vrlo različitih. One se kreću od 5 000 do više od 20 000 TWh. Te se razlike pojavljuju bilo zbog toga što nisu sve zemlje uključene u procjenu, bilo stoga što u nekim od njih prilike nisu dovoljno istražene.

U tabl. 2.46. navedeni su podaci o tehnički iskoristivim vodnim snagama po kontinentima, prema anketi Svjetske konferencije za energiju.

Tabl. 2.46.

Tehnički iskoristive vodne snage

	Tehnički iskoristive vodne snage		Proizvodnja u 1975. godini TWh	Iskorištenje u 1974. godini %
	Energija TWh	Snaga GW		
Afrika	2019,9	437,1	36,6	1,8
Amerika bez SAD	2423,3	429,6	334,3	13,8
Azija bez SSSR-a	2638,2	689,2	209,9	8,0
Istočna Evropa bez SSSR-a	66,6	22,2	20,1	30,2
Zapadna Evropa	655,8	182,6	391,2	59,7
Oceanija	202,1	36,5	33,9	16,8
SAD	701,5	186,7	306,4	43,7
SSSR	1095,0	269,0	126,0	11,5
Svijet	9802,4	2266,0	1458,4	14,9

ju (1974). Prema toj procjeni ukupne vodne snage u svijetu iznose gotovo 10 000 TWh godišnje, a to je tek 4,5% energije koja bi se mogla dobiti energetske iskoristavanjem svih padalina na sve kontinente. Najveće su vodne snage u Aziji (26,9% vodnih snaga u svijetu, ne uračunavajući vodne snage u SSSR-u); u SSSR-u je 11,2%, u SAD 7,2%, a u Evropi 7,4% svjetskih vodnih snaga. Vodne snage su samo manjim dijelom iskorištene, i to nešto manje od 15%. To se u prvom redu odnosi na područja s velikim vodnim snagama (Afrika i Azija bez SSSR-a), ali ni u Americi (bez SAD) i Oceaniji nije, u tom pogledu, povoljnija situacija. U Zapadnoj Evropi, međutim, iskorišteno je gotovo 60% vodnih snaga, a u SAD više od 40%. U nekim evropskim zemljama (tabl. 2.47) iskorišteno je više od 80% tehnički iskoristivih vodnih snaga (Francuska, Italija, SR Njemačka, Švicarska, Velika Britanija, Belgija, Dan-

Tabl. 2.47.

Tehnički iskoristive i iskorištene vodne snage u evropskim zemljama

	Tehnički iskoristive vodne snage GWh/god.	Ostvarena proizvodnja u 1976. god. GWh/god.	Iskor.štenje vodnih snaga %
Albanija	3 600	1 300	36
Austrija	43 900	23 745	54
Belgija	428	430	100 ¹
Bugarska	10 252	2 452	24
Čehoslovačka	12 000	3 816	32
Danska	25	24	96
Finska	18 000	12 189	68
Francuska	63 000	59 892	95
Grčka	15 600	2 006	13
Italija	50 600	44 599	88
Jugoslavija	63 753	19 317	30
Mađarska	4 610	161	3
Nizozemska	—	—	—
Norveška	121 000	77 496	64
Njemačka DR	...	1 272	...
SR Njemačka	21 844	17 111	78
Poljska	12 080	2 379	20
Portugal	17 764	6 437	36
Rumunjska	24 100	8 711	36
Španjolska	67 490	28 750	43
Švedska	100 300	57 669	57
Švicarska	32 000	33 069	103 ¹
Velika Britanija	4 181	4 948	118 ¹

¹ Uračunata i proizvodnja pumpno-akumulacijskih postrojenja.

ska). U Velikoj Britaniji i u Švicarskoj ostvarena je u 1974. godini u hidroelektranama proizvodnja veća od tehnički iskoristivih vodnih snaga. To je posljedica činjenice da je uračunata i proizvodnja pumpno-akumulacijskih postrojenja. U takvim postrojenjima električna se energija proizvodi pumpanom vodom.

Razvoj proizvodnje u hidroelektranama, što odgovara iskorištenju vodnih snaga — jer se danas one iskorištavaju praktički samo za proizvodnju električne energije — vidi se u tabl. 2.48. (proizvodnja po kontinentima) i tabl. 2.49. (proizvodnja u zemljama s najvećom proizvodnjom). U razdoblju od 1950. do 1976. godine proizvodnja u hidroelektranama rasla je u svijetu godišnje prosječno po stopi od 5,74%, a najmanji porast ostvaren je u SAD (4,15%) i u Zapadnoj Evropi (4,69%), u kojima je već 1950. godine bila ostvarena znatna proizvodnja. Najveći porast postignut je u Africi (14,48%) i u SSSR-u (9,54%), gdje postoji još dosta neiskorištenih vodnih snaga. Normalno, zapaža se veći porast proizvodnje u zemljama s velikim neiskorištenim vodnim snagama nego u zemljama u kojima su vodne snage na kraju mogućnosti.

U Jugoslaviji je proizvodnja u hidroelektranama rasla po visokoj godišnjoj stopi (11,6%, tabl. 2.49). I pored toga, još je znatan dio tehnički iskoristivih vodnih snaga ostao neiskorišten (tabl. 2.50). U ovoj tablici nalaze se i podaci o bruto vodnim snagama pojedinih vodotoka, te omjer tehnički iskoristivih vodnih snaga i bruto vodnih snaga. U cijeloj Jugoslaviji može se tehnički iskoristiti 58% od bruto vodnih snaga, ali taj je postotak manji na rijekama koje protječu nizinama (Dunav, Sava, Bosna). I pored toga što je iskorišteno tek nešto više od trećine vodnih snaga, preostale vodne snage — uz dosadašnji porast iskorištavanja (oko 12% godišnje) — bile bi potpuno iskorištene kroz 9 godina.

4.3. Pokušaj procjene razvitka iskorištavanja vodnih snaga

Danas je iskorišteno samo oko 15% tehnički iskoristivih vodnih snaga, a to je jedini obnovljivi oblik energije koji se danas iskorištava u većoj mjeri. Budući da su rezerve sirove nafte i zemnog plina ograničene, a eksploatacija ugljena u mnogim područjima skopčana sa znatnim poteškoćama, može se očekivati dalji razvitak iskorištavanja vodnih snaga. Na takvom razmišljanju temelji se procjena daljeg razvitka proizvodnje električne energije potencijalnom energijom vodotoka [19]. U prilog takvom razvitku govori i činjenica da se iskorištavanjem vodnih snaga praktički ne zagađuje okoliš i da u mnogo slučajeva izgradnja hidroelektrana ima povoljan utjecaj na njega. Osim toga, iz-

Tabl. 248.

Proizvodnja hidroelektrana (TWh)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	1,2	3,2	7,4	13,6	24,8	35,9	37,5	40,4	14,8
Amerika bez SAD	67,1	98,0	140,6	168,1	238,4	334,8	334,6	359,9	6,67
Azija bez SSSR-a	43,8	61,1	94,4	135,7	164,9	194,0	209,2	218,4	6,37
Istočna Evropa bez SSSR-a	2,3	4,1	6,3	9,5	12,3	19,7	20,1	19,5	8,57
Zapadna Evropa	109,1	158,3	227,4	290,3	334,6	387,0	390,8	359,4	4,69
Oceanija	4,4	6,6	10,0	16,3	21,8	29,4	33,9	32,4	7,98
SAD	101,0	116,5	149,5	197,0	250,7	306,4	306,4	290,5	4,15
SSSR	12,7	23,2	50,9	81,4	124,4	132,0	126,0	135,7	9,54
Svijet	341,6	471,0	686,5	911,9	1171,9	1438,8	1458,5	1456,2	5,74

Tabl. 2.49.

Proizvodnja hidroelektrana u zemljama s najvećom proizvodnjom (TWh)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
SAD	101,0	116,5	149,5	197,0	250,7	306,4	306,4	290,5
Kanada	53,0	76,2	105,9	117,1	156,7	210,9	202,4	213,0
SSSR	12,7	23,2	50,9	81,4	124,4	132,0	126,0	135,7
Japan	38,3	48,1	59,1	71,2	79,9	85,1	86,3	88,7
Norveška	17,7	22,5	30,9	48,9	57,3	76,6	77,5	82,1
Brazil	7,5	10,6	18,4	25,5	39,9	65,6	72,0	81,5
Švedska	17,3	21,7	31,1	46,4	41,5	57,3	57,7	54,9
Francuska	16,1	25,5	40,3	46,4	56,6	57,6	60,6	49,3
Italija	21,6	30,8	46,1	43,0	41,3	41,8	45,1	43,5
Kina	0,9	2,4	11,9	25,0	27,0	35,0	37,0	37,5
Španjolska	5,1	9,0	15,6	19,7	28,0	31,3	26,4	22,5
Švicarska	10,3	15,4	18,8	24,0	29,3	28,6	34,0	26,6
Indija	2,5	3,8	7,8	15,2	25,3	27,9	33,3	34,8
Austrija	5,0	7,9	11,9	16,1	21,2	22,7	23,7	20,5
Jugoslavija	1,2	2,6	6,0	9,0	14,8	20,6	19,3	20,6
SR Nemačka	8,6	12,0	13,0	15,4	17,8	17,9	17,1	14,1
Meksiko	1,9	3,4	5,2	8,9	15,0	17,2	15,6	17,7

Tabl. 2.50.

Bruto i tehnički iskoristive vodne snage, te prosječna proizvodnja izgrađenih hidroelektrana (stanje izgradnje 31. XII. 1975.)

	Bruto vodne snage TWh/god.	Tehnički iskorist. vodne snage ¹ TWh/god.	Udio iskorist. od bruto %	Prosječna proizv. izgr. hidro- elektrana TWh/god.	Udio izgrađ. od isko- ristivih %
Dunav	13,88	6,65	47,9	5,0	75,2
Tisa	0,28	—	—	—	—
Drava	8,92	6,98	78,3	2,61	37,4
Sava	9,76	4,48	45,9	0,24	5,4
Kupa	3,03	1,25	41,3	0,32	25,6
Una	2,90	1,39	47,9	0,04	2,9
Vrbaš	3,35	1,68	50,1	0,39	23,2
Bosna	4,99	1,70	34,1	0,05	2,9
Drina	18,50	13,92	75,2	2,70	19,4
Kalubara	0,20	—	—	—	—
Morava	6,32	2,73	43,4	0,30	11,3
Mlava	0,17	0,03	17,6	—	—
Pek	0,25	—	—	—	—
Porečka reka	0,07	—	—	—	—
Timok	0,90	0,18	20,0	0,02	11,1
Soča	2,71	1,52	56,0	0,33	21,7
Rječina	0,56	0,20	35,7	0,12	60,0
Notranjska reka	0,69	0,20	29,0	—	—
Mirna	0,08	—	—	—	—
Raša	0,04	—	—	—	—
Lika-Gacka	2,00	1,19	59,5	1,10	92,4
Krka-Zrmanja	1,22	0,87	72,1	0,16	18,4
Cetina	5,70	3,50	61,4	2,31	66,0
Neretva-Trebišnjica	10,42	7,78	74,7	3,98	51,2
Morača	3,41	2,16	63,3	1,07	49,5
Beli Drim	1,23	1,04	84,6	0,57	54,8
Crni Drim	1,90	0,57	30,0	0,03	5,3
Dragovštica	0,16	—	—	—	—
Strumica	0,14	—	—	—	—
Vardar	6,22	3,73	60,0	0,82	13,2
Ukupno	110,00	63,75	58,0	22,16	34,8

¹ Nisu uračunate hidroelektrane snage manje od 2 MW

Tabl. 2.51.

Procjena razvitka iskorištavanja vodnih snaga

	Energija TWh				Prosječni porast %		
	1976.	1985.	2000.	2020.	1976.	1985.	2000.
	1976.	1985.	2000.	2020.	1985.	2000.	2020.
Razvijene zemlje ¹	1049	1248	1491	2167	1,9	1,2	1,9
Zemlje s planskom privredom ²	200	333	800	2417	5,8	6,0	5,7
Zemlje u razvoju	325	548	1247	3278	6,0	5,6	5,0
Ukupno	1574	2129	3538	7862	3,4	3,4	4,1

¹ SAD, Kanada, Zapadna i južna Evropa, Australija, Japan, Novi Zeland, Južnoafrička Republika,

² SSSR, Kina, Istočna Evropa, Sjeverna Koreja, Vijetnam

gradnjom akumulacijskih bazena poboljšava se režim protjecanja voda vodotocima, što ima pozitivan utjecaj na poljoprivredu i na opskrbu vodom. Tehnologija građenja i proizvodnje potrebnih strojeva već je dugo razvijena, pa nema nikakvih nepoznanica ni rizika. Pored toga, postoji mogućnost da se poboljša iskorištenje potencijalne energije vode zamjenom starih strojeva novima u već izgrađenim hidroelektranama, čime se može uz relativno male izdatke proizvodnja električne energije povećati za oko 10%. Osnovna je prednost hidroelektrana smanjenje potrošnje fosilnih goriva, jer se proizvodnjom od oko 4 400 kWh u hidroelektranama štedi tona sirove nafte. S druge strane, izgradnja hidroelektrana traži veće investicije, ali ta prednost termoelektrana postaje sve manja s povišenjem cijena goriva. Zbog svega toga treba računati s postepenom izgradnjom hidroelektrana u budućnosti. Povećanje proizvodnje u hidroelektranama bit će veće u onim područjima u kojima postoje znatne neiskorištene vodne snage, a relativno malo u razvijenim zemljama u kojima je gotovo polovica vodnih snaga već iskorištena. Na takvoj pretpostavci osniva se i procjena razvoja proizvodnje u hidroelektranama prikazana u tabl. 2.51. Prema toj procjeni [19] bit će u 2020. godini iskorišteno oko 80% vodnih snaga u svijetu.

Kako je već spomenuto, pri određivanju tehnički iskoristivih vodnih snaga obično se ne računa s hidroelektranama snage manje od 2 MW. U nekim zemljama u tehnički iskoristive vodne snage nisu uključene ni hidroelektrane snage od 5 MW i manje. To je slučaj u SAD, gdje se procjenjuje da takve hidroelektrane imaju mogućnost proizvodnje koja iznosi 15 do 20% od ukupnih vodnih snaga.

5. NUKLEARNA GORIVA

5.1. *Prirodna i umjetna nuklearna goriva*

Kad se promatra raspad jezgre atoma kao energetski izvor, samo uran (U) i torij (Th) mogu se smatrati nuklearnim gorivima. Njihova svojstva sadrži tabl. 2.52.

Izotop urana U-235 jedino je nuklearno gorivo koje se pojavljuje u prirodi. No, budući da njega u prirodnom uranu ima samo 0,7%, dugoročni razvitak iskorištavanja nuklearne energije bazirane na raspadu jezgara (nuklearna fisija) osniva se na tzv. umjetnim nuklearnim gorivima: plutoniju (Pu-239) i izotopu urana (U-233).

Plutonij se dobiva iz U-238, koji je glavni sastojak prirodnog urana (99,3%). Ako se, naime, U-238 zrači neutronima u nuklearnim reaktorima, neutroni prodiru u jezgru U-238. Nakon što U-238 prihvati neutron, postaje U-239 jer mu se poveća broj neutrona. U-239 emitira γ -zrake i elektrone. Emisija elektrona vrlo je intenzivna (nakon 25,5 min polovica atomâ U-239 emitirala je elektrone; kaže se da je vrijeme poluraspada 25,5 min). Nakon emisije elektrona nastaje neptunij. (Np-239). Emisijom još jednog elektrona (vrijeme poluraspada 2,3 dana) neptunij prelazi u plutonij (Pu-239), koji je praktički stabilan jer mu je vrijeme poluraspada 24 000 godina.

Izotop urana U-233 dobiva se također zračenjem torija (Th-232) neutronima u reaktoru. Prodorom neutrona u jezgru Th-232 nastaje Th-233. On emitira γ -zrake i elektrone, pa nastaje protaktinij (Pa-233) uz vrijeme poluraspada od 25,5 min, a nakon emisije još jednog elektrona (vrijeme poluraspada 27,4 dana) protaktinij prelazi u U-233.

Tabl. 2.52.

Neka uranova i torijeva svojstva

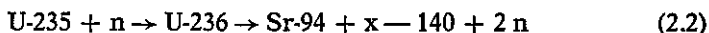
	Uran	Torij
Redni broj u sustavu kemijskih elemenata	92	90
Atomska masa	238,03	232,04
Broj izotopa	15	12
Važniji izotopi	234 do 238 i 240	227 do 232 i 234
Udio izotopa u prirodnom stanju	238 99,3% 235 0,7% 238 0,0055	232 99,99%
Boja	srebrnasto bijel	platinast
Gustoća kg/dm³	18,9	11,31
Temperatura taljenja °C	1130	1827
Temperatura isparavanja °C	3800	3530

Treba naglasiti da se umjetna nuklearna goriva mogu proizvoditi samo u nuklearnim reaktorima koji se mogu graditi, dok ne postoje umjetna nuklearna goriva samo na bazi U-235. Takvi reaktori služe i za pretvorbu nuklearne energije u toplinsku i za proizvodnju umjetnih nuklearnih goriva.

5.2. Energija raspada jezgre

Postoji velik broj mogućih nuklearnih procesa pomoću kojih se postiže transformacija nuklearne energije u toplinsku. Jedan je npr. raspad litija (Li) djelovanjem neutrona, koji se nakon pretvorbe u berilij (Be) raspada na dva helijeva atoma. Zbog smanjenja mase, transformira se pri raspadu svake jezgre litija u toplinu oko 17 MeV nuklearne energije. Takva je nuklearna reakcija, međutim, tehnički beskorisna, kao uostalom i većina nuklearnih procesa, jer se ne može sama po sebi dalje nastaviti.

Za tehničke svrhe zanimljiv je proces prikazan relacijom



Preuzimanjem neutrona (n) u jezgru U-235 nastaje prijelazna jezgra U-236, koja se raspada u stroncij (Sr-94) i ksenon (Xe-140) uz istodobno oslobađanje dvaju neutrona, pomoću kojih je moguće izazvati raspad drugih jezgara U-235. Treba naglasiti da je moguć velik broj načina raspada prijelazne jezgre U-236, pa se u nekim slučajevima oslobađaju

i tri neutrona. Pri raspadu U-235 oslobađaju se u prosjeku 2,5 neutrona. Osim toga — kako će se vidjeti — pri raspadu jezgre U-235 dio nuklearne energije transformira se u toplinsku. Budući da se raspadom jedne jezgre oslobađa više neutrona nego što je potrebno da bi se izazvao raspad slijedeće jezgre (za njezin raspad potreban je samo jedan neutron), naglo će se povećavati broj raspadnutih jezgara, jer je vremenski razmak između dva sukcesivna raspada 0,001 sekunda. Prema tome, ne samo da se takva nuklearna reakcija, jednom započeta, može sama od sebe održavati, već se može razvijati kao lavina. Ako se, naime, računa da će nakon svakog raspada dva tako oslobođena neutrona izazvati raspade jezgara, nakon 10 sukcesivnih raspada (nakon 0,01 s) broj će raspadnutih jezgara iznositi 1024, a nakon 100 raspada (nakon 0,1 s) već $1,27 \cdot 10^{30}$ raspadnutih jezgara ($1,27$ bilijuna trilijuna). Ta pojava upotrijebljena je za izradu atomske bombe. Ako se, međutim, postigne da se reakcija odvija uz konstantan broj neutrona koji izazivaju raspad jezgara, dobiva se lančana reakcija koja omogućuje tehničko iskorištavanje raspada jezgre U-235. Nije, međutim, jednostavno ostvariti uvjete za takvu lančanu reakciju, jer će mnogi neutroni biti zahvaćeni od jezgara koje se ne raspadaju pa neće ni sudjelovati u lančanoj reakciji. Lančana reakcija može se održavati zbog toga što je jezgra U-235 toliko labilna da se raspada pošto prihvati neutron, i bez dovođenja vanjske energije, odnosno i onda kad neutron ima minimalnu kinetičku energiju. Nasuprot tome, npr. za raspad U-238 potrebna je znatna vanjska energija (velika kinetička energija neutrona), a za raspad jezgara lakih atoma potrebna energija iznosi i više stotina MeV. Prema tome, tehnička važnost raspada jezgre U-235 nije samo u mogućnosti transformacije nuklearne energije u toplinsku — što se postiže i drugim tipovima nuklearnih reakcija — već u tome što se može održavati lančana reakcija, jer se raspadom jezgara stvaraju uvjeti za nove raspade.

Kao U-235 (prirodno nuklearno gorivo) vladaju se još samo U-233 i Pu-239 (umjetna nuklearna goriva), pa su to jedine jezgre pomoću kojih se može osigurati lančana reakcija.

Raspadom jezgre U-236, prema relaciji (2.2), nastaje jezgra stroncija (Sr) i ksenona (Xe), te dva neutrona. Masa U-236 iznosi 236,172 jedinica mase (relativna atomska masa), a zbroj mase stroncija (93,938 jedinica mase), ksenona (139,955 jedinica mase), te mase dvaju neutrona ($2 \cdot 1,008\,98 = 2,017\,96$ jedinica mase) iznosi 235,911 jedinica mase. Produkti raspada imaju, dakle, manju masu od polazne jezgre. Ta je pojava nazvana defekt mase koji u promatranom slučaju iznosi $236,127 - 235,911 = 0,216$ jedinica mase. Prema Einsteinovoj relaciji, masi m odgovara energija $m c^2$ gdje je c brzina svjetlosti ($c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s). Jedinica mase iznosi $1,659\,7 \cdot 10^{-24}$ g, pa jedinici mase odgovara energija $1,659\,7 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20} = 1,593\,7 \cdot 10^{-3}$ erga. Energija 1 eV jednaka je $1,602 \cdot 10^{-12}$ erga, pa iz toga izlazi da je 1 jedinica mase = 931 MeV. Prema tome, defektu mase od 0,216 jedinica mase odgovara energija od približno 202 MeV.

Ta energija pojavljuje se najvećim dijelom (oko 80%) kao kinetička energija produkata raspada, za raspad prema relaciji (2.2) kao kinetička energija stroncija i ksenona. Zatim, kao kinetička energija neutrona (u prosjeku 2,5 neutrona po 2 MeV), a ostatak čine β -zračenje i γ -zračenje. Pri tom se ne smije zaboraviti da produkti raspada koji se u prvom času pojavljuju nisu konačni, jer se primarni produkti naknadno spontano raspadaју uz β i γ -zračenje. Najveći dio energije kao posljedice raspada pojavljuje se konačno u obliku unutrašnje termičke energije u nuklearnom gorivu i u produktima raspada.

Količina nuklearne energije transformirane u unutrašnju termičku energiju samo je mali dio energije nuklearnog goriva. Ako se, naime, uzme u obzir da jezgra U-235 ima masu od 235 jedinica mase, u energiju se transformira samo 0,216 jedinica mase. Dakle, energetske je iskoristivo samo 0,1% ukupne mase koja sudjeluje u nuklearnoj reakciji. S takvim stanjem, međutim, moramo se zadovoljiti, jer ne postoji povoljniji proces pretvorbe nuklearne energije u druge energetske oblike koji bi bio tehnički ostvariv. Točnije promatrano, to i nije tako mala količina energije. U masi od 1 grama urana U-235 ima $6,023 \cdot 10^{23} / 235 = 2,563 \cdot 10^{21}$ jezgara, a raspadom svake od njih dobiva se oko 200 MeV, što odgovara oko $320 \cdot 10^{-13}$ J, odnosno Ws, jer je $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Prema tome, raspadom 1 g U-235 dobiva se energija $0,82 \cdot 10^{11} \text{ J}$, odnosno $2,3 \cdot 10^4 \text{ kWh} = 23 \text{ MWh}$. Pri tome je računato da se transformira samo 0,1% ukupne mase, kako je već spomenuto.

Raspadom jedne jezgre U-235 oslobađa se $0,89 \cdot 10^{-17} \text{ kWh}$, jer se jednim raspadom dobiva $3,20 \cdot 10^{-11} \text{ Ws}$, a $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws}$. Da bi se, dakle, nuklearna energija transformirala u 1 kWh unutrašnje termičke energije, potreban je raspad $1,12 \cdot 10^{17}$ jezgara nuklearnog goriva.

U današnjim nuklearnim elektranama (s lakovodnim reaktorima) može se iz 1 kg uran-oksida (U_3O_8) proizvesti oko 31,5 MWh električne energije. Ako se računa da je za proizvodnju 1 kWh potrebno 2 700 kcal, energija koja se može dobiti iz 1 kg uran-oksida jednaka je energiji od oko 12 t ekv. ugljena. U budućim oplodnim reaktorima dobivat će se kako se danas računa, iz jednake količine urana 60 do 70 puta više energije, pa će tada 1 kg uran-oksida zamjenjivati oko 800 t ekv. ugljena.

5.3. *Nalazišta i rezerve urana i torija*

Oba ta elementa, uran i torij, nisu rijetka u Zemljinoj kori. Uran se pojavljuje u prosjeku s udjelom od 4 g po toni, a torij 10 do 15 g po toni. To odgovara sadržaju volframa, molibdena i olova, a zlato i platina (0,005 g po toni), te srebro (0,1 g po toni) znatno su rjeđi elementi.

Nalazištima urana i torija mogu se smatrati samo ona u kojima ruda sadrži jedan ili oba metala u obliku i koncentraciji koji omogućuju praktično iskorištavanje. Prema današnjem stanju razvoja tehnike mogu se smatrati eksploatabilnima rude u kojima nema manje od 0,05 do 0,1% uranov oksida (U_3O_8) ili 0,04 do 0,09% urana (U), što odgovara 0,4 do 0,9 kg po toni rudače. Za dobivanje torija eksploataбилne su rude koje ga ne sadrže manje od 0,1%. Oba elementa pojavljuju se u prirodi kao spojevi s kisikom (oksidi) ili sa silicijem (silikati). Poznato je više od 200 minerala koji sadržavaju uran, od kojih se tridesetak može smatrati uranovim rudama, zbog znatnije količine tog elementa. Ekonomski je interesantno samo desetak minerala, od kojih su najvažniji uraninit, branerit, euksenit i karnotit. Tridesetak minerala sadrži torij u količinama koje su od nekog praktičnog značenja. Za eksploataciju danas dolaze u obzir samo monazit, torit i granerit. Monazit je najvažniji mineral za dobivanje metala iz skupine lantanida (rijetke zemlje), a pri njegovoj preradi dobiva se torij kao nusprodukt. Uran i torij nalaze se u dubljim zonama Zemljine kore, u stijenama koje su nastale od magme, i u području neposredno uz površinu tla, u sedimentnim stijenama.

Kao što je već spomenuto, minerali sadrže relativno male količine urana. Troškovi eksploatacije, svakako, ovise u prvom redu o koncentraciji, ali i o veličini nalazišta. Kod malih rezerva rude s relativno velikim sadržajem urana troškovi eksploatacije mogu biti veći nego pri eksploataciji velikih nalazišta siromašnije rude, jer je tada moguća primjena mehanizacije ako rezerve osiguravaju eksploataciju u toku 15 do 20 godina. Takve uvjete normalno ispunjavaju sedimentna nalazišta. U njima se nalazi oko 90% danas poznatih rezerva.

Rezerve urana i torija dijele se, kao i rezerve ugljena, na iskoristive, poznate i ukupne rezerve, ali je uobičajena klasifikacija i prema troškovima proizvodnje uranov oksida u obliku tzv. žutog kolača ($Na_2U_2O_7$), koji se dobiva kao produkt prerade uranovih ruda. Prema toj klasifikaciji ove su kategorije rezerva urana:

- a) do 22 dolara/kg U_3O_8
- b) 22 do 33 dolara/kg U_3O_8
- c) 33 do 66 dolara/kg U_3O_8

a preračunato na kg urana

- a) do 26 dolara/kg urana
- b) 26 do 39 dolara/kg urana
- c) 39 do 77 dolara/kg urana

Povijest eksploatacije urana vrlo je kratka u usporedbi s trajanjem eksploatacije ugljena i sirove nafte. Nalazišta urana iskorištavaju se tek oko 25 godina. Naglom porastu eksploatacije urana nakon dru-

gog svjetskog rata (u razdoblju od 1950. do 1960. godine) — jer je tada izgledalo da postoje neograničene potrebe za uranom zbog proizvodnje oružja — slijedilo je razdoblje naglog opadanja potražnje. Tada je, naime, arsenal nuklearnog oružja bio zasićen, a gradnja nuklearnih elektrana tek je činila prve korake. Tempo razvoja nuklearnih elektrana, međutim, ni kasnije nije bio takav da bi osiguravao iskorištenje već ranije izgrađenih proizvodnih kapaciteta. Tek nakon povišenja cijena sirove nafte (1973), porastao je interes za nuklearne elektrane, pa i za istraživanje nalazišta urana. Takav razvoj uvjetovao je i relativno slabo poznavanje rezerva urana, jer u mnogim zemljama nije ni bilo takvog istraživanja, a i tamo gdje je bilo započeto obustavljeno je prije 10—15 godina. Zbog toga je poznavanje rezerva urana dosta manjkavo. Tome još potpomaže činjenica da se u nekim zemljama te rezerve smatraju vojnom tajnom.

Prema podacima objavljenim 1974. godine (tabl. 2.53), poznate rezerve urana kategorije a (do 26 \$/kg, vrijednost dolara u 1974. godini) iznose nešto manje od 1 000 tisuća tona, a ukupne (poznate + dodatne) rezerve oko 1 800 tisuća tona. Ako se tome dodaju rezerve kategorije b (od 26 do 39 \$/kg), poznate su rezerve oko 1 950 tisuća tona, a ukupne oko 4 000 tisuća tona. Tu nisu uračunate rezerve urana u SSSR-u, Kini i istočnoevropskim zemljama, jer se takvi podaci ne objavljuju. Prema starijim podacima, ukupne su rezerve u SSSR-u između 100 i 370 tisuća tona, a u Kini od 80 do 270 tisuća tona.

Podaci objavljeni u 1977. godini [20] (tabl. 2.54) nešto se razlikuju od ranijih podataka, ali zadržavaju jednaku raspodjelu rezerva prema područjima. U najnovijim podacima obuhvaćene su rezerve uz proizvodne troškove od 130 \$/kg (vrijednost dolara iz 1976. godine). U taj procjeni kao dodatne rezerve uračunate su samo one za koje se pretpostavlja da se mogu pronaći u dobro istraženim područjima proširujući već poznata nalazišta. Ni u najnovijim podacima nisu obuhvaćene rezerve urana u SSSR-u, Kini i u istočnoevropskim zemljama.

Više od 60% poznatih rezerva urana nalazi se u Sjevernoj Americi i u Africi južno od Sahare, i to u konglomeratima. Od evropskih rezerva oko 3/4 nalazi se u Švedskoj. Od dodatnih rezerva gotovo 3/4 nalazi se u Sjevernoj Americi, od kojih najviše u SAD. Takav raspored rezerva vjerojatno je posljedica i opsega istraživanja koja su provedena u zemljama s najvećim poznatim rezervama.

Procjenjuje se da se 80% poznatih i dodatnih rezerva može eksploatirati uz troškove do 78 \$/kg, pa se te rezerve mogu smatrati ekonomski povoljnima, jer je današnja cijena urana na razini od 104 \$/kg (početak 1977. godine). Mali udio skupljeg urana u ukupnim rezervama vjerojatno je posljedica geoloških karakteristika na poznatim nalazištima i pomanjkanja podataka o ekonomičnim rezervama.

Naravno da postoje, — pogotovo kad se uzme u obzir nedovoljna istraženost — i još neotkrivene rezerve urana, koje ne spadaju u kategorije poznatih i dodatnih rezerva. Do sada su jedino Sjedinjene Ame-

Tabl. 2.53.

Rezerve urana (10³ tona elementarnog urana), poznate i dodatne rezerve prema stanju u 1974. godini

	Poznate rezerve		Dodatne rezerve		Ukupno do 39 \$/kg
	do 26 \$/kg	26 do 39 \$/kg	do 26 \$/kg	26 do 39 \$/kg	
Angola	—	—	—	12,8	12,8
Centralnoafrička Republika	8,1	8,1	—	—	16,2
Gabon	20,4	5,1	—	5,1	30,6
Južnoafrička Republika	202,0	8,0	62,0	26,0	298,0
Nigerija	40,0	20,4	10,2	10,2	80,8
Zair	1,8	1,7	—	—	3,5
AFRIKA	272,3	43,3	72,2	54,1	441,9
Indija	—	—	33,2	28,3	61,5
Japan	3,1	—	...	0,9	4,0
Turska	0,8	—	1,9	—	2,7
AZIJA¹	3,9	—	35,1	29,2	68,2
Finska	—	—	1,9	—	1,9
Francuska	34,9	19,6	10,2	20,4	85,1
Italija	1,1	—	—	22,9	24,0
Jugoslavija	6,0	10,2	—	—	16,2
Portugal	7,4	5,9	—	10,2	23,5
Španjolska	7,3	—	—	—	7,3
Švedska	—	—	269,8	38,5	308,3
EVROPA¹	56,7	35,7	281,9	92,0	466,3
Kanada	185,8	190,4	121,8	218,9	716,9
Meksiko	1,1	1,8	0,6	—	3,5
SAD	329,3	539,8	401,0	771,1	2041,2
SJEV. AMERIKA	516,2	732,0	523,4	990,0	2761,6
Argentina	12,6	7,8	6,9	11,2	38,5
Brazil	1,9	1,9	0,9	1,7	6,4
Kolumbija	—	—	—	51,0	51,0
JUŽNA AMERIKA	14,5	9,7	7,8	63,9	95,9
AUSTRALIJA	120,9	...	39,1	...	160,0
Sveukupno	984,5	820,7	959,5	1229,2	3993,9

... Nema podataka

¹ Bez podataka za SSSR, Kinu i istočnoevropske zemlje

Tabl. 2.54.

Rezerve urana (10^3 tona elementarnog urana), poznate i dodatne rezerve prema podacima početkom 1977. (do cijene od 130 \$/kg, vrijednost dolara iz 1976. godine)

	Poznate	Dodatne	Ukupno
Afrika južno od Sahare	427,8	134,5	562,3
Južna Amerika	57,0	94,4	151,4
Sjeverna Amerika	825,0	1709,0	2534,0
Istočna Azija	2,4	...	2,4
Južna Azija	29,2	23,3	52,5
Zapadna Evropa	388,8	90,1	478,9
Oceanijska i Japan	244,7	42,0	286,7
Bliski istok i sjeverna Afrika	32,1	69,6	101,7
Ukupno	2007,0	2162,9	4169,9

... Nema podataka

ričke Države objavile podatke o neotkrivenim rezervama urana, koje iznose oko 1,2 milijuna tona. U drugim zemljama tek se u najnovije vrijeme zapaža nastojanje da se procijene sveukupne rezerve urana, ali to često nije moguće zbog pomanjkanja potrebnih geoloških, geokemijskih i geofizičkih osnovnih podataka i zbog nedovoljno definiranih metoda za takve procjene.

Zbog svega toga pokušavalo se izračunati još neotkrivene rezerve urana pomoću statističkih i matematičkih metoda. Dobiva se da ukupne rezerve iznose 80 do 280 milijuna tona urana. Premda su takvi rezultati ohrabrujući, oni ne mogu služiti kao osnova za definiranje energetske politike. Osim toga, mnogi su skeptični s obzirom na opravdanost upotrebe takvih metoda za određivanje rezerva urana. S druge strane, naglašava se da je neopravdano očekivati da se na području Sjeverne Amerike nalazi oko 60% svjetskih rezerva urana, jer njezina površina predstavlja tek 17% površine kontinenta (bez površine SSSR-a, Kine i istočnoevropskih zemalja).

Osim toga, postoje rezerve urana koje se nazivaju rezerve nekonvencionalnog urana. Većina današnjih spoznaja o rezervama urana osni-va se na rezervama s »niskim proizvodnim troškovima«, ali je bilo pokušaja da se utvrde rezerve s troškovima proizvodnje do 260 \$/kg pa i s višim. Osim takvih rezerva, postoji mogućnost proizvodnje urana kao nusproizvoda. Tako se može dobiti uran uz proizvodnju fosforne kiseline, iz otopina prilikom prerade nekih bakarnih rudača, iz monazita prilikom ekstrakcije teških metala, iz morskog pijeska, te kao nusproizvod mnogih drugih elemenata iz švedskih škriljavaca. Pored toga, proučavana je mogućnost dobivanja urana iz fosfatnih stijena, nekih

škriljavaca (škriljavci iz Katange), granita, te iz ugljena i lignita, kad je sadržaj urana veći od prosječnog. Proučava se, osim toga, mogućnost dobivanja urana iz morske vode. Premda su rezerve nekonvencionalnog urana vrlo velike (stotine, pa i milijuni tisuća tona), ne treba očekivati znatniju proizvodnju takvog urana, jer je njegova proizvodnja ograničena zbog mnogo razloga. Ona je ograničena jer je ovisna o proizvodnji glavnih proizvoda, jer nije razvijena tehnologija proizvodnje, jer su proizvodni troškovi visoki i kad je poznata tehnologija, jer je potrebna prerada velikih količina minerala, zbog niskog sadržaja urana, što mo-

Tabl. 2.55.

Rezerve torija (10^3 tona elementarnog torija), poznate i dodatne rezerve, prema podacima u 1974. godini

	Poznate rezerve		Dodatne rezerve		Ukupno do 39 \$/kg
	do 26 \$/kg	26 do 39 \$/kg	do 26 \$/kg	26 do 39 \$/kg	
Egipat	—	—	14,7	279,8	294,5
Južnoafrička Republika	—	—	20,4	...	20,4
Madagaskar	—	—	2,0	—	2,0
Malavi	—	—	—	8,8	8,8
Ostale zemlje	—	—	17,2	30,8	48,0
AFRIKA	—	—	54,3	319,4	373,7
Indija	—	—	302,4	...	302,4
Turska	—	—	4,0	...	4,0
AZIJA	—	—	306,4	...	306,4
Norveška	132,0	—	—	132,0	264,0
SSSR	—	—	80,0	80,0	160,0
EVROPA	132,0	—	80,0	212,0	424,0
Kanada	79,8	79,8	—	—	159,6
SAD	51,6	267,4	—	—	319,0
SJEV. AMERIKA	131,4	347,2	—	—	478,6
Brazil	58,4	1059,1	—	—	1117,5
Urugvaj	—	—	0,7	1,5	2,2
JUŽNA AMERIKA	58,4	1059,1	0,7	1,5	1119,7
AUSTRALIJA	—	—	6,2	10,5	16,7
Sveukupno	321,8	1406,3	447,6	543,4	2719,1

že imati veliki utjecaj na okoliš. Zbog svega toga ne može se očekivati da će proizvodnja nekonvencionalnog urana moći bitno popraviti opskrbljenost potrebnim uranom. Troškovi proizvodnje takvog urana iznosit će i više od 260 \$/kg, osim u nekim slučajevima kad se uran proizvodi kao nusprodukt.

Danas nema točnih podataka o rezervama torija, jer je interes za istraživanje nalazišta torija još uvijek vrlo mali. Na tržištu je, naime, veća ponuda od potražnje, jer se danas torij upotrebljava za proizvodnju nekih legura za zrakoplovstvo, za plinske mrežice i kao katalizator u nekim procesima. Podaci o rezervama torija nalaze se u tabl. 2.55. Većina poznatih rezerva nalazi se u monazitu u morskom pijesku na obalama Brazila, Indije i SAD. Nalazišta takvog pijeska iskorištavaju se u prvom redu zbog sadržaja titana, kositra i cirkonija. Pored toga, monazit se eksploatira više zbog rijetkih zemalja nego zbog proizvodnje torija.

5.4. *Proizvodnja urana i torija*

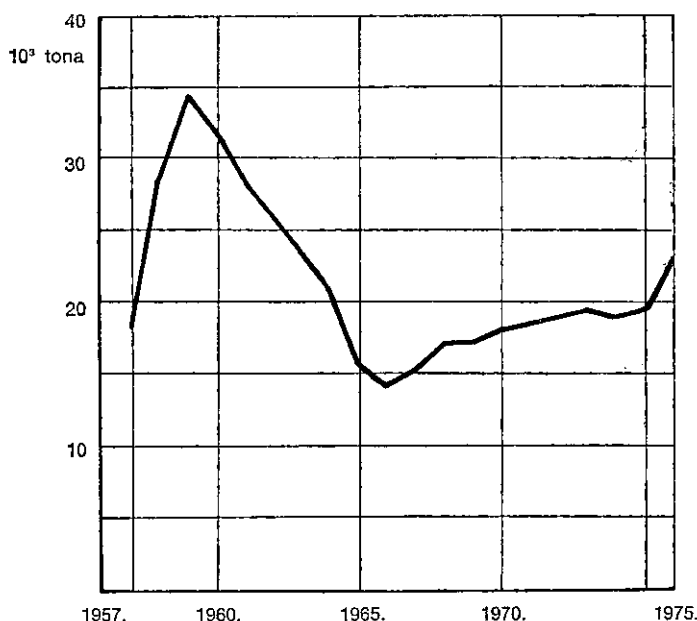
Kao što je već spomenuto, proizvodnja urana imala je u šestom desetljeću ovog stoljeća nagli uspon, zatim pad, da bi tek u posljednjih nekoliko godina ostvarila ponovni uspon (sl. 2.15). Dugo trajanje gradnje nuklearnih elektrana (oko 10 godina) uvjetovalo je, međutim, tek postepeno povećanje proizvodnje urana sve do polovice osmog desetljeća. Danas su najveći proizvođači urana (tabl. 2.56) SAD, Kanada i Južnoafrička Republika, u kojima se proizvodi oko 80% svjetske proizvodnje (bez proizvodnje u SSSR-u, Kini i u istočnoevropskim zemljama). Ako se toj proizvodnji doda proizvodnja u Francuskoj (koja je najveći evropski proizvođač), Nigeriji i Gabonu, dobiva se 99% svjetske proizvodnje za koju su poznati podaci.

Proizvodni kapaciteti urana procjenjuju se sa $33,5 \cdot 10^3$ tona, što je manje od 2/3 ostvarene proizvodnje u posljednjim godinama. Oni su najveći u Sjevernoj Americi i u Africi južno od Sahare. U nekim postojećim rudnicima urana proširuju se proizvodni kapaciteti, u nekim zemljama otvaraju se ili se projektiraju novi rudnici, pa se oko 1980. godine očekuje mogućnost proizvodnje od $53,5 \cdot 10^3$ tona godišnje. Računa se da bi s poznatim rezervama urana bilo moguće do 1990. povišiti proizvodnju na oko $100 \cdot 10^3$ t/god. (tabl. 2.57). Povećanje proizvodnje iznad toga iznosa neće biti moguće bez otkrivanja novih rezerva urana.

U 1975. godini postojale su nuklearne elektrane u 20 zemalja (tabl. 2.58). U 1977. godini njima bi se, prema stanju gradnje, trebale pridružiti Finska, Koreja i Tajvan. Iako je prvi reaktor za proizvodnju električne energije u pogonu od svibnja 1954. godine (Obinsk kraj Moskve), proizvodnja električne energije pomoću nuklearne energije u većem

opsegu počinje u rujnu 1956. godine, kad je stavljena u pogon prva nuklearna elektrana veće snage (Calder Hall u Velikoj Britaniji). Nakon toga ostvaren je nagli razvoj proizvodnje u nuklearnim elektranama, s porastom nešto većim od 28% godišnje u razdoblju od 1965. do 1976. godine. U 1976. godini najviše je proizvedeno u SAD (oko 50% svjetske proizvodnje) i Velikoj Britaniji (oko 9%).

Svjetska proizvodnja torija iznosi danas oko 730 tona, i to samo kao nusproizvod prerade monazita. Procjenjuje se da bi se, ako bi se proizvodnja torija osnivala samo na preradi monazita, mogla ostvariti godišnja proizvodnja od 1 800 tona. Kad bi bila potrebna veća proizvodnja torija, smatra se da bi bilo moguće postići godišnju proizvodnju od oko 4 200 tona iskorištavajući nalazišta urana u Kanadi, nalazišta bakra u Južnoafričkoj Republici i nalazišta niobija u Brazilu. U svim tim slučajevima radi se o proizvodnji torija kao nusprodukta. Dalje je moguće povećati proizvodnju torija iskorištavanjem nalazišta u SAD.



Sl. 2.15. Proizvodnja urana u svijetu

Tabl. 2.56.**Proizvodnja urana (10³ tona urana)**

	1963.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
SAD	10,938	8,033	9,900	8,900	8,900	9,800
Kanada	6,425	3,418	3,234	3,420	3,510	4,850
Južnoafrička Republika	3,486	2,263	3,167	2,711	2,488	3,412
Francuska	1,529	1,093	1,136	1,673	1,742	2,063
Nigerija	—	—	—	1,117	1,306	1,460
Gabon	0,448	0,557	0,400	0,436	0,800	...
Portugal	0,008	0,032	0,088	0,092	0,115	0,088
Španjolska	0,040	0,052	0,051	0,060	0,136	0,170
Argentina	0,008	0,020	0,045	0,030	0,023	0,025
Australija	0,923	0,285	0,254	—	—	0,360
Švedska	0,008	0,015	0,014	—	—	—
SR Njemačka	—	—	—	0,026	0,057	0,038
Japan	—	—	—	0,007	0,003	0,002
Svijet	23,813	15,768	18,289	18,472	19,080	22,268

Napomena: ne objavljuju se podaci za SSSR, Kinu i istočnoevropske zemlje

Tabl. 2.57.**Predviđiva proizvodnja urana (10³ tona)**

	1977.	1980.	1985.	1990.
Afrika, južno od Sahare	9,3	16,9	19,7	19,2
Južna Amerika	0,2	0,7	1,6	0,6
Sjeverna Amerika	20,8	31,5	48,5	58,2
Istočna Azija	—	0,0	...	...
Južna Azija	...	...	...	...
Zapadna Evropa	2,6	3,5	6,0	6,2
Oceanija i Japan	0,6	0,8	7,5	15,0
Bliski istok i sjeverna Afrika	—	0,1	0,1	0,1
Ukupno	33,5	53,5	83,4	99,3

Tabl. 2.58.

Proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama (TWh)

	1955.	1956.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
SAD	—	—	0,52	3,66	21,80	112,70	172,51	191,11
Velika Britanija	—	0,06	2,08	16,34	26,01	33,61	30,32	36,16
Japan	—	—	—	0,03	4,58	19,70	25,13	34,08
SR Njemačka	—	—	—	0,12	6,03	12,14	21,40	24,26
Francuska	—	—	0,13	0,90	5,15	14,71	18,25	15,76
Švedska	—	—	—	—	0,06	2,05	11,97	15,99
Kanada	—	—	—	0,12	6,03	13,86	11,86	16,43
SSSR	...	...	...	...	3,50	9,00	11,20	14,00
Španjolska	—	—	—	—	0,92	7,22	7,54	7,56
Švicarska	—	—	—	—	2,45	6,73	7,39	7,56
Belgija	—	—	—	—	0,06	0,15	6,78	10,04
Italija	—	—	—	3,51	3,18	3,41	3,80	3,81
Nizozemska	—	—	—	—	0,37	3,28	3,34	3,87
Njemačka DR	—	—	—	—	0,46	2,18	2,74	5,27
Indija	—	—	—	—	2,42	2,21	2,63	3,25
Bugarska	—	—	—	—	—	0,93	2,55	3,25
Argentina	—	—	—	—	—	1,04	2,52	4,99
Pakistan	—	—	—	—	—	0,55	0,55	2,57
Cehoslovačka	—	—	—	—	—	0,49	0,19	0,60
Panama	—	—	—	—	0,05	0,03	0,03	0,44
Svijet	—	0,06	2,73	24,68	83,07	245,99	342,70	397,77

6. DOSADAŠNJI RAZVOJ POTROŠNJE PRIMARNIH OBLIKA ENERGIJE

Da bi se dobila ukupna potrošnja energije, treba potrošnji krutih oblika energije (tabl. 2.10), tekućih oblika (tabl. 2.38) i potrošnji zemnog plina (tabl. 2.43) dodati potrošnju električne energije proizvedene u hidroelektranama i nuklearnim elektranama, zatim proizvodnju u elektranama koje iskorištavaju geotermičku energiju, o kojima će biti riječi u slijedećem poglavlju, te saldo izvoza i uvoza električne energije. Podaci o potrošnji tako definiranih količina električne energije nalaze se u tabl. 2.59. Ta je energija preračunata u ekvivalentni ugljen u odnosu $1 \text{ kWh} = 0,123 \text{ kg}$ ekvivalentnog ugljena, jer je $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$. Takvo preračunavanje fizikalno je ispravno, ali se uz njegovu primjenu prešutno pretpostavlja da je pretvorba u električnu energiju bez gubitaka, što je daleko od stvarnosti. Energetski bi ispravno bilo računati da se prilikom transformacije potencijalne energije vode gubi oko 20%, a prilikom transformacije nuklearne energije oko 70%. Prema tome, 1 kWh proizveden u hidroelektrani odgovara $0,154 \text{ kg}$, a onaj proizveden u nuklearnoj elektrani $0,410 \text{ kg}$ ekv. ugljena. Ekonomski promatrano, može se smatrati da se svakim kWh proizvedenim u hidroelektranama štedi proizvodnja isto toliko električne energije u termoelektranama, a za proizvodnju u termoelektranama potrebno je oko $0,34 \text{ kg}$ ekvivalentnog ugljena po kWh. U međunarodnim statistikama prihvaćen je danas fizikalni način preračunavanja, pa je tako i prikazano iskorištenje vodnih snaga u tabl. 2.59. Zbog takvog načina preračunavanja udio vodnih snaga i nuklearnih elektrana izlazi manji od stvarnog njihovog udjela u opskrbi energijom.

Razvoj ukupne potrošnje energije svih oblika vidi se u tabl. 2.60. U razdoblju od 1900. do 1975. godine ima perioda stagnacije (npr. na-

kon ekonomske krize 1929. godine), ali i perioda naglog rasta (npr. razdoblje između 1950. i 1960, te razdoblje između 1965. i 1970. godine). Prosječni je porast za cijelo promatrano razdoblje (1900. do 1975. godine) 3,2% što odgovara udvostručenju u 22 godine, a prosječni je porast u pojedinim periodima:

1900—1913.	4,63%
1913—1929.	1,27%
1929—1937.	0,82%
1937—1950.	2,56%
1950—1955.	5,41%
1955—1960.	5,52%
1960—1965.	4,20%
1965—1970.	5,69%
1970—1975.	3,19%

U posljednjem 26-godišnjem razdoblju zabilježen je prosječni godišnji porast od 4,75%, odnosno udvostručenje svakih 14 godina. U istom vremenskom razdoblju prosječni je porast potrošnje energije u pojedinim područjima iznosio:

Afrika	5,48%
Amerika bez SAD	5,66%
Azija bez SSSR	9,27%
Istočna Evropa bez SSSR	5,05%
Zapadna Evropa	3,95%
Oceanija	5,11%
SAD	3,13%
SSSR	6,12%

Najmanji postotni porast ostvaren je u poratnom razdoblju u SAD i u Zapadnoj Evropi, a najveći u Aziji (bez SSSR-a) i u SSSR-u. Veliki porast potrošnje energije u Aziji uvjetovan je porastom potrošnje u Kini i Japanu. Mali porast potrošnje u Zapadnoj Evropi i u SAD posljedica je već ranije ostvarene velike potrošnje u ta dva područja (tabl. 2.60). Do drugog svjetskog rata u SAD i Evropi trošeno je gotovo 80% (tabl. 2.61) od ukupne svjetske potrošnje (u 1900. više od 87%, a u 1937. više od 77%). I pored relativno velikog porasta potrošnje ostvarenog nakon drugog svjetskog rata u Africi, Aziji (bez SSSR-a) i u Americi (bez SAD), ipak se u Evropi, SAD i SSSR-u troši više od 75% ukupne svjetske potrošnje energije (1950. oko 83%, a 1976. oko 72%), iako u tim područjima živi samo 36% svjetskog stanovništva (u 1950. godini), odnosno 28% (u 1976. godini). Ako se tim područjima dodaju dvije vrlo razvijene zemlje (Kanada i Japan), na tom području, koje se može sma-

Tabl. 2.59.

Razvitak iskorištavanja vodnih snaga i nuklearne energije (10⁶ tona ekvivalentnog ugljena)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika	—	—	—	—	—	—	1	2	3	4	5	5
Amerika bez SAD	—	—	3	5	7	12	16	20	30	41	41	45
Azija bez SSSR-a	—	—	2	3	5	8	11	16	22	27	29	32
Istočna Evropa bez SSSR-a	—	...	...	...	—	—	1	1	2	4	5	5
Zapadna Evropa	—	1	1	1	14	19	30	40	46	58	62	60
Oceanija	—	—	—	—	1	1	1	2	3	4	4	4
SAD	—	—	4	6	13	15	19	25	33	53	60	60
SSSR	—	—	—	1	2	3	6	10	15	16	15	17
Svijet	—	1	10	16	42	58	85	116	154	207	221	228

¹ Uključeno u Zapadnu Evropu

Tabl. 2.60.

Potrošnja primarnih oblika energije (10⁶ tona ekvivalentnog ugljena)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	1	8	17	21	41	56	69	89	109	142	151	164	6,94
Amerika bez SAD	34	51	67	71	137	178	233	305	430	546	549	574	3,79
Azija bez SSSR-a	15	65	100	127	149	261	690	709	1090	1380	1422	1495	6,24
Istočna Evropa	...	...	...	...	159	231	292	374	464	515	546	572	5,05
bez SSSR-a	...	...	...	...	575	727	829	1056	1373	1520	1471	1573	2,13
Zapadna Evropa	399	600	660	660	575	727	829	1056	1373	1520	1471	1573	2,13
Oceanija	8	12	14	18	29	39	46	61	79	98	99	106	3,46
SAD	269	578	756	733	1114	1309	1476	1783	2257	2401	2353	2485	2,97
SSSR	37	61	68	165	288	442	608	836	1074	1219	1288	1350	4,85
Svijet	763	1375	1682	1795	2492	3243	4243	5213	6876	7816	7887	8318	3,19

¹ Uključeno u Zapadnu Evropu

Tabl. 261.

Udio područja u svjetskoj potrošnji energije (%)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Afrika	0,1	0,6	1,0	1,2	1,6	1,7	1,6	1,7	1,6	1,8	1,9	2,0
Amerika bez SAD	4,5	3,7	4,0	3,9	5,5	5,5	5,5	5,9	6,3	7,0	7,0	6,0
Azija bez SSSR-a	2,0	4,7	5,9	7,1	6,0	8,1	16,3	13,6	15,9	17,7	18,0	18,0
istočna Evropa bez SSSR-a	...	...	...	...	6,4	7,1	6,9	7,2	6,7	6,6	6,9	6,8
Zapadna Evropa	52,3	43,4	39,2	36,8	23,1	22,4	19,5	20,2	20,0	19,4	18,7	18,9
Oceanija	1,0	0,9	0,8	1,0	1,2	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,3
SAD	35,3	42,1	45,0	40,8	44,7	40,4	34,8	34,2	32,8	30,7	29,9	29,9
SSSR	4,8	4,4	4,1	9,2	11,5	13,6	14,3	16,0	15,6	15,6	16,3	16,2

¹ Uključeno u Zapadnu Evropu

Tabl. 2.62.

Udio energetskih oblika u ukupnoj svjetskoj potrošnji energije

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Ugljen	94,2	91,1	79,7	74,6	61,5	55,9	52,0	43,3	35,2	32,3	33,0	32,4
Tekuće gorivo	4,3	7,0	15,1	18,2	27,0	30,6	32,0	37,5	42,7	45,1	44,4	44,9
Zemni plin	1,5	1,8	4,6	6,3	9,8	11,7	14,0	17,0	19,9	20,0	19,8	20,0
Vodne snage	—	0,1	0,6	0,9	1,7	1,8	2,0	2,2	2,2	2,6	2,8	2,7
+ nukl.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabl. 263.

Udio energetske oblike u ukupnoj potrošnji energije (%)

	1900.	1913.	1929.	1937.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Istočna Evropa												
ugljen	...	...	...	...	93,1	90,5	88,0	82,1	72,9	66,7	65,6	63,9
tekuće gorivo	...	...	...	...	3,8	5,6	6,5	10,4	15,5	19,3	20,1	20,6
zemni plin	...	...	...	...	3,1	3,9	5,1	7,2	11,2	13,2	13,4	14,6
vodne snage												
+ nukl.	...	...	...	...	—	—	0,4	0,3	0,4	0,8	0,9	0,9
Zapadna Evropa												
ugljen	99,5	96,5	95,9	93,0	85,4	78,0	65,0	49,0	32,6	25,6	25,0	25,0
tekuća goriva	0,5	3,3	3,6	6,2	12,0	18,4	29,5	44,6	56,1	56,1	54,9	55,2
zemni plin	—	—	0,3	0,6	0,2	1,0	1,9	2,6	7,8	14,5	15,9	16,0
vodne snage												
+ nukl.	—	0,2	0,2	0,2	2,4	2,6	3,6	3,8	3,4	3,8	4,2	3,8
SAD												
ugljen	90,7	87,7	67,1	58,7	40,1	30,9	24,3	23,9	20,9	20,7	22,3	21,9
tekuća goriva	5,2	8,3	22,9	26,3	38,9	42,6	43,2	41,7	41,9	44,5	44,3	45,4
zemni plin	4,1	4,0	9,5	14,2	19,8	25,4	31,2	33,0	35,7	32,6	30,9	30,3
vodne snage												
+ nukl.	—	—	0,5	0,8	1,2	1,1	1,3	1,4	1,5	2,2	2,5	2,4
SSSR												
ugljen	56,8	78,7	70,6	71,5	79,2	76,0	63,1	49,2	40,0	37,5	36,6	35,9
tekuća goriva	43,2	21,3	29,4	26,7	17,3	20,6	26,0	29,3	34,0	36,5	36,6	36,0
zemni plin	—	—	—	1,2	2,8	2,7	9,9	20,3	24,6	24,7	25,5	26,8
vodne snage												
+ nukl.	—	—	—	0,6	0,7	0,7	1,0	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3

¹ Uključeno u Zapadnu Evropu

trati najrazvijenijim, troši se nešto više od 90% svjetske potrošnje u 1950, a nešto više od 81% u 1976. godini. Na tom području živi 40% od ukupnog stanovništva u 1950, a 34% u 1976. godini.

Početkom stoljeća ugljen je gotovo jedini iskorištavani oblik energije, jer se njime tada zadovoljavalo gotovo 95% svih energetske potrebe (tabl. 2.62). Postepeno je udio ugljena opadao, pa je u 1976. godini tek nešto veći od 30%. Nasuprot tome, udio je drugih oblika energije neprestano rastao, da bi u sedamdesetim godinama tekuća goriva preuzela dominantnu ulogu u opskrbi energijom u svijetu. Zemni plin postao je važan činilac u opskrbi energijom: krajem promatranog razdoblja sudjeluje s oko 20% u ukupnoj potrošnji energije. Vodne snage, skupa s nuklearnom energijom, prema prihvaćenom načinu računanja, pokrivaju tek mali dio ukupnih energetske potrebe. Kad bi se vodne snage i nuklearna energija obračunale prema zamjeni goriva u termoelektranama, one bi sudjelovale sa 6,8% u ukupnoj potrošnji energije.

Postoji, međutim, znatna razlika u strukturi oblika energije kojom se zadovoljavaju potrebe u pojedinim područjima (tabl. 2.63). Dok se u Zapadnoj Evropi potrebe zadovoljavaju najvećim dijelom tekućim gorivima (gotovo 55% u 1976), u Istočnoj Evropi je ugljen glavni energetske izvor (gotovo 2/3 potreba), a tekuća goriva sudjeluju u opskrbi energijom tek sa 20%. U SAD zemni plin čini gotovo 1/3 ukupne potrošnje, ugljen tek 1/5, a tekuća goriva 45%. U Sovjetskom Savezu ugljen i tekuća goriva gotovo podjednako sudjeluju u opskrbi energijom, a zemni plin s nešto više od 1/4.

U 1950. godini u većini evropskih zemalja (tabl. 2.64) udio ugljena u opskrbi energijom iznosio je više od 3/4, a bilo je zemalja i s udjelom većim od 90% (Bugarska, Čehoslovačka, Jugoslavija, Njemačka DR, SR Njemačka, Poljska i Velika Britanija). U samo nekoliko zemalja iskorištavan je zemni plin (Belgija, Austrija, Italija, Jugoslavija, Mađarska, Nizozemska, Poljska i Rumunjska), ali u svim zemljama — osim u Rumunjskoj — udio zemnog plina bio je vrlo mali. U Finskoj, Italiji, Norveškoj, Švicarskoj i Švedskoj sudjelovale su vodne snage s više od 10% u opskrbi energijom. Sudjelovanje vodnih snaga naročito je visoko u Norveškoj (37,8%). U slijedećih 25 godina struktura se energije znatno izmijenila. Udio ugljena znatno je smanjen, pa ima znatan broj zemalja s udjelom ugljena manjim od 30% (Albanija, Austrija, Belgija, Danska, Finska, Francuska, Grčka, Irska, Italija, Nizozemska, Norveška, Portugal, Rumunjska, Španjolska, Švedska, Švicarska), a među njima ima i takvih zemalja u kojima je udio ugljena manji od 10% (Italija, Nizozemska, Norveška, Portugal, Švedska i Švicarska); to su zemlje s malim rezervama ugljena ili bez njih. Karakteristično je da u zemljama s velikim rezervama ugljena (SR Njemačka, Velika Britanija) udio ugljena iznosi u 1975. godini tek oko 1/3 ukupne potrošnje energije. Velik je broj zemalja u kojima je udio tekućih goriva veći od 50%, a među njima ima i onih u kojima je taj udio veći od 70% (Danska, Finska, Italija, Portugal, Švedska i Švicarska). Samo je mali broj

zemalja s udjelom tekućih goriva manjim od 20% (Čehoslovačka, Njemačka DR i Poljska), a to su zemlje u kojima je udio ugljena u 1975. godini veći od 70%. Karakterističan je porast udjela zemnog plina, pa u 1975. godini ima veći broj zemalja s udjelom toga energetskog izvora većim od 10% (Albanija, Austrija, Belgija, Francuska, Italija, Mađarska, Nizozemska, SR Njemačka, Rumunjska i Velika Britanija), a među njima su i dvije zemlje s udjelom zemnog plina većim od 50% (Nizozemska 63,1%, Rumunjska 53,7%). Malo je zemalja koje danas ne iskorištavaju zemni plin za opskrbu energijom (Danska, Grčka, Irska, Norveška, Portugal i Švedska). S druge strane, malen je broj zemalja sa znatnijim udjelom hidroenergije u opskrbi energijom. Taj energetski oblik sudjeluje s udjelom većim od 10% samo u Norveškoj, Švedskoj i Švicarskoj. U Norveškoj je taj udio vrlo visok (47,9%), u Švedskoj i Švicarskoj znatno manji (17,1%, odnosno 16,7%). U Portugalu je tek nešto manji od 10% (9,4%).

Dobru sliku o potrošnji energije daju podaci o potrošnji energije po stanovniku (tabl. 2.65. i 2.66). Promatrajući po područjima svijeta, mogu se konstatirati znatne razlike u specifičnoj potrošnji energije. U razdoblju od 1950. do 1976. godine prosječna je potrošnja energije po stanovniku udvostručena — od 1 tone ekvivalentnog ugljena na nešto više od 2 tone godišnje. U najrazvijenijem području (SAD) potrošnja energije po stanovniku bila je u 1974. godini 5,5 puta veća od prosječne svjetske potrošnje, a u najmanje razvijenom području (Afrika) ta je potrošnja tek 19% od prosječne potrošnje po stanovniku u svijetu. U razvijenim područjima (Evropa, Oceanija i SSSR) troši se oko dva do dva i pol puta više od prosječne svjetske potrošnje energije po stanovniku (4 do 5 tona ekv. ugljena godišnje).

U evropskim zemljama najveća potrošnja energije po stanovniku ostvaruje se u Čehoslovačkoj i Nizozemskoj (oko 7 tona ekv. ugljena po stanovniku), a najmanja u Albaniji (867 kg ekv. ugljena po stanovniku), Portugalu (1 050 kg) i u Jugoslaviji (2 016 kg). U svim ostalim zemljama potrošnja energije veća je od 2 000 kg po stanovniku. To vrijedi za 1976. godinu. U 1950. godini, međutim, najveća je specifična potrošnja bila ostvarena u Velikoj Britaniji (više od 4 tone ekv. ugljena po stanovniku), najmanja u Albaniji (53 kg), Grčkoj (247 kg), Portugalu (264 kg), Italiji (417 kg), Bugarskoj (469 kg) i u Jugoslaviji (483 kg). Treba naglasiti da potrošnja energije nije proporcionalna s industrijskom proizvodnjom i životnim standardom. Iskorištenje energije u gorivu ovisi o vrsti goriva; najbolje se iskorištava zemni plin, pa tekuća goriva, a najslabije ugljen. O industrijskoj strukturi ovisi potrebna količina energije za istu vrijednost proizvodnje; bazična industrija traži više energije od prerađivačke industrije za jednaku vrijednost proizvoda. Potrošnja energije ovisi i o klimatskim prilikama, jer se dio energije troši za grijanje prostorija i jer potrošnja topline u tehnološkim procesima ovisi i o temperaturi okoline. Osim toga, način obračuna energije proizvedene u hidroelektranama i nuklearnim elektranama ima

Tabl. 2.64.

Udio oblika energije u opskrbi evropskih zemalja

		Kruća goriva	Tekuća goriva	Zemni plin	Vodne snage + nukl.
Albanija	1950.	32,3	66,2	—	1,5
	1965.	28,6	57,5	9,0	1,5
	1975.	24,4	58,7	11,2	5,7
Austrija	1950.	84,1	8,5	1,5	5,9
	1965.	40,2	40,0	12,0	7,8
	1975.	20,0	50,6	20,9	8,5
Belgija	1950.	88,8	10,8	0,3	0,1
	1965.	56,7	42,7	0,5	0,1
	1975.	24,2	50,7	23,7	1,4
Bugarska	1950.	90,6	8,3	—	1,1
	1965.	73,9	24,5	0,4	1,2
	1975.	49,6	44,2	3,7	2,5
Čehoslovačka	1950.	96,8	2,8	0,1	0,3
	1965.	88,4	9,1	1,6	0,9
	1975.	74,3	19,8	4,9	1,0
Danska	1950.	72,7	27,0	—	0,3
	1965.	25,9	73,0	—	1,1
	1975.	15,8	83,8	—	0,4
Finska	1950.	61,9	23,6	—	14,4
	1965.	23,5	66,6	—	9,9
	1975.	16,4	70,3	4,4	8,9
Francuska	1950.	79,9	17,2	0,4	2,5
	1965.	45,3	46,4	4,4	3,9
	1975.	19,4	63,9	12,0	4,7
Grčka	1950.	19,3	80,6	—	0,1
	1965.	30,7	67,9	—	1,4
	1975.	34,4	64,3	—	1,3
Irska	1950.	82,0	17,1	—	0,9
	1965.	49,6	48,6	—	1,8
	1975.	29,0	70,1	—	0,9
Italija	1950.	49,3	32,7	3,5	14,5
	1965.	13,2	68,7	11,4	6,7
	1975.	7,6	71,5	17,2	3,7

		Kruta goriva	Tekuća goriva	Zemni plin	Vodne snage + nukl.
Mađarska	1950.	83,5	10,9	5,6	0,1
	1965.	76,4	17,1	5,9	0,6
	1975.	43,7	34,9	20,0	1,4
Nizozemska	1950.	83,2	16,7	0,1	0,0
	1965.	33,8	60,5	5,7	0,0
	1975.	4,3	32,1	63,1	0,5
Njemačka DR	1950.	99,3	0,6	—	0,1
	1965.	94,3	5,4	0,2	0,1
	1975.	72,6	18,5	8,4	0,5
SR Njemačka	1950.	95,9	3,1	0,1	0,9
	1965.	57,7	39,6	1,8	0,9
	1975.	32,1	49,7	16,5	1,7
Norveška	1950.	30,1	32,1	—	37,8
	1965.	9,9	46,5	—	43,6
	1975.	7,1	45,0	—	47,9
Poljska	1950.	98,2	1,1	0,6	0,1
	1965.	92,2	5,6	2,1	0,1
	1975.	83,3	10,4	6,2	0,1
Portugal	1950.	57,8	39,8	—	2,4
	1965.	26,5	62,0	—	11,5
	1975.	7,2	83,4	—	9,4
Rumunjska	1950.	25,1	30,5	44,2	0,2
	1965.	20,3	25,0	54,5	0,2
	1975.	23,1	22,3	53,7	0,9
Španjolska	1950.	84,3	11,4	—	4,3
	1965.	46,0	46,8	0,0	7,2
	1975.	22,1	69,6	2,3	6,0
Švedska	1950.	49,5	35,9	—	14,6
	1965.	8,9	75,2	—	15,9
	1975.	5,4	77,5	—	17,1
Švicarska	1950.	49,4	27,6	—	23,0
	1965.	10,6	71,9	—	17,5
	1975.	1,2	78,6	3,5	16,7
Velika Britanija	1950.	90,8	9,1	—	0,1
	1965.	67,2	31,5	0,4	0,9
	1975.	42,2	39,3	17,0	1,5

Tabl. 2.65.

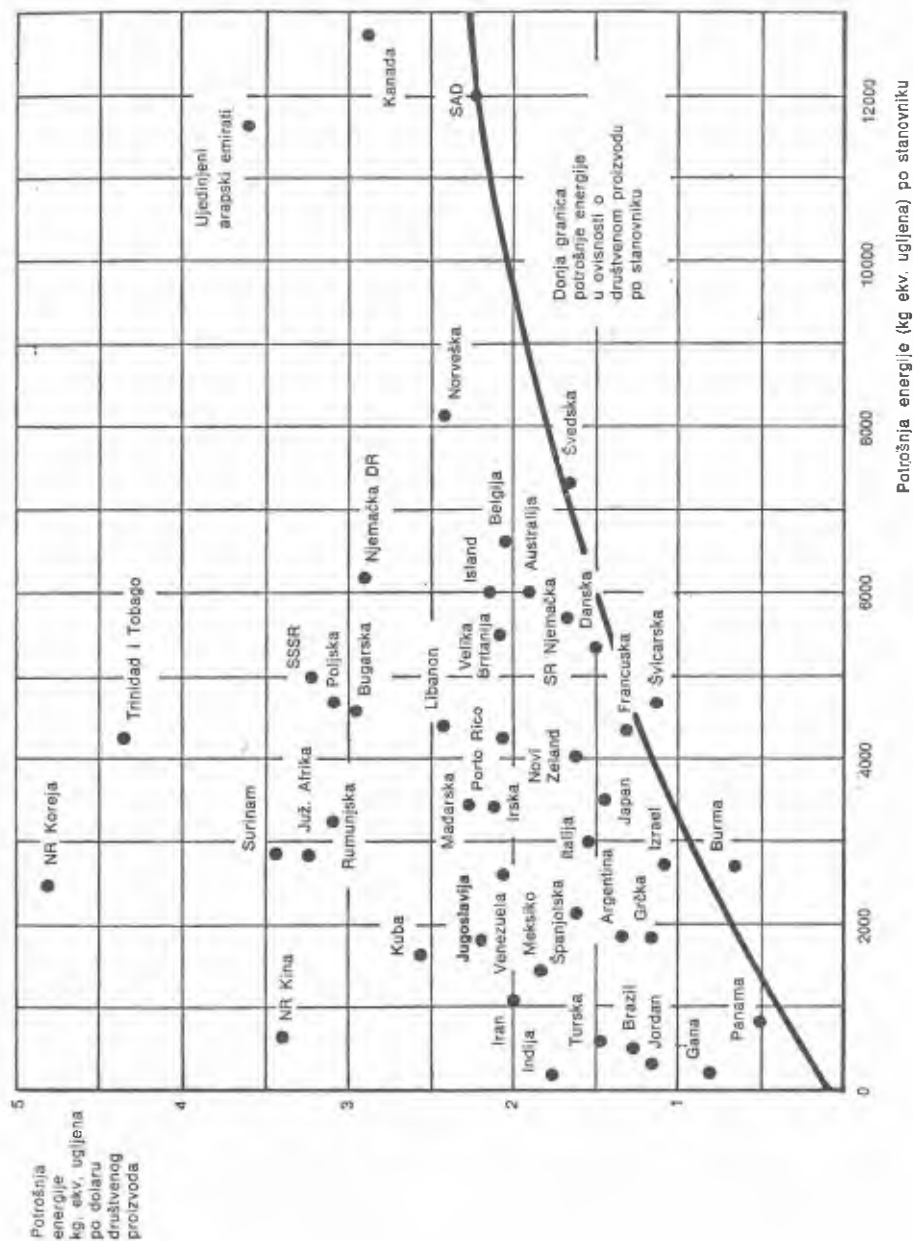
Potrošnja energije po stanovniku (kg ekv. ugljena po stanovniku)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	189	232	254	285	309	376	397	2,90
Amerika bez SAD	781	887	1009	1162	1431	1601	1633	2,88
Azija bez SSSR-a	110	176	420	389	538	635	654	7,10
Istočna Evropa bez SSSR-a	1838	2481	3004	3670	4415	5161	5233	4,11
Zapadna Evropa	1900	2323	2543	3978	3882	4025	4289	3,18
Oceanija	2351	2721	2916	3468	4064	4684	4953	2,91
SAD	7316	7889	8172	9176	11020	11019	11554	1,77
SSSR	1593	2249	2839	3620	4424	5063	5259	4,70
Svijet	1004	1196	1423	1507	1908	1996	2069	2,82

utjecaja na ukupno prikazanu potrošnju energije. Prema prihvaćenom načinu obračuna u Norveškoj u 1976. godini potrošnja energije po stanovniku iznosi 5 263 kg ekv. ugljena. Kad bi se energija iz hidroelektrana obračunala prema energiji potrebnoj za jednaku proizvodnju električne energije u termoelektranama, potrošnja energije u Norveškoj iznosila bi oko 9 000 kg ekv. ugljena po stanovniku.

I pored toga, potrošnja energije po stanovniku daje indikaciju o industrijskom razvoju i životnom standardu stanovništva, uvažujući pri tome utjecaj strukture utrošenih oblika energije, karakteristike industrije, utjecaj klime i udio hidroenergije u opskrbi energetske potrošnje.

Ilustraciju za takve tvrdnje daje dijagram na sl. 2.16. U njemu je prikazan odnos između bruto nacionalnog dohotka po stanovniku (na apscisi) i potrošnje energije po dolaru bruto nacionalnog dohotka (na ordinati). Pokazuje se da postoje vrlo velike razlike među pojedinim zemljama, ali i da postoji neka najniža granica potrošnje energije po dolaru bruto nacionalnog dohotka koja raste s potrošnjom energije po stanovniku. Na toj najnižoj granici nalaze se Francuska, Švicarska, Švedska i SAD. Ostale zemlje su iznad te granice, a neke i vrlo visoko iznad nje. Svakako da na položaj zemalja u tom dijagramu — pored utjecaja koji su već navedeni — utječe i privredna struktura. U zemljama s razvijenom poljoprivredom i tercijarnim djelatnostima potrebno je za jednak nacionalni dohodak manje energije nego u zemljama u kojima je dominantna industrijska proizvodnja. Za jednak nacionalni dohodak u tercijarnim djelatnostima potreban je tek deseti dio energije od onog u industriji. Donja granična linija u dijagramu na sl. 2.16.



Sl. 2.16. Ovisnost potrošnje energije po dolaru društvenog proizvoda o tom dohotku po stanovniku (1972. godina)

prikazuje, osim toga, minimalno potrebnu energiju po stanovniku s kojom se može ostvariti određeni bruto nacionalni dohodak. To, naravno, vrijedi uz današnja općenito prihvaćena tehnička rješenja i uz današnje ponašanje potrošača. Nema sumnje da se racionalnijom upotrebom energije i nekim promjenama navika potrošača može postići smanjenje potrošnje energije, ali efekti su svakako ograničeni. Znatnije povećanje bruto nacionalnog dohotka, međutim, može se ostvariti samo povećanjem potrošnje energije.

U dijagramu na sl. 2.16. proizvodnja u hidroelektranama obračunata je kao da je za tu proizvodnju utrošeno onoliko goriva koliko bi bilo potrebno da se ta energija proizvede u termoelektranama.

U Jugoslaviji je potrošnja energije rasla u razdoblju od 1950. do 1976. godine po prosječnoj godišnjoj stopi od 6,78% (tabl. 2.67), a kad se promatra potrošnja po stanovniku, po stopi od 5,65% godišnje (tabl.

Tabl. 2.66.

Potrošnja energije po stanovniku u evropskim zemljama (kg ekv. ugljena)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1975.	1976.	Porast %
Albanija	35	135	302	341	632	737	867	11,35
Austrija	1279	1923	2129	2644	3408	3733	4013	4,50
Belgija	3354	3972	3851	4384	5555	5738	6049	2,29
Bugarska	469	737	1303	2575	3941	4695	4710	9,28
Čehoslovačka	2979	3749	4741	5720	6522	7165	7397	3,56
Danska	2032	2516	2830	4144	5723	4992	5320	3,77
Finska	774	1267	1529	2699	4071	4672	5177	7,58
Francuska	1912	2189	2474	3087	3956	3946	4380	3,24
Grčka	247	303	460	783	1222	2004	2250	8,87
Irska	1611	1884	1838	2247	3145	3046	3170	2,64
Italija	417	720	1986	1752	2793	3061	3284	8,26
Jugoslavija	483	592	826	1095	1382	1930	2016	5,65
Mađarska	974	1694	2072	2812	3162	3373	3553	5,10
Nizozemska	1948	2191	2504	3323	4943	6590	6789	4,92
Njemačka DR	2832	4185	4950	5434	6051	6003	6224	3,07
SR Njemačka	2490	3396	3695	4376	5419	5345	5922	3,39
Norveška	1766	2284	2702	3542	4844	5105	5263	4,29
Poljska	2087	2618	3107	3514	4269	4991	5253	3,61
Portugal	264	295	382	536	754	990	1050	5,45
Rumunjska	599	1029	1342	2092	3013	3799	4036	7,61
Španjolska	523	667	756	1020	1514	2137	2399	6,03
Švedska	2061	2757	3572	4575	6430	5636	6046	4,23
Švicarska	1103	1434	1873	2679	3546	3475	3342	4,36
Velika Britanija	4358	4907	4861	5080	5336	5300	5268	0,73

Tabl. 2.67.

Potrošnja energije u Jugoslaviji (10⁶ tona ekv. ugljena)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1972.	1973.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Ugljen i koks	7,11	9,06	12,32	15,27	13,67	17,55	18,63	19,37	20,59	21,34	4,32
Tekuća goriva	0,62	0,94	2,09	4,45	11,45	12,70	14,11	16,03	15,90	17,12	13,61
Zemni plin	0,02	0,05	0,06	0,40	1,17	1,96	2,11	2,30	2,32	2,45	20,31
Vodne snage	0,14	0,31	0,74	1,17	1,87	2,20	2,01	2,54	2,41	2,55	11,81
Ukupno	7,89	10,36	15,21	21,29	28,16	34,41	36,86	40,24	41,22	43,46	6,78

Tabl. 2.68.

Struktura potrošnje energije u Jugoslaviji (%)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1972.	1973.	1974.	1975.	1976.
Ugljen	90,1	87,4	81,0	71,7	48,5	51,0	50,5	48,1	50,0	49,1
Tekuća goriva	7,9	9,1	13,7	20,9	40,7	36,9	38,3	39,8	38,6	39,4
Zemni plin	0,2	0,5	0,4	1,9	4,2	5,7	5,7	5,7	5,6	5,6
Vodne snage	1,8	3,0	4,9	5,5	6,6	6,4	5,5	6,3	5,8	5,9

2.66). Struktura utrošenih oblika energije u tom razdoblju bitno se izmijenila (tabl. 2.68), pogotovo nakon 1965. godine, kad je opala proizvodnja ugljena, naglo je porasla potrošnja tekućih goriva. U 1976. godini velik dio energetske potrebe pokriva se tekućim gorivima (39,4%), jer je u 26-godišnjem razdoblju porasla njihova potrošnja po stopi od 13,61% godišnje, što odgovara udvostručenju u 5,2 godina. Znatno je porast potrošnje zemnog plina (20,31% godišnje), ali se njime zadovoljava samo mali dio ukupnih potreba (5,6%). Postojanje znatnih vodnih snaga omogućilo je porast proizvodnje u hidroelektranama od 11,81% godišnje. I pored toga — prema prihvaćenom načinu obračuna — vodnim snagama se pokriva samo 5,9% potreba. Kad bi se proračun proveo prema energiji potrebnoj za proizvodnju jednake energije u termoelektranama, udio hidroenergije porastao bi na oko 15%, uz odgovarajuće smanjenje udjela drugih oblika energije.

7. ULJNI ŠKRILJAVCI I BITUMINOZNI PIJESAK

Uljni škriljavci su sedimentno stijenje s većim ili manjim sadržajem organske materije koja je raspršena u stijenama u obliku mikroskopski sitnih čestica. Ta se organska materija naziva ulje ili kerogen. Uljni škriljavci su nastali u velikim i plitkim jezerima ili u plitkim morima. Stijene koje sadrže ugljikovodike nastale su prije oko 50 milijuna godina. Čini se da su ugljikovodici ostaci alga, peluda i sitnih voštanih spora koji su postojali u suptropskim klimatskim uvjetima i koji su se nataložili i bili prekriveni nanosom. Tako stvoreni slojevi tektonski su mirovali milijunima godina. Izdizanjem tla i djelovanjem erozije, oni su se pojavili na površini. U središnjim dijelovima starih jezera nailazi se na slojeve i do nekoliko stotina metara debljine. Naslage nastale u plitkim morima najčešće su tanje (do 30 m), a sadrže manje organskih tvari.

Bituminozni pijesak je smjesa pijeska, mineralnih materijala, vode i bitumena. Svako zrno pijeska prekriveno je bitumenom. Bituminozni pijesak prema nekim je mišljenjima ostatak prirodno ishlapljene nafte, a drugi drže da je to mlađi stadij formiranja nafte.

Ugljikovodici u uljnim škriljalcima sliče vosku, a iz njih se mogu proizvesti plinoviti i tekući ugljikovodici destruktivnom destilacijom. Prije prerade bitumena iz bituminoznog pijeska treba ga od pijeska odijeliti grijanjem.

Uljni škriljavci i bituminozni pijesak najčešće se nalaze neposredno ispod površine tla u slojevima, slično kao ugljen.

Sadržaj ulja, odnosno bitumena u takvim škriljalcima i pijesku iznosi od svega nekoliko litara do 600 l/t u najbogatijim nalazištima. Budući da je za dobivanje ulja potrebna toplina, smatra se da se isplati eksploatirati stijenje sa sadržajem ulja većim od 40 l/t.

Prema procjeni US Geological Survey, svjetske su rezerve uljnih škrljavaca tolike da se iz njih može dobiti oko 500 milijarda tona kerogena, što je više i od vrlo optimističnih procjena rezerva sirove nafte. Prema istoj procjeni, struktura je rezerva uljnih škrljavaca prema sadržaju ulja:

83,6%	20 do 40 l/t
15,6%	40 do 100 l/t
0,8%	100 do 400 l/t

Danas se, međutim, ne mogu točnije odrediti rezerve ulja u uljnim škrljavcima i bituminoznom pijesku, jer za većinu zemalja nema konačnih podataka. Istraživanja tih izvora energije nisu, naime, dosad bila intenzivna. Neka nalazišta su otkrivena pri istraživanju nafte i zemnog plina. Utvrđivanje sadržaja ugljikovodika, osim toga, nije jednostavno, jer oni nisu jednolično raspodijeljeni u slojevima.

U tabl. 2.69. nalaze se podaci o poznatim i mogućim dodatnim rezervama ulja u uljnim škrljavcima i bituminoznom pijesku po kontinentima, a u tabl. 2.70 podaci o iskoristivim količinama u zemljama s najvećim rezervama. Valja naglasiti da su podaci u tabl. 2.69. i 2.70. iz različitih izvora.

Pri eksploataciji nalazišta mogu se upotrijebiti dvije metode: rudarenje s preradom u posebnim postrojenjima za rafinaciju i odjeljivanje ulja u samim nalazištima.

Kad se radi o odjeljivanju ulja na površini, treba rudu izvaditi iz ležišta, samljeti je i u posebnim postrojenjima zagrijati do temperature od 510°C, da bi se odijelilo ulje od anorganskog materijala. Po-

Tabl. 2.69.

Poznate i dodatne moguće rezerve ulja u uljnim škrljavcima i bituminoznom pijesku

	Poznate rezerve ulja (10 ⁶ tona)		Moguće dodatne rezerve (10 ⁶ tona)	
	sadržaj ulja 0,1—0,4 l/kg	sadržaj ulja 0,04—0,1 l/kg	sadržaj ulja 0,1—0,4 l/kg	sadržaj ulja 0,04—0,1 l/kg
Afrika	15,5	—	...	...
Južna Amerika	—	124,0	...	497,0
Sjeverna Amerika	60,6	232,0	50,8	246,0
Azija	14,0	2,2	0,3	575,0
Evropa	10,9	0,9	15,5	31,1
Oceanija	—	0,2	...	...
Svijet	101,0	359,3	66,6	1439,1

... Nema podataka

Tabl. 2.70.

**Iskoristive rezerve ulja u uljnim škrljavcima
i bituminoznom pijesku u zemljama s najvećim
poznatim rezervama (10^6 tona)**

Kolumbija	155 400
SAD	147 175
Kanada	75 110
Kina	21 000
SSSR	3 388
Zair	1 550
Italija	1 087
Švedska	880
Brazil	497
SR Njemačka	311
Francuska	237
Madagaskar	235
Novi Zeland	224
Burma — Tajland	217
Anaola	200
Jugoslavija	128
Luksemburg	109
Albanija	60
Argentina	45

stoji vrlo mnogo patenata za odjeljivanje ulja iz uljnih škrljavaca. Neki se osnivaju na uvođenju zraka u stupac škrljavaca uz izgaranje dijela ulja, a drugi na uvođenju ugrižanih keramičkih kugla. Budući da je većina nalazišta blizu površine, ona će se moći eksploatirati površinskim kopovima (kad slojevi nisu na dubini većoj od 30 do 45 m). To, međutim, znači da će biti uništene velike površine zemljišta. Pored toga, u preradi ostaju velike količine otpadaka (na svaku tonu prerađenih škrljavaca pojavljuje se oko 0,8 t otpadaka), i to najvećim dijelom u obliku prašine, što predstavlja opasnost za okolinu.

Kad se, međutim, odjeljivanje ulja provodi u samim ležištima, nema takvog negativnog utjecaja na okolinu. Zbog toga se nastoje razviti metode za takvo odjeljivanje ulja. Princip je jednostavan. Ako se kroz bušotinu uvodi u ležište vrući komprimirani zrak, izgaranjem dijela ulja zagrijat će se podzemni slojevi i ulje će se na pogodnim mjestima sakupljati, pa će ga se moći izvući pumpama. Mjesto zraka može se s jednakim djelovanjem u sloj upuštati vodena para ili vodik. Glavna je poteškoća što stijene slabo provode toplinu, pa je potrebno razbiti stijenje da se proširi djelovanje injektiranog zraka ili vodene pare. To se pokušava postići upotrebom vode, pod tlakom, električnom energijom visokog napona i tekućim eksplozivima. Pomišlja se i na upotrebu nuklearnih eksploziva, pomoću kojih bi se stvorile velike šupljine

u kojima bi se sakupljalo ulje odijeljeno izazvanim izgaranjem, a iz kojih bi ga se izvlačilo na isti način kao i sirovu naftu. Za takvu eksploataciju, međutim, bit će potrebna još dugotrajna istraživanja.

Bitumen se odjeljuje od pijeska ispiranjem vrućom vodom uz dodatak kaustične sode. Isprani bitumen se razrjeđuje i filtrira centrifugiranjem, a nakon toga se zagrijava da bi se raspadanjem teških stvorili lakši ugljikovodici.

Ležišta uljnih škrljavaca i bituminoznog pijeska eksploatirana su već od početka 19. stoljeća (Škotska, Francuska, Švedska), ali danas ne postoji u evropskim zemljama nijedno takvo postrojenje. U Estoniji su eksploatirana nalazišta sa sadržajem ulja od 220 l/t, a proizvodnja je za vrijeme drugog svjetskog rata iznosila $8 \cdot 10^6$ litara sirove nafte godišnje.

Uljni škrljavci mogu se upotrijebiti i kao gorivo bez ikakve prethodne prerade. Tako se u Estonskoj SSR loži oko 23 milijuna tona uljnih škrljavaca godišnje u kotlovima termoelektrana. U Rumunjskoj se gradi termoelektrana snage 1 000 MW, u kojoj će se ložiti uljni škrljavci ogrjevne moći 1 000 kcal/kg.

Svakako da je mnogo interesantnija upotreba uljnih škrljavaca i bituminoznog pijeska za proizvodnju tekućih goriva kojima bi se zamijenili derivati nafte. U SAD je najprije izgrađeno eksperimentalno postrojenje (Grand Valley, Colorado) kapaciteta prerade uljnih škrljavaca od 1 000 t/dan, a od 1970. godine u pogonu je postrojenje u kojem se prerađuje 66 000 t/dan. U Kanadi se danas proizvodi oko 2 milijuna tona ulja iz bituminoznog pijeska (Great Canadian Oil Sands), a grade se postrojenja za godišnju proizvodnju od 20 milijuna tona godišnje; računa se da će se u 1990. godini proizvoditi čak 175 milijuna tona ulja iz bituminoznog pijeska.

Rezerve uljnih škrljavaca u Jugoslaviji nisu točnije utvrđene. Najveće su rezerve u SR Srbiji (najbolje je istraženo područje kod Aleksinca, u dolini Južne Morave). Nalazišta uljnih škrljavaca ima i u SR Makedoniji (kod Zletova) i SR Hrvatskoj (kod Sinja).

8. TRESET, DRVO I OTPACI

Treset i drvo, te biljni i životinjski otpaci promatraju se odvojeno od konvencionalnih oblika energije, jer je udio tih oblika u opskrbi energijom, s tendencijom opadanja, danas ograničen na seoska područja u malo razvijenim zemljama.

8.1. *Treset*

Treseta ima u močvarnim područjima s hladnom i vlažnom klimom. Tresetišta u nekim zemljama prekrivaju velike površine (tabl. 2.71), koje se protežu na oko 2 milijuna km². Srednja je debljina slojeva treseta 9 do 12 m, a ima tresetišta s debljinom slojeva i do 60 m. Na velikim površinama u SSSR-u i u Finskoj slojevi treseta su debeli 4 do 6 m.

Sadržaj vlage u tresetu u nalazištu može biti i 90%, pa se izvađeni treset suši na zraku. Tako osušen treset ima oko 50% organskih tvari i oko 25% vlage. Budući da je porozan i da ima oko 2% dušika, može se upotrijebiti i kao gnojivo.

Podaci o rezervama treseta vrlo su nepotpuni jer ih mnoge zemlje ne objavljuju. U tabl. 2.72. svrstane su zemlje s najvećim rezervama treseta. Među njima su na prvom mjestu SSSR, Finska i Poljska. Ukupne poznate rezerve treseta tek su mali dio rezerva krutih goriva (samo 0,6% od rezerva ugljena i lignita), pa one ne mogu imati većeg utjecaja na opskrbu energijom. Proizvodnja u 1971. godini iznosila je oko 195.10⁶ tona, od čega je skoro 2/3 upotrijebljeno u poljoprivredi (tabl. 2.72). Ostali treset iskorištava se kao gorivo u domaćinstvima i termoelektranama (SSSR i Irska).

Tabl. 2.71.

Površine tresetišta u zemljama s najvećim nalazištima

	Površina 10 ³ km
SSSR	730
SAD	475
Finska	100
Kanada	95
SR Njemačka i Njemačka DR	52
Velika Britanija	52
Švedska	50
Poljska	15
Indonezija	13
Norveška	10

Tabl. 2.72.

Ukupne rezerve treseta i proizvodnja u 1971. godini

	Ukupne rezerve		Proizvodnja 10 ³ tona treseta	Upotrebljeno	
	10 ⁹ tona treseta	10 ⁹ tona ekv. uglj.		za gorivo 10 ⁶ t	za poljopr. 10 ⁶ t
SSSR	125,59	35,88	187,00	57,00	130,00
Finska	33,00	9,43	0,32	0,17	0,15
Poljska	24,00	6,86	0,05	—	0,05
SAD	12,54	3,58	0,55	0,55	—
Švedska	9,40	2,69	0,10	0,02	0,08
Island	2,00	0,57	—	—	—
Velika Britanija	1,61	0,46	—	—	—
SR Njemačka	0,90	0,26	0,07	—	0,07
Danska	0,56	0,16	0,01	0,01	—
Japan	0,50	0,14	0,01	—	0,01
Irska	0,40	0,11	4,95	4,90	0,05
Ostale zemlje	0,80	0,23	2,55	0,36	2,19
Ukupno	211,30	60,37	195,61	63,01	132,60

8.2. Drvo

Šumovita područja pokrivaju na Zemlji površinu od oko 40.10⁶ km², od čega je 28.10⁶ km² šuma. Skoro polovicu šuma čine neiskorištene prašume. Raspodjela šuma po kontinentima vidi se u tabl. 2.73.

Godišnji prirast drva u šumama ovisi o klimatskim prilikama. Tako u šumama Zapadne Evrope prirast iznosi 400 do 800 m³ po km², u crnogoričnim šumama sjeverne Evrope oko 1000 m³, u najpovoljnijim područjima Sjeverne Amerike i do 2 000 m³, a u tropskim prašumama 300 do 700 m³ po km². Postoje, međutim, različite procjene ukupnog godišnjeg prirasta drva (tabl. 2.74), koje se međusobno znatno razlikuju. Energija koja odgovara godišnjem prirastu drva vrlo je velika i ima red veličine godišnje potrošnje energije u svijetu (tabl. 2.60). Prema najskromnijoj procjeni (Sevette, tabl. 2.74), energija drva iznosi oko polovicu ukupno iskorištene energije u svijetu u 1974. godini, a prema najpovoljnijoj procjeni energija drva veća je od iskorištene energije. Treba napomenuti da je računato samo s površinama pod šumama, a nisu uzimana u obzir šumovita područja.

Tabl. 2.73.

Površine šuma u svijetu

	Šumska područja 10 ⁶ km ²	Šume 10 ⁶ km ²
Afrika	8,00	1,90
Južna Amerika	7,30	5,30
Sjeverna Amerika	6,30	6,30
Srednja Amerika	0,65	0,60
Azija (bez SSSR-a)	5,30	4,00
Evropa (bez SSSR-a)	1,70	1,40
Oceanija	1,90	0,80
SSSR	9,15	7,65
Ukupno	40,30	28,00

Tabl. 2.74.

Procjena godišnjeg prirasta drva

	Prirast t/km ²	Godišnji prirast 10 ⁹ t/god.	Energija prirasta 10 ⁹ t ekv. ugljena/god.
OUN ¹	470	13,2	5,6
CNEMA ²	700	19,6	8,3
Sevette ³	280	7,8	3,3

¹ OUN = Organizacija ujedinjenih naroda

² CNEMA = Centre national d'étude du mécanisme agricole

³ Sevette = Sevette, P., Géographie et économie comparées de l'énergie, Grenoble 1974

Prema tome, prirast drva djelovanjem prirodne fotosinteze predstavlja vrlo velik izvor energije, koji može uz racionalno iskorištavanje pomoći razvoju nerazvijenih područja. Teško je, međutim, zamisliti da bi — i pored vrlo velikih količina energije — energetska iskorištavanja drva moglo imati znatniji utjecaj na opskrbu energijom u budućnosti. Upotreba drva u gradskim aglomeracijama zahtijevala bi transport drva na velike udaljenosti, što bi tražilo znatne količine kvalitetnijih oblika energije (tekućih goriva), pa bi to najvjerojatnije negativno utjecalo na opskrbljenost energijom. Drugi je put za energetska iskorištavanje drva njegovo rasplinjavanje. Da bi postrojenja za rasplinjavanje bila ekonomična, moraju imati velik proizvodni kapacitet (za preradu najmanje $400 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ drva godišnje), što zahtijeva velik transport drva.

Danas se u svijetu oko $900 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ drva troši kao primarni oblik energije, što odgovara potrošnji od oko $300 \cdot 10^6 \text{ t}$ ekv. ugljena ili oko 3,6% od ukupno utrošenih oblika energije. Za energetske potrebe troši se manje od polovice posjećenog drva, a ostalo se upotrebljava kao sirovina u industriji.

8.3. Biljni i životinjski otpaci

Prema procjeni FAO, danas ima na svijetu oko $1800 \cdot 10^6$ tona poljoprivrednih otpadaka. Ta je procjena nepotpuna, pogotovo s obzirom na povrtlarske kulture, na više kultura u nerazvijenim zemljama (kikiriki, kokos, kakaovac i sl.) i na životinjske izmetine. Ako se pretpostavi da postoji proporcionalnost između broja stanovnika i količine poljoprivrednih otpadaka, i ako se pođe od objavljenih podataka za SAD i Francusku, dobiva se da poljoprivredni otpaci iznose oko $5000 \cdot 10^6$ tona godišnje [22]. Prosječna je ogrjevnja moć tih otpadaka 4000 kcal/kg , pa energija tih otpadaka odgovara energiji od $3 \cdot 10^9$ tona ekv. ugljena, naravno uz uvjet da se svi otpaci energetska iskoriste.

Otpaci iz kućanstava u Zapadnoj Evropi iznose 235 kg po stanovniku, a u SAD 1100 kg . Ekstrapolacija podataka na ostale zemlje vrlo je nesigurna, a to pogotovo vrijedi za ogrjevnju moć otpadaka, jer ona ovisi o načinu života stanovnika. Može se procijeniti [22] da energija u otpacima iz kućanstava iznosi oko $340 \cdot 10^6$ tona ekv. ugljena, od čega se samo mali dio danas upotrebljava kao gorivo u elektranama.

Ukupna energija u poljoprivrednim otpacima i otpacima iz kućanstava predstavlja oko 40% od ukupno utrošene energije u svijetu.

Osim spaljivanjem, moguće je te otpatke iskoristiti za proizvodnju tzv. biogasa, plina dobivenog fermentacijom celuloznog materijala u otpacima. Djelovanjem mikroorganizama, u prvoj fazi procesa od većih molekula nastaju manje, stvaraju se neke kiseline. Nakon toga

potpunom ili nepotpunom oksidacijom, a djelovanjem bakterija koje omogućuju metansku fermentaciju, nastaje ugljični dioksid i metan. Smjesa tih plinova može se upotrijebiti kao gorivo u kućanstvu ili industriji. Tako dobiveni plin ima ogrjevnu moć između 4 800 i 6 000 kcal po m³ plina, ovisno o sadržaju metana.

Za proizvodnju biogasa dovoljno je izgraditi rezervoare u koje se dovode životinjski otpaci i u koje se ubacuju poljoprivredni otpaci. Proizvedeni plin sakuplja se na vrhu takvog rezervoara i odvodi se potrošačima.

Takvi se uređaji počinju danas graditi u Nepal u [23], a tokom protekle tri godine u Indiji je izgrađeno 7 000 takvih uređaja [24].

8.4. *Nekomercijalni oblici energije*

Obično se drvo i otpaci smatraju nekomercijalnim oblicima energije. Početkom stoljeća samo su u Evropi i Sjevernoj Americi fosilna goriva bila dominantna kao energetske izvori, dok su se u drugim područjima upotrebljavali gotovo samo spomenuti nekomercijalni oblici energije.

Procjenjuje se da je 1950. godine oko 15% energije u svijetu proizvedeno spaljivanjem drva, biljnih otpadaka i životinjskih izmetina, a udio je tih goriva u opskrbi energijom po kontinentima:

Afrika	51%
Sjeverna Amerika	3%
Srednja Amerika	35%
Južna Amerika	45%
Azija	58%
Evropa	7%
Oceanija	13%

Smatra se da je danas udio nekomercijalnih energetskih izvora u ukupnoj opskrbi energijom samo 4% unatoč tome što gotovo polovica stanovništva u svijetu ovisi o takvim izvorima. U Indiji je [25] npr. u 1971. godini kao gorivo potrošeno 123.10⁶ t ogrjevnog drva, 38.10⁶ t biljnih otpadaka, i 67.10⁶ t životinjskih izmetina.

Treće poglavlje

NEKONVENCIONALNI
PRIMARNI
OBlici ENERGIJE

1. OPĆENITO

Kako je već spomenuto u drugom poglavlju, među nekonvencionalne primarne oblike energije danas se ubrajaju: geotermička energija, energija plime i oseke, energija vjetra, energija morskih valova, neposredno iskorištavanje energije Sunčeva zračenja i fuzija lakih atoma. Neki od tih oblika energije i danas se iskorištavaju, ali je njihov udio u opskrbi energijom tako malen da se mogu smatrati nekonvencionalnim oblicima.

2. GEOTERMIČKA ENERGIJA

Geotermička energija može se smatrati fosilnom nuklearnom energijom; ona je energija polaganog prirodnog raspadanja radioaktivnih elemenata (u prvom redu urana, torija i kalija) koji se nalaze u Zemljinj kori. Geotermička energija nije neiscrpna, ali su njezine količine tako velike, pogotovo kad se računa s energijom akumuliranom u vrućim suhim stijenama, da se — s obzirom na potrebe čovječanstva — može smatrati takvom. Ona bi mogla, ako se pokaže da je to iskorištavanje tehnički ostvarivo i ako se razvije adekvatna tehnologija, osigurati opskrbu čovječanstva energijom u toku veoma dugog razdoblja u budućnosti.

Temperatura na površini Zemlje ovisi u najvećoj mjeri o zračenju Sunca. Utjecaj toga zračenja opaža se samo na najgornjem dijelu Zemljine kore, i to samo do dubine od oko 30 m. Na toj dubini vlada konstantna temperatura, a ona se povisuje s povećanjem dubine. Tem-

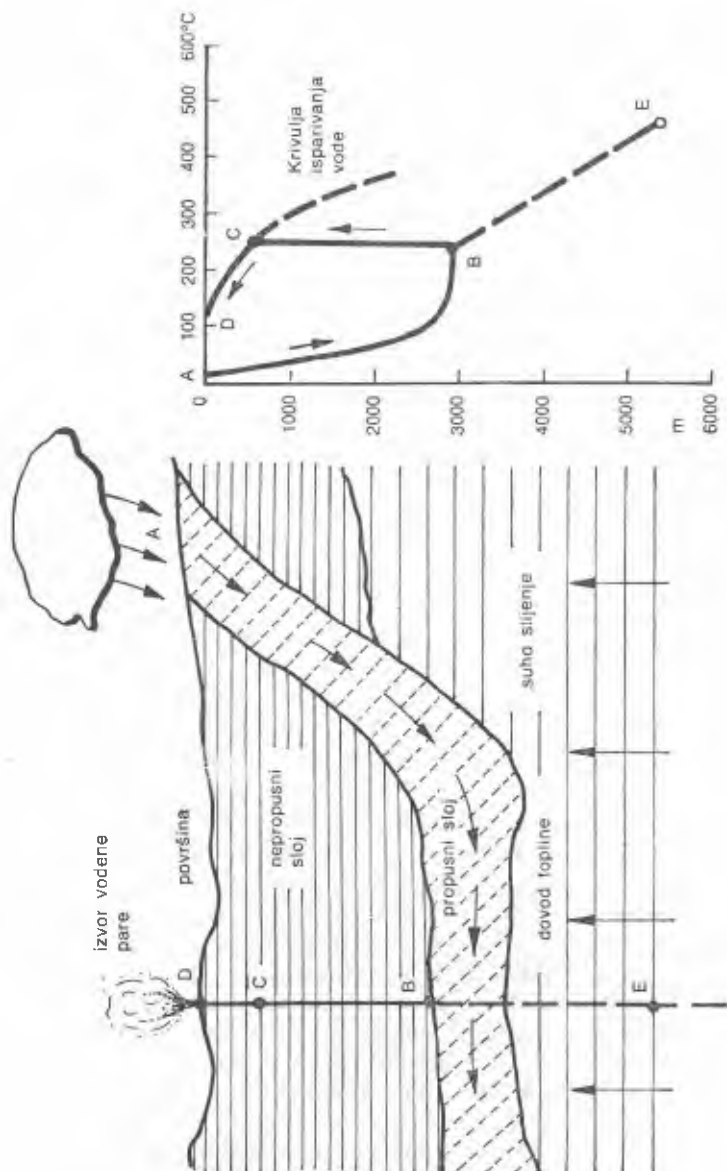
peraturni gradijent, povišenje temperature po km, neposredno uz površinu tla iznosi oko $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, ali on postaje sve manji što je udaljenost od površine veća (tabl. 3.1). Prema današnjem saznanju, temperatura u središtu Zemlje iznosi oko 6000°C (središte je udaljeno od površine oko 6 370 km).

Povišenje temperatura s dubinom posljedica je toplinskog strujanja koje trajno teče od unutrašnjosti Zemlje prema površini. U područjima gdje nema transporta topline konvekcijom pomoću vode ili vodene pare, već samo provođenjem topline kroz stijene, na površinu se dovodi toplota od oko $1,3 \text{ kcal}/\text{m}^2$ ($5,4 \text{ kJ}/\text{m}^2$) dnevno, što odgovara energiji 0,18 g ekv. ugljena po m^2 dnevno. Pojava topline na površini kao posljedica samog provođenja različita je u pojedinim područjima i kreće se od 0,8 do $1,8 \text{ kcal}/\text{m}^2$ dnevno. Računa se da je potrebno 100 milijuna godina da toplota koja se nalazi u Zemljinoj kori do dubine od 100 km stigne na površinu djelovanjem provođenja. Iako se radi o vrlo velikoj energiji koja sama od sebe dopire do površine (računajući samo s površinom kontinenta, na površinu se dovodi energija koja odgovara oko 62 milijarde tona ekvivalentnog ugljena, a to je oko 8 puta više nego potrošnja energije u svijetu u 1974. godini), ona se ne može iskoristiti jer je gustoća energije vrlo mala i jer je temperatura praktički jednaka temperaturi okoline. Kad se, dakle, govori o iskorištavanju geotermičke energije, ne misli se na energiju koja dopire provođenjem topline, nego na energiju koja je akumulirana u stijenama Zemljine kore, što je bilo moguće zbog vrlo male vodljivosti tih stijena.

Prirodno provođenje topline nije, dakle dovoljno za praktično iskorištavanje geotermičke energije, pa je potrebno iskoristiti ili prirodnu cirkulaciju vode ili stvoriti uvjete za takvu cirkulaciju. Voda se, naime, dovodi s površine u dublje slojeve, u njima se ugrije i tako ugrijana ponovno se pojavljuje na površini.

S obzirom na termodinamičke i hidrološke karakteristike, valja razlikovati četiri grupe geotermičkih energetskih izvora: hidrogeotermička energija izvora vruće vode, hidrogeotermička energija izvora vodene pare, energija vrućih i suhih stijena (petrotermička energija) i hidrogeotermička energija vrele vode u velikim dubinama.

Voda koja se pojavljuje u izvorima vruće vode ili vodene pare dospjela je u dublje slojeve s površine kroz vodopropusne slojeve (sl. 3.1). Prolaženjem kroz te slojeve na većim dubinama, ona se ugrije preuzimajući toplinu akumuliranu u stijenama i toplinu koja se dovodi iz većih dubina. Temperatura vode odgovara temperaturi okolnih stijena i dostiže do 360°C . Ona se pojavljuje na površini, ako pronade na svom putu otvor kroz gornji nepropusni sloj, odnosno ona će se dovesti na površinu kroz umjetno stvorenu bušotinu. Na putu prema površini voda se postepeno hladi, predavajući toplinu okolnim stijenama, pa njezina temperatura na površini ovisi o dubini propusnog sloja i o stanju



Sl. 3.1. Shematski prikaz geotermičkog sustava s izvorom vodene pare

na putu do površine. U nalazištima vruće vode temperatura raste s dubinom, ali u samom »rezervoaru« ostaje praktički konstantna zbog strujanja i izmjene topline sa stijenama. U nalazištu je voda pod tlakom koji je jednak hidrostatskom tlaku.

Nalazišta u kojima dominira vodena para relativno su rijetka, jer se s povišenjem tlaka povećava temperatura isparavanja. U njima se nalazi zasićena para koja ispunja pore stijena. Smatra se da se u porama nalaze kapljice vode pod tlakom. Temperatura je u nalazištu između 220 i 250°C. Eksploatacija je relativno jednostavna, jer je dovoljno na pogodnom mjestu načiniti bušotinu kroz koju će strujiti para na površinu.

Pretpostavlja se da je u stijenama akumulirano znatno više energije nego što je može preuzeti voda koja struji kroz porozne slojeve. Budući da su u većim dubinama stijene sve manje porozne, te budući da s dubinom raste i temperatura stijena, može se računati da u većim dubinama Zemljine kore postoje velike mase suhih stijena u kojima su akumulirane znatne količine energije. U te stijene ne može prirodnim putem prodrijeti voda s površine, pa one ni ne sudjeluju u stvaranju izvora vruće vode ili vodene pare.

Postoje, osim toga, hidrogeotermički energetske izvori u velikim dubinama. To je voda koja je u ranijim geološkim razdobljima došla pod površinu Zemlje i tamo ostala zatvorena među nepropusnim slojevima. Ona je pod tlakom koji odgovara masi stijena iznad nje. U Meksičkom zaljevu postoje takva nalazišta u kojima vlada tlak od 760 bara (76 MPa). U toj vodi obično se nalazi otopljen metan.

Vruća voda ili vodena para prirodno se pojavljuju na površini u obliku vrućih izvora (termalni izvori) ili izvora vodene pare (gejziri) koji se mogu neposredno iskorištavati. Dotok vruće vode i vodene pare na površinu može se povećati bušenjem na pogodnim mjestima.

Danas, međutim, nije tehnički riješeno iskorištavanje energije akumulirane u suhim stijenama, a niti energije u vodi u velikim dubinama.

Da bi se iskoristila energija akumulirana u suhim stijenama, potrebno je dovoljno duboko ispod površine razdrobiti suho stijenje kako bi se dobila dovoljno velika površina za prijelaz topline između stijena i vode koja se kroz umjetno stvorenu bušotinu dovodi među raspucano stijenje. Ugrijana voda odvodi se kroz drugu bušotinu na površinu i ona se u obliku pare iskorištava za pogon parnih turbina. Tu se pojavljuje problem, kako ostvariti drobljenje stijena u količini koja će biti dovoljna za pogon kroz vijek trajanja termoelektrane (25—30 godina). Proračuni, naime, pokazuju da je dovođenje topline iz neraspucanih stijena u okolišu zdrobljenih komada relativno maleno u odnosu na energiju u zdrobljenim stijenama. Zbog toga se praktički može iskoristiti samo energija akumulirana u zdrobljenim stijenama. To još više potencira problem drobljenja stijena. Neke analize pokazuju da pod-

zemne nuklearne eksplozije snage 30 do 50 kilotona TNT napucavaju i lome stijene u relativno ograničenom području od nekoliko desetaka metara. Zbog toga bi trebalo upotrijebiti nuklearne bombe znatno veće snage, jer se smatra da bi trebalo razdrobiti stijene volumena reda veličine kubnog kilometra; promjer područja razdrobljenosti, naime proporcionalan je trećem korijenu snage. Takva metoda stvaranja razdrobljenih stijena svakako nije poželjna sa stajališta kontrole širenja nuklearnog oružja, ali postoje i druge neizvjesnosti, poglavito s obzirom na seizmičke efekte i na emisiju radioaktivnosti. Treba naglasiti da upotreba konvencionalnih eksploziva za toliki volumen drobljenja ne dolazi u obzir. Postoji mogućnost drobljenja stijena hidrostatskim tlakom. Ako se, naime, u željenoj dubini zatvori bušotina, zatim se napuni vodom i voda se tlači visokotlačnim pumpama (tlak oko 1 000 bara), stijena će se raspuknuti. Kad je jednom pukotina nastala, njezino širenje će se nastaviti i pri manjem tlaku. Takvo dobivanje pukotina je, dakako, izvan područja današnjeg iskustva.

Kad se ostvarilo potrebno drobljenje stijena, ostaje pitanje raspodjele strujanja vode među zdrobljenim stijenama, o čemu ovisi prijelaz topline sa stijena na vodu.

Uz povoljan raspored zdrobljenih stijena, ako bi se osigurao optimalan prijelaz topline, te ako bi se postiglo drobljenje unutar kugle s polumjerom od 1 km, mogla bi se iskorištavanjem geotermičke energije dobiti snaga od oko 100 MW koja bi se mogla iskorištavati 30 godina. Zbog toga danas nema razloga predviđati iole ozbiljniji priнос geotermičke energije suhih stijena u opskrbi energijom.

Računa li se do dubine od 10 km, što je — uz današnju tehnologiju — maksimalna dubina bušenja, energija akumulirana u stijenama iznosi oko 3.10^{23} kcal ili $4.2 \cdot 10^{26}$ t ekv. ugljena (42 milijuna milijarda tona ekv. ugljena). Ta je energija za oko 4 000 puta veća od energije ukupnih rezerva ugljena u svijetu. Energija akumulirana u cijeloj planeti veća je za oko 3 000 puta od energije u gornjem sloju debljine 10 km.

Upotrebljivost energije ovisi, međutim, o temperaturi, pa je interesantna procjena prema temperaturama (tabl. 3.2). Ta se procjena [30] osniva na podacima o temperaturnim gradijentima, a odnosi se na gornji sloj do dubine od 3 km. Te su rezerve geotermičke energije znatno manje nego kad se računa do dubine od 10 km. Ipak su te količine vrlo velike jer su oko 140 puta veće od energije u ukupnim rezervama ugljena. Podaci na tabl. 3.2. pokazuju, osim toga, da najveći dio nosilaca geotermičke energije ima temperature niže od 100°C (oko 88%), a tek mali dio ih je s temperaturom višom od 150°C (oko 3%). Tako određene količine geotermičke energije znatno su veće od onih s kojima se danas računa u pojedinim zemljama. U tabl. 3.3. navedeni su podaci dobiveni iz odgovora pojedinih zemalja ili iz podataka iz literature. Vidi se da tako određene rezerve geotermičke energije iznose

Tabl. 3.1.

Porast temperature s dubinom ispod površine tla

Dubina km	Predalpsko područje		Alpsko područje	
	Temper. gradijent °C/km	Temperatura °C	Temper. gradijent °C/km	Temperatura °C
10	18	220	22	250
20	12	360	18	450
50	10	690	11	860

Tabl. 3.2.

Rezerve geotermičke energije (10^{18} kcal) — rezultati proračuna (30)

	100°C	100—150°C	150—250°C	250°C	Ukupno
Afrika	1240	79	17	2	1 338
Južna Amerika	1100	195	55	0,3	1 350
Sjeverna Amerika	1700	285	76	5	2 066
Srednja Amerika	40	21	7	0,4	69
Azija	1790	190	50	3	2 033
Istočna Evropa	1600	60	15	1	1 676
Zapadna Evropa	360	17	5	0,3	382
Oceanija	780	62	41	2	885
Svijet (10^{18} kcal)	8610	909	266	14	9 799
Svijet (10^{12} ekv. uglj.)	1230	130	38	2	1 400

Tabl. 3.3.

Rezerve geotermičke energije (10^{18} kcal) — podaci ankete

Afrika	—
Južna Amerika	0,2
Sjeverna Amerika	406
Srednja Amerika	—
Azija	0,0
Istočna Evropa	13
Zapadna Evropa	86
Oceanija	0,0
Svijet	505
Svijet (10^{12} ekv. uglj.)	72

tek 5% od energije dobivene proračunom. To ukazuje da su podaci za pojedine zemlje manjkavi i da se istraživanjima rezerva takve energije nije do sada poklanjala veća pažnja.

Dok se ne pronade pogodno tehničko rješenje za energetska iskorištavanje energije akumulirane u suhim stijenama i hidrogeotermičke energije u velikim dubinama, kao energetski izvor dolazi u obzir samo hidrogeotermička energija koja se pojavljuje na manjim dubinama. Taj dio geotermičke energije — iskoristiva energija na tabl. 3.4 — prema procjeni u [30] iznosi nešto više od 7% ukupne geotermičke energije do dubine od 3 km. Taj je postotak vjerojatno još manji kad se računa s iskorištavanjem geotermičke energije do dubine od 10 km.

Tabl. 3.4.

Iskorištena geotermička energija (10^{18} kcal)

	Rezerve	Iskoristivo za proizvodnju električne energije	Iskoristivo za grijanje
100°C	8610	—	620
100—150°C	909	—	64
150—250°C	266	4	16
250°C	14	0,2	0,8
Ukupno	9799	4,2	701

Tabl. 3.5.

Mogući razvoj izgradnje geotermičkih elektrana (prema rezervama geotermičke energije)

	Energetski potencijal 10^3 TWh	Moguća snaga elektrana (GW = 10^6 kW)		
		1985.	2000.	2020.
Alfrika	79	14	41	82
Južna Amerika	228	40	117	231
Sjeverna Amerika	201	35	106	212
Srednja Amerika	15	3	8	16
Azija	201	34	100	200
Istočna Evropa	63	11	33	65
Zapadna Evropa	15	3	8	15
Oceanija	166	30	90	179
	968	170	503	1000

Velik dio izvora vruće vode ili vodene pare ima preniske temperature za proizvodnju vodene pare takvih karakteristika koje su potrebne za proizvodnju električne energije, pa se takva geotermička energija može upotrijebiti za grijanje prostorija, za neke tehnološke procese u industriji, za grijanje staklenika u poljoprivredi, za rekreaciju i sl. Ona se, osim toga, može iskoristiti u neposrednoj blizini nalazišta, jer je transport vruće vode na veće daljine vrlo skup, a skupčan je i s gubicima energije. Računa se, dakle, da je samo mali dio od ukupne iskoristive geotermičke energije upotrebljiv za proizvodnju električne energije (tabl. 3.4). I pored toga, iskorištavanjem geotermičke energije moglo bi se proizvesti oko 1.10^6 TWh (miliјum milijarda kWh — tabl. 3.5), što je 150 puta više od današnje svjetske proizvodnje električne energije. S tolikom energijom mogla bi se izgraditi termoelektrana snage oko 1 400 GW, ako se računa s iskorištavanjem raspoložive energije u toku 100 godina. U tabl. 3.5. navedena je procjena mogućeg razvoja geotermičkih termoelektrana na temelju iskoristive geotermičke energije za proizvodnju električne energije.

Te mogućnosti izgradnje geotermičkih termoelektrana najvjerojatnije neće biti ostvarene, ako se sudi prema danas poznatim planovima (tabl. 3.6). Prema tim planovima, do kraja stoljeća iskoristilo bi se oko 7% od potencijalnih mogućnosti.

Ni planovi razvoja iskorištavanja geotermičke energije za druge namjene nisu opsežniji (tabl. 3.7). Prema danas poznatim planovima, do 2000. godine iskoristit će se samo mali dio geotermičke energije. Ako se, naime, računa s trajanjem iskorištavanja od 100 godina, u 2000. godini bit će iskorišteno 6 do 8% od potencijalnih mogućnosti.

Industrijska eksploatacija vrućih izvora započinje 1818. godine kad je izgrađeno postrojenje za ekstrakciju borne kiseline iz vrućih izvora u Italiji, u području Larderello u blizini Siene. U početku su za ispa-

Tabl. 3.6.

Predviđeni razvoj geotermičkih elektrana (GW = 10^6 kW) — podaci ankete

	1985.	2000.
Afrika	0,3	0,06—0,09
Južna Amerika	—	—
Sjeverna Amerika	6,4—7,4	21,5—40,0
Srednja Amerika	0,07—0,08	0,3—0,4
Azija	0,4	1,0
Istočna Evropa	—	—
Zapadna Evropa	0,8	1,0
Oceanija	2,8—2,9	52,1—57,6
Svijet	10,5—11,6	76,0—100,1

Tabl. 3.7.

Procjena iskorištenja geotermičke energije za druge namjene osim za proizvodnju električne energije (10^{15} kcal) — rezultati ankete

	1985.	2000.	2020.
Afrika	—	—	—
Južna Amerika	—	—	—
Sjeverna Amerika	30	110—250	700—1480
Srednja Amerika	150	250	440
Azija	24	...	...
Istočna Evropa	0	8—80	15—40
Zapadna Evropa	9	70	90
Oceanija	3	4	7
Svijet	216	442—594	1252—2057
Svijet (10^9 t ekv. uglj.)	31	63—85	179—294

ravanje preostale vode upotrebljavani drvo i ugljen, a 1827. godine u tu je svrhu upotrijebljena para iz vrućih izvora. Za povećanje eksploatacije pare u početku je bušeno samo u blizini prirodnih izvora, ali je kasnije područje bušenja prošireno na cijelu zonu. Prva elektrana snage 250 kW stavljena je u pogon 1913. godine, i to je početak iskorištavanja geotermičke energije za proizvodnju električne energije. Do 1935. godine proizvodnja električne energije nije se znatnije povećavala zbog nepoznavanja tehnologije bušenja i zbog poteškoća u iskorištavanju pare. Tek 1930. godine počinju intenzivnija bušenja i nakon toga brzo raste proizvodnja električne energije (sl. 3.2.). Danas u području Larderello postoji 14 termoelektrana ukupne snage 398,6 MW. Osim toga od 1972. godine iskorištavaju se za proizvodnju električne energije nalazišta u području Monte Amiata (oko 50 km jugoistočno od Siene). Tamo su danas postavljena tri agregata ukupne snage 22 MW.

U području Larderello prosječni temperaturni gradijent iznosi $30^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, a iznimno se pojavljuje i $100^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; u području Monte Amiata, površine oko 400 km^2 , temperaturni gradijent je nešto veći od $10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, ali ima i zona s gradijentom od $50^{\circ}/100\text{ m}$.

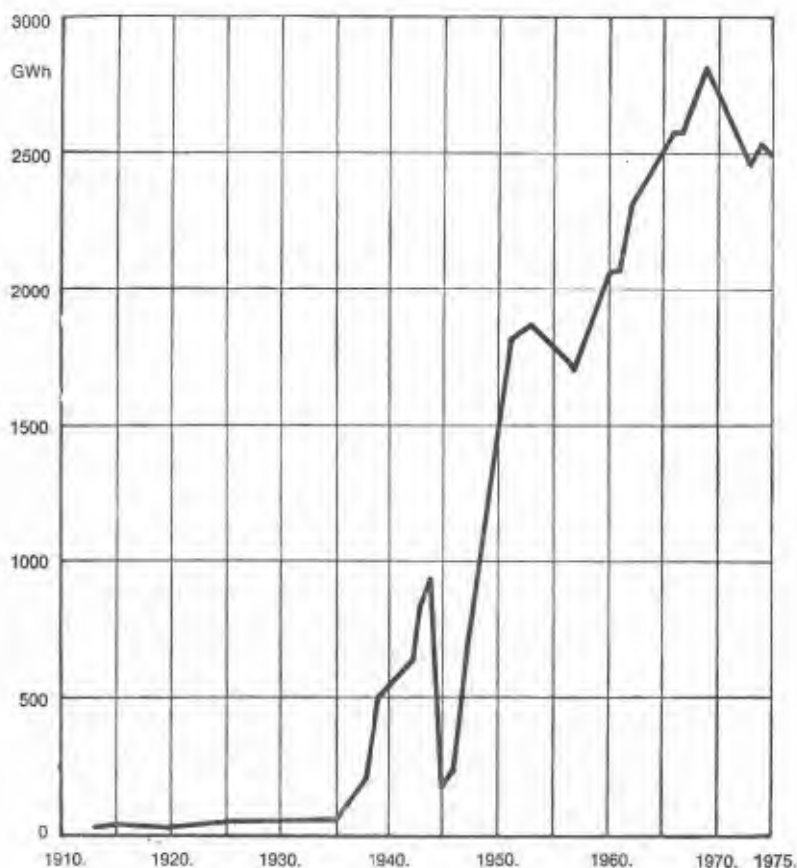
U području Larderello temperatura pare iznosi od 150 do 260°C , a na izlazu iz bušotine pojavljuje se kao pregrijana para. Na većini bušotina temperatura pare raste s trajanjem eksploatacije (sl. 3.3). Jedino na rubu područja temperatura opada, što je vjerojatno posljedica dotjecanja vode s površine. Maksimalni dotok kroz jednu bušotinu iznosi 300 t/h , ali obično je između 50 i 100 t/h . S trajanjem eksploatacije dotok opada, i to naglo u prvom razdoblju (sl. 3.3). To je opadanje naročito brzo u zonama koje su znatno vodopropusne, gdje se

inicijalno nalaze veće količine vode. Nakon nekog vremena dotok se stabilizira na nekoj nižoj vrijednosti. Smanjenjem dotoka smanjuje se tlak zatvorene bušotine, što utječe na tlak pare za vrijeme eksploatacije. Zabilježen je maksimalni tlak od 60 bara.

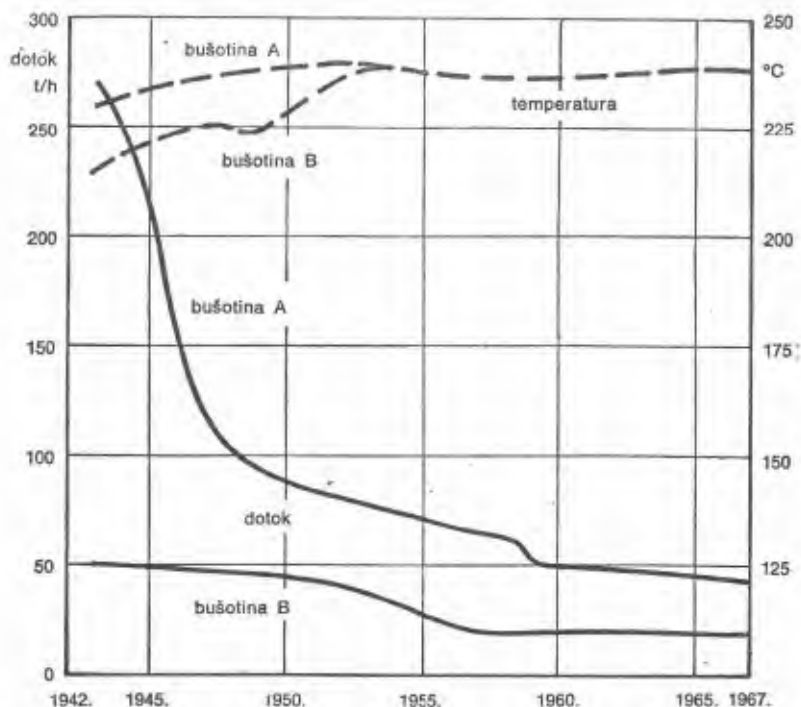
U području Monte Amiata temperature pare su niže — na jednom nalazištu oko 140°C, a na drugom između 160 i 195°C.

Postrojenja se opskrbljuju parom iz oko 200 bušotina koje dosežu dubinu i do 1 000 m.

Na izlazu iz bušotine pojavljuje se smjesa vodene pare i plinova. Maseni udio plinova iznosi između 1 i 20%. Prosječni je udio oko 5%. U tim plinovima najviše je ugljik-dioksida, ali ima i sumpora, vodika, metana, dušika itd. Tako mali postotak plinova posljedica je pojave pri-



Sl. 3.2. Proizvodnja geotermičkih termoelektrana u Italiji

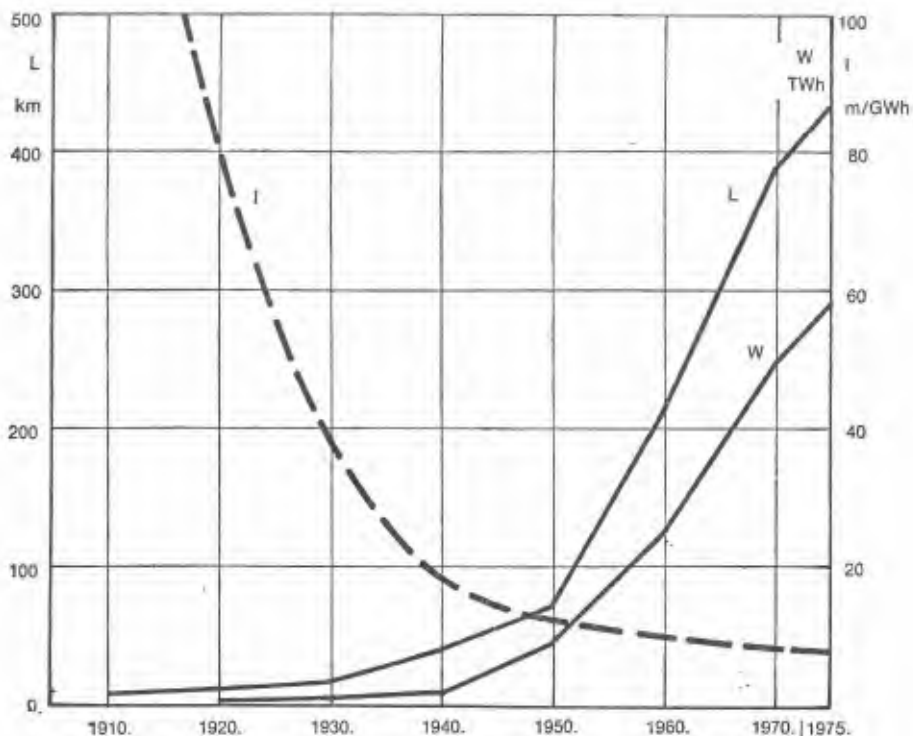


Sl. 3.3. Dotok i temperatura vodene pare dviju bušotina u području Larderello (Italija) u ovisnosti o trajanju eksploatacije

rodnih izvora koji su spriječili veće sakupljanje plinova. To potvrđuje i sadržaj plinova u području nekoliko kilometara udaljenom od prirodnih izvora. Tamo, naime, na izlazu iz bušotine, smjesa pare i plinova sadrži i 98% plinova. U području eksploatacije Larderello sadržaj plinova, međutim, ostaje konstantan za cijelo vrijeme eksploatacije. Nasuprot tome, u području Monte Amiata — gdje nema prirodnih izvora — u početku eksploatacije sadržaj plinova iznosi oko 90%, ali s vremenom opada, da bi se stabilizirao na vrijednosti od oko 9%.

Sadržaj plinova u pari diktira i izvedbu parnih turbina, jer se plinovi na normalnim temperaturama ne mogu kondenzirati.

Povećanje proizvodnje električne energije pomoću geotermičke energije moguće je stvaranjem bušotina koje pospešuju strujanje pare prema površini. U Italiji, koja ima najveću tradiciju u iskorištavanju geotermičke energije, do kraja 1975. godine izbušeno je oko 430 km bušotina i ostvarena proizvodnja električne energije od oko 59 milijarda kWh, što znači da je za svaki milijun kWh trebalo izbušiti 7,3 metra (sl. 3.4).



Sl. 3.4. Kumulativna duljina (L), kumulativna proizvodnja u geotermičkim elektranama (W) i specifične duljine bušotina (I m/GWh) u Italiji

Dugo vremena su samo u Italiji iskorištavani vrući izvori za proizvodnju električne energije. Tek 1958. godine izgrađeno je prvo takvo postrojenje u Novom Zelandu, a 1960. u SAD. Nakon toga su građene takve elektrane u Japanu, Meksiku, SSSR-u i na Islandu. U 1975. godini snaga je takvih postrojenja u svijetu iznosila 1 312 MW (tabl. 3.8), s godišnjom proizvodnjom od 7 918 GWh (tabl. 3.9). Instalirana snaga geotermičkih elektrana predstavlja tek 0,08% od instalirane snage svih elektrana, a njihova proizvodnja 0,1% od svjetske proizvodnje električne energije.

Kako je već spomenuto, temperatura vrućih izvora mora biti dovoljno visoka (najmanje 130°C da bi se postigao koliko-toliko povoljan stupanj djelovanja), ako se želi upotrijebiti vodena para iz tih izvora neposredno za pogon parne turbine. Pokušava se, međutim, da se u istu svrhu upotrijebi i energija vrućih izvora nižih temperatura, što se može postići zagrijavanjem druge tekućine (npr. izobutana ili freona)

koja ima temperaturu vrelišta nižu od vode. Tada se u posebnom izmjenjivaču topline vrelom vodom zagrijava npr. freon, koji isparava na toj temperaturi i njegovim se parama tjera parna turbina. Takva postrojenja, međutim, traže još veliki tehnološki razvoj. Pokusno postrojenje snage 680 kW izgrađeno je u SSSR-u (postrojenje Paratunka s freonom kao sekundarnim medijem, temperatura vruće vode 81,5°C).

Premda su vrući izvori visokih temperatura rijetki, postoji vrlo velik broj toplih izvora koji se danas iskorištavaju u medicinske svrhe. Ne postoji, međutim, mnogo primjera njihovog energetskog iskorištavanja. Od 1930. godine zagrijava se oko polovica svih stanova na Islandu vodom iz vrućih izvora koji pri izlasku na površinu imaju temperaturu od 98 do 146°C. U tu svrhu izgrađena je vrelovodna mreža između izvora i naselja. Postignuti su vrlo povoljni rezultati u smanjenju gu-

Tabl. 3.8.

Instalirane snage geotermičkih termoelektrana (MW)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Italija	259	246	287	339	402	406	421	421
SAD	—	—	12	27	84	441	559	559
Novi Zeland	—	—	69	192	192	192	192	192
Japan	—	—	—	—	31	50	54	55
Meksiko	—	—	—	—	4	75	75	75
SSSR	—	—	—	—	5 ¹	5 ¹	5 ¹	5 ¹
Island	—	—	—	—	2	2	2	3
Salvador	—	—	—	—	—	—	30	60
Svijet	259	246	368	558	720	1171	1338	1370

¹ Procjena

Tabl. 3.9.

Proizvodnja geotermičkih termoelektrana (GWh)

	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Italija	1278	1859	2104	2576	2725	2502	2483	2523
SAD	—	—	33	189	525	2453	3246	3616
Novi Zeland	—	—	384	1255	1185	1249	1272	1233
Japan	—	—	—	—	243	312	378	400
Meksiko	—	—	—	—	1	474	491	550
SSSR	—	—	—	—	30 ¹	30 ¹	30 ¹	30 ¹
Island	—	—	—	—	12	8	18	19
Salvador	—	—	—	—	—	—	72	280
Svijet	1278	1859	2521	4020	4721	7028	7990	8651

¹ Procjena

bitaka u transportu vrele vode; pad temperature u pogodno izoliranim vrelovodu dugom 18 km iznosi samo 5°C pri polaznoj temperaturi vode od 81°C.

U Panonskoj nizini pojavljuju se visoke vrijednosti temperaturnog gradijenta (oko 70°C/km). U Mađarskoj je pronađen podzemni rezervoar vruće vode velikih mogućnosti. Na tom području načinjeno je preko 100 bušotina dubine do 2 000 m, a svaka bušotina daje u minuti prosječno oko 1 500 litara vrele vode od 70 do 90°C. Ta se voda upotrebljava za grijanje stanova, termalnih kupališta, staklenika za uzgoj povrća i cvijeća, te — nakon sniženja temperature — za navodnjavanje poljoprivrednih površina.

Kod Meluna, u pariškoj oblasti, pronađen je na dubini od 1 800 m rezervoar vruće vode s temperaturom od oko 70°C koji se proteže na površini od oko 7 000 km². Energija akumulirana u tom rezervoaru veća je od energije koja se može proizvesti u svim elektranama u Francuskoj. U toku je eksperimentalni pogon grijanja 2 000 stanova vodom iz tog rezervoara.

U Jugoslaviji postoji mnogo vrućih izvora, ali je njihova temperatura između 20 i 80°C, a dominiraju izvori temperature 30 do 35°C. Stotinjak izvora iskorištava se za balneološke i rekreativne svrhe. Samo na nekoliko mjesta upotrebljava se vruća voda za grijanje staklenika za uzgoj povrća i cvijeća.

U nas nije do sada posebno istraživana mogućnost iskorištavanja geotermičke energije, ali postoje mnogobrojni podaci na temelju bušotina načinjenih pri istraživanju nafte i plina. Na temelju tih podataka mogu se procijeniti srednji temperaturni gradijenti na pojedinim područjima i to:

Panonsko područje	50°C/km
Dinaridi	15°C/km
Jadransko podmorje	25°C/km
Crna Gora	13°C/km

Područje Srbije i Makedonije nije detaljnije istraživano.

Maksimalna temperatura utvrđena u sjevernom dijelu Panonskog područja doseže do 150°C na dubini od oko 3 000 m. Rezultati dosadašnjih istraživanja upućuju na zaključak da bi se u Panonskom području moglo očekivati postojanje vrućih voda s temperaturom do 120°C na dubinama 2 000 do 2 500 m. To znači da u tom području ne treba očekivati vruće vode s višim temperaturama, pa ne treba ni očekivati mogućnost proizvodnje električne energije pomoću geotermičke energije.

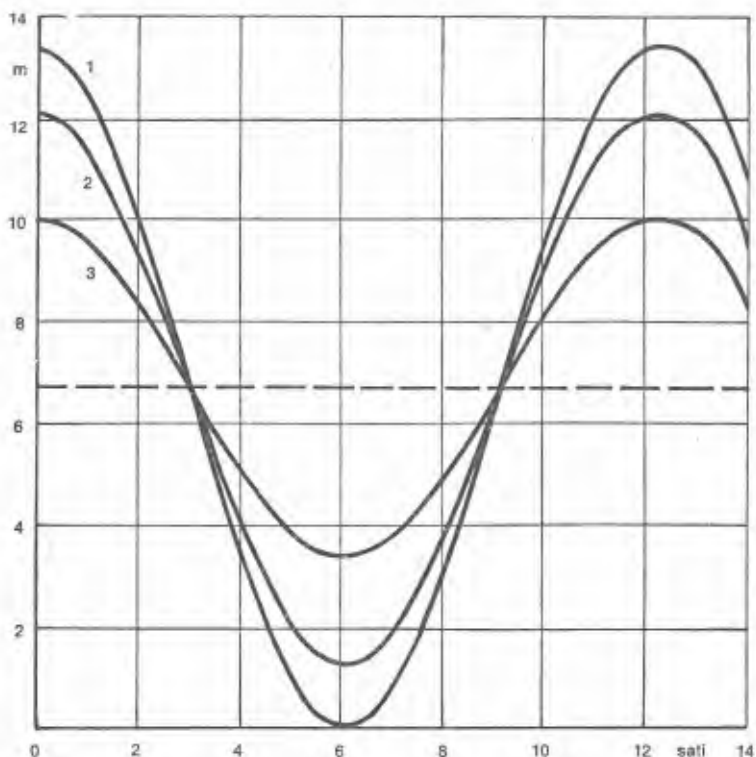
Iako iskorištavanje hidrogeotermičke energije može pridonijeti opskrbi stanovništva energijom, pogotovo u neposrednoj blizini izvora vruće vode, tek iskorištavanje energije akumulirane u suhim stijenama može bitno utjecati na energetske bilancu u svjetskim razmjerima.

3. ENERGIJA PLIME I OSEKE

Plima i oseka posljedica su Sunčeva i Mjesečeva djelovanja na vodu u oceanima. Amplituda plime i oseke ovisi o položaju obaju spomenutih nebeskih tijela. Amplituda i frekvencija različite su na pojedinim obalama. Na obalama Atlantskog oceana vremenski razmak između dviije plime iznosi 12 sati i 25 minuta, na Tahitima (otočje u Tihom oceanu) iznosi točno 12 sati, a na obalama Indokine pojavljuje se samo jedna plima u 24 sata. Amplituda plime u Sredozemnom moru samo je desetak centimetara, u Baltičkom moru nekoliko decimetara, u Atlantskom, Indijskom i Tihom oceanu prosječno 6 do 8 m. Na pojedinim mjestima u zapadnoj Francuskoj, u jugozapadnom dijelu Velike Britanije i istočnoj obali Sjeverne Amerike amplituda plime dostiže i više od 12 m.

Amplituda plime nije uvijek jednaka. Ona se mijenja u dosta širokom rasponu, ovisno o međusobnom položaju Sunca, Mjeseca i Zemlje, što uvjetuje oscilacije među kojima se obično razlikuje: vrlo visoka plima (krivulja 1 na sl. 3.5), koja se pojavljuje za vrijeme proljetnog i jesenskog ekvinocija, visoka plima (krivulja 2) koja se pojavljuje dva puta u toku 29,5 dana jedan ili dva dana nakon mladog i punog mjeseca, te niska plima (krivulja 3) koja se također pojavljuje dva puta u toku 29,5 dana jedan ili dva dana nakon prve i druge Mjesečeve četvrti. Oscilacije plime i oseke prikazane na sl. 3.5. pojavljuju se u zaljevu La Rance kod mjesta St. Malo u sjevernoj Francuskoj.

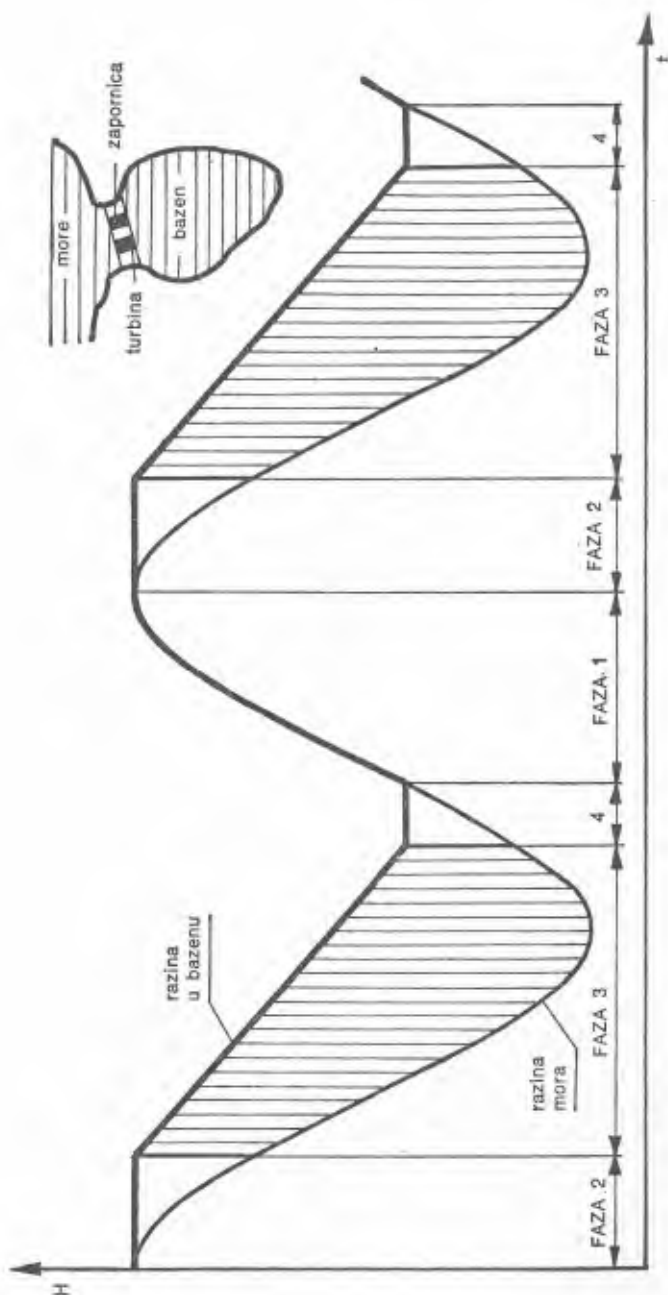
Procjenjuje se da ukupna energija plime i oseke iznosi $23 \cdot 10^3$ TWh što odgovara energiji od $3,2 \cdot 10^9$ tona ekv. ugljena godišnje. Računa li se s iskorištavanjem u toku 100 godina, plima i oseka predstavljaju energiju koja je jednaka oko 3% energije u ukupnim svjetskim rezervama ugljena. Trećina te energije gubi se u plitkim morima, a srednja amplituda plime na oceanskim širinama manja je od jednog metra,



Sl. 3.5. Plima i oseka u zaljevu La Rance kod mjesta St. Malo u sjevernoj Francuskoj; 1 vrlo visoka plima, 2 visoka plima, 3 niska plima

što je nedovoljno za ekonomično iskorištavanje. Prema tome, kako će se još vidjeti, za praktično energetska iskorištavanje dolazi u obzir samo mali dio ukupne energije plime i oseke.

Za energetska iskorištavanje plime i oseke potrebno je odabrati pogodno mjesto na obali na kojoj je amplituda plime velika i gdje postoji mogućnost izolacije dijela morske površine, tj. stvaranja akumulacijskog bazena izgradnjom pregrade. Najjednostavniji način iskorištavanja postiže se ugradnjom turbine koje rade samo u jednom smjeru strujanja vode (sl. 3.6). Tada se osim turbine u pregradu ugrađuje i zapornica. Razlikuju se četiri faze pogona. U prvoj (faza pogona 1 na sl. 3.6) za vrijeme plime bazen se puni, uz otvorenu zapornicu, sve dok se ne postigne maksimalna kota bazena, koja odgovara maksimumu plime. Tada se zatvara zapornica. Voda u bazenu ostaje na maksimalnoj koti, a razina mora opada (faza 2). Kad je razina mora toliko niska



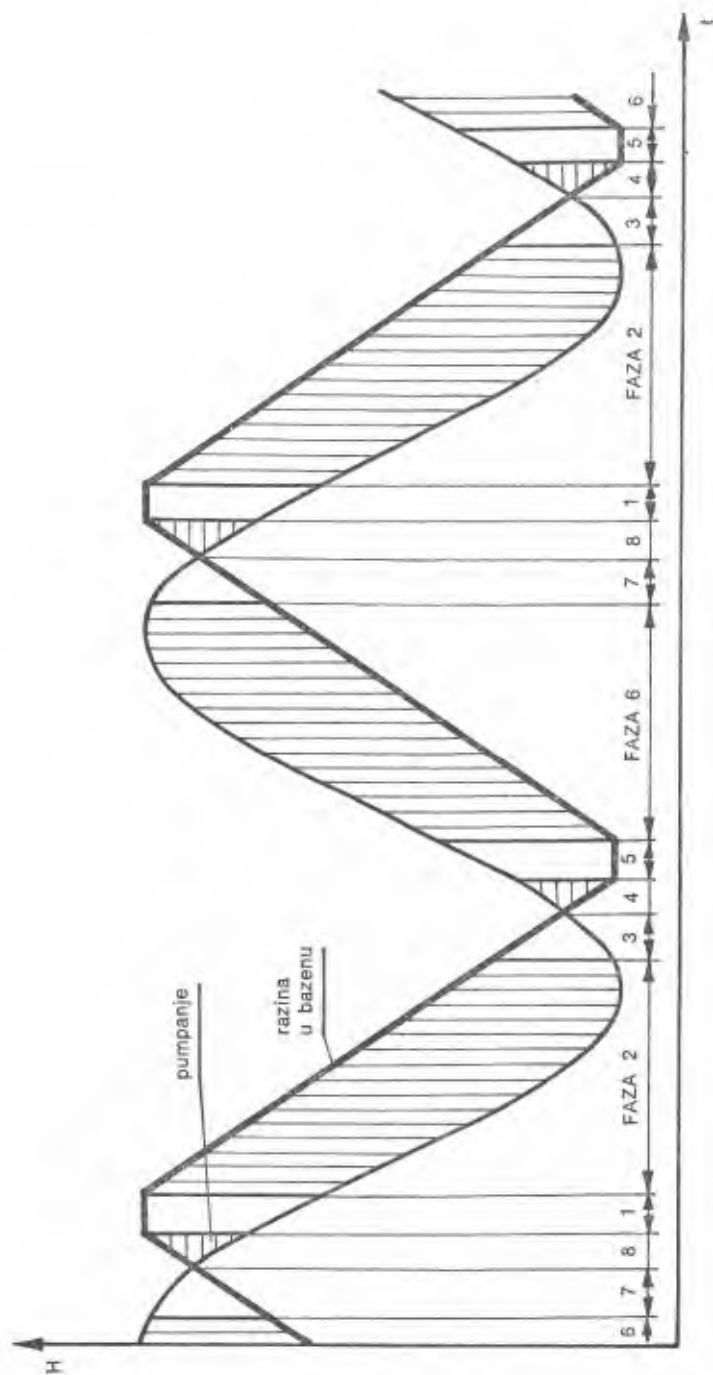
Sl. 3.6. Iskorištavanje energije plime i oseke s turbinom koja radi u jednom smjeru strujanja vode

da postoji dovoljna rezlika kotā za pogon turbine, stavlja se turbina u pogon (faza 3), pa se tako potencijalna energija vode akumulirane u bazenu pretvara u mehaničku, a ova u električnu energiju, na padu koji je jednak razlici između razine vode u bazenu i morske razine. Propuštanjem vode kroz turbinu snizuje se razina vode u bazenu sve dok razlika razinā postigne određeni minimum uz koji turbina još može raditi. Kad je taj minimum postignut, obustavlja se pogon turbine i prelazi se u četvrtu fazu pogona (faza 4), za vrijeme koje razina u bazenu ostaje konstantna. Kad se razine mora i vode u bazenu izjednače, otvara se zapornica i počinje se puniti bazen, što odgovara prvoj fazi pogona.

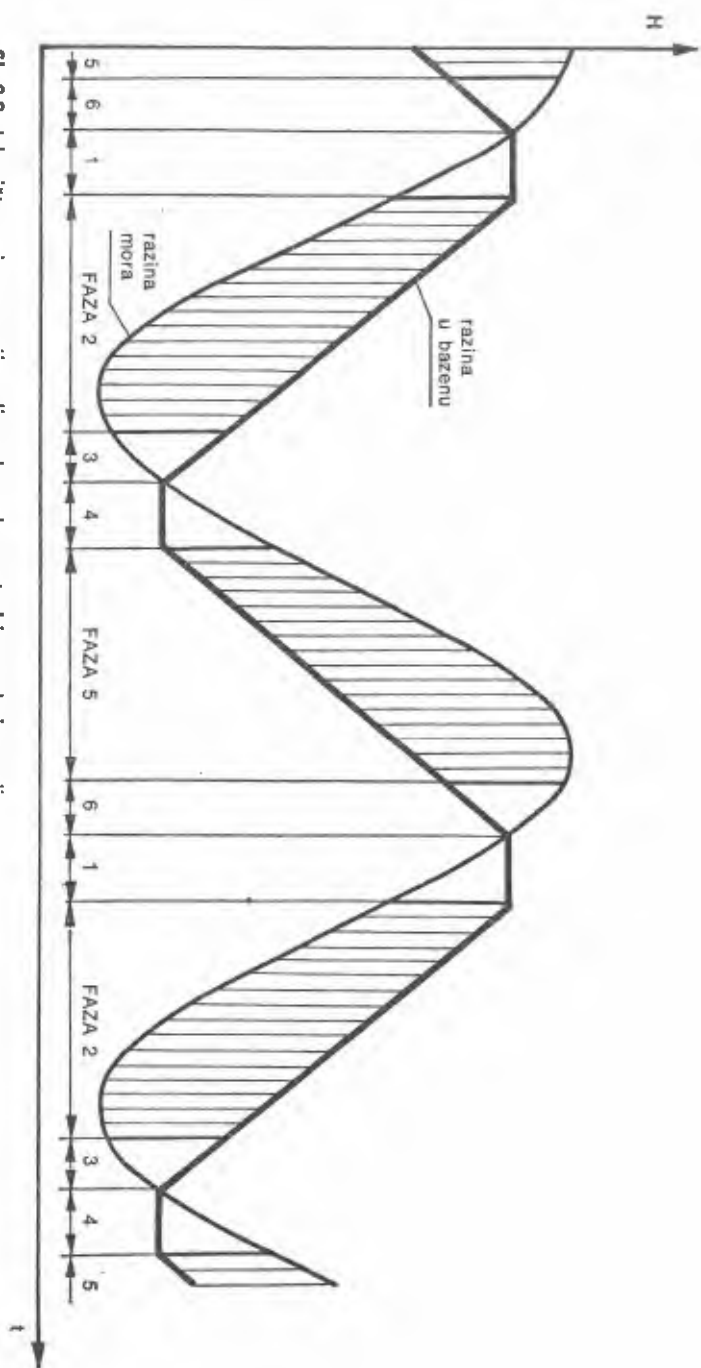
Voda akumulirana u bazenu može se iskorištavati uz veće ili manje padove, odnosno uz polaganije ili brže sniženje razine u bazenu. Ako se kroz turbine propušta manje vode, u bazenu će se održavati viša razina, pa će se voda iskorištavati pri većim padovima. S povećanjem protoka kroz turbinu razina vode će brže opadati, a to će imati za posljedicu manju razliku između razine vode u bazenu i razine otvorenog mora. Iskorištena potencijalna energija vode ovisi o produktu pada i količine vode koja protječe kroz turbinu, pa je moguće odrediti maksimalnu količinu energije koja se može postići, a time i optimalni način pogona. Za pogon prikazan na sl. 3.6. trajanje pogona turbine (samo faza 3) iznosi oko 45 % vremena trajanja jedne periode plime i oseke. Ostalo vrijeme turbina je izvan pogona, pa se za to vrijeme ne proizvodi ni električna energija.

Da bi se produžilo vrijeme pogona, može se postaviti turbina koja radi u oba smjera strujanja vode: iz bazena i u bazen. Tada se može ostvariti način pogona prikazan na sl. 3.7. pa turbina radi za vrijeme faze 2 i faze 5. Za pražnjenja bazena (faza 2) iste su prilike kao na sl. 3.6. Turbina se zaustavlja kad se postigne minimalni pad, ali se bazen nakon toga i dalje prazni (faza 3 na sl. 3.7) kroz zapornicu, da bi se u njemu postigla što niža razina, kako bi se ostvario što veći pad za fazu pogona kad se prijeđe na smjer od mora prema bazenu. Zapornica se zatvara kad se izjednače razine bazena i mora. Pri zatvorenoj zapornici razina u bazenu ostaje konstantna (faza 4), sve dok se ne postigne dovoljno velika razlika razinā koja će osigurati dovoljan pad. Nakon toga stavlja se turbina u pogon, ali sa smjerom strujanja od mora prema bazenu (faza 5). Turbina se zaustavlja kad se postigne minimalni pad, a nakon toga se otvara zapornica da bi se dalje punio akumulacijski bazen (faza 6). Kad se razine izjednače zapornica se zatvara i tada počinje prva faza pogona.

Usporedba načina pogona na sl. 3.6 (turbina s jednim smjerom strujanja) i na sl. 3.7 (turbina s dva smjera strujanja) pokazuje da se u drugom slučaju voda eksploatira na nižem padu jer je razina vode u bazenu niža. Zbog toga se smanjuje efekt postavljanja turbine s dva smjera strujanja. Ako bi se, naime, željela postići ona kota u bazenu



Sl. 3.7. Iskorištavanje energije plime i oseke s turbinom koja radi u dva smjera strujanja vode



Sl. 3.8. Iskorišćavanje energije plime i oseke s turbinom koja radi kao turbina i pumpa u oba smjera strujanja vode

koja odgovara amplitudi plime ili amplitudi oseke, moralo bi se skratiti trajanje pogona turbine, što bi smanjilo iskorištenje potencijalne energije vode.

Da bi se akumulirana voda iskorištavala na najvećem mogućem padu, potrebno je konstruirati stroj tako da može raditi ne samo kao turbina u dva smjera strujanja nego i kao pumpa, bilo za prebacivanje vode iz bazena u more, bilo iz mora u bazen. Takva turbina-pumpa omogućuje da se realizira pogon prikazan na sl. 3.8. Faze pogona 1 do 3 odgovaraju istoimenim fazama na sl. 3.7. Ali kad se zatvori zapor-nica, počinje pumpanje iz bazena u more (faza 4 na sl. 3.8), da bi se što više snizila razina u bazenu. Kad je postignuta kota koja odgovara najnižoj razini mora, obustavlja se pumpanje, pa bazen ostaje na konstantnoj razini (faza 5) sve dok ne počne pogon turbine. Faze 5 do 7 odgovaraju fazama 4 do 6 na sl. 3.7. Kad se izjednače razine bazena i mora na kraju faze 7, ponovno počinje pumpanje, ali tada iz mora u bazen. Potrebna energija za pumpanje uzima se iz drugih elektrana. Korist od takvog postupka ogleda se u činjenici da se voda podiže pumpanjem na znatno manju visinu od one na kojoj će se upotrijebiti. Tako se bolje iskorištava potencijalna energija plime i oseke.

Kakav se god, međutim, odabere način iskorištavanja energije plime i oseke, ne može se postići pogon bez prekida ni konstantna snaga. To pokazuje da je nemoguća izolirana proizvodnja električne energije na toj osnovi. Potrebna je, naime, suradnja s drugim postrojenjima za proizvodnju električne energije. Takve se elektrane moraju uključiti u elektroenergetski sistem u kojemu ostale elektrane imaju ukupnu snagu nekoliko desetaka puta veću od snage tih elektrana.

Maksimalna energija jednog ciklusa plime i oseke izračunava se iz relacije

$$W_{\max} = \rho g H^2 S \quad (3.1)$$

u kojoj je ρ gustoća vode ($\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$), g ubrzanje Zemljine teže ($g = 9,81\text{ m/s}^2$), H srednja amplituda plime u m, a S površina bazena u m^2 . Energija iz relacije (3.1) dobiva se u Ws . Srednja snaga dobiva se dijeljenjem energije u Ws s trajanjem ciklusa plime i oseke u sekundama. Iz relacije (3.1), kako je već spomenuto, dobiva se teorijski maksimalno moguća energija, uz pretpostavku da se sva akumulirana voda iskorištava na padu koji odgovara amplitudi plime. To se, naravno, u stvarnosti ne može postići, jer za vrijeme pogona raste razina mora uz istodobno smanjivanje razine vode u bazenu i jer postoje gubici u turbini.

U tabl. 3.10. navedeni su podaci o proučavanim postrojenjima za iskorištavanje energije plime i oseke. Sigurno je moguće zamisliti velik broj takvih postrojenja na obalama s velikom amplitudom plime,

Tabl. 3.10.

Pregled proučavanih postrojenja za iskorištavanje energije plime i oseke

	Srednja amplituda H m	Površina bazena 5 km ²	Teorijska energija W GWh/god.
Sjeverna Amerika			
Passamaquoddy	5,52	262	15 800
Cobscook	5,5	106	6 330
Annapolis	6,4	83	6 710
Minas-Cobequid	10,7	777	175 000
Amhers Point	10,7	10	2 250
Shepody	9,8	117	22 100
Cumberland	10,1	73	14 700
Petitcodiac	10,7	31	6 960
Memramcook	10,7	23	5 170
Južna Amerika			
San Jose	5,9	750	51 500
Evropa			
Severn	9,8	70	14 700
Aber-Bengit	5,2	2,9	158
Aber-Wrach	5,0	1,1	53
Arguenon et Lancieux	8,4	28	3 910
Freney	7,4	12	1 300
La Rance	8,4	22	3 060
Rotheneuf	8,0	1,1	140
Mont Saint Michel	8,4	610	85 100
Somme	6,5	49	4 090
SSSR			
Kislogubskaja	2,37	2	22
Lunebovskij zaljev	4,20	70	2 430
Bijelo more	5,65	2000	126 000
Zaljev Mesen	6,60	140	12 000
Koreja			
Garorim	7,9	108	7 490
Cheonsu	7,0	192	24 830
Seosan	7,9	48	4 460
Anhung	7,6	30	1 670
Namyang	9,5	34	3 380
Shihang	9,5	37	4 600
Inchon	9,5	181	15 030
Ukupno			620 943

ali — da bi imalo izgleda da takva postrojenja budu i ekonomski opravdana — trebalo bi da se ispune dva zahtjeva: da brana kojom se pregrađuje dio mora ne bude suviše duga i da dubina na mjestu brane ne bude prevelika. Te zahtjeve teško je ispuniti, pa je to i razlog što ne postoji veći broj povoljnih lokacija za izgradnju takvih postrojenja. Sva postrojenja u Sjevernoj Americi, koja su u tabl. 3.10, nalaze se u zaljevu Fundy. Godišnja količina energije koja se može dobiti iz postrojenja u tabl. 3.10, uz pretpostavku potpunog iskorištenja, iznosi nešto više od 600 TWh godišnje, što je oko jedne desetine električne energije proizvedene u svijetu u 1974. godini. Stvarna električna energija koja bi se mogla proizvesti iz tih postrojenja, međutim, znatno je manja, jer se uz najpovoljnije dimenzioniranje postrojenja može iskoristiti tek oko 25% teorijske proizvodnje.

Danas su u pogonu samo dvije elektrane koje iskorištavaju energiju plime i oseke. Jedna od njih je u Francuskoj. To je La Rance, za koju vrijede krivulje oscilacija plime i oseke na sl. 3.5. Stavljena je u pogon 1966. godine, a ima 24 turbine koje mogu raditi i kao pumpe za oba smjera strujanja vode (način pogona prikazan na sl. 3.8). Ukupna snaga turbina je 240 MW. Godišnja proizvodnja iznosi 608 GWh, a 64 GWh je potrebno za pumpanje. Maksimalni je protok svake turbine $260 \text{ m}^3/\text{s}$ ili $6\,240 \text{ m}^3/\text{s}$ za cijelu elektranu. Iskoristivi volumen baze na iznosi $184 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, površina mu je 22 km^2 , a duljina oko 20 km. Duljina brane je 720 m.

Ako se usporedi moguća proizvodnja u elektrani La Rance (608 GWh) i teorijska mogućnost proizvodnje u istom postrojenju (3 060 GWh, tabl. 3.8), pokazuje se da je iskorištenje energije tek nešto manje od 20%. Kad bi se povećala snaga elektrane na 320 MW, bilo bi moguće postići iskorištenje od 24% teorijske mogućnosti proizvodnje.

Drugo postrojenje izgrađeno je u Sovjetskom Savezu. To je Kislogubskaja elektrana na sjevernoj obali Sibira. U pogonu je od 1968. godine, a snaga joj je 800 kW. Izgrađena je kao pokusno postrojenje.

Od projekata drugih postrojenja najpoznatije je Passamaquoddy, na graničnom području između SAD i Kanade. Prvi put je projektirano 1930. godine. Revidirani projekt iz 1958. predviđao je ugradnju 30 turbina snage po 10 MW za pogon samo u jednom smjeru strujanja. U takvom postrojenju moglo bi se proizvoditi 1 843 GWh, pa se postiže iskorištenje od samo 11,7% teorijske mogućnosti proizvodnje. U 1961. godini ponovno je razmatrana opravdanost izgradnje toga postrojenja, i tada je predloženo da se instalirana snaga poveća od 300 MW na 1 000 MW, što bi izazvalo smanjenje proizvodnje na 1 318 GWh (8,3% iskorištenja teorijske mogućnosti proizvodnje). To je učinjeno s namjerom da se omogućiti proizvodnja električne energije u kratkom vremenu. Pokazalo se, međutim, da takvo postrojenje nije ekonomično, pa se privremeno odustalo od njegove gradnje. Prema nekim informacijama, gradnja toga postrojenja mogla bi početi nakon 1980. godine.

Vrlo veliki investicijski troškovi govore protiv izgradnje elektra-
na na osnovi plime i oseke. Osim toga, na poznatim povoljnim lokaci-
jama ukupna moguća proizvodnja energije predstavlja samo margi-
nalnu količinu potrebne energije. Najveći dio energije plime i oseke
nije praktički iskoristiv (djelovanje plime na otvorenim morima) ili
njezino iskorištavanje nije ekonomično (danas se, naime, smatra da
nema nikakvog opravdanja graditi postrojenja tamo gdje je amplituda
plime manja od 2 m).

4. ENERGIJA VJETRA

Strujanje zraka, koje se obično naziva vjetar, posljedica je različitog zagrijavanja atmosfere i površine Zemlje djelovanjem Sunčeva zračenja. U krajnjoj liniji, energija Sunčeva zračenja na taj se način transformira u kinetičku energiju zraka. Giba li se neka masa m brzinom v , ta masa ima kinetičku energiju koja je jednaka polovici produkta mase i kvadrata brzine. Prema tome, energija vjetra je kinetička energija.

Ako je V volumen zraka (m^3/s) koji struji u jedinici vremena, a ρ gustoća zraka (kg/m^3), produkt volumena i gustoće predstavlja masu zraka koja struji u jedinici vremena (kg/s). Snaga toga strujanja iznosi

$$P_s = \frac{1}{2} V \rho v^2 \quad \text{W} \quad (3.2)$$

Snaga se dobiva u vatima, što je u skladu s relacijama u prvom poglavlju. Gustoća zraka iznosi približno $1,25 \text{ kg}/\text{m}^3$ (za prilike u blizini površine Zemlje). Budući da se volumen može prikazati kao produkt površine A (m^2) i brzine strujanja v (m/s), izraz za snagu može se napisati u obliku

$$P_s = 0,625 A v^3 \quad \text{W} \quad (3.3)$$

Ukupna kinetička snaga zraka ne može se iskoristiti jer zrak mora dalje strujati da bi načinio mjesto onome koji dolazi. Moguće je, dakle, iskorištavati energiju koja odgovara razlici brzina. Za pretvorbu kinetičke energije zraka u mehaničku energiju služe zračne turbine (vjetrenjače). Njihov pogon omogućuje razlika kinetičkih energija zraka

koje odgovaraju brzinama ispred i iza vjetrenjače. Može se pokazati da se maksimalna iskoristiva snaga dobiva ako je brzina iza vjetrenjače 1/3 brzine ispred nje. Zbog toga se može iskoristiti maksimalno 16/27 kinetičke energije vjetra, pa je iskoristiva snaga vjetra, koja se može nazvati teorijskom snagom, određena relacijom

$$P_o = 0,371 A v^3 \quad (3.4)$$

Zbog toga je poznavanje brzine vjetra od osnovne važnosti za ocjenu mogućnosti energetskog iskorištavanja vjetra.

U meteorologiji se upotrebljava Beaufortova ljestvica (tabl. 3.11) s brojčanim oznakama od 0 do 12. Brzina se vjetra brzo mijenja, pa u istom danu ona može biti i vrlo velika i vrlo mala. Brzina vjetra mjeri se u meteorološkim stanicama. Na osnovi tih kontinuiranih mjerenja mogu se odrediti frekvencije brzine vjetra. U tabl. 3.12. nalaze se podaci o frekvencijama brzina vjetra za četiri meteorološke stanice u Jugoslaviji. Frekvencije su navedene u postocima. Tako vjetar u Beogradu puše brzinom od 3,0 do 3,9 m/s prosječno 17,28% vremena godišnje, odnosno 1 514 sati godišnje jer godina ima 8 760 sati, u Dubrovniku 20,80%, u Vršcu 8,60%, a na Zlatiboru 12,86%. Podaci u tabl. 3.12. odnose se na 1975. i 1976. godinu, pa bi se oni sigurno nešto izmijenili kad bi se analiza frekvencija proširila na dulje vremensko razdoblje. Iz podataka o frekvencijama mogu se nacrtati krivulje vjerojatnosti pojave brzina vjetra (sl. 3.9). Iz takvih krivulja mogu se dobro ocijeniti karakteristike vjetra na pojedinim mjestima. Tako se, npr., brzine

Tabl. 3.11.

Beaufortova skala jakosti vjetra

Jakost vjetra	Brzina vjetra	
	m/s	km/h
0	do 1,3	do 4,68
1	1,4—2,7	5,04—9,72
2	2,8—4,5	10,1 — 16,2
3	4,6—6,6	16,5 — 23,7
4	6,7—8,9	24,1 — 32,0
5	9,0—11,3	32,4 — 40,7
6	11,4—13,8	41,0 — 49,7
7	13,9—16,4	50,0 — 59,0
8	16,5—19,2	59,4 — 69,1
9	19,3—22,4	69,5 — 80,6
10	22,5—26,0	81,0 — 93,6
11	26,1—30,1	93,9 — 108,0
12	30,2 i više	108,4 i više

Tabl. 3.12.

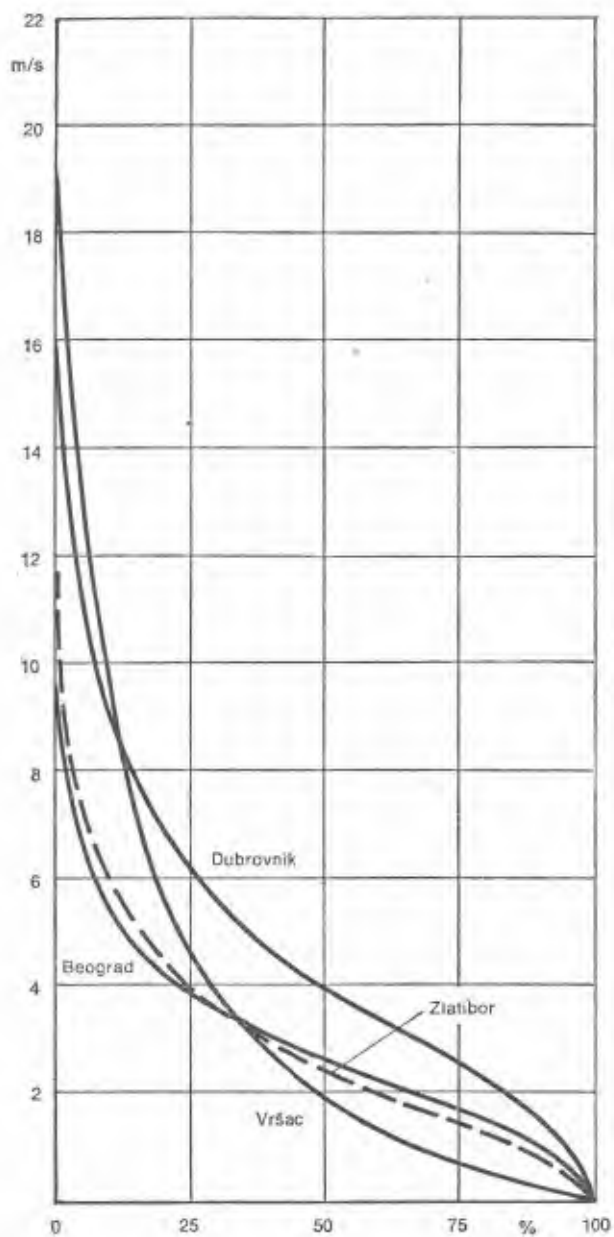
Frekvencija pojava brzine vjetra (%) (prilike u 1975. i 1976. godine)

Brzina m/s	Beograd	Dubrovnik	Vršac	Zlatibor
0,0—0,9	6,52	3,10	38,19	9,40
1,0—1,9	28,68	12,60	11,87	31,94
2,0—2,9	26,01	16,61	13,77	21,59
3,0—3,9	17,28	20,80	8,60	12,86
4,0—4,9	9,30	12,70	5,14	8,48
5,0—5,9	5,07	8,58	4,23	6,42
6,0—6,9	3,44	6,70	3,02	4,21
7,0—7,9	2,11	5,38	2,19	2,15
8,0—8,9	0,92	4,06	1,92	1,23
9,0—9,9	0,38	2,66	1,75	0,65
10,0—10,9	0,10	2,09	1,82	0,49
11,0—11,9	0,05	1,51	1,47	0,21
12,0—12,9	0,06	1,05	1,43	0,13
13,0—13,9	0,02	0,94	1,44	0,09
14,0—14,9	0,03	0,52	1,06	0,06
15,0—15,9	0,02	0,35	0,65	0,04
16,0—16,9	—	0,20	0,62	0,03
17,0—17,9	0,01	0,08	0,51	0,01
18,0—18,9	—	0,04	0,19	—
19,0—19,9	—	0,02	0,07	—
20,0—20,9	—	0,01	0,06	0,01

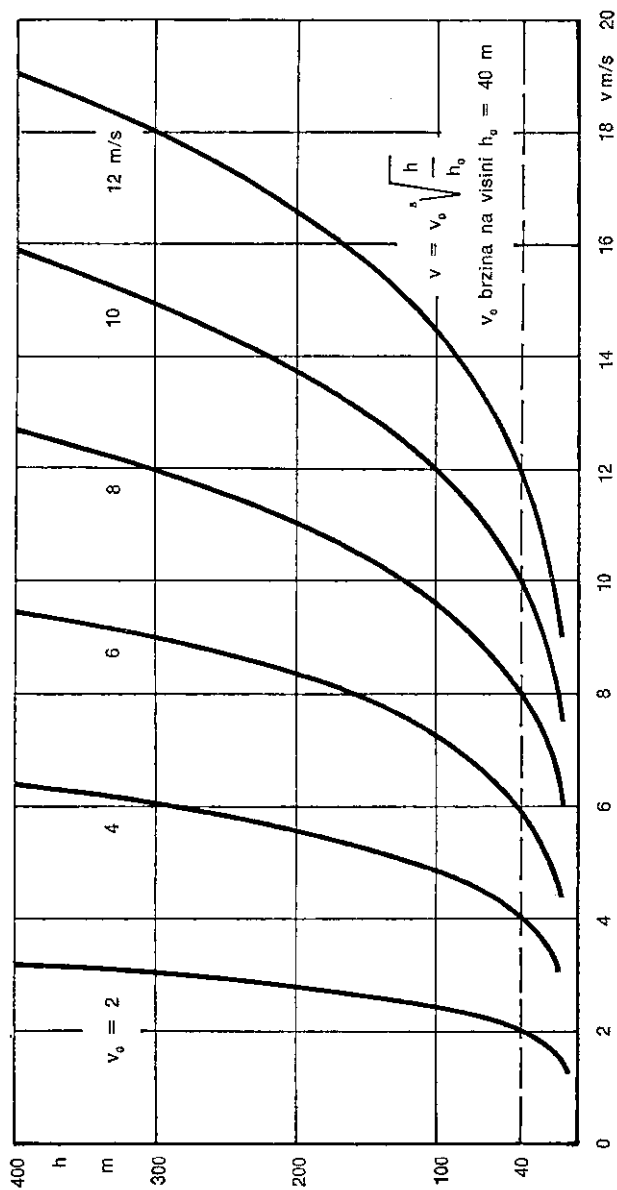
vjetra veće od 6 m/s pojavljuju u Beogradu 7,1% vremena godišnje (622 sata godišnje), u Dubrovniku 25,6% (2 243 sata godišnje), u Vršcu 18,2% (1 594 sata godišnje), a na Zlatiboru 9,3% (815 sati godišnje). Vjetrovi većih brzina vrlo su rijetki u Beogradu i na Zlatiboru, a znatno češći u Dubrovniku i Vršcu. To će imati, kako će se vidjeti, znatnog utjecaja na iskoristivu energiju vjetra.

Brzina vjetra raste s visinom iznad površine tla. Brzina uz površinu tla opada zbog trenja. Može se približno računati da je omjer brzina proporcionalan petom korijenu iz omjera visina nad zemljom. Sl. 3.10. prikazuje ovisnost brzine vjetra o visini iznad površine tla, uzimajući pri tom kao osnovicu brzine na visini od 40 m. Sa v_0 označena je brzina vjetra na toj visini. Zbog toga se i nastoji vjetrenjaču postaviti na što viši stup. Brzine vjetra u meteorološkim stanicama mjere se na visini od oko 10 m.

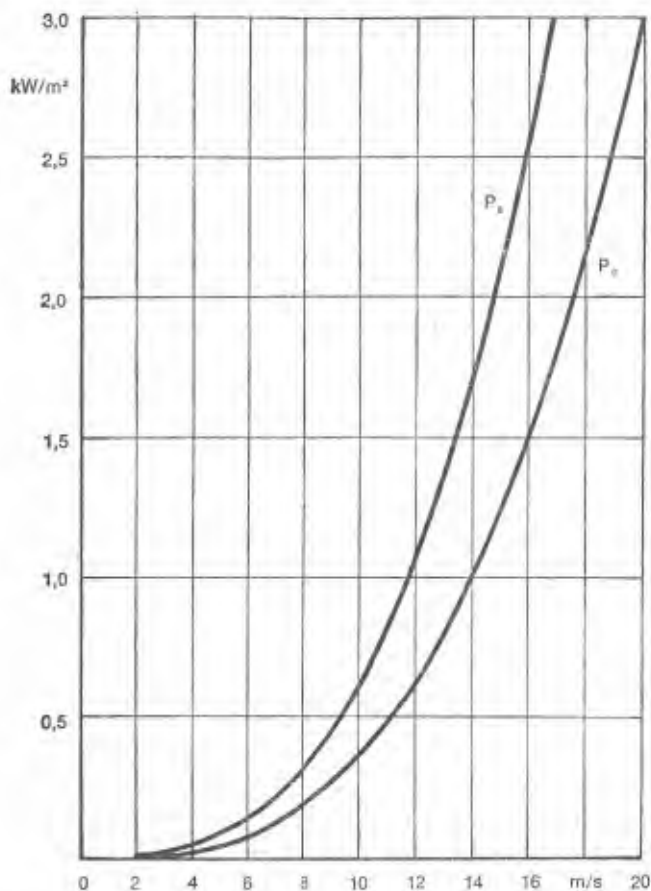
Brzina vjetra mijenja se unutar vrlo širokih granica od tišine do olujnog vjetra, i te promjene mogu nastupiti unutar jednog sata. Promjene snage vjetra još su veće i brže, jer snaga ovisi o trećoj potenciji brzine, što znači da udvostručenje brzine povećava snagu za osam puta. Ovisnost snage P_0 , prema relaciji (3.3), i snage P_s , prema relaciji



Sl. 3.9. Krivulje vjerojatnosti brzine vjetra



Sl. 3.10. Porast brzine zraka ovisno o visini iznad površine tla

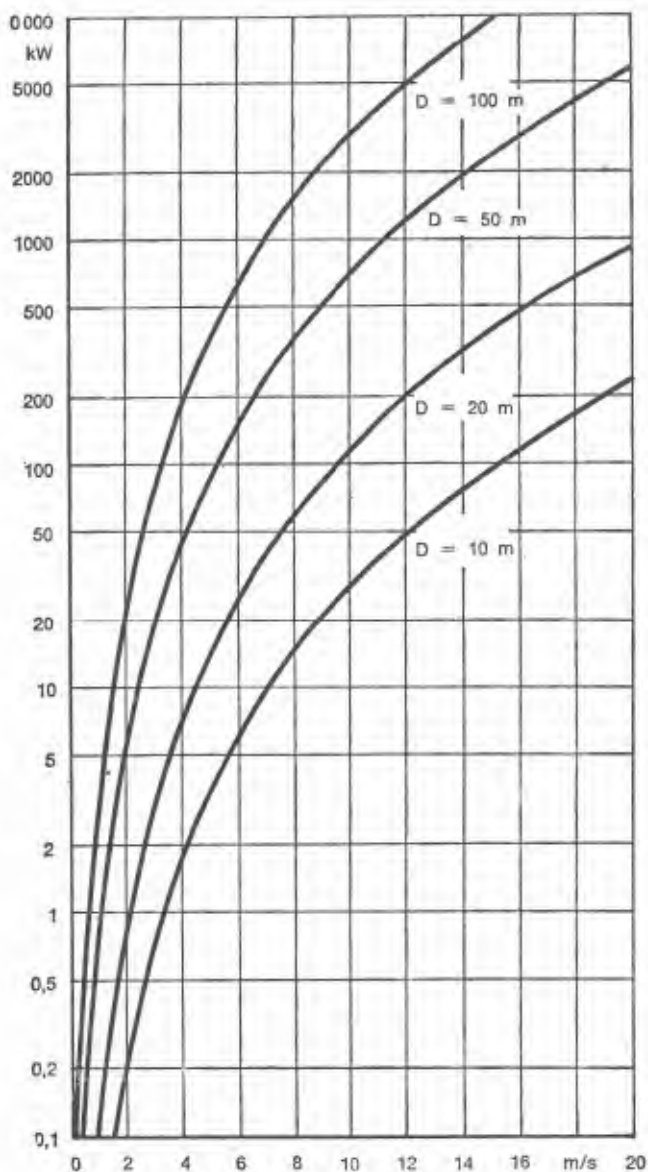


Sl. 3. 11. Specifične snage vjetra po m² ovisno o brzini vjetra

(3.4) o brzini vjetra vidi se na sl. 3.11. Snage su preračunate na površinu od 1 m². Površina u spomenutim formulama označuje površinu kruga što ga opisuju vrhovi krila vjetrenjače. Za male brzine vjetra, prema tome, gustoća je snage vrlo mala. Tako se npr. pri brzini vjetra od 3 m/s može iskoristiti samo 10 W/m², pri brzini od 10 m/s snaga od 371 W/m², da bi pri brzini od 20 m/s, što odgovara olujnom vjetru, snaga iznosila 2 968 W/m².

Ako se površina u formuli (3.4) izrazi pomoću promjera kruga D što ga opisuju krila vjetrenjače, snaga se izračunava iz formule

$$P_s = 0,291 D^2 v^3 W \quad (3.5)$$



Sl. 3.12. Iskoristive snage vjetra ovisno o brzini i o promjeru (D) vjetrenjače

iz koje se može nacrtati dijagram na sl. 3.12. Na njemu je prikazana iskoristiva snaga vjetra za različite promjere vjetrenjača. Tako vjetrenjača promjera 20 m može iskoristiti snagu od 0,93 kW kad je brzina vjetra 2 m/s, snagu od 116,2 kW pri brzini 10 m/s, a snagu 932,4 kW pri brzini od 20 m/s.

Svakako je interesantno pitanje koliko se energije može iskoristiti postavljanjem vjetrenjače na mjestu s poznatim karakteristikama vjetra. Poznavajući frekvenciju pojava brzine vjetra (tabl. 3.12), za svaki interval brzina može se odrediti energija ako se snaga koja odgovara srednjoj brzini pomnoži s brojem sati koji odgovara frekvenciji pojave. Tako se dobiva energija koja se može iskoristiti u svakom intervalu brzina. Podaci o energiji za prilike u četiri promatrane meteorološke stanice nalaze se u tabl. 3.13. U Beogradu najviše se energije može iskoristiti pri brzinama vjetra od 2 do 9 m/s, u Dubrovniku pri brzinama od 6 do 15 m/s, u Vršcu pri brzinama od 8 do 19 m/s, a na

Tabl. 3.13.

Teorijski iskoristiva energija vjetra (kWh/m² god) za neke meteorološke stanice (podaci za 1975. i 1976. godinu)

Brzina m/s	Beograd	Dubrovnik	Vršac	Zlatibor
0,0— 0,9	0,03	0,01	0,15	0,04
1,0— 1,9	3,40	1,38	1,30	3,44
2,0— 2,9	13,59	8,43	6,99	5,29
3,0— 3,9	24,21	28,98	11,98	17,70
4,0— 4,9	24,58	37,63	15,21	25,19
5,0— 5,9	22,90	46,42	22,90	33,33
6,0— 6,9	26,29	59,81	27,00	41,87
7,0— 7,9	27,37	73,67	30,03	32,85
8,0— 8,9	14,35	81,11	38,28	28,94
9,0— 9,9	7,63	74,11	48,67	18,13
10,0—10,9	3,01	78,59	68,29	18,90
11,0—11,9	1,69	74,48	72,79	7,90
12,0—12,9	4,35	66,66	90,58	8,70
13,0—13,9	—	74,85	115,01	9,13
14,0—14,9	—	52,03	105,19	2,26
15,0—15,9	—	42,83	78,75	4,14
16,0—16,9	—	30,00	90,00	—
17,0—17,9	2,0	14,00	90,03	2,00
18,0—18,9	—	7,05	39,93	—
19,0—19,9	—	5,50	16,51	—
20,0—20,9	—	3,20	15,48	3,20
Godišnje	175,38	860,74	985,07	263,01

Zlatiboru pri brzinama od 4 do 9 m/s. Postoje, međutim, vrlo velike razlike prosječne godišnje iskoristive energije. Tako se može iskoristiti godišnje:

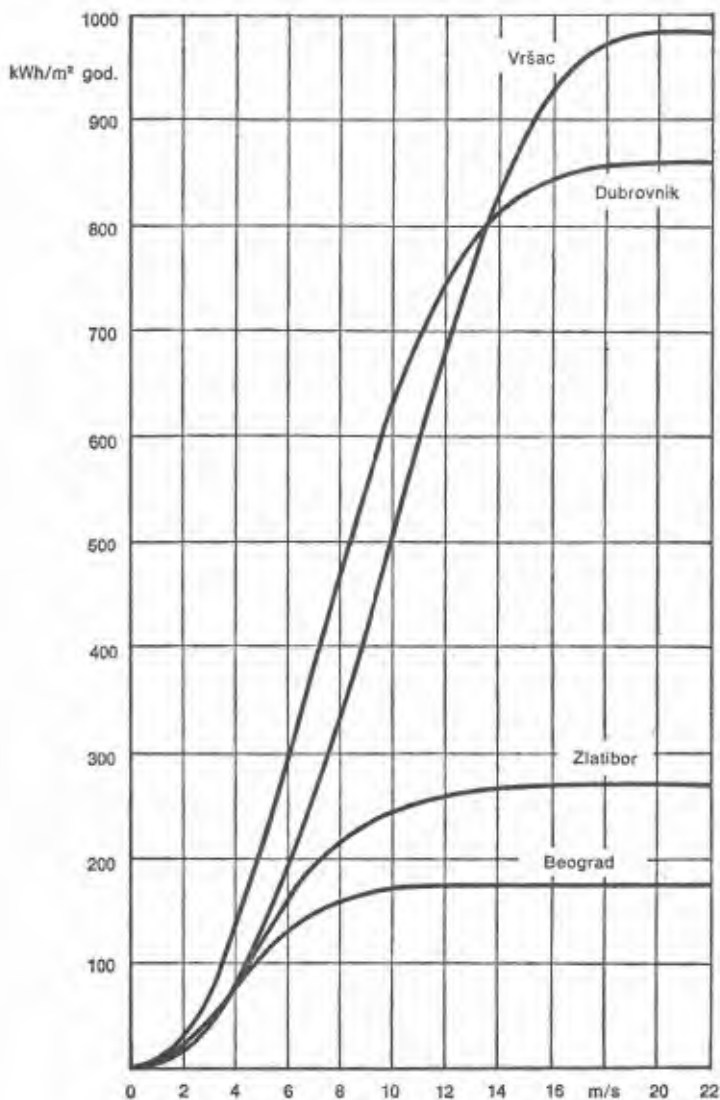
Beograd	175,4 kWh/m ²
Dubrovnik	860,7 kWh/m ²
Vršac	985,1 kWh/m ²
Zlatibor	263,0 kWh/m ²

Iz tih podataka vidi se kako je veliko značenje izbora lokacije vjetrenjača. Naravno da mikrolokacija može imati vrlo veliki utjecaj na energetske karakteristike postrojenja za iskorištavanje energije vjetra, a to pogotovo vrijedi za brdska područja. Zbog toga se na osnovi navedenih podataka ne smije zaključivati o pogodnosti promatranih lokacija. Podaci o tim lokacijama služe samo kao ilustracija energetske karakteristike takvih postrojenja, a nije im svrha uspoređivanje promatranih lokacija.

Iskorištavanje energije vjetra u većem opsegu moguće je samo konačnom transformacijom kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Tada vjetrenjača tjera električni generator. Njegova snaga odabire se prema karakteristikama vjetra, a pri tom se uzimaju u obzir gubici u vjetrenjači i generatoru. O tim gubicima bit će još riječi. Svi podaci o snagama i energijama, međutim, odnose se na snage i energije vjetra definirane relacijom (3.4). Svakako da nema smisla odabrati takvu snagu generatora kojom bi se iskorištavala snaga vjetra i pri najvećim brzinama. Tada bi, naime, snaga generatora bila iskorištena samo nekoliko sati godišnje, a u nekim godinama ni toliko. Stoga tako odabrana snaga ne bi imala ekonomskog opravdanja. Snaga generatora treba, dakle, biti manja od one koja odgovara maksimalnoj snazi vjetra, pa je zbog toga i iskoristiva energija manja od energije izračunate uz pretpostavku iskorištenja i maksimalne brzine vjetra (tabl. 3.13).

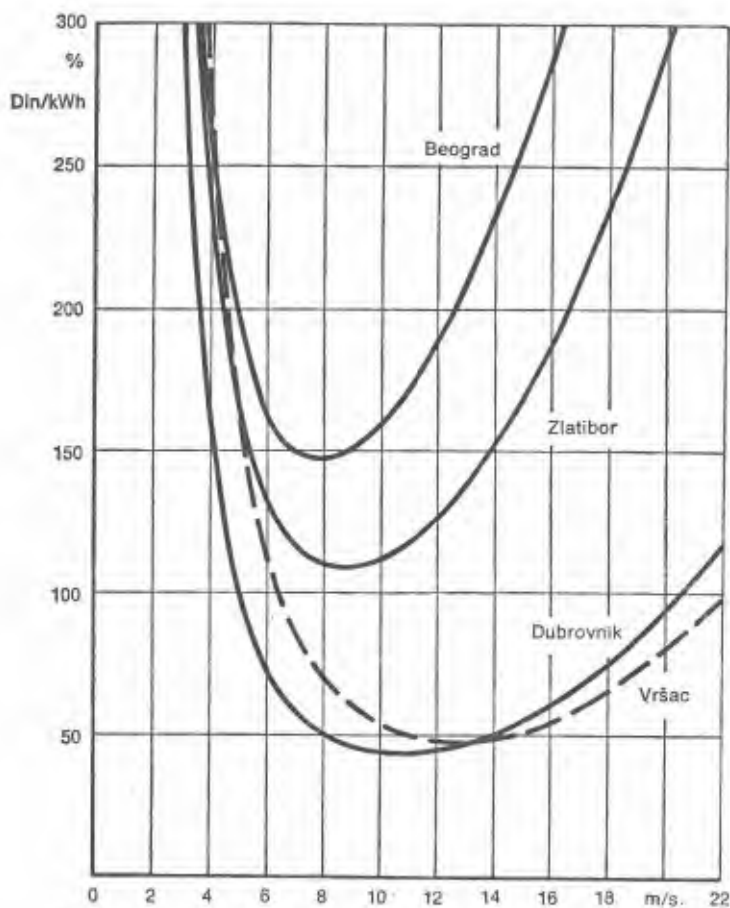
Ako se pođe od brzine vjetra koja se još može iskoristiti u odnosu na odabranu snagu generatora, koja se može nazvati brzinom vjetra za instaliranu snagu postrojenja, može se odrediti iskoristiva energija ovisno o toj brzini (sl. 3.13). Poznavajući tu ovisnost i ovisnost investicija o instaliranoj snazi, lako je odrediti specifične proizvodne troškove ovisne o instaliranoj snazi (sl. 3.14). Treba naglasiti da investicije ne ovise o lokaciji postrojenja, pa je moguća usporedba troškova proizvodnje i bez poznavanja smještaja stupa koji nosi vjetrenjaču. Prema tome, specifični proizvodni troškovi ovise samo o karakteristikama vjetra, odnosno o toku krivulja na sl. 3.13, i o instaliranoj snazi. Iz krivulja na sl. 3.14. može se očitati i brzina vjetra za instaliranu snagu pri kojoj se postižu minimalni proizvodni troškovi. Ta je brzina najmanja za vjetrenjaču na lokaciji Beograd, a najveća za vjetrenjaču na lokaciji Vršac. Podaci se nalaze u tabl. 3.14. Specifični troškovi proizvodnje za optimalnu brzinu međusobno se znatno razlikuju, pa su

troškovi za energiju proizvedenu u postrojenju na lokaciji Beograd otprilike tri puta veći nego na lokaciji Dubrovnik i Vršac, što je posljedica bitno različitih frekvencija brzina vjetra (tabl. 3.12) i vjerojatnosti pojava tih brzina (sl. 3.9).



Sl. 3.13. Godišnja energija ovisno o maksimalno iskoristivoj brzini vjetra

Uz optimalnu brzinu vjetra može se ostvariti 80 do 90% maksimalno moguće proizvodnje energije; maksimalno iskoristive snage vjetra međusobno se znatno razlikuju, $0,815 \text{ kW/m}^2$ u postrojenju u Vršcu, a $0,190 \text{ kW/m}^2$ u Beogradu. I pored toga što je maksimalna snaga odre-



Sl. 3.14. Proizvodna cijena iskoristive energije ovisno o brzini vjetra za instaliranu snagu

đena prema brzini vjetra znatno manjoj od maksimalne, trajanje pogona s maksimalnom snagom vrlo je kratko (80 h/god u Beogradu, a 414 h/god u Dubrovniku), pa je i iskorištenje postrojenja vrlo maleno. Iskorištenje postrojenja određuje se kao omjer između godišnje

iskoristive energije vjetra i one energije koja bi se mogla iskoristiti kad bi postrojenje cijelu godinu radilo s maksimalnom snagom za koju je i izgrađeno. Tako definirano iskorištenje postrojenja iznosi za promatrane lokacije između 9,7% za postrojenje u Beogradu i na Zlatiboru te 16% za postrojenje u Dubrovniku. Prema tome, s obzirom na karakteristike vjetra, iskorištava se oko 10% ili nešto više proizvodnog kapaciteta izgrađenog postrojenja, pa je to osnovni razlog male ekonomičnosti postrojenja za iskorištavanje energije vjetra. Zbog toga je i prosječna snaga takvih postrojenja niska (od 0,019 kW/m² u Beogradu do 0,087 kW/m² u Vršcu).

Tako nepovoljne energetske karakteristike postrojenja za iskorištavanje energije vjetra svakako su utjecale na dosadašnju malu praktičnu primjenu takvih postrojenja u opskrbi većim količinama energije. Svakako da bi se izborom manje brzine mjerodavne za instaliranu snagu povećalo iskorištenje postrojenja, ali bi to značilo smanjenje proizvodnje i povišenje proizvodne cijene. Smanjenjem na mjerodavne brzine vjetra u postrojenju u Dubrovniku od optimalnih 11 m/s na 6 m/s povećalo bi se iskorištenje postrojenja od 16,0 na 42,8%, ali bi to značilo smanjenje proizvodnje od 692,4 kWh/m² na 300,5 kWh/m² godišnje s istodobnim povišenjem proizvodne cijene za 166%.

Tabl. 3.14.

Energetske karakteristike postrojenja za iskorištavanje energije vjetra na četiri promatrane lokacije

	Beograd	Dubrovnik	Vršac	Zlatibor
Srednja brzina vjetra m/s	2,83	4,67	3,33	3,01
Ukupna energija vjetra kWh/m ²	175,4	860,7	985,1	263,0
Brzina vjetra za instaliranu snagu m/s	8	11	13	9
Maksimalna iskoristiva snaga vjetra kW/m ²	0,190	0,494	0,815	0,270
Godišnja iskoristiva energija vjetra kWh/m ²	162,1	692,4	762,6	233,3
Iskorištene ukupne energije vjetra %	92,4	80,4	77,4	88,7
Trajanje pogona s maksim. snagom h/god	80	414	403	195
Prosječna iskoristiva snaga kW/m ²	0,019	0,079	0,087	0,027
Iskorištenje postrojenja %	9,7	16,0	10,7	9,7

Računajući da se tornjevi kao nosioci vjetrenjača mogu izgraditi do ograničene visine, iskoristiva energija vjetra iznosi između 10^4 TWh i $2 \cdot 10^5$ TWh godišnje (između $1,2 \cdot 10^9$ i $24 \cdot 10^9$ tona ekvivalentnog ugljena). Računajući s iskorištavanjem u toku 100 godina, iskoristivom energijom vjetra može se zamijeniti 1,5 do 30% ukupnih rezerva ugljena. Razlike u procjeni iskoristive energije vjetra nastaju zbog različitih pretpostavki o visini tornjeva i o maksimalnoj iskoristivoj brzini vjetra.

Naravno da se sva iskoristiva snaga vjetra ne može transformirati u mehaničku i električnu energiju, jer postoje gubici u vjetrenjači i električnom generatoru. Stupanj djelovanja vjetrenjače iznosi 0,65 do 0,75, pa snaga na osovini vjetrenjače iznosi

$$P_{\text{meh}} = 0,260 A v^3 W \quad (3.6)$$

a budući da je stupanj djelovanja generatora 0,80 do 0,85 (za snage generatora koje dolaze u obzir za takva postrojenja), snaga je na stezaljkama generatora

$$P_{\text{el}} = 0,215 A v^3 W \quad (3.7)$$

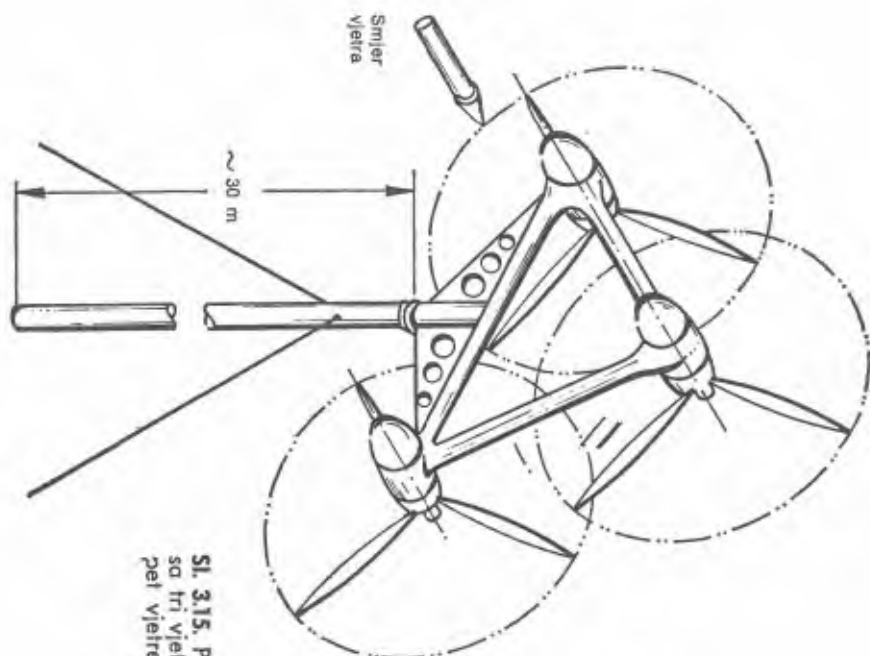
Prema tome, polazeći od snage vjetra definirane relacijom (3.3), može se vjetrenjačama iskoristiti nešto više od 34% energije vjetra.

Vjetrenjače neće moći raditi ako je brzina vjetra manja od minimalne brzine potrebne da vjetrenjača postigne potrebni broj okretaja. To je brzina vjetra za prazni hod vjetrenjače. Ona je to veća što je veća snaga vjetrenjače. Za manje vjetrenjače ona iznosi oko 3 m/s, a za veće dostiže brzinu i do 6 m/s. Zbog toga je neopravdano na mjestima gdje su česte male brzine vjetra postavljati vjetrenjače velike snage. U takvim slučajevima može se na isti stup postaviti više vjetrenjača manjeg promjera (sl. 3.15).

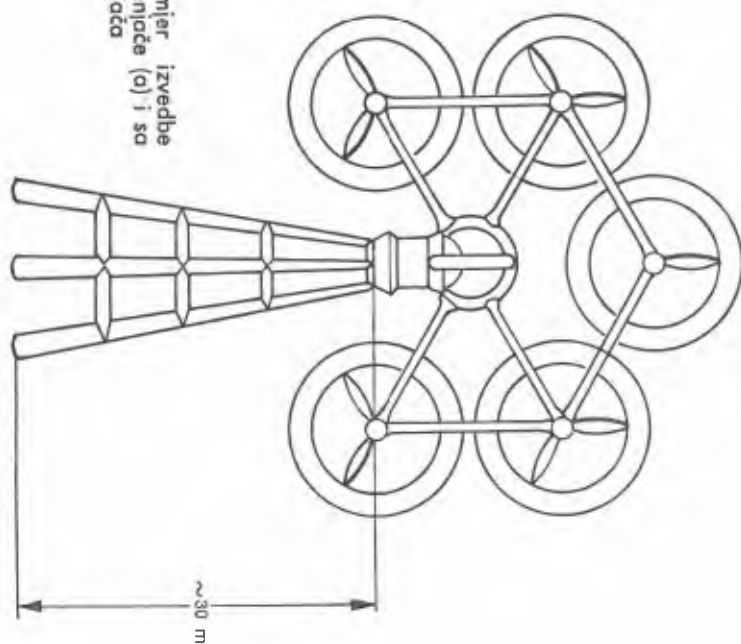
Vjetrenjače se postavljaju na tornjevima (stupovima). Njihova je visina obično veća od polumjera što ga opisuje vrh krila, kako bi se što bolje iskoristila pojava da brzina vjetra raste s visinom iznad površine tla (sl. 3.10). Budući da troškovi gradnje postrojenja u prvom redu ovise o visini tornja, potrebno je u svakom slučaju odrediti optimalni smještaj vjetrenjače u odnosu na površinu tla.

Da bi se energija vjetra što bolje iskoristila, vjetrenjača se mora uvijek postaviti tako da krug što ga opisuju vrhovi krila bude okomit na smjer vjetra. To se postiže postavljanjem vjetrenice. Ona je izvedena kao okomito kormilo na avionskom repu i pomoću nje se vjetrenjača — koja mora biti s vjetrenicom kruto spojena — uvijek postavlja u najpovoljniji položaj.

Regulacija broja okretaja vjetrenjače postiže se smanjivanjem ili povećavanjem aktivnih ploha na koje djeluje vjetar. Razvijena su dva sistema: zakretanje cijele vjetrenjače ili zakretanje samo krila. Prvi sistem upotrebljava se za male vjetrenjače, a zakretanje se provodi po-



Sl. 3.15. Primjer izvedbe sa tri vjetrenjake (a) i sa pet vjetrenjaka



Tabl. 3.15.

Tipovi vjetrenjača-elektrana u Sovjetskom Savezu

Tip	Promjer vjetrenjače m	Broj lopatica	Broj okretaja min ⁻¹	Snaga generatora kW
100 D 2 Zagi	2	2	280 .. 600	0,13
D 3,5 BIM	3,5	2	260 .. 400	1
D 12	12	3	60	12
D 18 WIV Gusmp	18	3	42	28
I D 18 Zagi	18	3	44	28
D 30 Zagi	30	3	30	93

moću tlaka vjetra na plohu koja se skupa s vjetrenjačom postavlja okomito na smjer vjetra. Sila na tu plohu zakreće vjetrenjaču oko okomite osi tako da površina kruga, projicirana na ravninu okomitu na smjer vjetra, postaje sve manja, što je zakret veći. Zakretanjem krila mijenja se kut lopatica, što ima za posljedicu promjenu sile na lopaticu. Takva regulacija ima znatnih prednosti jer može poslužiti i za regulaciju snage; može ograničiti broj okretaja za vrijeme vrlo jakih vjetrova ili potpuno zaustaviti vjetrenjaču za vrijeme orkana, a osim toga, služi za kočenje vjetrenjače u slučaju kvara.

Nekadašnja upotreba vjetrenjača za pogon mlinova danas je potpuno iščezla. Poneke su se još zadržale kao turistička atrakcija. Danas vjetrenjače služe bilo neposredno za pumpanje vode, bilo za proizvodnju električne energije. Pri proizvodnji električne energije, ponajčešće vjetrenjača tjera istosmjerni generator, kojemu je paralelno spojena akumulatorska baterija koja se puni za vrijeme pogona vjetrenjače i služi kao dopunski izvor električne energije za vrijeme malih brzina vjetra.

Ako, međutim, vjetrenjača tjera sinhroni generator, pogon je moguć samo u paralelnom radu s elektranama drugih tipova. Tada se uloga te elektrane svodi na štednju goriva u drugim elektranama elektroenergetskog sistema. Naime, elektrana-vjetrenjača ne može pridonijeti da se smanji potreba te izgradnjom ostalih elektrana, jer je ona kao energetski izvor vrlo nestalna i, ovisno o brzini vjetra, može odjednom zakazati.

U SAD instalirano je nekoliko tisuća vjetrenjača. Uglavnom se upotrebljavaju dva tipa: prvi, snage od 2 kW, koji tjera istosmjerni generator s paralelno spojenom akumulatorskom baterijom, i drugi, snage od oko 0,2 kW, za neposredni pogon pumpa za dizanje vode iz podzemnih bunara. Prvi tip proizvodi 150 do 400 kWh mjesečno (ovisno o sezoni), što je dovoljno za najnužniju opskrbu električnom energijom u udaljenim farmama koje nisu priključene na električnu mrežu.

Za vrijeme drugog svjetskog rata u Danskoj je izgrađeno stotinjak vjetrenjača-elektrana snage 30 do 50 kW, lociranih u seoskim područjima. One su radile paralelno s elektranama u kojima je dizelski motor pogonski stroj. Svrha je bila štednja tekućih goriva.

Neposredno pred drugi svjetski rat izgrađena su u SSSR-u i SAD eksperimentalna postrojenja snage od po 1 000 kW. Ona su oštećena bilo djelovanjem vjetra ili u ratnim operacijama.

U Velikoj Britaniji studirana je nakon drugog svjetskog rata izgradnja većeg broja vjetrenjača-elektrana, jer su tamo karakteristike vjetrova za energetska iskorištenje vrlo povoljne. Polazilo se od činjenice da je ta zemlja siromašna vodnim snagama, a u njoj je tih godina vladala i kriza ugljena. Ideja o izgradnji takvih elektrana poslije je napuštena, jer se pokazalo da je to neracionalno, a pronađena su i druga, povoljnija rješenja za opskrbu električnom energijom.

U Sovjetskom Savezu razvijeno je nekoliko tipova vjetrenjača za pumpanje vode ili proizvodnju električne energije u izoliranim naseljima ili gospodarstvima. Karakteristike tih tipova nalaze se u tabl. 3.15.

U posljednje vrijeme, zbog poskupljenja sirove nafte, što je uzrokovalo povišenje cijena i drugih goriva, ponovno je poraslo zanimanje za energiju vjetra. U jednoj novijoj studiji predložena je izgradnja oko 60 000 tornjeva visine 300 m na površini od 900 000 km² (Great

Tabl. 3.16.

Energetske karakteristike postrojenja za iskorištavanje energije vjetra na vrlo povoljnim lokacijama u SAD

	Prosječna god šnja proizvodnja kWh/m ²	Iskorištenje postrojenja %
Huron, Južna Dakota	680	29
Fargo, Sjeverna Dakota	720	31
Casper, Wyoming	855	36
Great Falls, Montana	866	37
Billings, Montana	627	27
Wichita, Kansas	1041	44
Topcka, Kansas	603	26
Tulsa, Oklahoma	571	24
Sioux City, Iowa	934	40
Buffalo, New York	565	24
Over Lake, Ontario	989	42
Milwaukee, Wisconsin	574	24
Green Bay, Wisconsin	765	33
Duluth-Superior	658	28
Over Lake Superior	924	39

Plains, SAD). Na svakom tornju postavila bi se zračna turbina promjera 65 m, kojom bi se postigla snaga od 3,2 MW pri brzini vjetra od 17 m/s i godišnja proizvodnja od 8,5 GWh. Postiže se iskorištenje postrojenja od oko 30%, što ukazuje na povoljnije karakteristike vjetra. Maksimalna snaga svih postrojenja iznosila bi 192 000 MW, a srednja snaga oko 58 000 MW. Naravno da je stvarna trenutna snaga vrlo promjenljiva jer ovisi o brzini vjetra. U tabl. 3.16. nalaze se podaci za postrojenja na vrlo pogodnim lokacijama u SAD, u kojima je zabilježena prosječna godišnja proizvodnja po m² površine kruga što ga opisuju vrhovi zračne turbine.

Zbog vrlo brzih promjena snage i zbog nepredvidivosti tih promjena udio elektrana sa zračnim turbinama u snazi svih elektrana elektroenergetskog sistema ne može biti veći od 10%. Samo tada moći će se ostale elektrane prilagoditi brzim promjenama opterećenja koje se pojavljuju zbog promjena u elektranama koje iskorištavaju energiju vjetra. Bit će, međutim, moguće povećati udio takvih elektrana ako se osigura akumuliranje energije. Taj se problem pojavljuje i pri iskorištavanju drugih primarnih oblika energije, pa će o njemu biti posebno riječi.

Karakteristike energije vjetra s obzirom na njihovo iskorištavanje (brze promjene snage, nepredvidivost tih promjena, nemogućnost pogona za vrijeme malih brzina) vrlo su nepovoljne, pa je teško zamisliti da bi u budućnosti moglo doći vrijeme u kojem bi bilo opravdano graditi takva postrojenja u većem opsegu.

5. NEPOSREDNO ISKORIŠTAVANJE SUNČEVA ZRAČENJA

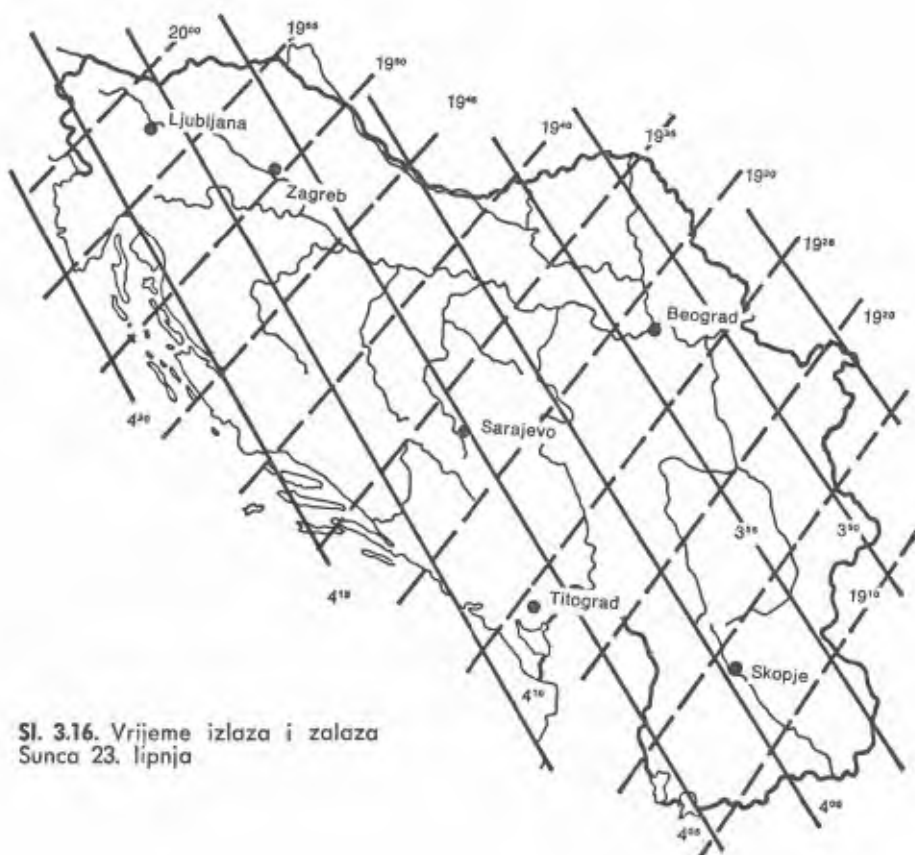
5.1. *Energija Sunčeva zračenja*

Većina oblika energije nastala je ili nastaje djelovanjem Sunčeva zračenja. U krajnjoj liniji, fosilna su goriva akumulirana energija zračenja Sunca koja je doprla do Zemljine površine prije milijunâ godina, a i vjetar izazvan tim istim zračenjem, praktički istodobno kad je ono prodrlo u atmosferu. Zbog toga, kad se govori o iskorištenju Sunčeva zračenja kao izvora energije misli se na njegovo iskorištavanje u trenutku kad dopre do Zemljine površine, a to se obično naziva neposredno energetska iskorištavanje Sunčeva zračenja.

Energija zračenja koja dopire do vanjskog ruba atmosfere pri srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca iznosi oko $1\,400\text{ W/m}^2$ na plohu koja je okomita na smjer zračenja. Pri prolazanju kroz atmosferu dio se energije troši u složenim procesima, a dio se reflektira i reemitira u svemir. Taj dio iznosi približno jednu trećinu energije koja je dostigla rub atmosfere, pa dotok energije do Zemljine površine iznosi u prosjeku 920 W/m^2 . Reflektirana energija mijenja se, naime, sa stanjem oblačnosti i sa stanjem na površini Zemlje (snježni pokrivač i sl.). Uzevši u obzir projekciju Zemlje ($127,6 \cdot 10^6\text{ km}^2$), dotok energije iznosi oko $117 \cdot 10^9\text{ MW}$. Ta se energija zbog Zemljine rotacije raspodjeljuje po cijeloj njezinoj površini ($510,1 \cdot 10^6\text{ km}^2$), pa je prosječni dotok energije 230 W/m^2 , odnosno $5,52\text{ kWh/m}^2$ dnevno. To su, naravno, prosječne vrijednosti, a stvarne ovise o geografskoj širini, o dijelu dana i o pojavi oblaka.

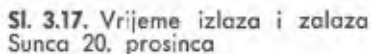
Energija Sunčeva zračenja koja dopire do Zemljine površine iznosi, dakle, oko 10^9 TWh ($8,6 \cdot 10^{20}$ kcal, $1,2 \cdot 10^{14}$ t ekv. ugljena) godišnje. Prema tome, godišnja je energija Sunčeva zračenja oko 12 puta veća nego energija u ukupnim rezervama ugljena, ili oko 150 tisuća puta veća nego energija u svim primarnim oblicima energije utrošenim u svijetu u 1974. godini. To je, dakle ogromni energetska potencijal, kojim se mogu — uz iskorištenje samo jednog njegovog dijela — zadovoljiti potrebe čovječanstva za vrlo dugo vrijeme.

Energija zračenja koja dopire do površine Zemlje ovisi u prvom redu o trajanju insolacije (trajanju sijanja Sunca, odnosno o vremenu kroz koje se Sunce nalazi iznad horizonta). Trajanje insolacije ovisi o geografskoj širini i o godišnjem dobu. Na sl. 3.16. i 3.17. vide se podaci o izlasku i zalasku Sunca u Jugoslaviji, i to na dan 23. lipnja i na dan 20. prosinca, dakle u doba ljetnog i zimskog solsticija. Razlika između



Sl. 3.16. Vrijeme izlaza i zalaza Sunca 23. lipnja

Plohe koje su okomite na površinu Zemlje ili su postavljene koso obasjane su Suncem kraće od horizontalnih ploha. U tabl. 3.17. nalaze se podaci o mogućem trajanju insolacije, dakle uz pretpostavku da je



Tabl. 3.17.

Moguće trajanje insolacije (sati/dan) u Zagrebu (sjeverna geografska širina 45° 49')

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	X-III sati	IV-IX sati	X-III %	IV-IX %	godišnje sati
Moguće trajanje insolacije																	
horizontalna ploha	9,2	10,4	11,9	13,5	14,9	15,6	15,2	14,1	12,6	11,0	9,6	8,9	1 850	2 620	41,4	58,6	4 470
prema jugu okrenuta ploha nagnuta 45°	9,2	10,4	11,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	11,0	9,6	8,9	1 829	2 230	45,1	54,9	4 059
Stvarno trajanje insolacije (1889—1970)																	
horizontalna ploha	2,0	3,5	4,7	5,9	7,1	8,2	9,1	8,7	6,7	4,4	2,3	1,5	558	1 394	28,6	71,4	1 952
prema jugu okrenuta ploha nagnuta 45°	2,0	3,5	4,4	5,3	5,8	6,5	7,3	7,5	6,5	4,4	2,3	1,5	549	1 186	31,6	68,4	1 735

Tabl. 3.18.

Stvarno trajanje insolacije, razdoblje 1950—1971.

	Nadmorska visina	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	X-III	IV-X	X-III	IV-X	godišnje
		sati/dan												sati	sati	%	%	sati
Kredarica	2 514	3,7	4,0	4,6	4,7	5,4	5,5	6,6	5,7	5,4	4,8	3,1	3,1	707	1016	41,0	59,0	1 723
Ljubljana	299	1,4	2,6	3,9	5,4	6,6	7,3	8,3	7,3	5,2	3,6	1,5	0,9	422	1223	25,7	74,3	1 645
Zagreb	157	1,6	2,7	3,9	5,7	6,7	7,7	8,8	8,2	6,4	4,4	2,0	1,2	479	1327	26,5	73,5	1 806
Novi Sad	132	2,4	3,5	4,7	6,3	7,7	8,9	9,6	9,2	7,7	6,0	2,9	2,0	652	1507	30,2	69,8	2 159
Beograd	132	2,2	3,2	4,4	6,1	7,2	8,5	9,4	8,8	7,9	5,6	2,9	1,8	610	1461	29,5	70,5	2 071
Zenica	344	1,3	2,5	3,7	5,0	5,6	6,4	7,8	7,5	6,0	4,8	2,5	1,8	413	1152	26,4	73,6	1 565
Belašnica	2 067	2,6	2,6	3,3	4,0	4,6	5,5	7,5	7,1	6,5	4,5	2,5	2,1	543	1058	33,9	66,1	1 601
Sarajevo	630	1,7	2,9	4,1	5,4	6,1	7,3	8,5	8,7	6,6	4,7	2,5	1,3	522	1299	28,7	71,3	1 821
Split	22	4,0	4,8	5,8	7,4	8,7	10,3	11,4	10,6	8,3	6,5	4,1	3,2	862	1729	33,3	66,7	2 591
Hvar	20	4,1	5,0	6,2	7,9	9,3	10,8	12,0	11,0	8,7	6,7	4,1	3,3	892	1821	32,9	67,1	2 713
Priština	573	2,4	3,6	4,5	6,3	7,2	8,7	10,0	9,6	7,7	5,5	3,2	2,1	642	1510	30,0	70,0	2 156
Titograd	49	3,6	3,9	5,4	6,7	8,0	9,4	11,2	10,4	8,3	6,4	3,7	3,2	795	1647	32,6	67,4	2 442
Skopje	239	2,2	3,6	4,4	6,3	7,4	8,6	10,1	9,8	7,6	5,2	2,8	1,8	607	1519	28,6	71,4	2 126

uvijek vedro, na horizontalnu plohu i na plohu okrenutu prema jugu, ali nagnutu prema sjeveru tako da s površinom Zemlje čini kut od 45° . Razlike u trajanju insolacije pojavljuju se u razdoblju između proljetnog i jesenskog ekvinocija, jer tada Sunce izlazi na sjeveroistoku a zalazi na sjeverozapadu, pa neće obasjavati tako orijentiranu plohu. U zimskim mjesecima, naravno kad bi bilo vedro, Sunčeve bi zrake obasjavale obje plohe od izlaska do zalaska Sunca. Moguće trajanje insolacije na geografskoj širini Zagreba iznosi: na horizontalnu plohu 4 470 sati godišnje, a na plohu nagnutu pod kutem od 45° oko 4 060 sati godišnje.

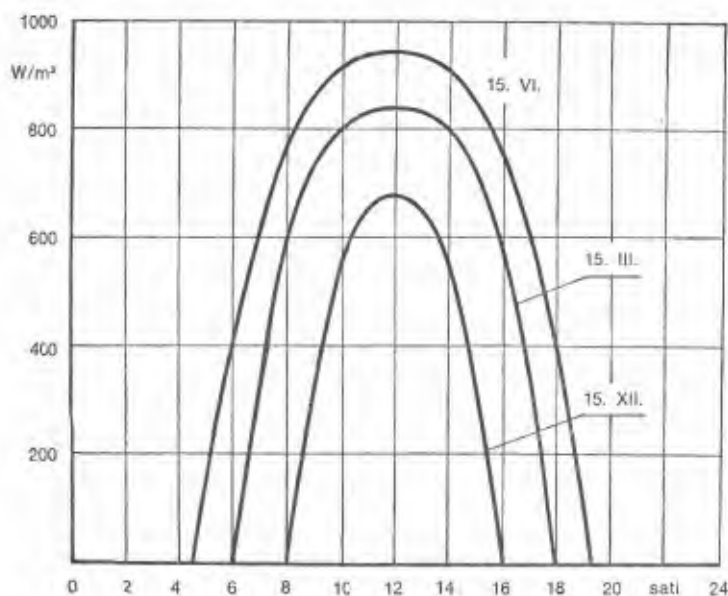
Stvarno trajanje insolacije, međutim, znatno je kraće zbog pojave oblaka i magle. Ono, dakle, ovisi ne samo o geografskoj širini i godišnjem dobu nego o klimatskim uvjetima i o stanju atmosfere na promatranom području (zagađenost). Prosječno stvarno trajanje insolacije u Zagrebu u razdoblju od 1889. do 1970. iznosi 1 952 sata godišnje na horizontalnu plohu, a 1 735 sati godišnje na plohu nagnutu pod kutem od 45° . Stvarno trajanje insolacije u Zagrebu, dakle, iznosi oko 43% od mogućeg trajanja. Utjecaj klimatskih prilika na stvarno trajanje insolacije vidi se na tabl. 3.18, na kojoj su podaci za mjesta koja više ili manje karakteriziraju sve klimatske oblasti u Jugoslaviji. Svi podaci odnose se na horizontalno postavljenu plohu. Utjecaj nadmorske visine može se procijeniti iz usporedbe podataka za Kredaricu i Bjelašnicu s podacima za mjesta u njihovoj blizini, ali na manjim nadmorskim visinama. Na planinama je u zimskim mjesecima dulje, a u ljetnim mjesecima kraće trajanje insolacije. Postoji, osim toga, znatna razlika u trajanju insolacije između kontinentalnih i primorskih dijelova zemlje. Interesantni su podaci za Zenicu, koji pokazuju da je trajanje insolacije kraće od 1 600 sati godišnje. Vjerojatno je tu utjecaj zagađivanja atmosfere. Trajanje insolacije u Zagrebu u razdoblju od 1950. do 1971. godine (tabl. 3.18) nešto je kraće (za oko 7,5%) nego u razdoblju od 1889. do 1970. godine. I to je vjerojatno utjecaj povećanog zagađivanja atmosfere.

Iako je trajanje insolacije jedan od preduvjeta za dotok energije Sunčeva zračenja, taj dotok nije proporcionalan trajanju insolacije. Dio se, naime, snage Sunčeva zračenja gubi prolaženjem kroz atmosferu zbog apsorpcije kisika, ozona i ugljik-dioksida. Taj je gubitak, zbog duljeg puta zraka kroz atmosferu, to veći što je Sunce bliže horizontu. Neposredno nakon izlaska Sunca taj gubitak iznosi oko 300 W/m^2 , u podne oko 90 W/m^2 u ljetnim, a oko 120 W/m^2 u zimskim mjesecima. Toliki gubici pojavljuju se kad je atmosfera suha i čista, a oni su veći kad Sunčeve zrake prolaze kroz vlažnu i onečišćenu atmosferu. Osim toga, zračenje se u prolazu kroz atmosferu raspršuje. Gubitak zbog raspršivanja najveći je neposredno nakon izlaska Sunca (oko 600 W/m^2), a najmanji kad je Sunce najviše iznad horizonta (zimi oko 240, a ljeti oko 140 W/m^2). Navedeni podaci vrijede za suhu i čistu atmosferu; gubici su veći kad je atmosfera vlažna i onečišćena. Dio rasprše-

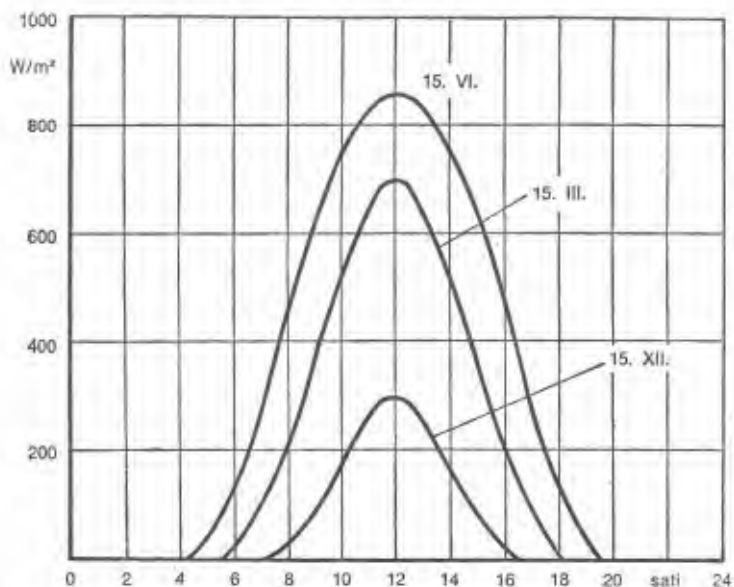
ne energije zračenja ipak dopire do tla (oko 50 % te energije dopire do tla kad je vedro, a manje kad je oblačno). Prema tome, ukupno zračenje koje dotječe na površinu Zemlje sastoji se od neposrednog i difuznog zračenja koje je dio raspršene energije zračenja.

Zbog svega toga snaga zračenja koja dopire do tla, a koja bi se mogla energetski iskorištavati, znatno se mijenja tokom dana, a njezine promjene ovise o godišnjem dobu i o položaju obasjane plohe. (sl. 3.18, 3.19. i 3.20).

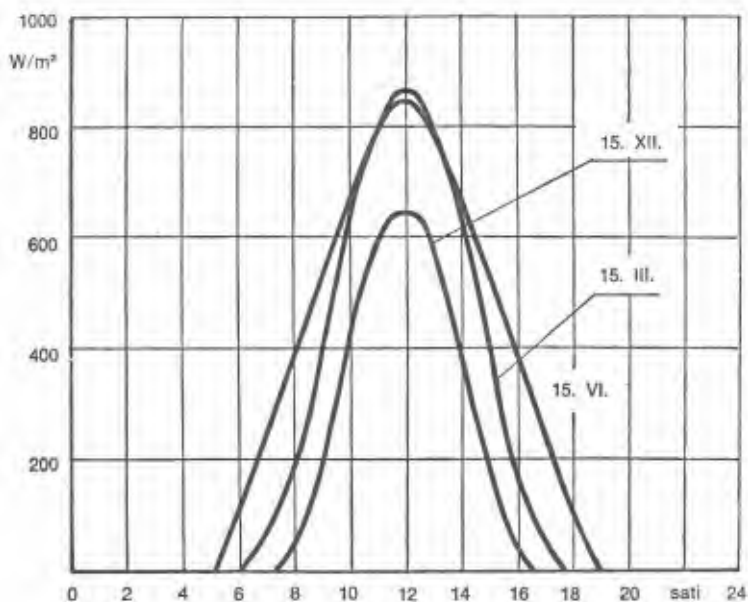
Vrlo se često energija zračenja prikazuje kao energija koja dopire do površine Zemlje tokom dana, naravno za vrijeme insolacije. Svakako da ta energija ovisi o stanju oblačnosti i o svojstvima atmosfere, ali je pogodno poznavati i potencijalnu energiju zračenja. To je maksimalna energija koja dopire do tla kroz suhu i čistu atmosferu. Potencijalna energija zračenja ovisi o geografskoj širini i nadmorskoj visini (tabl. 3.19). Ona postaje manja sa smanjenjem nadmorske visine, jer Sunčeve zrake moraju prolaziti kroz deblji sloj atmosfere, i s povećanjem geografske širine, jer upadni kut zraka postaje manji. Na geografskoj širini od 43° potencijalna energija zračenja iznosi oko $2\,500\text{ kWh/m}^2$ godišnje, a na geografskoj širini od 46° oko $2\,400\text{ kWh/m}^2$ godišnje. Maksimalna snaga zračenja iznosi oko $0,9\text{ kW/m}^2$, pa za tu snagu treba



Sl. 3.18 Snaga ukupnog zračenja Sunca na plohu okomitu na zračenje u Zagrebu pri vedrom nebu (prosječno vlažna i mutna atmosfera)



Sl. 3.19. Snaga ukupnog zračenja Sunca na vodoravnu plohu u Zagrebu pri vedrom nebu (prosječno vlažna i mutna atmosfera)



Sl. 3.20. Snaga ukupnog zračenja Sunca na plohu nagnutu pod kutom od 45° i okrenutu prema jugu u Zagrebu pri vedrom nebu (prosječno vlažna i mutna atmosfera)

Tabl. 3.19.

Potencijalna godišnja energija zračenja na horizontalnu plohu

Nadmor. visina (m)	Sjev. geogr. širina 43°				Sjev. geogr. širina 46°			
	3 000	2 000	1 000	0	3 000	2 000	1 000	0
Potencijalna energija zračenja kWh/dan								
I	3,46	3,38	3,34	3,26	2,98	2,90	2,86	2,81
II	4,82	4,75	4,68	4,58	4,37	4,30	4,22	4,15
III	6,74	6,65	6,55	6,46	6,36	6,26	6,17	6,07
IV	8,78	8,66	8,54	8,42	8,52	8,40	8,28	8,16
V	10,20	10,08	9,96	9,84	10,08	9,96	9,84	9,72
VI	10,92	10,78	10,63	10,51	10,87	10,73	10,58	10,44
VII	10,56	10,44	10,30	10,18	10,49	10,37	10,25	10,13
VIII	9,34	9,22	9,12	9,00	9,14	9,05	8,93	8,76
IX	7,51	7,42	7,30	7,20	7,18	7,08	6,98	6,89
X	5,52	5,42	5,35	5,26	5,06	4,99	4,90	4,80
XI	3,79	3,72	3,65	3,58	3,31	3,24	3,17	3,10
XII	3,00	2,93	2,86	2,78	2,50	2,45	2,38	2,33
Potencijalna energija zračenja (kWh)								
X—III	829	814	802	787	746	732	719	706
IV—IX	1 748	1 726	1 703	1 682	1 717	1 695	1 673	1 647
Godišnje	2 577	2 540	2 505	2 469	2 463	2 427	2 392	2 353
Prosječna dnevna energija (kWh/dan)								
	7,06	6,96	6,86	6,76	6,75	6,65	6,55	6,45

izgraditi i uređaj za iskorištavanje Sunčeva zračenja. Kad bi cijelu godinu snaga zračenja bila jednaka maksimalnoj snazi, moglo bi se s izgrađenim uređajem iskoristiti 7 884 kWh/m². Prema tome, potencijalno iskorištenje uređaja iznosi 31,7% na geografskoj širini od 43°, a 30,4% na geografskoj širini od 46°.

Stvarna energija zračenja koja dopire do tla znatno je manja od potencijalne zbog pojave oblaka, vlage i onečišćenja u atmosferi. U tabl. 3.20. vide se podaci o stvarnoj energiji zračenja za Zagreb i Split, kao prosječni podaci za desetogodišnje razdoblje (1961—1970). U Splitu je stvarna energija zračenja veća za 28,5% nego u Zagrebu u prvom redu zbog manje naoblake, jer utjecaj geografske širine vrlo je malen (tabl. 3.19). Najveće razlike u stvarno dozračenju energiji u ta dva grada pojavljuju se u zimskim mjesecima, kad je npr. u prosincu u Splitu energija zračenja više nego dvostruko veća nego u Zagrebu. Ako se

uspoređi stvarna sa potencijalnom energijom zračenja, vidi se da u Zagrebu stvarna energija iznosi oko 49% od potencijalne, a u Splitu taj postotak iznosi oko 60%. Maksimalna snaga zračenja na horizontalnu plohu pri prosječno vlažnoj i mutnoj atmosferi iznosi oko 0,85 kWh/m², pa bi se tom snagom — za koju treba biti dimenzionirano postrojenje za iskorištavanje energije zračenja — moglo iskoristiti 7 446 kWh/god. Stvarno se, međutim, može iskoristiti samo ono što dopire do površine Zemlje, pa bi takvo postrojenje u Zagrebu bilo iskorišteno 15,5%, a u Splitu 20,0%.

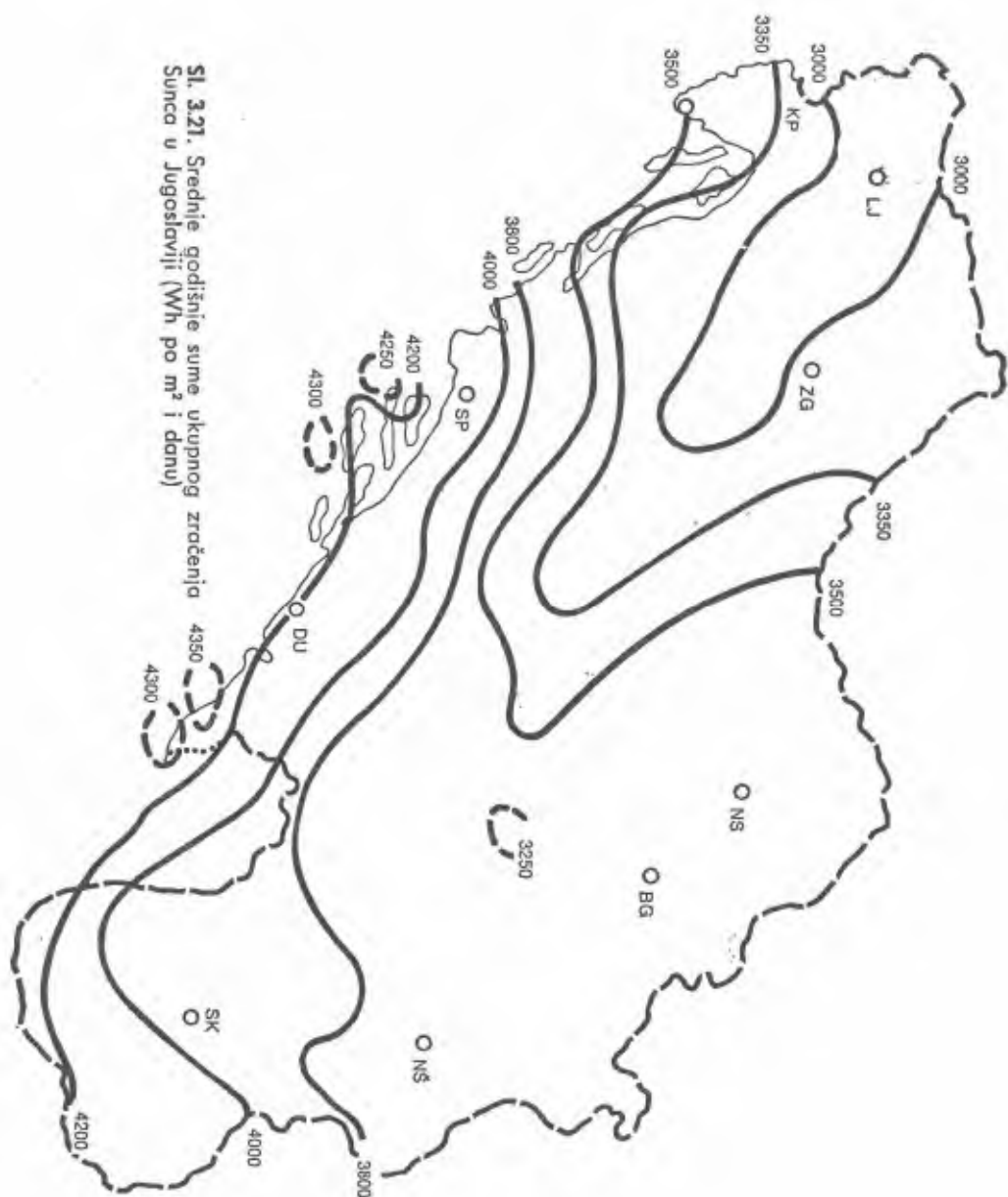
Prosječnu stvarnu dnevnu energiju zračenja u Jugoslaviji prikazuje sl. 3.21. Najveća energija zračenja — 4 kWh/m² dan (1 460 kWh/m² godišnje) i više — imaju primorska područja južno od Šibenika, dio Hercegovine i dio Crne Gore, a najmanju — 3 kWh/m² dan (1 095 kWh/m² godišnje) — područja oko Zagreba i Ljubljane.

Osim dnevnih oscilacija snage zračenja, koje ovise o dobi dana, snaga zračenja mijenja se tokom dana i zbog prekrivanja Sunca oblacima. Energija koja dopire do tla zbog toga može varirati u vrlo širokom rasponu, kao što se vidi na sl. 3.22. To su podaci za Zagreb u razdoblju od 1958—1967. godine. Prema tome, postoji vrlo velika razlika između dozračene energije u vedrom i oblačnom danu. Relativna razlika je veća zimi nego ljeti, pa dozračena energija u prosincu može iznositi između 0,4 (u oblačnom danu) i 2,0 kWh/m² dan (u potpuno vedrom danu), a u svibnju između 3,3 i 7,9 kWh/m² dan.

Tabl. 3.20.

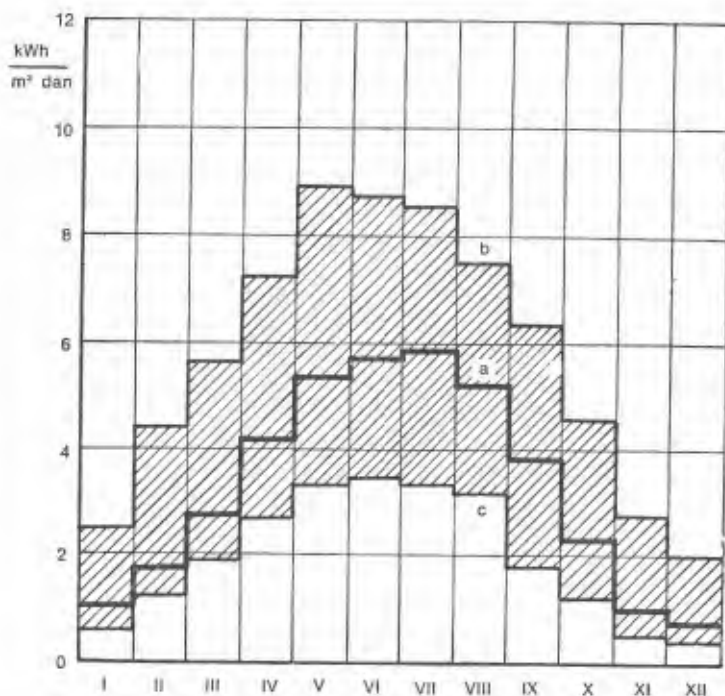
Stvarna prosječna energija zračenja na horizontalnu plohu u Zagrebu i Splitu (1961—1970)

	Dnevna energija kWh/m ² dan		Mjesečna energija kWh/m ² god.		Split Zagreb %
	Zagreb	Split	Zagreb	Split	
I	0,98	1,73	30,5	53,6	175,7
II	1,66	2,50	46,4	69,9	150,6
III	2,62	3,72	81,1	115,3	142,2
IV	4,08	4,75	122,4	142,6	116,5
V	5,09	5,74	157,7	177,8	112,7
VI	5,54	6,43	166,3	193,0	116,1
VII	5,66	6,67	175,6	206,8	117,8
VIII	4,78	5,95	148,1	184,5	124,6
IX	3,62	4,68	108,7	139,7	128,5
X	2,23	3,34	69,2	103,4	149,4
XI	1,03	1,87	31,0	56,2	181,3
XII	0,65	1,42	20,1	43,9	218,4
godišnje	3,17	4,07	1 157,1	1 486,7	128,5



Sl. 3.21. Srednje godišnje sume ukupnog zračenja Sunca u Jugoslaviji (Wh po m² i danu)

Sve to pokazuje vrlo veliku promjenljivost snage zračenja koje dopire do površine Zemlje. Te su promjene polaganije od promjena snage vjetra. One se, osim toga, mogu — s većom ili manjom točnošću — predviđati, jer je poznat ritam pojava (izlazak Sunca, zalazak i Sunčeva putanja po nebeskom svodu), ali intenzivnost zračenja koje će stajati na raspolaganju postrojenju, međutim, ne može se predvidjeti s većom sigurnošću. Kao izvor energije, zračenje Sunca povoljnije je od vjetra s obzirom na predvidivost pojave, ali je nepovoljnije s obzirom na to da zračenja nema u toku noći i da je zračenje manje intenzivno u hladnijem godišnjem razdoblju, a baš tada — kad su noći duge, i temperature zraka niske — potrošači trebaju najviše energije. To je i razlog zbog kojeg do sada nije bilo znatnijeg iskorištavanja energije zračenja Sunca i pored ogromne snage zračenja, i pored toga što se ta energija pojavljuje na cijelom naseljenom globusu.



Sl. 3.22. Prosječne dnevne energije zračenja Sunca registrirane na horizontalnu plohu u Zagrebu u razdoblju od 1958. do 1967. godine; a — prosječna dnevna energija, b — maksimalna dnevna energija u 10-godišnjem razdoblju, c — dnevna energija u oblačnom danu

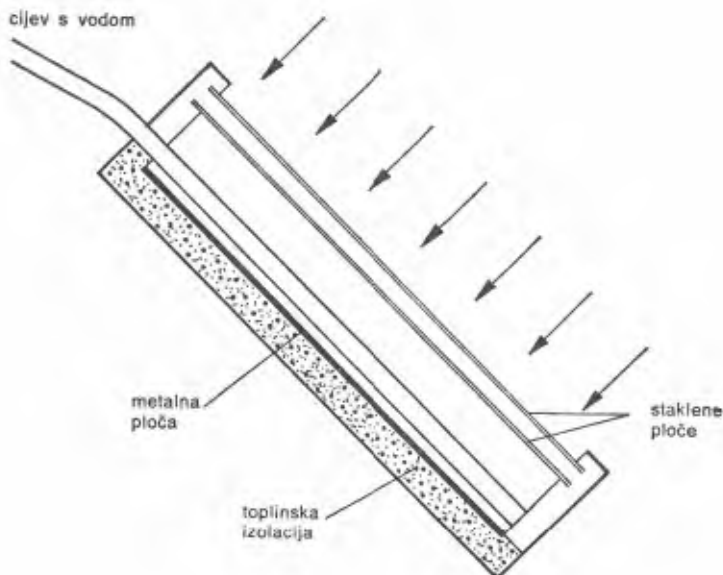
5.2. Mogućnosti iskorištavanja Sunčeva zračenja

U principu postoje dvije mogućnosti za energetske iskorištavanje Sunčeva zračenja: zagrijavanje medija (vode, zraka) i neposredna transformacija u električnu energiju.

Dozračena energija koja dolazi do nekog tijela bit će, u općenitom slučaju, djelomično apsorbirana, djelomično reflektirana i dijelom propuštena kroz zračeno tijelo. Apsorbirana energija pretvara se u toplinu. Reflektiranu i propuštenu energiju konačno će apsorbirati tijela u okolini. Tijelo koje apsorbira svu dozračenu energiju, naziva se crnim tijelom. U prirodi nema potpuno crnog tijela, ali ima materijala koji gotovo potpuno apsorbiraju dozračenu energiju. Takvi materijali su pogodni za iskorištavanje Sunčeva zračenja, a povećanje apsorpcije postiže se posebnim premazima. Temperatura dozračene plohe ovisi o snazi zračenja (W/m^2). Temperatura zračenog tijela proporcionalna je četvrtom korijenu snage. Potpuno crno tijelo može dostići temperaturu od $91^\circ C$, ako je snaga zračenja $1\,000\, W/m^2$, a to je praktički maksimalna snaga Sunčeva zračenja. Povišenje temperature može se ostvariti ako se ploha izvrnuta zračenju zaštititi staklom ili prozirnom folijom od plastičnog materijala. Takvi materijali, naime, gotovo potpuno propuštaju Sunčeve zrake, koje griju plohu ispod staklene ili plastične ploče. Materijal plohe zbog toga se ugrije i ponovno emitira zračenje znatno veće valne duljine (infracrveno zračenje) koje staklo i plastični materijali praktički ne propuštaju. Djelovanjem toga zračenja staklo se ugrije i ono opet emitira zračenje — djelomično prema unutrašnjosti, a djelomično prema vani. Unutrašnjost takvog uređaja djeluje, dakle, kao klopka, pa se mogu postići i temperature više od onih koje se postižu kad dozračena ploha nije zaštićena staklenom ili plastičnom pločom. To je tzv. efekt staklenika, koji se iskorištava u staklenicima za uzgoj povrća i cvijeća. Pogodnim konstrukcijama može se postići i temperatura do $150^\circ C$ uz navedenu snagu zračenja.

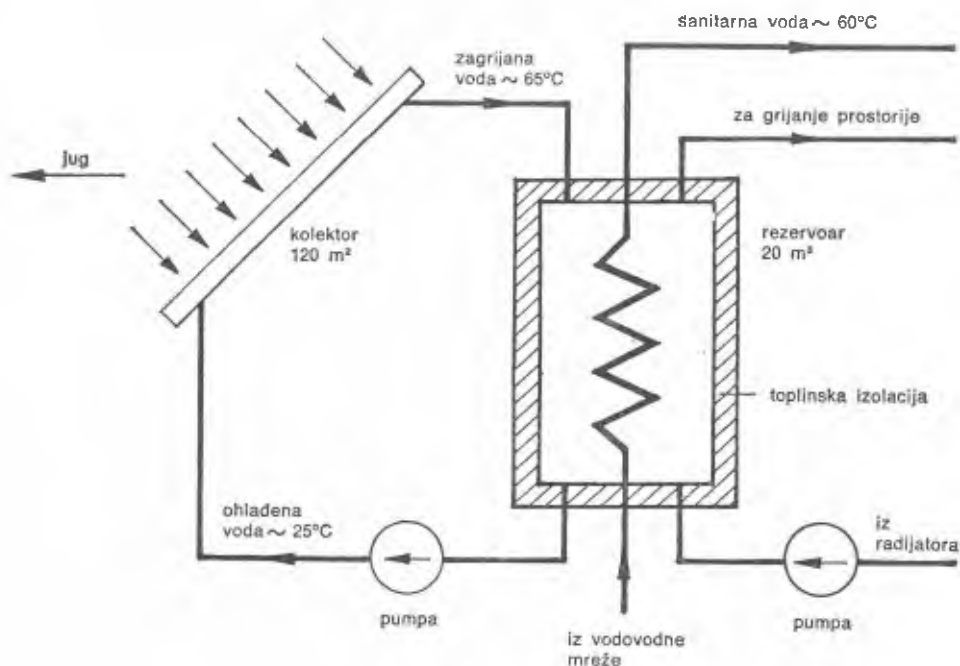
Grijanje vode najjednostavniji je način iskorištavanja Sunčeva zračenja. U Japanu se upotrebljavaju plastične vreće u koje se može naliti oko 200 l vode i koje se izlože zračenju u dvorištu ili na drugom pogodnom mjestu. Tako ugrijana voda upotrebljava se za kupanje i u druge svrhe u popodnevnim satima. Takav primitivni način ne može zadovoljiti potrebe, jer je topla voda potrebna preko cijelog dana. To se, međutim, može osigurati postavljanjem rezervoara u koji dotječe voda ugrijana u kolektoru postavljenom na krov. Kolektor se sastoji od plohe izložene zračenju, koja može biti izvedena kao sistem cijevi (sl. 3.23) kroz koje struji voda i koja se može, ali ne mora, zaštititi jednostrukom ili dvostrukom staklenom, odnosno plastičnom pločom. Za osiguranje potrebne tople vode u kućanstvu za jednu obitelj dovoljna je površina kolektora od 2–3 m^2 (ovisno o klimatskim prili-

kama). Takvih uređaja ima već danas vrlo mnogo u svijetu. Samo u Japanu ima više od dva milijuna uređaja za grijanje vode s rezervoarom.



Sl. 3.23. Presjek ravnog kolektora s dvostrukim staklenim pločama

S obzirom na opskrbu energijom mnogo je interesantnije iskorištavanje Sunčeva zračenja za grijanje prostorija, za koje je potrebno mnogo više energije, a koje se može kombinirati i s pripremom tople vode. Shema jednostavnog uređaja za grijanje prostorija i opskrbu toplom vodom vidi se na sl. 3.24. Osnovna je teškoća u varijacijama intenzivnosti zračenja i u relativno malom dotoku energije u razdobljima kad je potrebno najviše energije za grijanje. Zbog toga je nužno u sistem za grijanje ugraditi rezervoar dovoljno velikog volumena ali i dodatni sistem za grijanje (npr. pomoću električne energije, plina i sl.). Pokazuje se, naime, da se Sunčevim zračenjem u umjerenom klimatskom pojasu može osigurati oko 70% potrebne energije za grijanje i pripremu tople vode. Za preostali dio potrebne energije treba upotrijebiti druge oblike energije (električna energija, plin, loživo ulje). Potrošnja tih drugih oblika energije može se donekle smanjiti povećanjem volumena rezervoara, da bi se dio energije akumuliran u vedrim dani-



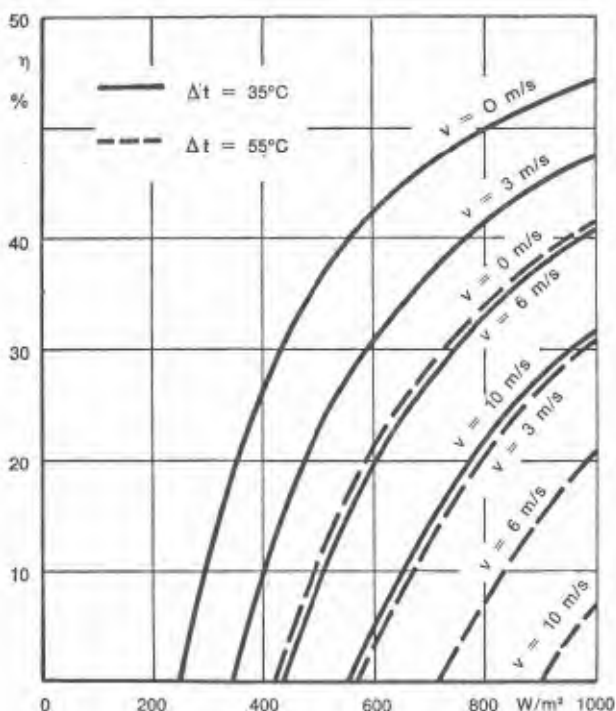
Sl. 3.24. Jednostavni sustav iskorištavanja energije Sunčeva zračenja za grijanje prostorija i pripremu tople vode za stan površine 140 m^2

ma iskoristio za vrijeme oblačnih razdoblja. Povećanjem volumena spremnika, međutim, povećavaju se investicije, što opet smanjuje ekonomičnost iskorištavanja Sunčeva zračenja.

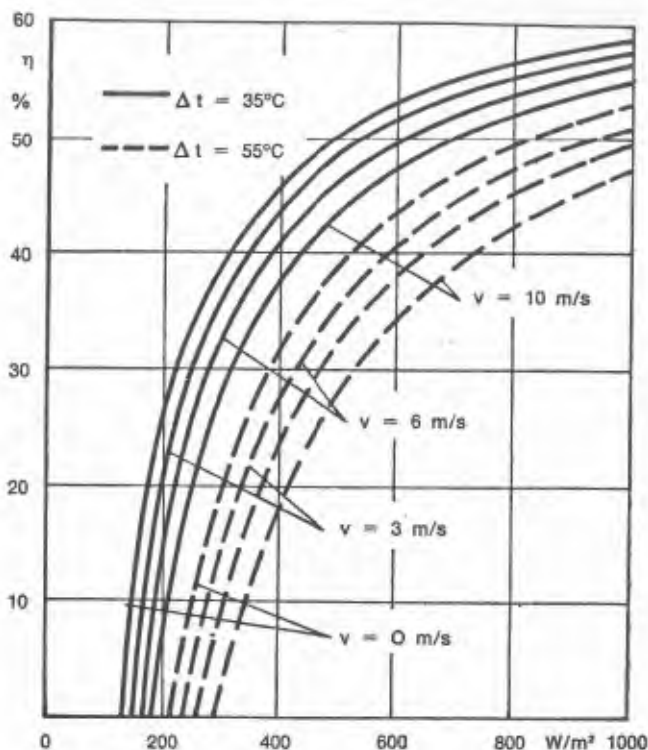
Kolektor je najvažniji i najskuplji dio uređaja za grijanje. Njegova površina ovisi o njegovom stupnju djelovanja (omjer između energije predane vodi i energije zračenja) i o predviđenoj intenzivnosti iskorištavanja energije zračenja. Da se postigne što veći udio zračenja u grijanju prostorija, površina kolektora određuje se prema prilikama u mjesecu s najmanjom energijom zračenja, kada su ujedno i temperature zraka najniže. Sigurno nije opravdano dimenzionirati kolektor za najnepovoljnije prilike (oblačan dan i niska temperatura), jer bi to zahtijevalo površinu kolektora koja bi bila prevelika već za nešto povoljnije prilike. To također pokazuje da je neophodan rezervni izvor energije. Može se sasvim aproksimativno računati da je za grijanje stambenih i poslovnih prostorija u našim klimatskim uvjetima za svaki m^2 površine potrebna isto tolika površina kolektora. Cijena 1 m^2 površine kolektora u SAD iznosi 20 do 40 dolara (vrijednost dolara u 1973. godini).

Stupanj djelovanja kolektora ovisi u prvom redu o njegovoj izvedbi, a zatim o temperaturi medija koji se zagrijava (prosječna temperatura medija pri prolazu kroz kolektor), o snazi zračenja i o brzini vjetra (sl. 3.25. i 3.26). Kao što se vidi, postavljanjem dvostrukog zaštitnog stakla znatno se poboljšava stupanj djelovanja kolektora, posebno zbog manjeg djelovanja brzine vjetra na stupanj djelovanja kolektora. Znatna utjecaj na stupanj djelovanja kolektora ima prosječna temperatura grijanog medija, jer je pri nižim temperaturama intenzivniji prijenos topline od materijala kolektora na grijani medij. Naravno da prikazane vrijednosti stupnja djelovanja vrijede za određene tipove kolektora, ali one mogu ilustrirati karakteristike kolektora.

Volumen spremnika ovisi o potrebnoj rezervi topline, koja se može definirati kao topline potrebna za grijanje kroz određeni broj dana. Broj dana za koje treba osigurati rezervu tople vode ovisi o klimatskim prilikama i o cijeni energije dopunskih izvora energije. Kako je već spomenuto, s povećanjem volumena spremnika smanjuje se potrebna dodatna energija, ali se povećavaju troškovi za gradnju spremnika,



Sl. 3.25. Stupanj djelovanja ravnog kolektora s jednostrukom staklenom pločom



Sl. 3.26. Stupanj djelovanja ravnog kolektora s dvostrukom staklenom pločom

pa je potrebno za svako područje pronaći optimalni volumen spremnika. Kao prva aproksimacija može se računati da je po kvadratnom metru površine stana potreban volumen spremnika od oko $0,04 \text{ m}^3$ za jedan dan grijanja, ako je temperatura vode 65°C . S povišenjem temperature vode smanjuje se potrebni volumen spremnika, ali se pogoršava stupanj djelovanja kolektora (sl. 3.25. i 3.26). Za stan površine 140 m^2 potreban je spremnik volumena 20 m^3 (20 000 litara) da bi se osiguralo grijanje u toku četiri dana. Cijena takvog spremnika iznosi oko 1 000 dolara (vrijednost dolara iz 1973. godine).

Uzevši u obzir sve potrebne instalacije za iskorištavanje Sunčeva zračenja za grijanje prostorija i pripremu tople vode (sl. 3.24) osim instalacija u prostorijama (radijatori i instalacije za dovod, i odvod vode), koje su jednake onima za centralno grijanje, investicije za stan površine 140 m^2 iznose od 3 500 do 6 000 dolara (vrijednost dolara iz 1973. godine). Ekonomska opravdanost takvog grijanja stanova to je

veća što je skuplje gorivo, pa se pokazuje da uz današnje cijene nafte grijanje Sunčevim zračenjem ima puno ekonomsko opravdanje.

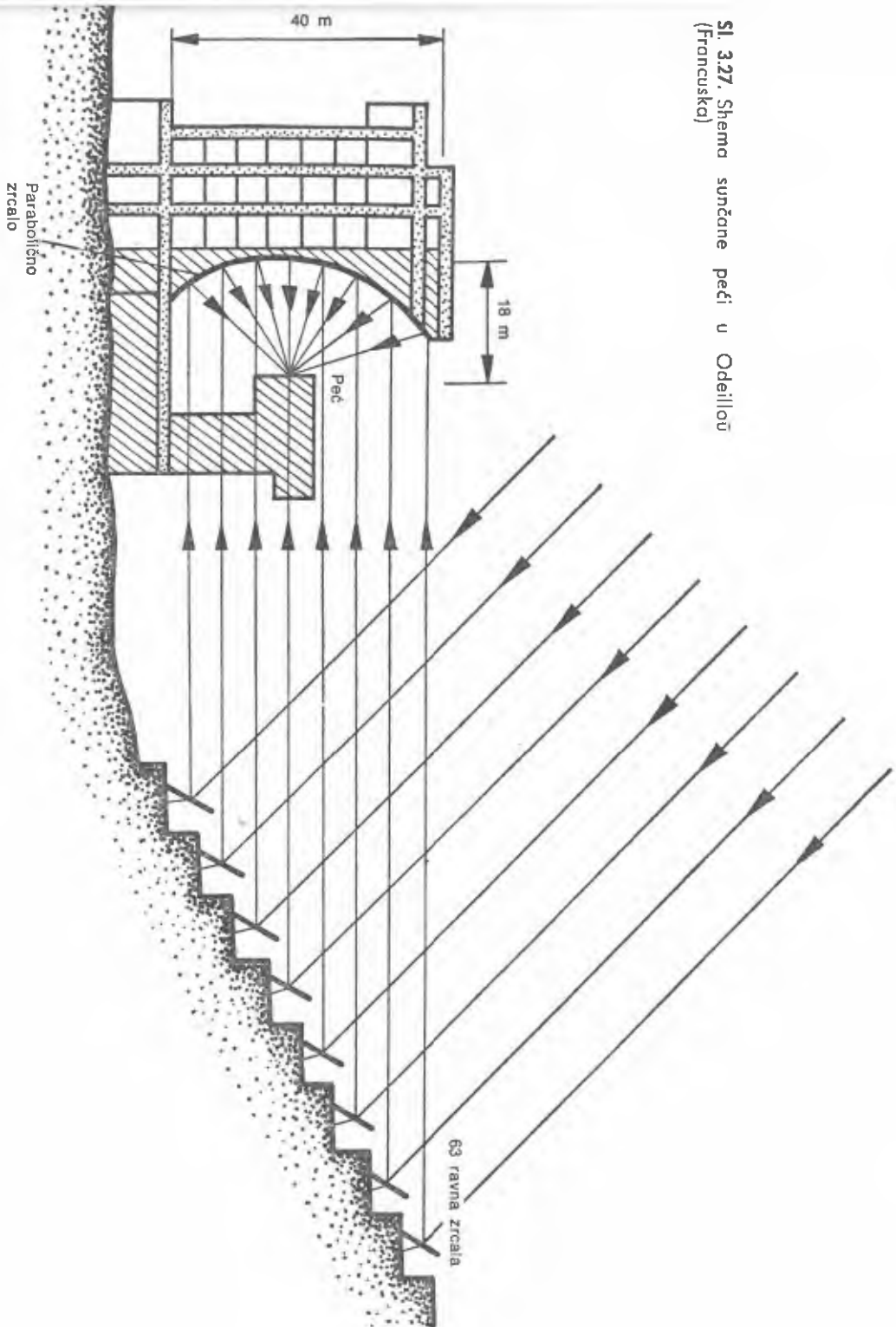
Takvi uređaji mogu se upotrijebiti za grijanje vode u bazenima za kupanje, pa i u industrijskim pogonima gdje nisu potrebne visoke temperature.

Više temperature mogu se ostvariti koncentracijom zračenja na manju površinu, što se postiže pomoću cilindričnih (koncentracija u pravcu) i paraboličnih zrcala (koncentracija u točki). Koncentracija se prikazuje omjerom snage zračenja na mjestu koncentracije i prirodne snage zračenja. S povećanjem koncentracije povećava se temperatura opet s četvrtim korijenom snage zračenja. Za potpuno crno tijelo uz stupanj koncentracije 10, ako je snaga prirodnog zračenja 800 W/m^2 , maksimalna temperatura iznosi 340°C , za stupanj koncentracije 100 ta je temperatura 817°C , $1\,665^\circ\text{C}$ za stupanj koncentracije 1 000, a $3\,260^\circ\text{C}$ za stupanj koncentracije 10 000.

Najjednostavnija je primjena Sunčeve energije u tzv. Sunčevu kuhalu. Sunčeve zrake koncentriraju se pomoću paraboličnog zrcala na posudu za kuhanje. Naravno da se takvo kuhalo može upotrijebiti samo u sunčanim danima i na otvorenom prostoru. Nakon drugog svjetskog rata u Indiji je pokušano da se proširi upotreba kuhala s aluminijskim zrcalom širine 1 m, kako bi se smanjila upotreba životinjskih izmetina kao energetskog goriva i omogućila njihova upotreba za gnojivu zemljišta. To se, međutim, nije ostvarilo jer je cijena takvih kuhala (10 do 15 dolara, vrijednost dolara u 1975. godini) bila previsoka za siromašno stanovništvo u indijskim selima.

Između 1880. i 1920. godine izgrađeno je više postrojenja za proizvodnju vodene pare pomoću Sunčeva zračenja. Najveće među njima bilo je postrojenje u Meadi (Egipat) snage 45 kW. Između dva svjetska rata koncentracijom zračenja ostvarene su temperature do $4\,000^\circ\text{C}$. Pokazalo se da su takva postrojenja pogodna za proizvodnju metala vrlo velike čistoće. U metalurgiji se, naime, upotrebljavaju električne peći u kojima se pomoću električnog luka postižu vrlo visoke temperature. Za dovod struje u takve peći potrebne su elektrode koje postepeno izgaraju. S elektrodama se u peć dovode nečistoće koje utječu na sastav proizvedenog metala. U Sunčevim pećima nisu potrebne elektrode, pa nema ni njihovog negativnog utjecaja na sastav proizvoda. U takvim pećima mogu se proizvoditi vrlo čisti kemijski spojevi, monokristali i poluvodiči. U spomenutom razdoblju izgrađeno je najveće postrojenje u Pirinejima (Fort Mont-Louis, Francuska) sa zrcalima površine 120 i 90 m^2 , od kojih prvo slijedi gibanje Sunca i reflektirane zrake usmjeruje na drugo zrcalo koje ih koncentrira u metaluršku peć u kojoj se postiže temperatura od $3\,000^\circ\text{C}$ uz snagu od 100 kW. Nakon drugog svjetskog rata izgrađeno je više takvih metalurških peći, najviše u SAD i SSSR-u, gdje su bile potrebne za proizvodnju čistih metala nužnih za svemirske letjelice. Jedna od najvećih je Odeillo

Sl. 3.27. Shema sunčane peći u Odeilloū
(Francuska)



u Francuskoj (sl. 3.27), snage 1 000 kW, koja je izgrađena 1970. godine. Sunčeve zrake padaju na 63 ravna zrcala površine po 45 m² (ukupna površina oko 2 800 m²); položaj tih zrcala stalno se mijenja kako bi reflektirane zrake pale na parabolično zrcalo površine 2 000 m², koje ih koncentrira u metaluršku peć. U fokusu peći postiže se snaga od 16 000 kW/m².

Iskorištavanja Sunčeva zračenja pomoću energetske transformacije zračenje-toplina-električna energija razvija se u dva smjera: postrojenja malih snaga za opskrbu energijom područja koja nisu priključena na električnu mrežu i postrojenja srednjih i velikih snaga za proizvodnju električne energije u sklopu elektroenergetskog sistema.

Postrojenja male snage grade se bez koncentracije zračenja. Ona, dakle, rade s niskim temperaturama, moraju biti jednostavna, sigurna u pogonu i robustna, jer je predviđeno da rade u područjima udaljenim od većih naselja. Energiju zračenja preuzima ravni kolektor kroz koji struji voda koja se u njemu ugrije na temperaturu od 70 do 80°C. U izmjenjivaču topline ugrijava voda predaje toplinu freonu koji isparava na toj temperaturi. Freonske pare vode se u parni stapni stroj ili u parnu turbinu, u kojima se energija pare transformira u mehaničku energiju koja se može upotrijebiti ili neposredno za pogon pumpe ili za pogon električnog generatora kojim se proizvodi električna energija.

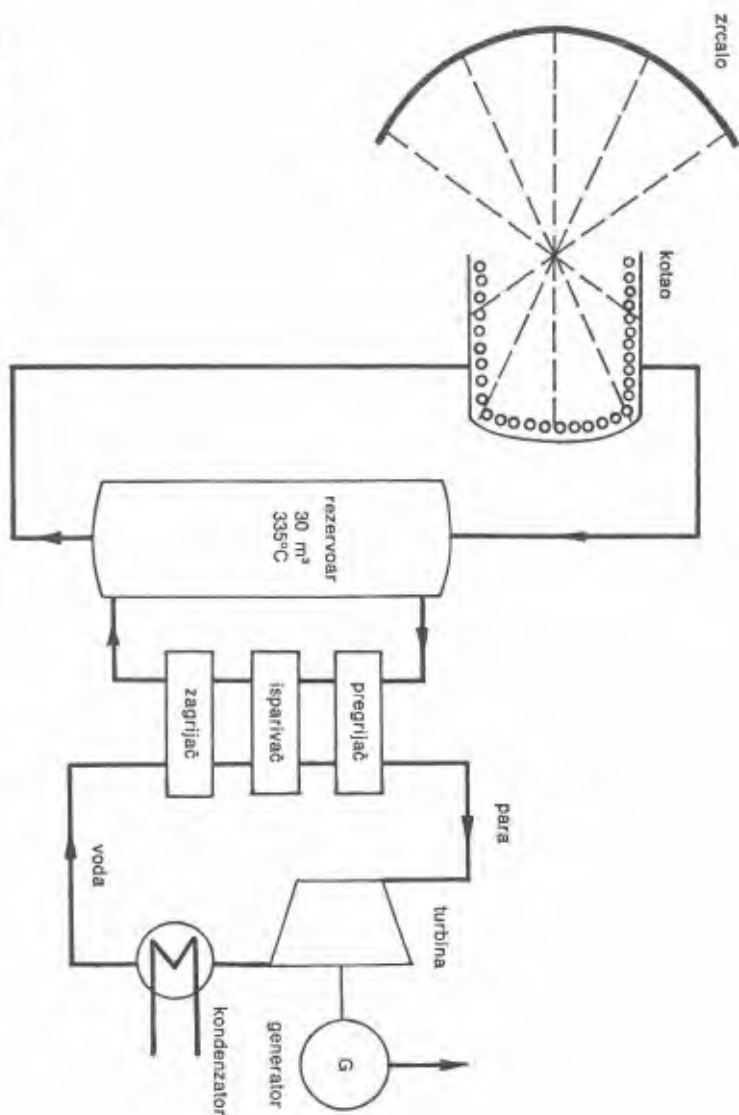
Grade se i mala postrojenja snage oko 1 kW s neposrednim pogonom, bez transformacije u električnu energiju. Njima se postiže stupanj djelovanja od samo nekoliko postotaka, ali nije potrebno praktički nikakvo održavanje niti kvalificirano osoblje. Takva su postrojenja pogodna za pumpanje vode iz bunara u izoliranim selima i za opskrbu vodom pastira i stada u pustinjским područjima. Do kraja 1976. godine izgrađeno je 40 takvih postrojenja u 14 zemalja (afričke zemlje, Indija, arapski emirati, Filipini).

Postrojenje sličnog tipa ali veće snage (30 kW) stavljeno je u pogon u Meksiku krajem 1975. godine. Ravni kolektor ima površinu od 1 500 m², a temperatura je ugrijava vode 70°C. Freonske pare vode se u parnu turbinu koja tjera električni generator. Proizvedena energija upotrebljava se za pumpanje vode kojom se opskrbljuje naselje od 15 000 stanovnika i natapa dvadesetak hektara zemljišta. Takvo postrojenje, međutim, ne može se iskoristiti za opskrbu stanovništva električnom energijom, zbog varijacija intenzivnosti zračenja.

Takva postrojenja mogu se graditi do snage od stotinjak kW, a za veće snage nužna je koncentracija zračenja da bi se smanjila površina kolektora i povisila temperatura, jer o temperaturi ovisi stupanj djelovanja postrojenja.

Eksperimentalna solarna elektrana Odeillo (istočni Pirineji, Francuska) stavljena je u pogon 19. studenoga 1976. priključkom na mrežu elektroenergetskog sistema. Ona iskorištava koncentrirano zračenje u

Sl. 3.28. Shema solarne elektrane Odeillo



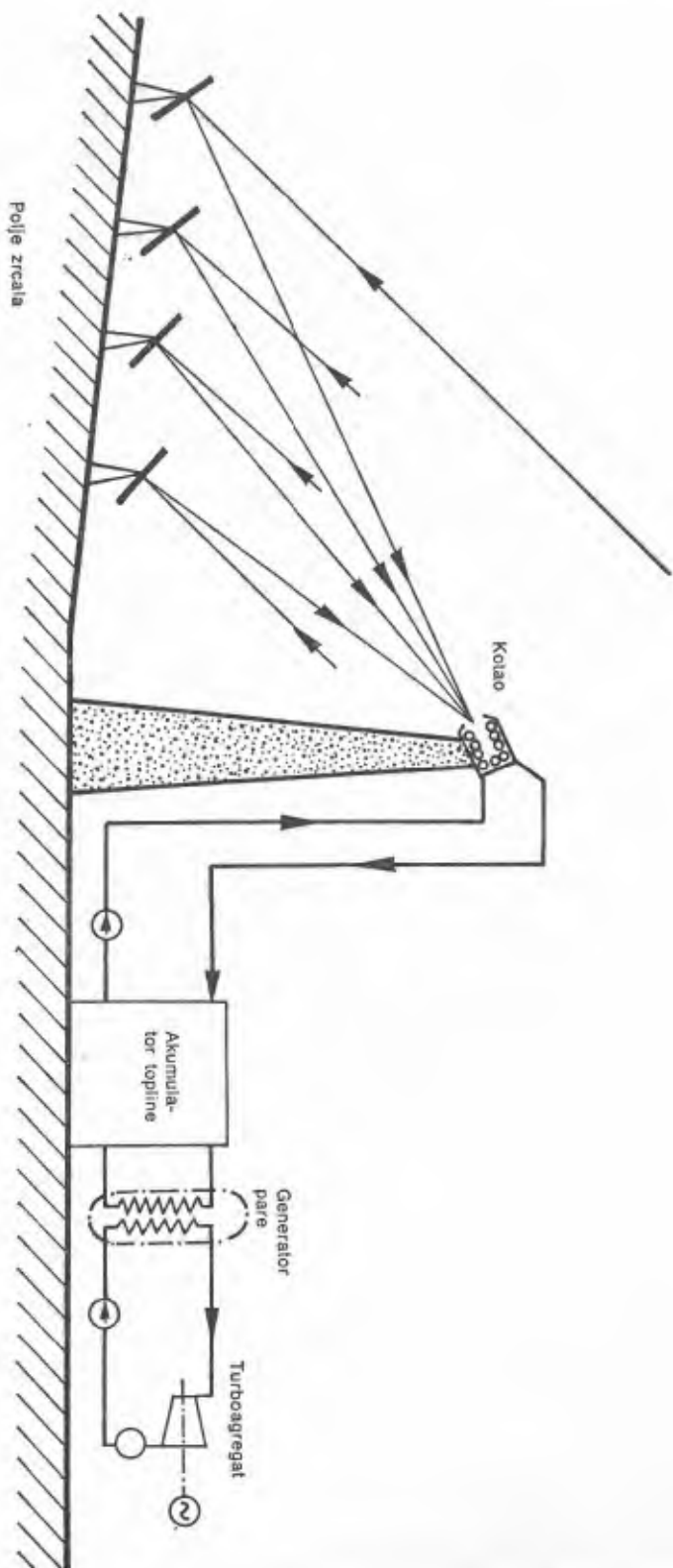
metalurškoj peći Odeillo (sl. 3.27). Za odvođenje topline iz sunčane peći služi terfenil (organska tekućina), koji se prolazom kroz cijevi ugrije na temperaturu od 335°C. Terfenil na toj temperaturi ostaje u tekućem stanju, jer isparava pri tlaku od 1 bara na temperaturi od 360°C. Tako se postiže dovoljno visoka temperatura uz niski tlak. Za-

grijani terfenil vodi se u spremnik koji služi kao akumulator topline, a odatle u zagrijač, isparivač i pregrijač, kroz koje također struji voda koja tamo isparava. Vodenom parom tjera se parna turbina, koja je neposredno spojena s električnim generatorom. Snaga elektrane je 64 kW. U spremniku se može akumulirati energija od 2 000 kWh. Eksperimentalna elektrana treba da posluži za proučavanje: energetske bilance u peći i spremniku; ponašanja spremnika i mogućnosti premoštenja oscilacija zračenja; ponašanja postrojenja za vrijeme oblačnog vremena i tokom noći, te mjera za smanjivanje gubitaka energije za vrijeme smanjene insolacije.

Ta proučavanja treba da posluže kao osnovica za izvedbu elektrane THEM 1, koja treba da uđe u pogon 1980. godine. To je elektrana s tornjem na kojem je smještena peć (sl. 3.29). Predviđa se da će biti postavljeno oko 500 ravnih zrcala (ukupne površine oko 22 000 m²), smještenih na površini od oko 6 ha sjeverno od tornja visokog 100 m. Snaga zračenja koja dopire do zrcala u podne za vrijeme ekvinocija iznosi 17 MW (800 W/m²). Zrcala su pomična i slijede kretanje Sunca, tako da zrake reflektirane od svih zrcala padnu u otvor peći na tornju. Računa se da je potrebno postići točnost od $\pm 4.10^{-3}$ radijana ($\pm 0,23^\circ$) položaja zrcala, da bi se ostvarila potrebna koncentracija zračenja u peći s otvorom površine od oko 50 m². U cijevima peći isparava voda i dobiva se zasićena para tlaka 180 bara i temperature 357°C. Prolazeći kroz sistem cijevi u spremniku, para zagrijava rastaljenu smjesu kalijevih i natrijevih nitrata koja služi kao akumulator topline. Ta rastaljena smjesa nitrata predaje toplinu vodi i pari u generatoru pare, koji je u stvari parni kotao za proizvodnju pare kojom se tjera parna turbina. Električni generator može proizvesti 3,1 MW u podne u vrijeme ekvinocija. Stupanj djelovanja u tom trenutku iznosi 18%, što znači da se toliko postotak dozračene energije pretvara u električnu energiju. Stupanj djelovanja još je niži kad se promatra cijela godina, jer uz manju snagu zračenja postrojenje radi s lošijim stupnjem djelovanja.

Izgradnjom elektrane THEM 1 želi se dovesti solarne elektrane toranjskog tipa do takvog stupnja razvoja na kojem bi se dostigla tehnička zrelost potrebna da se takve elektrane mogu koristiti za proizvodnju električne energije u zemljama s duljim trajanjem insolacije. Prije toga, međutim, treba riješiti problem proizvodnje i izbora karakteristika zrcala (heliostata), probleme smještaja i upravljanja zrcalima, probleme akumuliranja energije te probleme poboljšanja stupnja djelovanja i iskorištavanja otpadne topline.

U Francuskoj se također radi na projektu nazvanom THEK. To je solarna elektrana s raspodijeljenim kolektorima. Svaki kolektor ima parabolično-cilindrično zrcalo za linearnu koncentraciju zračenja, a za-



Sl. 3.29. Shema sunčane elektrane s tornjem

grijani medij odvodi se iz svih kolektora u zajednički spremnik koji je i akumulator topline. Ostali dijelovi jednaki su kao u elektrani THEM 1. Izgleda da je prednost takvog rješenja u tome što nije potreban to-ranj, ali je izvedba zrcala s kolektorima kompliciranija.

U SAD postoji velik program građe solarnih elektrana na temelju transformacija zračenje-toplina-električna energija. Pri kraju je gradnja elektrane snage oko 1 MW u Novom Meksiku i elektrane snage 10 MW u blizini Barstowa u Kaliforniji. Sredinom 1980. godine predviđa se dovršenje elektrane snage 100 MW. Ta bi elektrana imala 12 500 zrcala (heliostata) površine po 40 m² (ukupna površina 500 000 m²), pomoću kojih bi se reflektirane zrake koncentrirale u peći na tornju visokom 250 m. Razmatraju se dvije mogućnosti za osiguranje kontinuiranog iskorištavanja postrojenja: hibridni pogon elektrane s uređajem za proizvodnju pare izgaranjem goriva (konvencionalni parni kotao) ili akumulator topline s rastaljenim solima ili s organskim tekućinama.

Projektira se i gradnja solarne elektrane na jugu Italije, snage 1 MW. To je tip solarne elektrane s tornjem, a gradila bi ga poduzeća iz Italije, SR Njemačke i Francuske.

U Japanu je 1974. godine izgrađen plan Sunshine kojim se želi osigurati dugoročni razvoj tehnologije za iskorištavanje nekonvencionalnih oblika energije, u prvom redu Sunčeva zračenja. Prema tom planu, godine 1980. trebala bi biti puštena u pogon solarna elektrana snage 1 MW, a nakon toga i elektrana snage 10 MW.

Procjenjuje se da će investicije za gradnju solarnih elektrana iznositi 1 000 do 3 500 dolara po kW za koncentrirane kolektore, a 2 000 do 5 000 dolara po kW za raspodijeljene kolektore. Radi usporedbe, za nuklearne elektrane potrebne su investicije od 700 do 800 dolara po kW. Za pogon nuklearnih elektrana potrebno je još i gorivo, a u solarnim elektranama troškovi za gorivo ne postoje. Prilikom usporedbe, međutim, ne smije se zaboraviti da iskorištenje solarne elektrane ovisi o intenzivnosti zračenja (maksimalno iskorištenje solarne elektrane na području Zagreba iznosilo bi 15,5%, a na području Splita 20,0%, stvarno iskorištenje bilo bi još manje, jer stupanj djelovanja opada sa smanjenjem intenzivnosti zračenja). Iskorištenje nuklearne elektrane neovisno je o vremenskim prilikama, pa se može postići iskorištenje između 75 i 80%.

Te procjene investicija za solarne elektrane osnivaju se, međutim, na projektima i one nisu potvrđene iskustvom. Prema nekim procjenama, solarna elektrana na jugu Italije trebala bi stajati oko 7 000 dolara po kW. Najveća su nepoznanica troškovi gradnje heliostata.

Sigurnost opskrbe energijom iz takvih solarnih elektrana ovisi o prostornom rasporedu tih elektrana (ovisnost o insolaciji) i o jačini

mreže na koju će one biti priključene (promjenljivost njihove snage i mogućnost zamjene ostalim tipovima elektrana). Očekuje se da će krajem slijedećeg desetljeća biti sakupljeno dovoljno iskustava sa solarnim elektranama snage 50 do 100 MW, pa će se tek tada moći govoriti o ekonomskoj opravdanosti gradnje tih tipova solarnih elektrana.

Energija Sunčeva zračenja može se neposredno transformirati u električnu energiju (istosmjerna struja) pomoću solarnih ćelija, kojima je osnovni dio tanki sloj posebno pripremljenog silicija ili nekih drugih poluvodiča. Prva silicijeva solarna ćelija načinjena je 1955. godine u laboratorijima poduzeća Bell (SAD). Takve su ćelije već dvadesetak godina osnovni dio uređaja za opskrbu energijom svemirskih letjelica. Takva energetska transformacija naziva se fotovoltaična energetska transformacija.

Takva energetska transformacija ima vrlo velikih prednosti za iskorištavanje energije Sunčeva zračenja: solarne ćelije nemaju pokretnih dijelova; njihov vijek trajanja — u principu — dulji je od 100 godina; održavanje solarnih ćelija vrlo je jednostavno; one iskorištavaju neposredno i difuzno zračenje; njima se može postići bilo koja snaga (od vrlo malene do vrlo velike), jer je dovoljno povećati ukupnu površinu ćelija a nije potrebna koncentracija zračenja.

Visoka cijena solarnih silicijskih ćelija glavna je zapreka za njihovu upotrebu u proizvodnji električne energije. Za proizvodnju 1 kW električne energije potrebne solarne ćelije stoje 20 000 do 30 000 dolara. Stupanj djelovanja solarnih ćelija iznosi 12 do 15% (teorijski je maksimum 23%), pa je proizvodna cijena električne energije 100 do 200 puta veća od proizvodne cijene u konvencionalnim elektranama. Za solarne ćelije potreban je silicij najveće čistoće, a današnja proizvodnja takvog silicija vrlo je mala. Tako je npr. za elektranu snage 1 000 MW (to je snaga za koju se danas grade nuklearne elektrane) potrebno 30 000 tona takvog vrlo čistog silicija, a u 1974. godini njegova je proizvodnja u SAD iznosila oko 500 tona.

U sadašnjem trenutku, istraživanja i razvoj usredotočeni su na tehniku proizvodnje silicijevih ćelija sa svrhom da se smanje proizvodni troškovi na prihvatljivu razinu. Cilj je postići cijenu od 500 dolara po kW u 1985. godini. Kad se zna da to znači sniženje za 40 do 60 puta, može se procijeniti napredak koji se želi ostvariti. Uporedo s tim naporima nastoje se pronaći drugi tipovi solarnih ćelija (ćelije s kadmij-sulfidom, bakar-sulfidom i galij-arsenidom), s kojima se — kako izgleda — postižu bolji stupnjevi djelovanja i koje se mogu upotrijebiti u kolektorima s koncentracijom zračenja.

Za upotrebu fotovoltaične energetske transformacije u velikom opsegu, a to je vjerojatno budućnost iskorištavanja energije Sunčeva

zračenja, potrebno je osim sniženja proizvodne cijene solarnih ćelija provjeriti njihovu sigurnost u pogonu, ostvariti ekonomičnu i sigurnu akumulaciju energije, a potrebna su i postrojenja velike snage za pretvaranje istosmjerne u izmjeničnu struju.

5.3. *Proizvodnja vodika energijom Sunčeva zračenja*

Da bi se energijom Sunčeva zračenja mogao zadovoljiti znatan dio potreba za energijom, neophodno je pronaći pogodan transformirani oblik energije koji se može proizvesti pomoću energije zračenja. Taj transformirani oblik energije mora biti takav da se može akumulirati, kako bi se energija stavila na raspolaganje potrošačima i onda kad je intenzivnost zračenja mala ili kad uopće nema insolacije. Poznato je, naime, da je potražnja energije veća u doba kad je insolacija slaba i kad Sunce nije iznad horizonta. Pretvorba u električnu energiju sigurno je privlačiva, ali se ona ne može ekonomično akumulirati u većim količinama, a niti se može prenijeti na vrlo velike (transkontinentalne) udaljenosti.

Vodik je, kako se danas smatra, najpogodniji način koji može poslužiti za akumuliranje energije i medij koji se može transportirati na bilo koju udaljenost (plinovodima ili brodovima).

Vodik bi se mogao proizvoditi postupkom elektrolize u specijalnim solarnim elektranama, postavljenim na područjima sa znatnom insolacijom (npr. u tropskom i u suptropskom pojasu) u kojima nije moguća nikakva ljudska aktivnost. Te bi elektrane bile spojene s potrošačkim područjima plinovodima pod tlakom, a dio proizvedenog vodika mogao bi se u tekućem stanju prevoziti i brodovima. Svakako da treba predvidjeti mogućnost uskladištenja vodika, jer se samo tako mogu uskladišiti proizvodnja i potrošnja. Uskladištenje vodika moguće je u podzemlju, među nepropusnim slojevima, ili u posebnim spremnicima, u tekućem stanju, ali uz znatno veće troškove. Proizvodnja vodika moguća je i u drugim tipovima elektrana radi povećanja njihovog iskorištenja (to dolazi u obzir za nuklearne elektrane kad njihov udio u sistemima bude znatan, pa će se pojaviti razdoblja tokom dana i sedmice kad njihova snaga neće biti potpuno iskorištena), ali se vodik može proizvoditi i termokemijskim postupcima. Sve to omogućuje kombiniranu proizvodnju vodika, što bi moglo cijeli sistem učiniti elastičnijim.

Danas se vodik upotrebljava kao osnovna sirovina za sintezu kemijskih proizvoda i u petrokemiji. U Sjevernoj Americi i Zapadnoj Evropi utrošeno je 1970. godine oko 200 milijarda m³ vodika, od čega polovica

za proizvodnju amonijaka, a četvrtina u petrokemijskoj industriji. Računa se da će samo na području zajedničkog tržišta Zapadne Evrope u 1980. godini potrošnja vodika iznositi oko 100 milijarda m³.

Potrošnja vodika mogla bi se znatno povećati, kad bi se njegova cijena snizila do takvog iznosa da postane konkurentan drugim oblicima energije. S druge strane, dalje povećanje cijena sirovoj nafti može utjecati na povećanje potražnje vodika. Postoje, naime, vrlo velike mogućnosti upotrebe vodika.

Vodik je idealno gorivo za grijanje prostorija, jer se njegovim izgaranjem proizvodi samo voda, pa može izgarati u sobi bez dimnjaka. Vodik se može upotrijebiti kao gorivo za gorive ćelije kojima se proizvodi električna energija tzv. hladnim izgaranjem. To vjerojatno predstavlja mogućnost decentralizacije proizvodnje električne energije, jer je u svaki blok kuća moguće bez poteškoća postaviti gorivu ćeliju koja nema pokretnih dijelova i ne traži nadzor u pogonu. U industriji prerade minerala vodik se može upotrijebiti kao redukcijsko sredstvo, a u metalurgiji on se može iskoristiti zbog svoje visoke temperature izgaranja. Predviđa se upotreba vodika, bilo čistog ili u smjesi s benzinom, kao goriva za pogon motora s unutrašnjim izgaranjem (automobilski motori). U budućnosti bit će moguća upotreba vodika kao pogonskog goriva za nadzvučne avione.

Ogrjevna moć vodika tek je trećina ogrjevnice moći zemnog plina, što znači da je za jednaku energiju potrebna trostruka količina vodika. Zbog toga, bit će potrebno transportirati vodik pod većim tlakom, da se suviše ne povećaju dimenzije plinovoda. Inače, struktura instalacija neće se bitno razlikovati od onih koje se upotrebljavaju za transport zemnog plina. Bit će potrebna veća potrošnja energije za pogon kompresora, pa se procjenjuje da će troškovi za transport vodika biti za 40 do 50% veći od troškova za transport zemnog plina za jednaku količinu energije. Treba spomenuti da danas postoje plinovodi za transport vodika (u SR Njemačkoj u području Düsseldorf-Essen i u SAD u Texasu).

Uskladištenje vodika, kao i zemnog plina, moguće je u tekućem stanju. Da vodik prijeđe u tekuće stanje, potrebno ga je ohladiti na temperaturu od -253°C (zemni plin na temperaturu od -160°C). Osim toga, za uskladištenje tekućeg vodika potreban je za istu količinu energije tri puta veći volumen spremnika nego za zemni plin. Spremnik za 3 400 m³ vodika izgrađen je u SAD. Predviđa se također akumulacija vodika u obliku metalnog hidrida, jer se tako smanjuje volumen na 6%. Za ponovno dobivanje vodika, potrebno je metalni hidrid ugrijati ili ga dovesti u područje sniženog tlaka. Takav način spremanja vodika vjerojatno dolazi u obzir pri upotrebi vodika kao pogonskog goriva za vozila u kojima će se vodik oslobađati za vrijeme upotrebe.

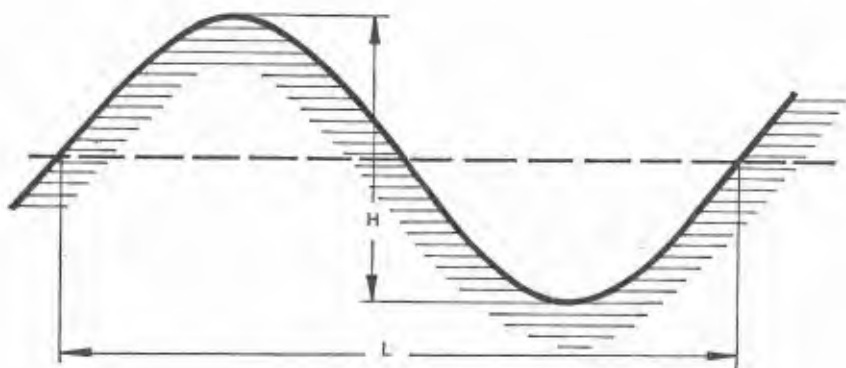
Distribucija vodika može se provesti na isti način kao i distribucija zemnog plina, pa se mogu upotrijebiti isti plinovodi. Treba spomenuti da se već godinama distribuira plin proizveden rasplinjavanjem ugljena

koji sadrži 50 do 60% vodika. Danas se potrošači u Baselu (Švicarska) opskrbljuju plinom u kojem ima 80% vodika. Poželjno je da vodik namijenjen potrošačima ima neki miris, što se postiže izvjesnim dodacima, te da bude tako kondicioniran da njegov plamen bude vidljiv, sve to sa svrhom povećanja sigurnosti pri njegovoj upotrebi. Uspoređujući troškove distribucije vodika i električne energije, pokazuje se da je distribucija vodika ekonomičnija od distribucije električne energije, a osim toga moguće je akumulirati veće ili manje količine vodika na pogodnim točkama mreže.

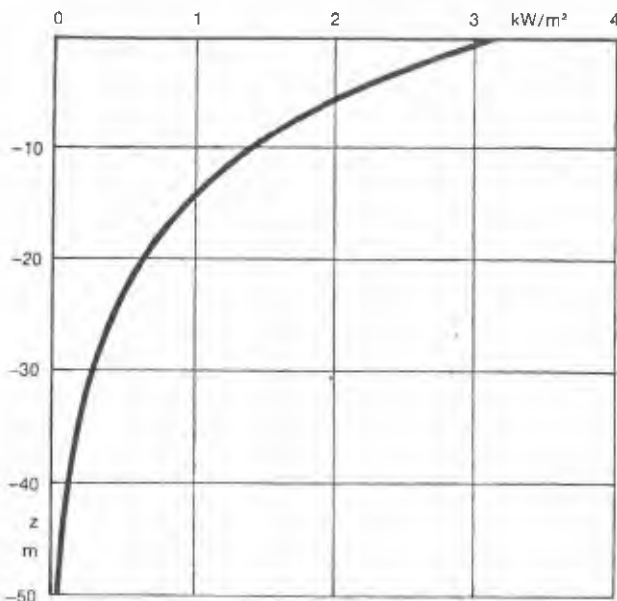
6. ENERGIJA MORSKIH VALOVA

Morski valovi nastaju djelovanjem vjetra, a vjetar djelovanjem Sunčeva zračenja. Iako postoji tisućljetno iskustvo o djelovanju valova, tek je posljednjih godina porastao interes za njihovo energetske iskorisćavanje.

Osnovne su karakteristike vala: visina i duljina (sl. 3.30). Vremenski razmak između dvije amplitude proporcionalan je drugom korijenu duljine vala. Energija valova proporcionalna je kvadratu visine vala i obrnuto proporcionalna vremenskom razmaku između dvije amplitude. Ona naglo opada s dubinom (sl. 3.31), pa već na dubini od 20 m iznosi samo 20% od energije neposredno ispod površine, a na dubini od 50 m samo oko 2% od energije neposredno ispod površine. To je energija valova po jedinici površine okomite na smjer kretanja



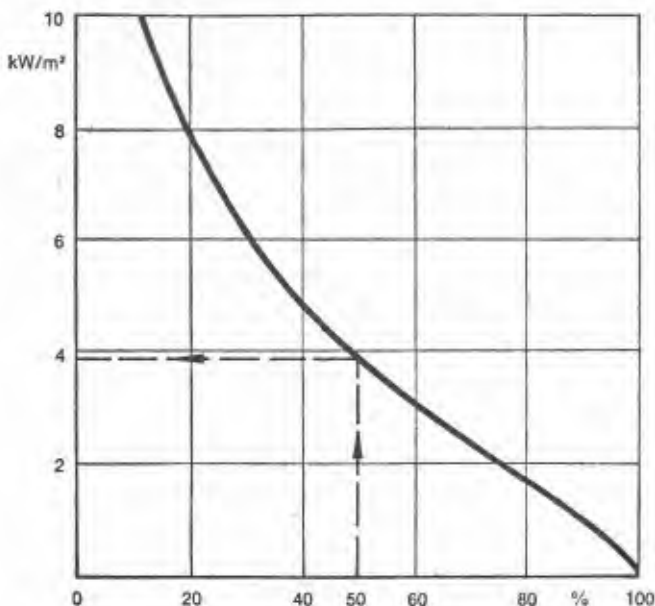
Sl. 3.30. Visina (H) i duljina (L) morskog vala



Sl. 3.31. Razdioba snage morskih valova po dubini (z) ispod morske površine (za $H=2\text{ m}$ i vremenski razmak između dvije amplitude $T=10\text{ s}$)

valova. Ona se mijenja u ovisnosti o brzini vjetra, pa može imati vrijednost i veću od 10 kW/m^2 , ali i vrijednost praktički jednaku nuli (sl. 3.32). Podaci na sl. 3.32. vrijede za područje sjevernog Atlantika, na pučini između Škotske i Islanda (59° sjeverne širine, 19° zapadne duljine). Površina koja je određena koordinatnim osima i krivuljom (sl. 3.31) proporcionalna je ukupnoj energiji valova, za određenu visinu i vremenski razmak između dviju amplituda, pa se može odrediti snaga valova po metru duljine na morskoj površini. Za visinu od 2 m i vremenski razmak od 10 s , između dviju amplituda ta energija iznosi oko 40 kW/m . Svakako da se tako definirana energija valova mijenja s brzinom vjetra, te da snaga ovisi o godišnjem dobu i o vremenskim prilikama. Na sl. 3.33. vidi se vjerojatnost pojave tako definirane snage na spomenutom dijelu Atlantika. Posebno su prikazane prilike u zimskom (prosinac-veljača), a posebno u ljetnom razdoblju (lipanj-kolovoz). Kad se uzmu u obzir i snage veće od 150 kW/m , koje nisu prikazane na sl. 3.33, dobiva se prosječna godišnja snaga od oko 90 kW/m . Ta je energija u blizini obala mnogo manja, pa uz obalu južne Norveške (59° sjeverne širine, 5° istočne dužine) iznosi oko 20 kW/m .

Duljina obala uz oceane svih pet kontinenata (bez područja oko polova) iznosi oko 100 milijuna metara, pa ako se računa s prosječnom

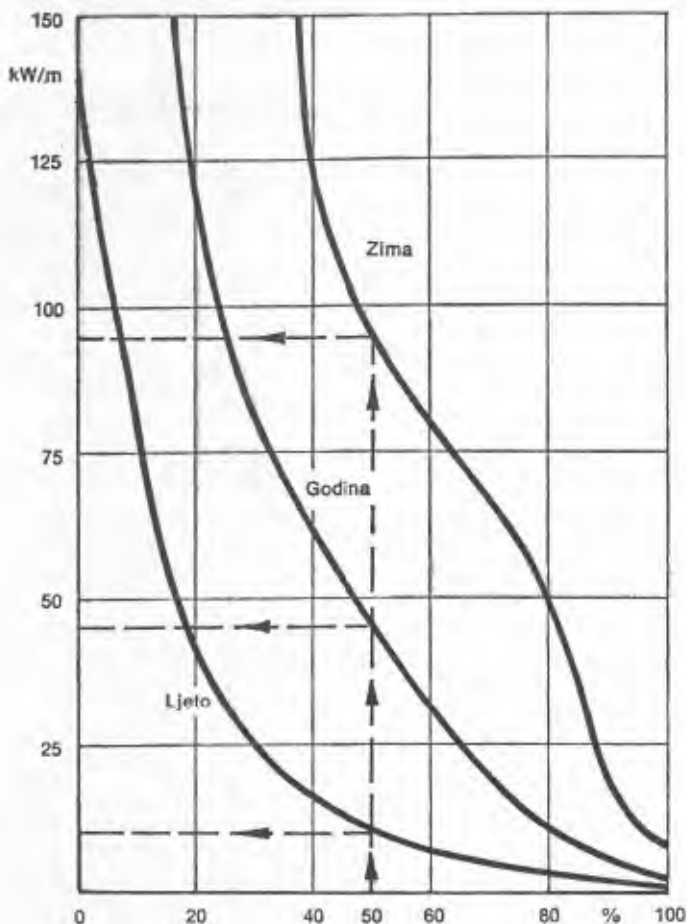


Sl. 3.32. Vjerojatnost pojave snage valova po m^2 neposredno uz morsku površinu okomitu na smjer valova (u 50% vremena snaga je valova $3,9 \text{ kW/m}^2$ ili veća)

godišnjom snagom od 10 kW/m^2 , dobiva se prosječna godišnja snaga od 10^9 kW , odnosno godišnja energija od oko 9 000 milijarda kWh, a to je više nego što je u 1977. godini proizvedeno u svim elektranama u svijetu (oko 7 000 milijarda kWh).

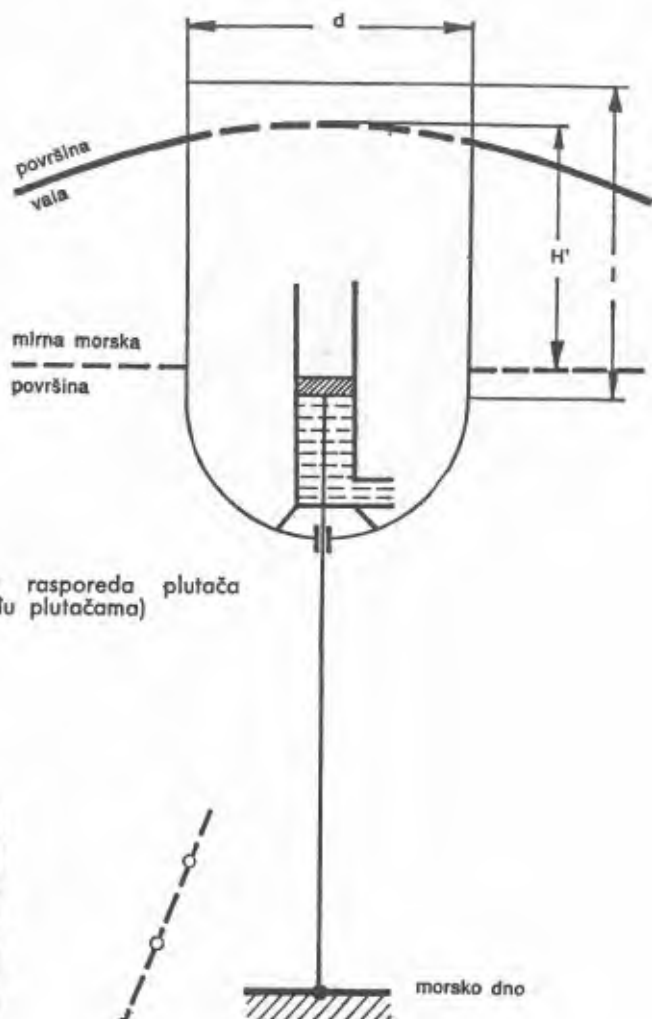
Svakako da će, zbog lakšeg dovođenja energije potrošačima na kopno, biti jednostavnije iskoristavati energiju valova neposredno uz obalu, iako je energija valova na pučini znatno veća.

Jedno od mogućih rješenja za iskorištavanje energije valova vidi se na sl. 3.34. Sastoji se od plutače koja se diže i spušta u ritmu kretanja valova, a uz nju je pričvršćen cilindar u kojem je stap usidren za dno. Kretanjem cilindra stap tlači vodu, koja se zbog povećanog tlaka može dignuti do razine iznad površine mora; tako sakupljena voda može se energetske iskoristiti u vodnoj turbini. Kao medij za prijenos energije može se također upotrijebiti zrak koji se djelovanjem stapa komprimira i koji se može upotrijebiti za pogon turbine. Naravno da je moguće pravocrtno kretanje stapa pretvoriti u kružno gibanje (kao u parnom stroju ili motoru s unutrašnjim izgaranjem), pa tu mehaničku energiju iskoristiti za pogon električnog generatora. U svakom slučaju, naime, mora se dobiti električna energija, jer se proizvedena energija mora prenijeti do obale.

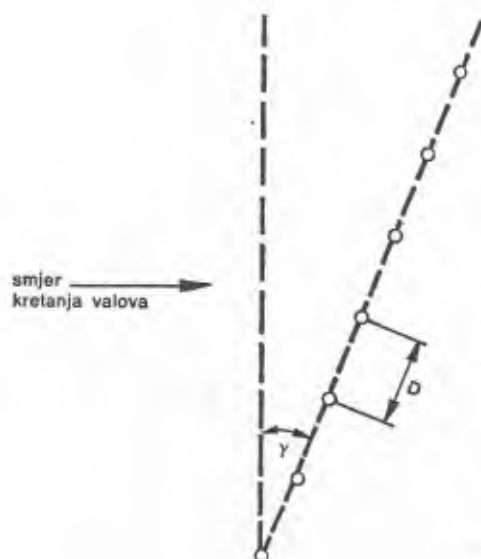


Sl. 3.33. Vjerojatnost pojave snage valova po m duljine neposredno uz morsku površinu okomito na smjer valova (u 50% vremena ljeti je snaga 10 kW/m ili veća, zimi 95 kW/m ili veća, a u godini 45 kW/m ili veća)

Zamišlja se da bi se postavio niz plutača (sl. 3.35) međusobno dovoljno udaljenih da se spriječi međusobno negativno djelovanje. Izgleda da je napovoljnije da razmak među plutačama bude jednak duljini vala. Za vremenski razmak od 10 s između dviju amplituda dobiva se duljina vala od oko 156 m, pa je snaga valova koja se može iskoristiti jednom plutačom jednaka 1 000 kW, ako je visina vala 2 m. Prema tome, da se postignu snage koje danas nešto znače za opskrbu energijom, treba postaviti mnogo takvih plutača. Za prilike na pučini Atlantskog



SI. 3.35. Primjer rasporeda plutača
(D razmak među plutačama)



SI. 3.34. Plutača sa stepnim uređajem; H' trenutna visina vala

oceana plutača promjera $d = 16$ m i visine $l = 8$ m mogla bi iskoristiti godišnje oko 10 milijuna kWh energije valova. Uz stupanj djelovanja od 20%, što se vjerojatno može postići, jedna bi plutača mogla osigurati proizvodnju od 2 milijuna kWh električne energije. Radi usporedbe navodi se da agregat snage od 600 MW u termoelektrani može godišnje proizvesti 3 600 milijuna kWh, pa bi za njegovu zamjenu trebalo postaviti 1 800 plutača, a duljina lanca plutača iznosila bi 280 km. Naravno da bi se pojavile oscilacije proizvodnje u ovisnosti o snazi valova i o njihovom smjeru kretanja.

Iskorištavanje energije valova bit će vjerojatno ograničeno zbog geografskih faktora i ekonomskih ograničenja, u prvom redu izazvanih problemom prijenosa tako proizvedene energije.

7. NUKLEARNA FUZIJA

7.1. *Osnovno o nuklearnoj fuziji*

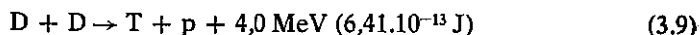
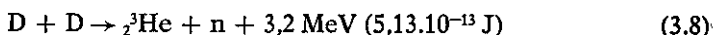
Nuklearna fuzija može se nazvati nuklearnim izgaranjem. Izgaranje je, naime, kemijsko spajanje atoma uz oslobađanje energije (najčešće je izgaranje ugljika iz fosilnih goriva spajanjem s kisikom iz zraka). Nuklearna fuzija je spajanje atomskih jezgara lakih elemenata uz oslobađanje energije. Takve nuklearne reakcije izvor su energije Sunca i zvijezda, a otkrivene su u laboratorijima prije više od 40 godina. Na njima »izgara« vodik međusobnim spajanjem atoma vodika, pri čemu nastaje helij uz oslobađanje energije. Budući da se ne može očekivati da će se na Zemlji stvoriti takvi uvjeti kakvi vladaju na Suncu i zvijezdama i koji omogućavaju spajanje vodikovih atoma, nužno je upotrijebiti druge lake atome kao fuzijsko gorivo. To su u prvom redu deuterij i tricij, dva izotopa vodika. Izotopi vodika, a to vrijedi i za izotope svih kemijskih elemenata, imaju jednaka kemijska svojstva kao vodik, ali se razlikuju od vodika po broju neutrona u jezgri. Normalni vodik ima u jezgri jedan proton i nema neutrona, deuterij pored protona ima jedan neutron, a u jezgri tricija postoje pored protona još i dva neutrona. Atomska masa vodika iznosi 1, deuterija 2, a tricija 3; zbog toga se deuterij naziva teški, a tricij superteški vodik.

Deuterij je stabilni izotop koji postoji zajedno s normalnim vodikom. On se nalazi na Zemlji, još od postanka Sunčeva sustava, pomiješan s normalnim vodikom. Deuterij se spaja s drugim elementima kao i normalni vodik, pa se tako u vodi, koja je spoj vodika i kisika, nalazi također deuterij. On s kisikom čini tzv. tešku vodu. Voda na Zemlji sadrži 1 atom deuterija na oko 6 000 atoma normalnog vodika,

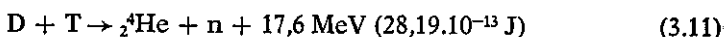
pa u toni vode ima oko 34 g deuterija. Prema tome, da se dobije 1 tona deuterija treba »preraditi« $29,4 \cdot 10^3$ t vode. Odjeljivanje teške vode iz prirodne vode, međutim, nije komplicirano, jer se gustoće prirodne i teške vode znatno razlikuju (za nešto više od 10%). Budući da u morima ima oko $1,5 \cdot 10^9$ km³ vode, morska voda sadrži oko $51 \cdot 10^{12}$ (51 000 milijarda) tona deuterija.

Tricij, međutim, ne postoji u prirodi. On je radioaktivni izotop, koji se spontano raspada uz emisiju jednog elektrona i pretvara se u stabilni helijev izotop He-3 (s dva protona i jednim neutronom). Vrijeme poluraspada tricija iznosi 12,3 godina, što znači da će se kroz to vrijeme raspasti polovica atoma tricija. Tricij se, prema tome, može proizvesti samo pogodnim nuklearnim reakcijama.

Fuzija deuterija s deuterijem može se prikazati dvjema osnovnim reakcijama:



gdje je D simbol za deuterij, T za tricij, n za neutron, p za proton, a He za helij. Gornja brojka uz simbol za helij označava broj protona i neutrona u jezgri (broj nukleona), a donja broj protona. Ako se uvede analogno označavanje, dobiva se ${}_1^2\text{H}$ za deuterij, a ${}_1^3\text{H}$ za tricij. Prema tome, postoje dvije mogućnosti fuzije deuterija, a njihova pojava ima praktički jednaku vjerojatnost. U prvoj reakciji nastaje izotop helija (He-3) i neutron, u drugoj tricij i proton, uz oslobađanje energije. U takvom procesu oslobođena energija znatno se povećava jer se produkti tih reakcija, He-3 i tricij, spajaju s deuterijem prema relacijama:



Prema tome, od šest atoma deuterija nastala su dva atoma He-4, te po dva protona i neutrona, uz oslobađanje energije od 43,1 MeV ($69,05 \cdot 10^{-13} \text{ J}$). To znači da se fuzijom 1 kg deuterija oslobađa $3,47 \cdot 10^{14} \text{ J}$, što odgovara energiji 96,3 GWh, ili $11,8 \cdot 10^3$ t ekvivalentnog ugljena. Kad bi se sav deuterij iz vode na Zemlji upotrijebio kao fuzijsko gorivo, dobila bi se energija od $4,9 \cdot 10^{15} \text{ TWh}$. To je energija koja je jednaka energiji Sunčeva zračenja koje dopire do površine Zemlje kroz više od 4,5 milijuna godina.

Kako će se vidjeti, spajanje deuterija s deuterijem mnogo je teže ostvariti nego fuziju deuterija s tricijem. Da bi se ostvarila takva fuzija, potrebno je najprije proizvesti tricij, jer se njega ne nalazi u prirodi. To se može postići bombardiranjem litija neutronima. Prirodni litij sastoji se od dva izotopa, Li-6 i Li-7. U prirodnom litiju ima 7,24%

Li-6. Litij je relativno rijedak element u stijenama (30 dijelova na milijun), a petnaesti je element po koncentraciji u morskoj vodi, u kojoj ga ima 0,13 dijelova na milijun (urana npr. ima samo 0,003 dijelova na milijun). Danas se litij dobiva iz različitih minerala pegmatita, koji ga sadrže od 0,3 do 10%. Godišnja potrošnja iznosi tek oko 3 500 tona, a poznate svjetske rezerve iznose oko $5 \cdot 10^6$ t. Treba spomenuti da dosadašnja istraživanja rezerva litija nisu bila intenzivna, jer je malu potražnju bilo lako zadovoljiti i poznatim rezervama. Svakako da su rezerve litija znatno veće od poznatih, a pogotovo kad se uzmu u obzir one u morskoj vodi gdje se nalaze milijarde tona litija.

Za dobivanje tricija iz litija potrebno je ostvariti slijedeće reakcije:



Spajanjem neutrona s *Li-6* (3.12) oslobađa se energija, a za spajanje neutrona s *Li-7* treba dovoditi energiju. Tako dobiveni tricij spaja se s deuterijem prema relaciji (3.11). Takvim relacijama ukupno se oslobađa energija od 37,5 MeV ($60,06 \cdot 10^{-13} \text{ J}$), jer se mora računati s dvije reakcije (3.11). Prema tome, iz 1 kg *Li-6* dobiva se $6,03 \cdot 10^{14} \text{ J}$, a uzevši u obzir udio *Li-6* u prirodnom litiju iz 1 kg prirodnog litija može se dobiti energija od $4,37 \cdot 10^{13} \text{ J}$, što odgovara energiji od 12,1 GWh, ili $1,49 \cdot 10^3$ t ekv. ugljena. Ako se računa samo s poznatim rezervama litija, energija koju je moguće dobiti iz litija iznosi oko 70% od ukupnih svjetskih rezerva ugljena (tabl. 2.3). S druge strane, kad se računa sa stupnjem djelovanja od 40%, poznatim rezervama litija moglo bi se proizvesti 400 puta više električne energije nego što je proizvedeno u 1975. godini u svim elektranama.

Omogućenje nuklearne fuzije osiguralo bi, dakle, opskrbu čovječanstva energijom do u daleku budućnost.

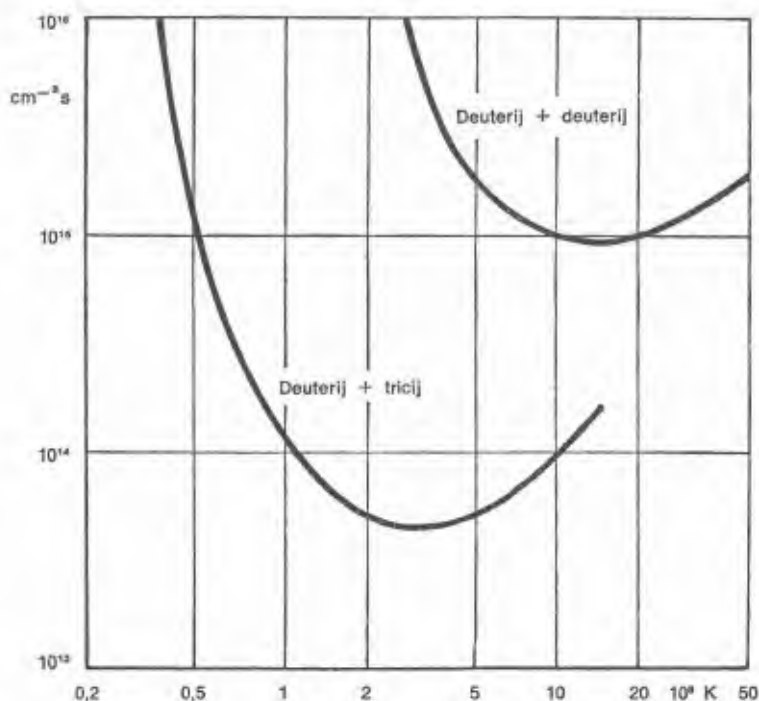
7.2. Uvjeti za nuklearnu fuziju

Kao što je za kemijsko izgaranje potrebno ugrijati gorivo na temperaturu zapaljenja, koja ovisi o vrsti goriva i iznosi nekoliko stotina °C, tako se i laki atomi, da bi se mogli spojiti moraju dovesti na takvu temperaturu pri kojoj je njihovo spajanje moguće. Za razliku od kemijskog izgaranja, za nuklearno izgaranje potrebne su temperature reda veličine 100 milijuna K. Na tolikoj temperaturi materija je u plinovitom stanju i ionizirana, pa se plinovi u takvom stanju nazivaju plazmom. Da bi se ostvarila nuklearna fuzija, mora biti postignuta dovoljna gustoća nuklearnih jezgara u plazmi i moraju se jezgre dovoljno dugo

zadržati u tom stanju. S gustoćom jezgara, naime, raste vjerojatnost spajanja jezgara; ta se vjerojatnost također povećava s trajanjem zadržavanja jezgara u ioniziranom stanju. Zadržavanje u stanju plazme od bitnog je značenja, jer se plazma u dodiru s »običnom« materijom brzo hladi i intenzivno reagira. Za energetske iskorištavanje fuzije, osim toga, mora energija proizvedena fuzijom biti veća od energije koja je potrebna da se gorivo dovede u stanje plazme, te da se oslobođena energija pretvori u oblik koji se može dalje iskorištavati (u toplinu ili električnu energiju). Oslobođena energija pojavljuje se u obliku kinetičke energije neutrona i atoma helija; oko 80% reakcijske energije dobivaju neutroni, a oko 20% atomi helija.

Budući da mogućnost nuklearne fuzije ovisi o gustoći (n) čestica goriva i o vremenu (τ) zadržavanja tih čestica u ioniziranom stanju, minimalni uvjeti za ostvarenje fuzije mogu se definirati produktom tih dviju veličina

$$A = n \tau \text{ cm}^{-3} \text{ s} \quad (3.14)$$



Sl. 3.36. Ovisnost produkta (3.14) o temperaturi za fuziju deuterija i tritija, te za fuziju deuterija i deuterija

gdje je n gustoća iona goriva (iona/cm³), a τ trajanje zadržavanja u sekundama. To je Lawsonov kriterij. Za reakciju deuterija i tricija vrijedi odnos temperature i produkta A prikazan na sl. 3.36. To je, naravno, najniža moguća vrijednost produkta A . Ako se npr. pretpostavi da je potrebno postići vrijednost $A = 10^{14}$ cm⁻³ s, te da je postignuta gustoća iona $2 \cdot 10^{14}$ iona/cm³, nužno je ostvariti zadržavanje plazme duže od 0,5 s. Gustoća reda veličine 10^{14} iona/cm³ znači da se ioni nalaze praktički u vakuumu, jer se u zraku na atmosferskom tlaku nalazi oko $2,7 \cdot 10^{19}$ molekula u cm³.

7.3. Mogućnosti ostvarenja uvjeta za fuziju

Smatra se da će prva generacija fuzijskih reaktora iskorištavati spajanje deuterija i tricija, jer je za fuziju deuterija s deuterijem potrebna viša temperatura (sl. 3.36).

Osnovni je problem zadržavanje plazme, jer se ioni kreću vrlo velikim brzinama (oko 1 000 km/s), a elektroni još brže. Postoji, prema tome, vrlo velika opasnost da plazma dođe u dodir s drugim materijalima koji ne mogu izdržati toliku temperaturu, što bi dovelo do hlađenja plazme, a to bi spriječilo dalju fuzijsku reakciju. U principu postoje tri metode za zadržavanje plazme: gravitacijska, magnetska i inercijska metoda.

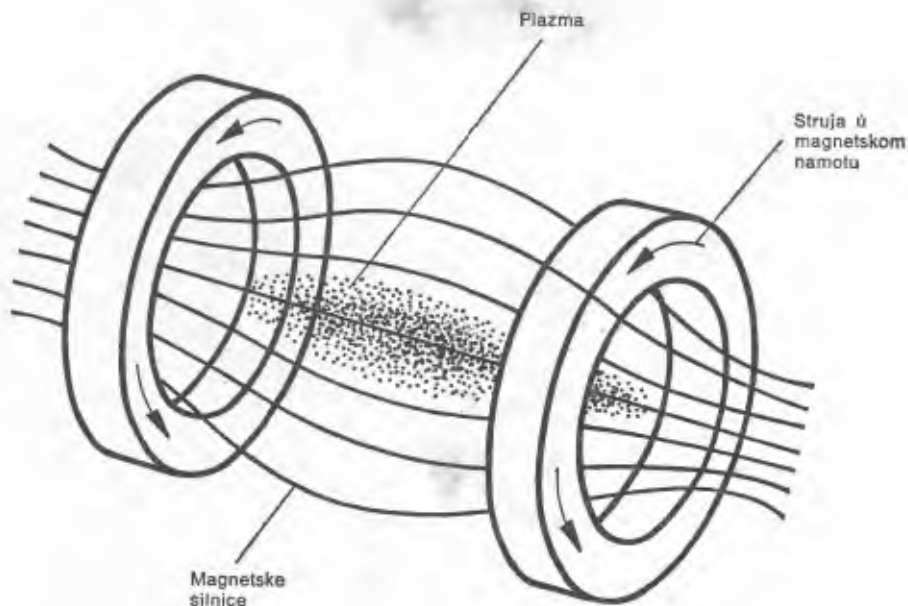
Na Zemlji se ne može primijeniti gravitacijska metoda, jer je sila gravitacije same Zemlje nedovoljna za zadržavanje plazme. Na zvijezdama, naime, gravitacija zadržava plazmu, jer je njihova masa vrlo velika. Trajanje zadržavanja plazme usporedivo je sa životnim vijekom zvijezda.

Magnetsko zadržavanje plazme osniva se na svojstvima plazme i magnetskog polja. Budući da je plazma dobar vodič električne struje, moguće ju je djelovanjem magnetskog polja održati unutar magnetskog polja da bi se zadovoljio Lawsonov kriterij (3.14).

Inercijskim zadržavanjem postiže se izgaranje dijela plazme fuzijskim reakcijama prije nego se plazma rasprši. To je metoda koja je primijenjena u termonuklearnim bombama, u kojima je fuzijsko gorivo ugrijano eksplozijom nuklearne bombe.

U principu postoje dva sustava za magnetsko zadržavanje plazme: otvoreni i zatvoreni sustav.

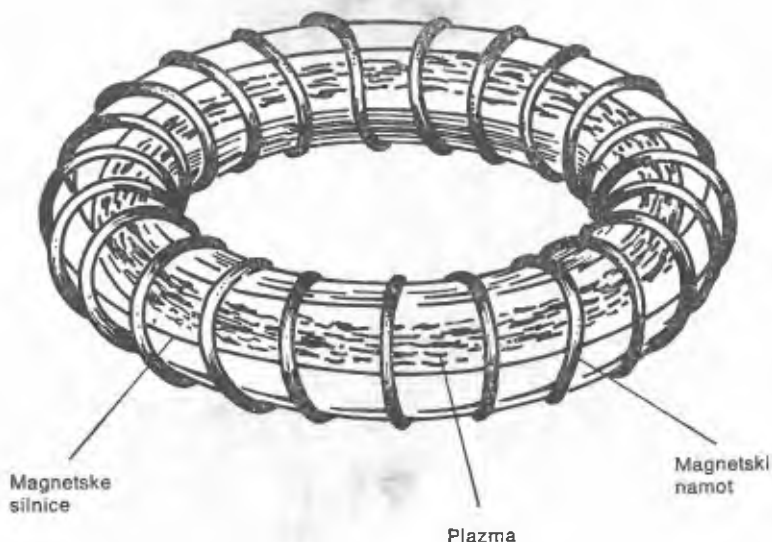
U otvorenom sustavu (sl. 3.37) magnetske silnice prolaze kroz otvore na krajevima komore za zadržavanje plazme, ali čestice plazme ne mogu proći kroz te otvore jer u njima vlada jako magnetsko polje proizvedeno strujom u namotima na kraju komore. Područje jakog magnetskog polja na krajevima komore naziva se magnetskim zrcalima.



Sl. 3.37. Skica otvorenog sustava za magnetsko zadržavanje plazme

Zrcalno djelovanje pojačanog magnetskog polja sprečava bijeg čestica kroz otvore na kraju komore. To djelovanje, međutim, nije potpuno, jer će čestice koje se u blizini krajeva komore kreću paralelno s magnetskim silnicama pobjeći iz komore. Zbog toga su negdje napuštena istraživanja otvorenih sustava, a u nekim laboratorijima razvijaju se otvoreni sustavi s ubacivanjem električki neutralnih čestica u fuzijsku komoru i s neposrednom konverzijom energije plazme koja bježi iz fuzijske komore u električnu energiju. Ubacivanjem neutralnih čestica postižu se visoke temperature plazme (red veličine 10^8 K) i potrebna gustoća iona (10^{14} iona/cm³). To su vrijednosti koje su potrebne za buduće fuzijske reaktore, ali je postignuto vrijeme zadržavanja plazme vrlo kratko (nekoliko milisekunda, a potrebno je 1 ili više sekunda).

U zatvorenom sustavu plazma se nalazi u torusu (sl. 3.38) oko kojeg je magnetski namot koji proizvodi magnetsko polje u unutrašnjost torusa. Takav sustav naziva se tokomak. On je analogan velikom transformatoru u kojem komora služi kao sekundarni namot. Kad električna struja poteče kroz magnetski namot postavljen oko torusa, inducirat će se u komori električno polje koje će izazvati proboj u plinovima koji se tamo nalaze i nastat će električna struja, koja će postepeno rasti zbog sve veće ionizacije plinova u komori. Jakost struje dostiže

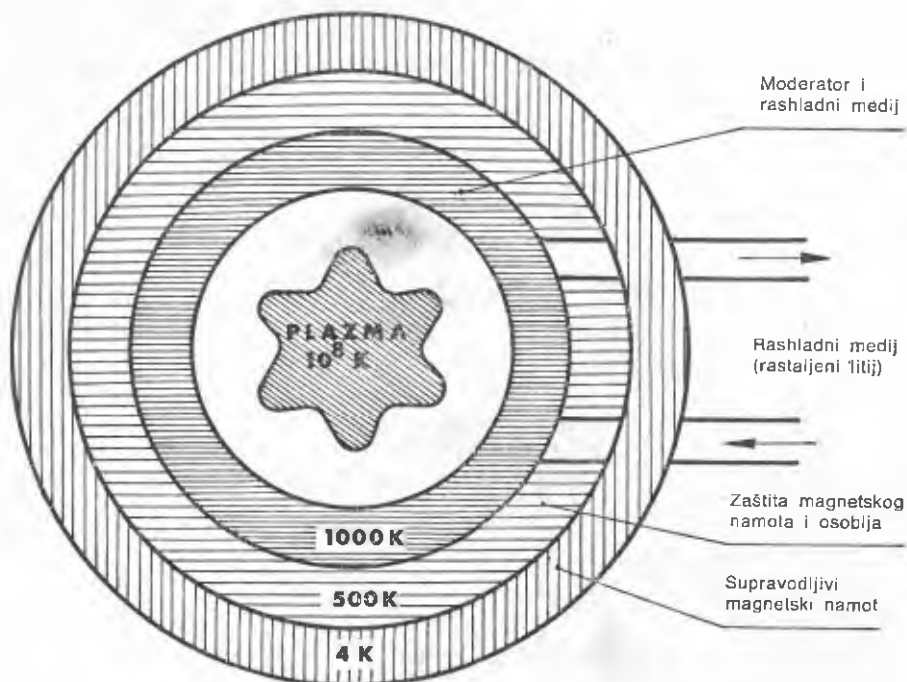


Sl. 3.38. Skica zatvorenog sustava za magnetsko zadržavanje plazme (tokomak)

vrijednosti od nekoliko stotina tisuća ampera. Prolazom struje kroz ionizirane plinove, oni se mogu zagrijati do temperature od desetak milijuna K. Magnetsko polje sprečava da električki nabijene čestice dospiju do stijenki torusa, pa se tako proizvedena plazma nalazi u središtu torusa i ona se kreće unutar torusa po koncentričnim kružnicama. U principu, električki nabijene čestice kretale bi se po tim koncentričnim kružnicama neizmjereno dugo a da ne bi dospjele do stijenki komore. To vrijedi, međutim, samo dok se ne pojavi fuzija čestica koje rotiraju. U skladu s teorijom, nakon svakog spajanja čestica nastaje difuzija kojom se čestice premještaju s jedne koncentrične kružnice na drugu, da bi konačno nakon nekog vremena dospjele do stijenke. Trajanje te difuzije, da bi se ostvarila fuzija, mora biti dulje od potrebnog trajanja zadržavanja plazme. S povećanjem dimenzija torusa povećava se i trajanje difuzije, pa se smatra da se mogu osigurati potrebni uvjeti za fuziju ako se povećaju dimenzije sustava. Teorija tokomaka, koja je razvijena u SSSR-u, prethodila je da je trajanje difuzije proporcionalno kvadratu dimenzija torusa, što je potvrđeno i pokusima.

U danas postojećim najvećim postrojenjima tipa tokomak (T-10 u SSSR-u i PLT u SAD), koja imaju slične dimenzije, postignute su temperature sedam i jedanaest milijuna K i gustoća iona u središtu stupca plazme oko 10^{14} iona/cm³. Ta je gustoća dovoljna za buduće fu-

zijske reaktore, ali je potrebno postići za oko deset puta višu temperaturu. Povišenje temperature može se ostvariti dodatnim metodama zagrijavanja. Jedna od njih sastoji se u uvođenju električki neutralnih čestica u fuzijsku komoru. Efikasnost te metode dokazana je pokusima u postrojenjima TFR u Francuskoj i ORMAK u SAD, pa se smatra da se tako može postići povišenje temperature za dva do tri puta, dakle do 20 milijuna K. Za dalje povišenje temperature, do 100 milijuna K, potrebne su dodatne metode.



Sl. 3.39. Shematski prikaz presjeka komore tokomaka

Trajanje zadržavanja plazme postignuto u spomenutim postrojenjima u SSSR-u i SAD iznosi 0,05 do 0,06 sekunda, što odgovara vrijednosti Λ od oko $0,5 \cdot 10^{13}$. Ta će vrijednost, kako se očekuje, biti povećana za dva-tri puta kad ta postrojenja budu u pogonu s punom snagom (krajem 1977. godine radila su s polovicom snage). Veće vrijednosti produkta Λ (do $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$) postignute su u tokomaku manjih dimenzija (Alcator, MIT, SAD) ali s jačim magnetskim poljem. Za fuzijske reaktore potrebno je ostvariti 10–15 puta veće vrijednosti faktora Λ , što se izgleda može postići povećanjem dimenzija tokomaka.

Zbog toga se grade ili se predviđa gradnja tokomaka većih dimenzija: TFTR (SAD), JET (zapadnoevropske zemlje), JT (Japan), te T-10M i T-20 (SSSR). Računa se da će u novim postrojenjima biti postignuta temperatura od 70 do 100 milijuna K, a vrijednost faktora Δ znatno veća od 10^{13} , blizu vrijednosti $10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$. Tokomak TFTR bit će u pogonu 1981. godine, a JET i T-20 nešto kasnije.

Razvoj postignutih parametara plazme u sustavima tipa tokomak vidi se u tabl. 3.21. Očekuje se da će oko 1983—1985. godine biti ispunjeni potrebni uvjeti za ostvarenje nuklearne fuzije deuterija i tricija.

Inercijalno zadržavanje osniva se na kontroliranim mikroeksplozijama. Gorivo je tada u obliku sitnih kuglica od smjese deuterija i tricija. To su tako male kuglice da je volumen 500 takvih kuglica jednak volumenu zrna riže. Ako se takvo gorivo izvrzne djelovanju intenzivnih laserskih zraka, snopa elektrona ili snopa teških iona, ono će se vrlo brzo ugrijati na temperaturu koja omogućava fuziju deuterija i tricija. Brzina fuzije mora biti veća od brzine raspršivanja iona, jer će se samo tako održati potrebna koncentracija goriva.

Dimenzije zrnaca moraju biti vrlo male da bi se postiglo vrlo brzo, praktički trenutno, izgaranje i da bi se spriječilo raspršivanje goriva prije fuzije. Osim toga, gorivo u kuglicama mora biti toliko stlačeno da se postigne onolika gustoća koja osigurava zadovoljenje Lawsonova kriterija. Zadržavanje goriva pri izgaranju tih sitnih kuglica iznosi oko 10^{-11} sekunda, pa da bude zadovoljen Lawsonov kriterij gustoća goriva u kuglici mora iznositi oko 10^{26} čestica/ cm^3 , a to je gustoća oko 10 000 puta veća od gustoće čvrste materije. Smatra se, naime, da je pri inercijalnom zadržavanju potrebno da produkt Δ ima vrijednost $10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$.

Tabl. 3.21.

Postignuti parametri plazme u zatvorenim sustavima za magnetsko zadržavanje

Godina	Trajanje zadržavanja τ s	Temperatura K	Produkt Δ $\text{cm}^{-3} \text{ s}$
1955.	10^{-5}	10^5	10^9
1960.	10^{-4}	10^4	10^{10}
1965.	$2 \cdot 10^{-3}$	10^6	10^{11}
1970.	10^{-2}	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{11}$
1976.	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^7$	10^{13}
Potrebno za fuziju	1	10^8	10^{14}

Za ostvarenje nuklearne fuzije magnetskim zadržavanjem osnovni je problem zadržavanje plazme, a njezino zagrijavanje tek je sekundarno. Nasuprot tome, pri inercijskom zadržavanju glavni je problem zagrijavanje goriva uz istodobno povećanje gustoće. Izgleda, da se to može postići intenzivnim zračenjem zrakama vrlo visoke snage (red veličine 10^{12} kW/cm²). Kuglica goriva koja je prije toga toliko ohlađena da se nalazi u čvrstom agregatnom stanju, izvrnuta takvom zračenju praktički se trenutno djelomično oljušti (pojava ablacije), pa se ukupno djelovanje impulsa prenosi na neoljušteni dio materijala. Nastaje pojava analoga ubrzanju rakete odbacivanjem njezinih dijelova. Istodobno se preostali dio kuglice ugrije na vrlo visoku temperaturu. To se može ostvariti simetrično postavljenim laserima vrlo velike snage, koji zajedno djeluju na kuglicu. Pri tome je potrebno postići vrlo visoku preciznost, tako da se kuglica nalazi točno u središtu, jer svaka nesimetrija bitno smanjuje gustoću koja bi se inače mogla postići. Osim toga, proces povišenja tlaka mora biti završen prije nego što se znatno povisi temperatura stlačene materije, jer inače ne bi bilo postignuto potrebno povišenje tlaka.

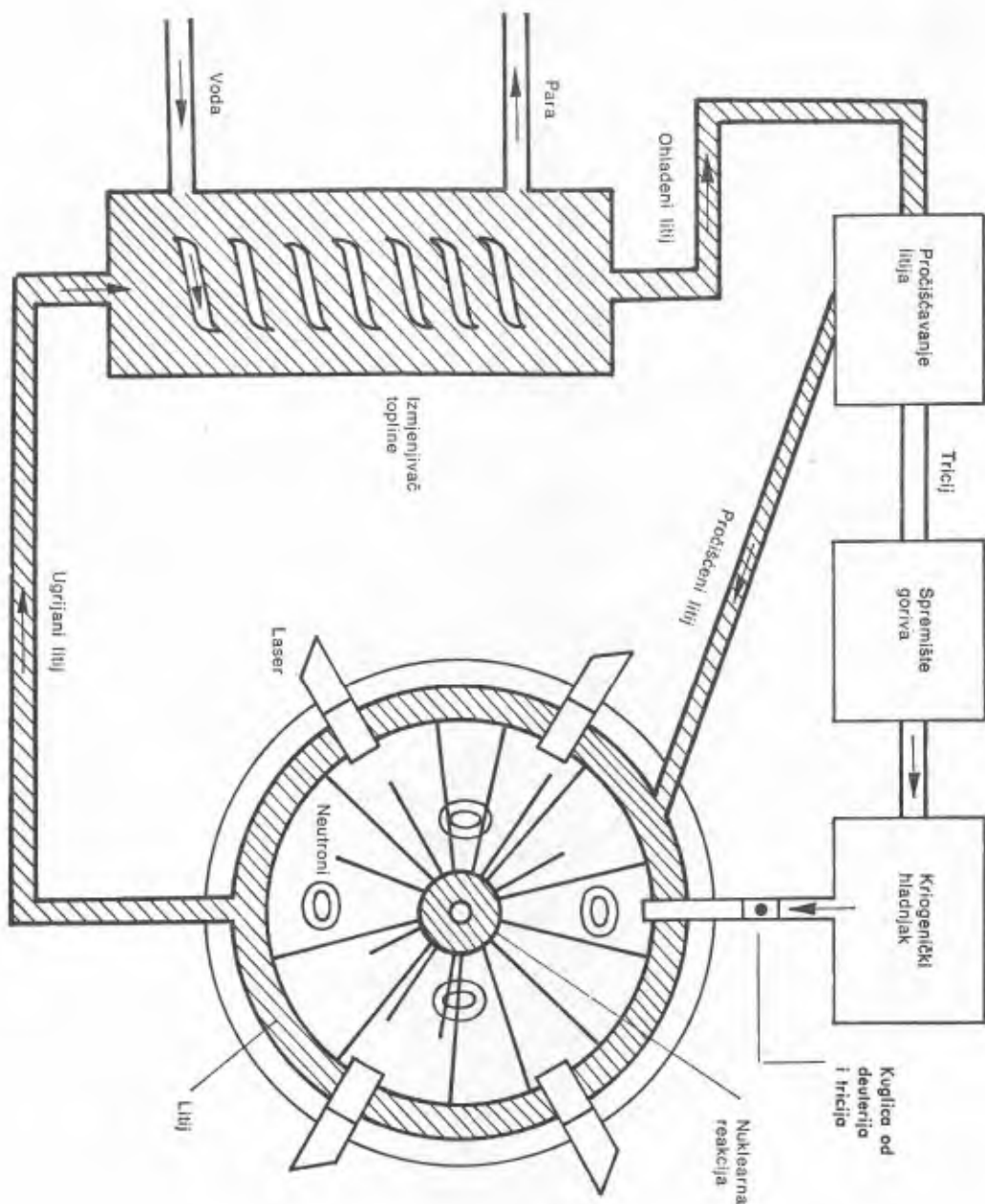
Laboratorijska ispitivanja su pokazala da je moguće povećati gustoću za 100 do 1 000 puta iznad gustoće čvrste materije uz istodobno ugrijavanje središta kuglice na temperaturu od oko 10 milijuna K. Izgleda da ne postoje principijelne teškoće za postizanje dovoljno visoke vrijednosti produkta Λ . Do sada su postignute vrijednosti od 10^{14} cm⁻³ s, a s povećanjem dimenzija kuglica i povećanjem laserskih sustava mogu se postići i više vrijednosti.

7.4. Izgledi za ostvarenje nuklearne fuzije

Do sada i pored znatnog napretka nije uspjelo ostvariti nuklearnu fuziju (tabl. 3.21). Da bi bilo moguće praktično iskorištavanje energije oslobođene fuzijom, potrebno je pronaći rješenja za mnogobrojne tehnološke probleme, pored napora za ostvarenje fuzije.

Kao što je već spomenuto, prva generacija fuzijskih reaktora iskoristavat će energiju spajanja deuterija i tricija, pa se danas radi praktički samo na realizaciji takvih reaktora. Prema tome, u proces fuzije treba uključiti i litij.

Energija fuzije, kako je već rečeno, pojavljuje se u obliku kinetičke energije neutrona i atoma helija. Energija atoma helija (oko 20% energije fuzije) iskoristavat će se za grijanje plazme, a energija neutrona, koji imaju energiju od 14,1 MeV (oko $2,3 \cdot 10^{-12}$ J) po neutronu, bit će iskorištena pretvorbom u toplinu u moderatoru neutrona koji je



Sl. 3.40. Skica mogućeg postrojenja za iskorištavanje energije fuzije inercijskim zadržavanjem plazme

smješten oko komore u kojoj se nalazi plazma (sl. 3.39). Da bi se iskoristila sva energija neutrona i da bi se spriječio njihov bijeg u druge dijelove reaktora, potreban je moderator debljine otprilike 1 m, uključujući i zaštitne stijenke. Kao moderator upotrijebit će se tekući litij, koji će stružeći odvoditi toplinu proizvedenu usporavanjem neutrona i u kojem će se proizvoditi tricij potreban za nuklearnu reakciju. Takav sistem odvođenja topline predviđen je za reaktore s magnetskim zadržavanjem i za one s inercijalnim zadržavanjem plazme (sl. 3.40).

Stijenka koja dijeli prostor s plazmom od ostalog dijela reaktora izvrnuta je djelovanju neutrona i visokih temperatura, pa mora biti od materijala koji može kroz vijek trajanja reaktora izdržati ta naprezanja. Smatra se da materijal tih stijenki mora izdržati trajno naprezanje koje odgovara snazi od 3 do 4 MW/m². Ispitivanja su pokazala da nerđajući čelik može izdržati naprezanje od 10 MW/m² kroz godinu dana. To, međutim, nije dovoljno za životni vijek od 10 do 20 godina. Zbog toga su potrebna intenzivna istraživanja, da se pronađe materijal koji će moći izdržati naprezanje od najmanje 40 MW/m² kroz godinu dana.

Za reaktore s magnetskim zadržavanjem čini se da je neophodno dodatno zagrijavanje plazme. Potrebna snaga za grijanje iznosi više desetaka MW. Razvijeni su, međutim, sustavi za grijanje pomoću injektora neutralnih atoma snage od nekoliko MW.

Za zadržavanje plazme potrebna su jaka magnetska polja, koja je nemoguće proizvesti pomoću konvencionalnih elektromagneta (protjecanjem struje kroz svitak u kojem se nalazi željezna jezgra), jer se pojavljuje zasićenje željeza magnetskim silnicama. Zbog toga se magnetski namot mora izvesti od supravodljivog materijala, kroz koji može protjecati tolika struja da proizvede magnetsko polje dovoljne jakosti i bez željezne jezgre. Izgleda da ne postoje nepremostive poteškoće za gradnju takvih magnetskih sistema. Treba, međutim, napomenuti da je za održavanje vodiča u supravodljivom stanju potrebna temperatura od 4 K (−269°C).

Osim toga, za održavanje reaktora s magnetskim zadržavanjem u pogonu potrebno je razviti uređaje za kontrolu stanja plazme, za održavanje plazme u razvnotežnom stanju, za dovođenje goriva, te za otklanjanje otpadaka i nečistoća iz komore reaktora.

Za reaktore s inercijskim zadržavanjem plazme treba razviti lase re znatno veće snage od onih koji se upotrebljavaju za laboratorijska istraživanja, a pored toga treba pronaći pogodan način za proizvodnju kuglica, za sinhronizaciju djelovanja izvora zračenja i za njihovo točno usmjerenje.

Istraživanja u vezi s nuklearnom fuzijom traže velika sredstva. Računa se da će istraživanja s gradnjom eksperimentalnih postrojenja u SAD u razdoblju od 1974. do 2000. godine stajati između 5 i 6 milijarda dolara. Za fiskalnu 1978. godinu predviđen je iznos od 417 mili-

juna \$, od čega 135 milijuna za gradnju i opremu, oko 190 milijuna za istraživanja sustava s magnetskim zadržavanjem, a ostatak za istraživanja sustava s inercijskim zadržavanjem. Američka vladina agencija za energiju (ERDA, Energy Research and Development Administration) predviđa u svojim planovima slijedeći razvoj nuklearne fuzije: a) do 1985. godine proizvesti znatne količine toplinske energije u prvom fuzijskom reaktoru iskorištavanjem energije spajanja deuterija i tricija, b) između 1985. i 1990. godine proizvesti znatne količine električne energije u dva fuzijska reaktora, c) do 1997. pustiti u pogon prvi komercijalni demonstracijski fuzijski reaktor i d) u početku 21. stoljeća zadovoljavati dio potražnje električne energije u SAD proizvodnjom u fuzijskim reaktorima.

Ne treba pri tome zaboraviti da će za gradnju fuzijskih reaktora prve generacije (fuzija deuterija i tricija) biti potrebne velike količine litija. Tako je npr. za reaktor snage 1 000 MW (električna snaga) potrebno oko 950 t litija, a današnja svjetska proizvodnja litija iznosi tek 3 500 t. Ako bi se, naime, u 2020. godini u SAD 1/3 potrebne električne energije proizvodila u fuzijskim elektranama, što se predviđa u nekim studijama, za izgradnju takvih elektrana bio bi potreban oko 1 milijun tona litija. To, naravno, nije utrošak litija u fuzijskom procesu, nego litij potreban kao moderator i kao medij za odvođenje topline iz reaktorske komore.

7.5. Hibridni nuklearni reaktori

U fuzijskom reaktoru proizvodi se po jedinici snage više brzih neutrona nego u fisijskom reaktoru, koji radi na bazi raspadanja jezgre urana. Zbog toga se pojavljuje ideja da se neutroni proizvedeni u fuzijskom reaktoru iskoriste za dobivanje plutonija iz urana 238, odnosno za dobivanje urana 233 iz torija, dakle za proizvodnju umjetnih nuklearnih goriva (drugo poglavlje, 5.1). Da se to postigne, bilo bi dovoljno da se moderator oko fuzijske komore izvede od prirodnog urana ili od torija, pa bi se najveći dio energije neutrona iskoristio za pretvorbu urana, odnosno torija.

Da se proizvede dovoljno neutrona za pretvorbu urana i torija, nije potrebno ostvariti one uvjete u fuzijskoj komori koji su potrebni u fuzijskom reaktoru. Dovoljna je temperatura plazme koja se može ostvariti dodatnim vanjskim zagrijavanjem, a produkt Δ može biti nekoliko puta manji od onoga koji je potreban za nuklearnu fuziju. Zbog toga će za stijenke oko fuzijske komore biti moguće upotrijebiti materijal slabijeg kvaliteta, jer on mora izdržati naprezanja reda veličine od 1 MW/m².

Proračuni pokazuju da hibridni reaktor pored električne energije može proizvesti pet puta više plutonija nego fisijski reaktor jednake snage. Zbog toga bi hibridni reaktori postali proizvođači plutonija potrebnog za oplodne reaktore, što bi znatno smanjilo potrebe urana za nuklearne elektrane, i zbog toga se smatra da su upravo hibridni reaktori jedna od mogućnosti za rješenje problema goriva za nuklearne fisijske elektrane.

Četvrto poglavlje

ELEKTRIČNA ENERGIJA

Električna energija jedan je od transformiranih oblika energije. Njezino značenje u opskrbi energijom postaje sve veće, jer se može u relativno jednostavnim aparatima i uređajima pretvoriti u sve korisne oblike energije i jer će se u budućnosti većina nekonvencionalnih primarnih oblika energije moći iskoristiti tek nakon pretvorbe u električnu energiju.

Električna energija proizvodi se u elektranama (električnim centralama). U njima su postrojenja za transformaciju u mehaničku energiju koja se transformira u električnu energiju pomoću sinhronih generatora. Prema obliku energije koja se transformira u mehaničku energiju razlikuju se termoelektrane, hidroelektrane i nuklearne elektrane. U termoelektranama transformira se kemijska energija izgaranjem goriva u mehaničku energiju, a ovisno o vrsti pogonskog stroja razlikuju se parne termoelektrane (pogonski stroj parna turbina), termoelektrane s plinskim turbinama i termoelektrane s dizelskim motorom. U hidroelektranama transformira se potencijalna energija vode u mehaničku energiju, a u nuklearnim elektranama energija raspada jezgara posredstvom vodene pare u mehaničku energiju (pogonski stroj parna turbina). U parnim termoelektranama može se ložiti ugljen, loživo ulje i zemni plin. Električna energija proizvedena u elektranama prenosi se preko električnih vodova (nadzemnih — zračni vodovi ili podzemnih — kabeli) do potrošača (industrijski pogoni, kućanstva i dr.), gdje se u strojevima, uređajima ili aparatima transformira u neki korisni oblik energije (mehanička, toplinska, rasvjetna ili kemijska energija).

U početnom stadiju razvoja elektrifikacije grad ili industrijsko poduzeće opskrbljivali su se iz vlastite elektrane, koja je morala biti izgrađena tako da može zadovoljiti s potrebnom sigurnošću potrošače na svojem području. Pokazalo se, međutim, da je takva proizvodnja neracionalna, jer je u svakoj elektrani trebalo osigurati potrebnu rezervu u strojevima (za slučaj kvara) i jer nije bilo moguće dobro isko-

ristiti one elektrane u kojima se mogla proizvesti energija uz manje troškove (hidroelektrane, termoelektrane na rudnicima ugljena). Zbog toga, počeli su se graditi električni vodovi koji su povezivali dvije elektrane, što je omogućilo njihovo bolje iskorištenje i smanjenje potrebne rezerve. Tada je bilo moguće prenositi električnu energiju iz jednog područja u drugo. Daljim razvojem postepeno su građeni električni vodovi, pa su sve elektrane na širem području međusobno spojene i tako je nastao elektroenergetski sistem. On je omogućio izgradnju elektrana na povoljnim lokacijama (hidroelektrane na povoljnim dijelovima vodotoka, termoelektrane na rudnicima ugljena), bez obzira na potrošnju električne energije u njihovoj neposrednoj blizini. Kasnije se elektroenergetski sistem proširio na cijelu državu, a zatim su međusobno povezani sistemi država, pa su nastali veliki međunarodni elektroenergetski sistemi. Danas u Evropi postoje dva velika međunarodna sistema: zapadni elektroenergetski sistem od Norveške i Velike Britanije na sjeveru do Italije i Portugala na jugu, uključujući i Jugoslaviju, te istočni elektroenergetski sistem koji obuhvaća južni dio evropskog dijela Sovjetskog Saveza i sve zemlje Istočne Evrope, od Njemačke DR na sjeveru do Bugarske na jugu.

Elektroenergetski sistem je skup postrojenja od elektrana za proizvodnju električne energije do potrošača, s njihovim strojevima, uređajima i aparatima. Pored elektrana i potrošačkih uređaja postoje u sistemu vodovi za prijenos električne energije među pojedinim dijelovima sistema (elektranama, područjima), rasklopna postrojenja za transformaciju i razvod električne energije, te vodovi za distribuciju električne energije do manjih potrošača. Vodovi imaju različite napone, ovisno o tome koliko se energije njima prenosi. Za prijenos većih snaga potrebni su i viši naponi, a za razdiobu do malih potrošača niski naponi. Danas se za prijenos velikih snaga na daljine od 1 000 km grade vodovi napona 750 kV, za manje snage i daljine vodovi 400, 220 i 110 kV, za dovod do većih potrošača vodovi 30 i 10 kV, a za dovod do malih potrošača (kućanstvo, obrt) vodovi napona 380/220 V. Za prijelaz s jednog napona na drugi potrebni su transformatori.

Jedna je karakteristika proizvodnje električne energije da se ona proizvodi u trenutku kad je potrebna i da se ne može uskladištiti. Zbog toga moraju elektrane i cijeli sistem biti izgrađeni tako da mogu zadovoljiti potražnju u onom trenutku kad se pojavljuje. Osim toga, svi generatori u elektroenergetskom sistemu rade sinhrono, što znači da svi generatori proizvode električnu struju točno iste frekvencije, bez obzira na to koliko područje pokriva sistem.

U elektroenergetskom sistemu postoji vrlo velik broj potrošača, i još više trošila električne energije, a svaki potrošač uključuje svoje trošilo prema potrebi, i u doba kad mu to najbolje odgovara, a da ne mora to prijaviti ili zatražiti dopuštenje za taj priključak. Elektro-

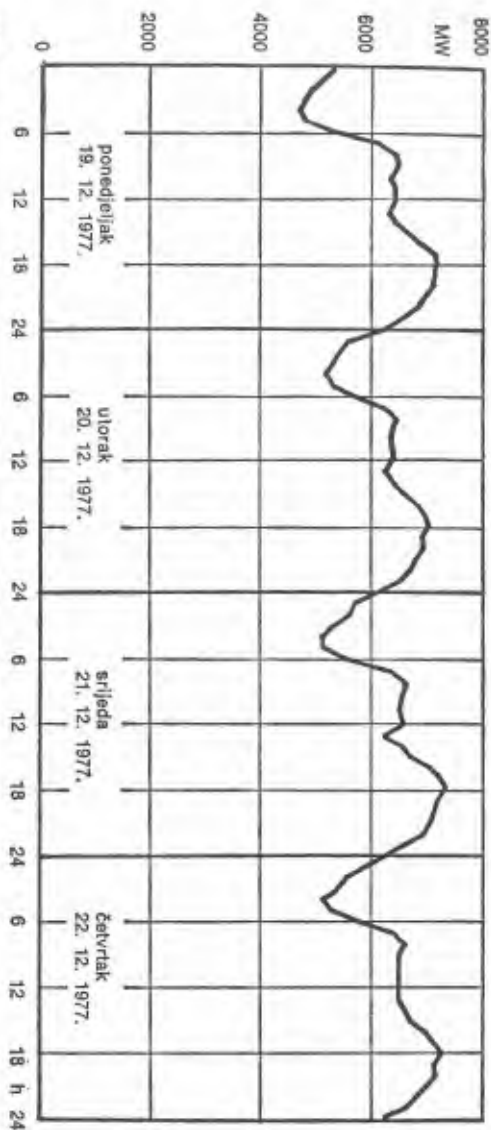
energetski sistem mora biti sposoban da zadovolji tim zahtjevima. To je moguće baš zbog toga što se radi o vrlo velikom broju potrošača, pa vrijede statističke zakonitosti po kojima se može s dosta velikom sigurnošću predvidjeti ponašanje potrošača. Radi toga što se potrebe za električnom energijom mijenjaju u toku dana (radno vrijeme u industriji, potreba rasvjete, vrijeme kuhanja, životne navike stanovništva itd.) potražnja se mijenja tokom dana, što se prikazuje dnevnim dijagramom opterećenja (sl. 4.1). Osim dnevnih promjena potražnje pojavljuju se i tjedne promjene jer ni svi dnevni dijagrami opterećenja unutar istog tjedna nisu međusobno jednaki. Dnevni dijagram opterećenja u neradnom danu znatno se razlikuje od onoga u radnom danu, a postoji i izvjesna razlika među dnevnim dijagramima opterećenja u radnim danima (manji radni intenzitet početkom i na kraju radnog tjedna). Godišnja doba također utječu na potražnju električne energije (trajanje insolacije, grijanje, sezonske industrije itd.). Dijagram opterećenja zimskog dana znatno se razlikuje od ljetnog dnevnog dijagrama opterećenja (sl. 4.2). Svakako da struktura potrošača utječe na oblik dijagrama opterećenja, pa je oblik dijagrama opterećenja karakteristika svakog područja.

Raznolika mogućnost upotrebe električne energije, a pogotovo jednostavnost strojeva za njezinu transformaciju u mehaničku energiju, uvjetovali su brzi razvoj proizvodnje, a to znači i potrošnje, električne energije. Taj je razvoj omogućilo proširenje električnih mreža, koje danas u razvijenijim zemljama dopiru praktički do svih sela i svih kućanstava.

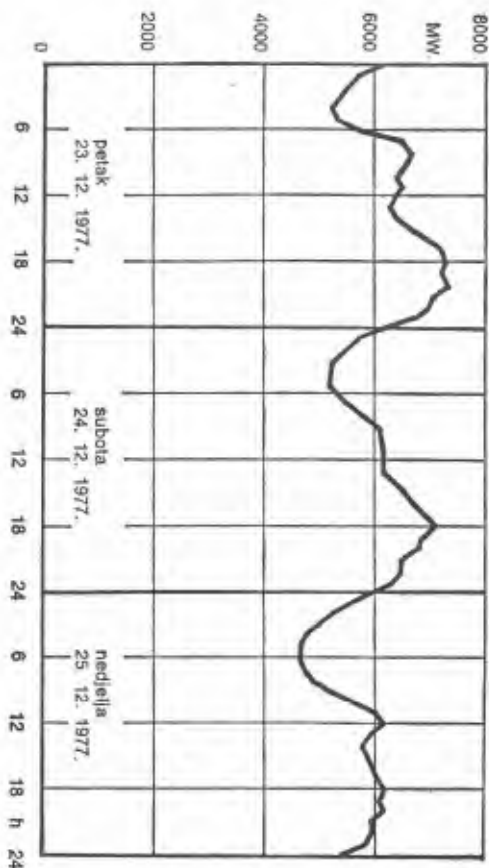
Razvoj proizvodnje električne energije u svijetu u posljednjih pedesetak godina vidi se iz slijedećih podataka (milijarde kWh):

1920.	123,4 TWh
1929.	290,4 TWh
1933.	191,2 TWh
1938.	464,4 TWh
1946.	644,0 TWh
1950.	958,9 TWh
1960.	2 300,4 TWh
1965.	3 379,9 TWh
1970.	4 908,4 TWh
1974.	6 265,0 TWh
1975.	6 461,6 TWh
1976.	6 916,7 TWh

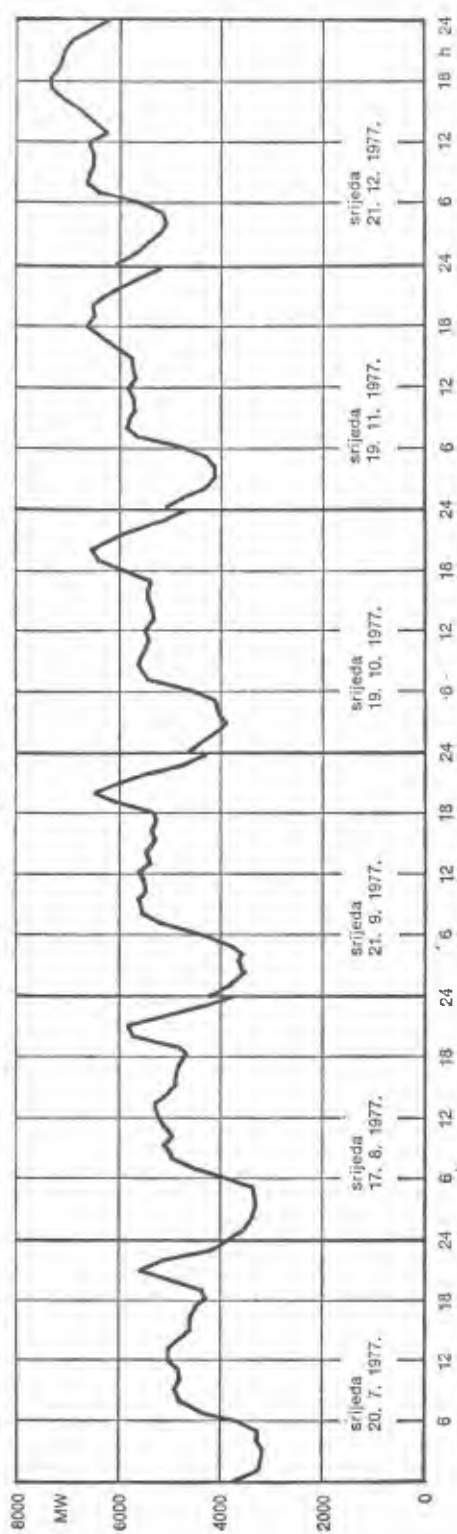
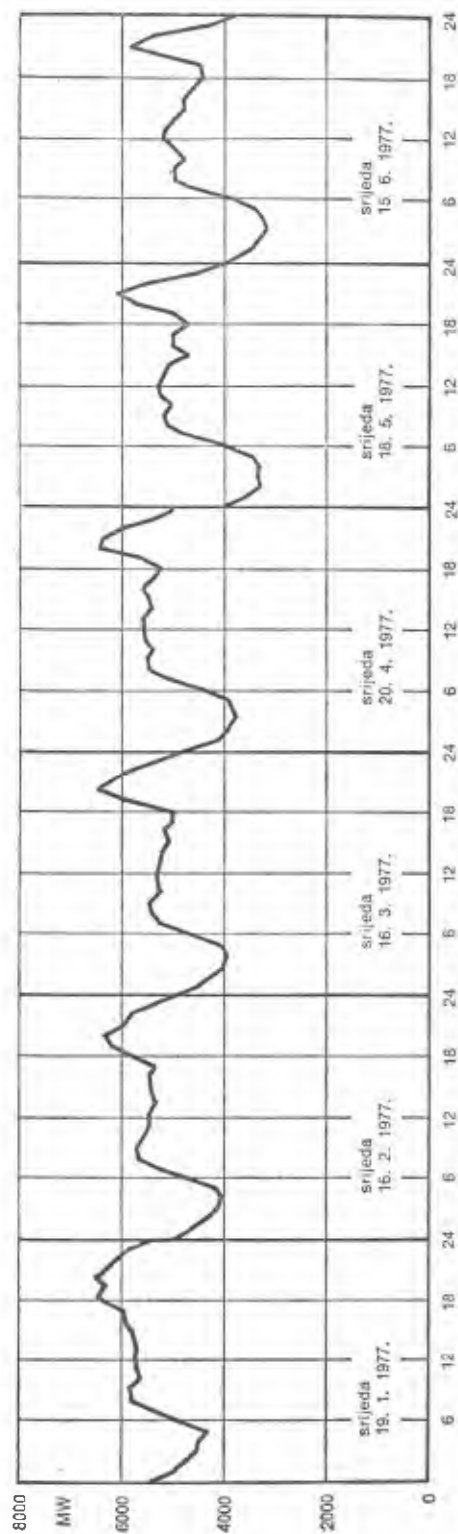
Promatrajući cijelo razdoblje dobiva se prosječni godišnji porast od 7,90%, odnosno udvostručenje u 8,9 godine. To je znatno veći prosječni godišnji porast od onoga koji je ostvaren kad se promatra razvoj potrošnje svih oblika energije (6. u drugom poglavlju), što znači da se udio električne energije u opskrbi energijom sve više povećava.



Sl. 4.2. Dnevni dijagrami opterećenja elektroenergetskog sistema Jugoslavije u srijedu nakon 15. u mjesecu u 1977. godini, na 259. stranici.



Sl. 4.1. Dnevni dijagrami opterećenja elektroenergetskog sistema Jugoslavije u tjednu od 19. do 25. prosinca 1977.



Razvoj proizvodnje električne energije po kontinentima vidi se u tabl. 4.1. Dok je u 1950. godini u SAD i Zapadnoj Evropi proizvedeno nešto više od 2/3 ukupne svjetske proizvodnje, u 1976. godini u ta dva područja proizvedeno je nešto više od 53%. Najveći porast proizvodnje ostvaren je u Aziji i SSSR-u.

Veliki porast proizvodnje električne energije ostvarivan je u svim evropskim zemljama (tabl. 4.2). Svakako da je taj porast bio veći u zemljama u kojima je bila manja proizvodnja (Albanija, Bugarska, Grčka, Jugoslavija, Rumunjska, Španjolska), gdje je proizvodnja rasla više od 10% godišnje, što odgovara udvostručenju u manje od 7 godina.

Još bolja se slika o razvoju upotrebe električne energije dobiva kad se promatra potrošnja električne energije po stanovniku (tabl. 4.3. i 4.4). Kad se promatra po kontinentima, vidi se ogromna razlika između dvaju najmanje razvijenih kontinenata (Azija i Afrika) i SAD, gdje se troši po stanovniku oko 30 puta više električne energije nego na dva spomenuta kontinenta. Također postoji velika razlika među evropskim zemljama (tabl. 4.4). Najveća potrošnja električne energije po stanovniku ostvaruje se u Norveškoj, a Švedska ima potrošnju nešto veću nego SAD. U te dvije evropske države potrošnja je električne energije tako velika jer je razvijena industrija koja se osniva na električnoj energiji (elektrolize, lučne peći, metalurška industrija), i jer se za grijanje stanova upotrebljava skoro jedino električna energija, a to je moguće zato što se proizvodnja električne energije osniva na iskorištavanju vodnih snaga.

I pored velikog porasta proizvodnje električne energije u Jugoslaviji, ona se nalazi skoro na dnu ljestvice evropskih zemalja ako se one poredaju prema potrošnji električne energije po stanovniku. Iza Jugoslavije se danas nalaze samo Grčka, Portugal i Albanija.

Zanimljivo je razmotriti strukturu proizvodnje električne energije. Pod strukturom se misli udio proizvodnje pojedinih tipova elektrana u ukupnoj proizvodnji. Obično se struktura promatra kao udio termoelektrana (to su praktički samo parne termoelektreane, jer je udio termoelektrana s plinskim turbinama i motorima s unutrašnjim izgaranjem zanemarivo mali), hidroelektrana i nuklearnih elektrana.

Udio hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije po kontinentima vidi se u tabl. 4.5. Promatrajući svijet u cjelini opaža se tendencija opadanja udjela hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije. Ta je tendencija to izraženija što je područje razvijenije, jer su tamo vodne snage i više iskorištene (tabl. 2.46). To se zaopaža i u evropskim zemljama (tabl. 4.6). Karakterističan je primjer Italije u kojoj je u pedesetim godinama skoro sva električna energija proizvedena u hidroelektranama, a danas se u njima proizvodi samo oko 30% ukupne električne energije. Tamo su, naime, skoro u potpunosti

Tabl. 4.1.

Proizvodnja električne energije (TWh = 10⁹ kWh)

	1950.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	16,1	39,6	57,8	87,3	121,6	130,8	139,4	8,66
Amerika bez SAD	83,2	186,0	248,9	365,5	514,0	524,9	566,7	7,66
Azija bez SSSR-a	63,4	225,0	360,7	603,0	826,1	880,3	960,6	11,02
Istočna Evropa bez SSSR-a	44,1	114,2	176,6	247,5	320,4	342,2	366,1	8,48
Zapadna Evropa	258,6	568,2	828,9	1 152,3	1 447,3	1 443,2	1 547,2	7,12
Oceanija	12,9	30,9	48,7	72,1	92,5	98,6	101,9	8,27
SAD	389,4	844,2	1 157,6	1 639,8	1 967,3	2 003,0	2 123,4	6,75
SSSR	91,2	292,3	506,7	740,9	975,8	1 038,6	1 111,4	10,09
Svijet	958,9	2 300,4	3 379,9	4 908,4	6 265,0	6 461,6	6 916,7	7,90

Tabl. 4.2.

Proizvodnja električne energije u evropskim zemljama (TWh = 10⁹ KWh)

	1938.	1950.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast % 1950/76
Albanija	...	0,02	0,19	0,34	0,94	1,70	1,80	2,00	19,38
Austrija	2,99	6,35	15,97	22,24	30,04	33,81	35,21	35,33	6,62
Belgija	5,31	8,86	15,15	21,1	30,52	42,6	41,07	41,35	6,66
Bugarska	0,21	0,50	4,66	10,24	19,51	22,81	25,24	27,14	14,61
Cenosaovčka	4,05	9,28	24,45	34,19	45,16	56,03	59,28	62,15	7,63
Danska	1,14	2,22	5,18	7,38	18,86	18,6	18,69	20,93	9,01
Finska	3,11	4,18	8,63	13,61	21,19	26,52	25,13	27,80	7,56
Francuska	18,77	33,03	72,12	101,44	140,71	188,13	185,31	203,09	7,24
Grčka	0,43	0,78	2,28	4,40	9,40	15,02	16,15	17,86	12,80
Irska	0,37	0,97	2,26	3,68	6,09	7,90	7,73	8,61	8,76
Italija	15,50	24,48	56,24	82,97	117,42	148,91	147,33	163,55	7,58
Jugoslavija	0,46	2,40	8,93	15,52	26,02	39,46	40,04	43,57	11,79
Mađarska	1,32	3,00	7,62	11,18	14,54	18,98	20,47	22,05	7,97
Nizozemska	1,20	7,42	16,52	25,01	40,86	55,35	54,26	58,14	8,24
Nemačka DR	...	19,47	40,31	53,61	67,65	80,29	84,51	89,15	6,03
SR Nemačka	32,43 ¹	46,10	118,99	172,34	242,61	311,71	301,80	333,65	7,91
Norveška	9,93	17,76	31,12	48,95	57,61	76,70	77,49	82,20	6,07
Poljska	3,70	9,42	29,31	43,80	64,53	91,60	97,17	104,10	9,68
Portugal	...	0,94	3,26	4,64	7,49	10,75	10,73	10,15	9,58
Rumunjska	1,13	2,11	7,65	17,22	35,09	49,06	53,72	58,27	13,61
Španjolska	...	6,92	18,61	31,72	56,49	80,86	82,39	90,82	10,41
Švedska	8,16	18,18	34,76	49,11	60,65	75,13	80,57	86,42	6,18
Švicarska	7,04	10,48	19,07	24,46	33,17	37,41	42,99	36,24	4,89
Velika Britanija	31,82	66,39	136,97	196,50	249,19	273,13	272,08	276,98	5,65

¹ Ukupno Nemačka
... Nema podataka

Tabl. 4.3.

Potrošnja električne energije (kWh po stanovniku)

	1950.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Afrika	74	146	186	247	311	326	337	6,00
Amerika bez SAD	473	805	948	1 215	1 506	1 514	1 590	4,77
Azija bez SSSR-a	49	136	197	296	352	393	421	8,62
Istočna Evropa bez SSSR-a	502	1 172	1 669	2 353	3 051	3 234	3 441	7,68
Zapadna Evropa	856	1 743	2 420	3 258	3 987	3 952	4 218	6,33
Oceanija	1 026	1 964	2 783	3 729	4 473	4 684	4 775	6,09
SAD	2 571	4 697	5 957	8 015	9 344	9 409	9 911	5,33
SSSR	507	1 364	2 187	2 848	3 831	4 038	4 285	8,56
Svijet	386	772	1 029	1 362	1 617	1 637	1 720	5,92

Tabl. 4.4.

Potrošnja električne energije po stanovniku (kWh/stanovnj.)

	1950.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.	Porast %
Albanija	17	118	183	441	522	583	707	15,42
Austrija	816	1 995	2 532	3 331	4 105	4 078	4 411	6,71
Belgija	1 036	1 660	2 292	3 199	4 343	4 103	4 448	5,76
Bugarska	111	596	1 249	2 289	3 096	3 309	3 562	14,27
Cehoslovačka	758	1 771	2 507	3 389	4 119	4 289	4 468	7,06
Danska	561	1 153	1 916	2 978	3 701	3 871	4 289	8,14
Finska	1 040	2 042	3 123	4 710	6 324	6 181	6 721	7,44
Francuska	797	1 576	2 099	2 759	3 578	3 556	3 876	6,27
Grčka	103	274	517	1 072	1 681	1 786	1 948	11,97
Irska	329	798	1 278	2 068	2 553	2 472	2 723	8,47
Italija	531	1 130	1 602	2 262	2 729	2 685	2 931	6,79
Jugoslavija	146	480	819	1 288	1 865	1 887	2 030	10,65
Mađarska	321	817	1 228	1 735	2 256	2 334	2 469	8,16
Nizozemska	736	1 449	2 037	3 110	3 978	3 955	4 198	6,93
Njemačka DR	1 132	2 470	3 164	3 990	4 809	5 056	5 330	6,14
SR Njemačka	942	2 222	2 991	4 128	5 120	5 008	5 440	6,98
Norveška	5 440	8 727	12 567	14 635	17 856	17 935	18 769	4,88
Poljska	380	1 002	1 376	1 985	2 637	2 841	3 026	8,31
Portugal	112	370	574	867	1 214	1 156	1 230	9,65
Rumunjska	128	414	887	1 615	2 221	2 411	2 649	12,36
Španjolska	247	606	970	1 627	2 263	2 297	2 503	9,32
Švedska	2 565	4 542	6 746	8 045	9 566	9 950	10 766	5,67
Švicarska	2 098	3 302	3 880	4 575	5 301	5 340	5 315	3,64
Sjeverna Velika Britanija	1 309	2 601	3 604	4 373	4 870	4 852	4 939	5,25

Tabl. 4.5.

Udio energije iz hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije (%)

	1950.	1960.	1965.	1970.	1975.	1976.
Afrika	8,7	18,7	23,5	28,4	28,4	29,0
Amerika bez SAD	80,3	75,5	67,5	65,2	65,6	63,5
Azija bez SSSR-a	26,5	44,4	41,0	31,0	27,1	22,7
Istočna Evropa bez SSSR-a	5,0	5,5	5,6	5,0	6,1	5,3
Zapadna Evropa	42,7	40,4	35,3	29,2	26,8	23,2
Oceanija	34,1	33,7	35,9	31,9	31,7	31,8
SAD	25,9	17,7	17,0	15,3	15,6	13,8
SSSR	13,9	17,4	16,1	16,8	13,5	12,2
Svijet	35,8	30,0	27,1	24,0	22,9	21,1

Tabl. 4.6.

Udio proizvodnje hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije (%)

	1938.	1950.	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
Albanija	...	23,8	62,4	73,4	49,6	70,6	72,2	75,0
Austrija	80,5	78,4	74,4	72,3	70,7	66,9	67,4	58,1
Belgija	0,9	0,7	1,1	1,2	0,8	1,6	1,0	0,7
Bugarska	67,6	38,8	40,6	19,5	11,0	9,1	9,7	10,6
Čehoslovačka	12,1	9,4	10,2	13,0	8,1	7,2	6,4	5,5
Danska	...	1,8	0,6	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
Finska	79,1	87,3	61,1	68,0	44,1	46,9	47,7	33,7
Francuska	53,3	51,3	55,9	45,8	40,2	31,5	33,5	24,3
Grčka	5,8	2,6	20,6	17,3	28,0	16,5	13,2	10,5
Irska	77,1	36,1	41,2	25,5	11,7	12,9	9,4	10,4
Italija	93,9	93,5	85,7	54,9	37,5	28,1	30,6	26,6
Jugoslavija	48,1	42,9	67,0	57,9	56,6	52,4	48,2	47,2
Mađarska	...	1,3	1,2	0,7	0,6	0,4	0,8	0,7
Nizozemska	—	—	—	—	—	—	—	—
Njemačka DR	...	2,1	1,5	1,5	1,8	1,7	1,5	1,3
SR Njemačka	22,2 ¹	18,8	10,9	8,9	7,3	5,7	5,7	4,2
Norveška	98,9	99,7	99,4	99,8	99,4	99,9	99,9	99,9
Poljska	...	5,4	1,8	2,1	2,9	2,7	2,4	2,0
Portugal	...	46,8	95,4	85,8	78,1	73,4	60,0	48,2
Rumunjska	13,0	8,1	5,2	5,9	7,9	17,3	16,2	13,9
Španjolska	...	73,4	83,9	62,1	49,5	37,8	35,3	24,8
Švedska	89,5	95,4	89,4	94,6	68,5	76,3	71,6	73,5
Švicarska	99,5	98,5	98,7	98,2	88,4	76,8	78,2	63,5
Velika Britanija	3,1	2,2	2,3	2,4	2,3	1,8	1,8	1,8

¹ Njemačka ukupno

sti iscrpljene vodne snage (tabl. 2.47). Slično se događa u Finskoj, Bugarskoj, Portugalu i Španjolskoj, a na tom putu su Švedska i Švicarska. U Norveškoj se još održava visoki udio hidroelektrana, jer još postoje znatne neiskorištene vodne snage.

Udio nuklearnih elektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije (tabl. 4.7) još je malen, iako je u nekim zemljama udio nuklearnih elektrana znatan. U Švicarskoj, Belgiji, Švedskoj i Bugarskoj u nuklearnim se elektranama proizvodi oko 10% ukupne električne energije. Danas se električna energija u nuklearnim elektranama proizvodi u dvadesetak zemalja, a uskoro će se taj broj povećati jer se u mnogim zemljama grade nuklearne elektrane (tabl. 4.8). Kad budu dovršene nuklearne elektrane koje se danas grade, bit će moguće u njima proizvesti oko 40% od današnje proizvodnje električne energije. To će biti za desetak godina. Ako se uzme u obzir da će se do tada proizvodnja električne energije udvostručiti, može se računati da će se oko 1985. godine u nuklearnim elektranama proizvoditi oko 20% ukupne električne energije u svijetu.

Tabl. 4.7.

Udio nuklearnih elektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije (%)

	1960.	1965.	1970.	1974.	1975.	1976.
SAD	0,06	0,32	1,33	5,74	8,61	9,00
Velika Britanija	1,52	8,32	10,44	12,31	11,15	13,05
Japan	—	0,00	1,15	4,29	5,28	6,66
SR Njemačka	—	0,07	2,49	3,89	7,09	7,27
Francuska	0,18	0,89	3,66	8,75	9,85	7,76
Švedska	—	—	0,10	2,73	14,85	18,51
Kanada	—	0,03	2,87	4,95	4,34	5,60
SSSR	—	—	0,47	0,92	1,08	1,26
Španjolska	—	—	1,63	8,94	9,16	8,32
Švicarska	—	—	7,39	17,99	17,19	20,86
Belgija	—	—	0,20	0,36	16,51	21,20
Italija	—	4,23	2,71	2,29	2,58	2,33
Nizozemska	—	—	0,91	5,92	6,15	6,66
Njemačka DR	—	—	0,68	2,72	3,24	5,91
Indija	—	—	3,78	2,87	3,06	3,41
Bugarska	—	—	—	4,07	10,12	17,98
Argentina	—	—	—	3,71	8,54	8,48
Pakistan	—	—	—	5,63	5,46	5,52
Čehoslovačka	—	—	—	0,87	0,32	0,70
Panama	—	—	7,70	3,65	3,61	3,03
Svijet	0,00	0,08	0,50	3,93	5,30	5,75

Tabl. 4.8.

Snaga nuklearnih elektrana (MW) u svijetu (stanje 30. lipnja 1977)

	U pogonu	U gradnji i naručeno	Ukupno
Argentina	319	600	919
Austrija	—	692	692
Belgija	1 650	3 825	5 475
Brazil	—	3 116	3 116
Bugarska	880	880	1 760
Čehoslovačka	110	1 760	1 870
Egipat	—	622	622
Filipini	—	1 252	1 252
Finska	420	1 740	2 160
Francuska	2 828	25 730	28 548
Indija	602	1 082	1 684
Iran	—	4 200	4 200
Italija	547	4 748	5 295
Japan	7 144	11 564	18 708
Jugoslavija	—	632	632
Južnoafrička Republika	—	1 844	1 844
Južna Koreja	—	1 798	1 798
Kanada	2 512	9 324	11 826
Luksemburg	—	1 250	1 250
Mađarska	—	1 760	1 760
Meksiko	—	1 308	1 308
Nizozemska	503	—	503
Njemačka DR	950	1 760	2 710
SR Njemačka	7 335	19 625	26 960
Pakistan	125	—	125
Poljska	—	440	440
Rumunjska	—	440	440
SAD	42 798	157 118	199 986
SSSR	7 475	9 440	16 915
Španjolska	1 073	14 048	15 121
Švedska	3 169	6 240	9 409
Švicarska	1 006	4 840	5 846
Taiwan	—	4 924	4 924
Velika Britanija	8 080	3 700	11 780
Svijet	89 516	302 372	391 888

LITERATURA

1. BISCHOFF, G. — W. GOCHT, *Das Energie Handbuch*, Vieweg u. Sohn, Braunschweig 1970.
2. AILLERET, P., *Énergétique — les besoins d'énergie*, Eyrolle, Paris 1963.
3. *World Power Conference, Survey of Energy Resources*, Percy Sund, London 1968.
4. *Survey of Energy Resources 1974, The United States National Committee of the World Energy Conference*, New York 1974.
5. PETERS, W. — H. D. SCHILLING, *Evaluation des ressources globales de charbon et de leur disponibilité future*, X Conférence Mondiale l'Énergie, Istambul 1977.
6. *Mogućća proizvodnja goriva (uglja, nafte, gasa, urana) na bazi do sada dokazanih rezervi — Separat Ugalj*, Rudarski institut, Beograd-Zemun, Beograd 1976.
7. *Perspectives énergétique mondiale, Rapport général*, Symposium sur le rôle futur du charbon dans les économies nationales et mondiales, Varšava 1970, Commission économique pour l'Europe, Genève 1970.
8. *World Energy Supplies 1950—1974*, Statistical Papers, Series J, No. 19, United Nations, New York 1976.
9. *Energetski godišnjak Jugoslavije 1975*, Jugoslavenski nacionalni komitet Svjetske konferencije za energiju, Beograd 1977.
10. POŽAR, H., *Osnove energetike*, Prvi svezak, Školska knjiga, Zagreb 1976.
11. BREZINŠČAK, M., *Mjerenje i računanje u tehnici i znanosti*, Tehnička knjiga, Zagreb 1971.
12. GRENON, M., *A propos des ressources mondiales de pétrole*, Revue de l'énergie, 27, 1976, str. 113—116 i 440—445.
13. DESPRAIRIES, P., *Les limites de l'approvisionnement pétrolier mondial*, X Conférence Mondiale de l'Énergie, Istambul, 1977.

14. *Accroissement des économies et de l'efficacité en matière de l'énergie dans la région de la CEE*, Commission économique pour l'Europe, Nations Unies, New York, 1977.
15. McCORMICK, W. T., L. W. FISH, R. B. KALISH, T. J. WANDER, *L'avenir des approvisionnements mondiaux en gaz naturel*, American Gas Association, X Conférence Mondiale de l'énergie, Istambul 1977.
16. *Moguća proizvodnja goriva (uglja, nafte, gasa, urana) na bazi do sada dokazanih rezervi* — Separat Nafia i prirodni gas, Institut za ekonomiku industrije, Beograd 1976.
17. SAJUS, L., *Mieux exploiter les réserves pétrolières: la récupération assistée*, Revue de l'énergie 28, 1977, str. 131—148.
18. RUTMAN, G. — F. BERNARD, *Le pétrole de mer profonde: mythe? réalité d'aujourd'hui? nécessité de demain?*, Revue de l'énergie, 28, 1977, str. 149—161.
19. ARMSTRONG, E. L., *Hydraulic Resources 1985 to 2020*, X World Energy Conference, Istambul 1977.
20. DURET, M. F., G. J. PHILLIPS, J. I. VEEDER, W. A. WOLFE, R. M. WILLIAMS, *The Contribution of Nuclear Power to World Energy Supply, 1975 to 2020*, X World Energy Conference, Istambul 1977.
21. FELIX, F., *Contenue énergétique et électrique du produit national brut de divers pays du monde: Essai d'analyse et d'interprétation*, Revue de l'énergie 26, 1975, str. 584—589.
22. ZEDET, E., *Les ressources énergétiques offertes par la photosynthèse naturelle*, Revue de l'énergie, 28, 1977, str. 187—201.
23. KARKI, A. B., B. A. COBURN, *The Prospect of Bio-gas as one of the Sources of Energy in Nepal*, X World Energy Conference, Ref. 4. 6—3, Istambul 1977.
24. GUPTA, C. L. i dru., *Energy from Unconventional Sources in Tropical Developing Countries*, X World Energy Conference, ref. 4. 8—2, Istambul 1977.
25. PARIKH, K. S., *Prévision pour une politique des énergies de remplacement en Inde*, Revue de l'énergie, 28, 1977, str. 50—57.
26. *Vodne snage Jugoslavije*, knjiga prva, Hidrotehnički institut »Jaroslav Černi«, Beograd 1956.
27. KNAPP, V. — COUFFU, E., *Novi izvori energije; geotermalna energija suhih stijena*, Simpozij »Nikola Tesla«, Zagreb 1976.
28. RYBACH, L., *Geothermische Energie*, Bulletin ASE/UCS 66, 1975, str. 257—261.
29. *Jedinstveni program istraživanja u energetici SFRJ*, Znanstveni savjet za naftu Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti, Zagreb 1977.
30. AUER, P. L. i dr., *Les ressources de l'énergie nouvelles*, X Conférence mondiale de l'énergie, Istambul 1977.
31. *Centrales géothermoélectriques de Larderello et du Monte Amiata*, Serie Grandi impianti ENEL, Milano 1977.
32. MUFFLER, L. J. P. — D. E. WHITE, *Geothermal Energy, Perspectives on Energy*, str. 352—358, Oxford University Press, New York 1975.

33. GIBRAT, R., *L'énergie des marées*, Bull. de la Société française d'électriciens 1953, str. 283.
34. GIBRAT, R., *Energija prilivov i prilivnije stancii*, Izdatelstvo Mir, Moskva 1964.
35. BERNSTEIN, *Kislogubskaja prilivnaja stanica*, Energija, Moskva 1972.
36. KING HUBBERT, M., *Tidal Power, Perspectives on Energy*, str. 359—363, Oxford University Press, New York 1975.
37. YONG WON, J., *Tidal Power on the West Coast of the Republic Korea*, X World Energy Conference, Ref. 4. 5—1, Istanbul 1977.
38. POMINOV, M. V., *Methodes permettant d'augmenter l'extraction des hydrocarbures liquides et gazeux contenus dans le sous-sol*, Commission économique pour l'Europe, ECE/AC.3/R.4, Genève 1977.
39. SEVETTE, P., *Géographie et économie comparée de l'énergie*, Institut économique et juridique de l'énergie, Grenoble 1976.
40. PENZAR, I., *Neki podaci o Sunčevoj iradijaciji u Jugoslaviji*, Savjetovanje »Sunčeva energija u Jugoslaviji«, Beograd 1977.
14. IVANOVIĆ, D., *Raspodela trajanja sijanja Sunca u Jugoslaviji po godišnjim dobima i za godinu*, Savjetovanje »Sunčeva energija u Jugoslaviji«, Beograd 1977.
42. PENZAR, I., *Aktinometrijski podaci potrebni za iskorištavanje Sunčeve energije*, II konferencija SITH o tehnološkom razvoju SR Hrvatske, Rad II-1. 5, Poreč 1977.
43. GOBAR, K., K. HAMED, *Methods Used for Economical Utilization of Terrista Solar Energy*, X World Energy Conference, Ref. 4.2—1, Istanbul 1977.
44. MORSE, R. N., *Solar Heating as a Major Source of Energy for Australia*, X World Energy Conference, Ref. 4.2—3, Istanbul 1977.
45. CLEMOT, M., B. DESSUS, C. ETIHVANT, F. PHARABOD, *Centrales solaires: réalisation et projets français*, X Conférence Mondiale de l'énergie, Ref. 4.2—4, Istanbul 1977.
46. KOBAYASHI, H., *Technical Development of Solar Energy Utilization in Japan*, X World Energy Conference, Ref. 4.2—5, Istanbul 1977.
47. MOROW, W. E., *Solar Energy, Its Time Is Near, Perspectives on Energy*, str. 336—351, Oxford University Press, London-Toronto 1975.
48. AMBLI, N., K. BUDAL, J. FALNES, A. SØRENSEN, *Wave Power Conversion by a Row of Optimally Operated Buoys*, X World Energy Conference, Ref. 4.5—2, Istanbul 1977.
49. PHILLIPS, J. A., *Recent Developments in Nuclear Fusion*, X World Energy Conference, Ref. 4.5—2, Istanbul 1977.
50. VELIHKOV, E. P., B. B. KADOMTSEV, *Termonuclear Fusion: Problems and Prospects*, X World Energy Conference, Ref. 4.1—2, Istanbul 1977.
51. MILJANIĆ, Đ., *Kontrolirana fuzija i energija*, Rad II—1.3, II konferencija SITH o tehnološkom razvoju SR Hrvatske, Poreč 1977.
52. LIDSKY, L. M., *The Quest for Fusion Energy, Perspectives on Energy*, str. 299—311, Oxford University Press, London-Toronto 1975.

53. KULCINSKI, G. L., *Fusion Power, Perspectives on Energy*, str. 312—335, Oxford University Press, London-Toronto 1975.
54. MARION, J. B., *Energy in Perspective*, Academic Press, New York-San Francisco-London 1974.
55. BRADSHAW, F., *Les schistes bitumineux: leur heure a sonné*, Revue de l'énergie, 28, 1977, str. 106—115.
56. SANDE, W. N., *Le projet Synorude et l'avenir du développement de l'huile lourde*, Revue de l'énergie, 28, 1977, str. 116—130.
57. *World Energy Supplies 1971—1975*, Statistical Papers, Series J, No. 20, United Nations, New York 1977.
58. POŽAR, H., *Osnove energetike*, Drugi svezak, Školska knjiga, Zagreb 1978.
59. *World Energy Supplies 1972—1976*, Statistical Papers, Series 7, No. 21, United Nations, New York 1978.

SADRŽAJ

Prvo poglavlje

KLASIFIKACIJA OBLIKA ENERGIJE	5
1. Kratki povijesni pregled	7
2. Energija u današnjem svijetu	12
3. Oblici energije	15
3.1. Pojava oblika energije	15
3.2. Primarni oblici energije	19
3.3. Transformirani oblici energije	20
3.4. Korisni oblici energije	24
4. Mjerne jedinice za energiju i snagu	26
4.1. Osnovne jedinice u SI sistemu jedinica	26
4.2. Sila, masa i težina	27
4.3. Jedinice za energiju i snagu	30
4.4. Neke angloameričke jedinice	33

Drugo poglavlje

PRIMARNI KONVENCIONALNI OBLICI ENERGIJE	35
1. Klasifikacija primarnih oblika energije	37
2. Ugljen	40
2.1. Karakteristike ugljena	40
2.2. Rezerve ugljena	42

2.3. Proizvodnja i potrošnja ugljena	49
2.4. Pokušaj procjene razvoja proizvodnje ugljena u daljoj budućnosti	57
3. Sirova nafta i zemni plin	63
3.1. Postanak i nalazišta	63
3.2. Rezerve sirove nafte i zemnog plina	67
3.3. Proizvodnja i potrošnja sirove nafte i zemnog plina	76
3.4. Pokušaj procjene razvoja proizvodnje sirove nafte i zemnog plina	106
4. Vodne snage	111
4.1. Energija vodotoka	111
4.2. Tehnički iskoristive i iskorištene vodne snage	117
4.3. Pokušaj procjene razvitka iskorištavanja vodnih snaga	119
5. Nuklearna goriva	124
5.1. Prirodna i umjetna nuklearna goriva	124
5.2. Energija raspada jezgre	125
5.3. Nalazišta i rezerve urana i torija	127
5.4. Proizvodnja urana i torija	133
6. Dosadašnji razvoj potrošnje primarnih oblika energije	137
7. Uljni škrljavci i bituminozni pijesak	151
8. Treset, drvo i otpaci	155
8.1. Treset	155
8.2. Drvo	156
8.3. Biljni i životinjski otpaci	158
8.4. Nekomercijalni oblici energije	159

Treće poglavlje

NEKONVENCIONALNI OBLICI ENERGIJE	161
1. Općenito	163
2. Geotermička energija	163
3. Energija plime i oseke	177
4. Energija vjetra	187
5. Neposredno iskorištavanje Sunčeva zračenja	204
5.1. Energija Sunčeva zračenja	204
5.2. Mogućnosti iskorištavanja Sunčeva zračenja	216
5.3. Proizvodnja vodika energijom Sunčeva zračenja	229
6. Energija morskih valova	232

7. Nuklearna fuzija	238
7.1. Osnovno o nuklearnoj fuziji	238
7.2. Uvjeti za nuklearnu fuziju	240
7.3. Mogućnosti ostvarenja uvjeta za fuziju	242
7.4. Izgledi za ostvarenje nuklearne fuzije	247
7.5. Hibridni nuklearni reaktori	250

Četvrto poglavlje

ELEKTRIČNA ENERGIJA	253
LITERATURA	269

HRVOJE POŽAR
IZVORI ENERGIJE

Izdavač
SVEUČILIŠNA NAKLADA LIBER
ZAGREB, SAVSKA 16

Za izdavača
SLAVKO GOLDSTEIN

Likovna oprema
IVAN PICELJ

Tehnički urednik
ĐURĐICA MAROŠEVIĆ

Lektor
KATARINA KRSNIK

Br. MK 229

Tisak
ŠTAMPARSKI ZAVOD »OGNJEN PRICA« — ZAGREB