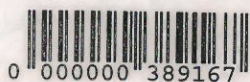


Petar Kulišić

20589



NOVI IZVORI ENERGIJE

Sunčana energija i energija vjetra

ŠKOLSKA KNJIGA – ZAGREB



Dr. PETAR KULIŠIĆ

Redovni profesor
Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu

Novi izvori energije

II. dio

SUNČANA ENERGIJA I ENERGIJA VJETRA

2. dopunjeno izdanje

KNJIŽNICA
FAKULTETA
ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA
ZAGREB - Unska 3

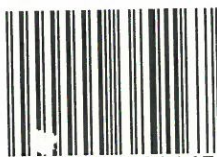
ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1991



KNJIŽNICA
FAKULTETA ELEKTROTEHNIKE
I RAČUNARSTVA - ZAGREB

Inv. br. 20 589 Sign: 5261

20589



0000000389167

Sadržaj

Iz Predgovora prvom izdanju	VII
Predgovor 2. izdanju	VIII
1. Uvod	1
2. Prijenos topline	7
2.1. Toplina i temperatura	7
2.2. Spektar elektromagnetskog zračenja	8
2.3. Toplinsko zračenje	9
2.4. Spektar zračenja crnog tijela. Planckov zakon	11
2.5. Vođenje topline	14
2.6. Konvekcija	15
2.7. Prijenos topline zračenjem	18
3. Energija vjetra	20
3.1. Brzina vjetra	20
3.2. Energija i snaga vjetra	29
3.3. Turbine na vjetar	31
3.4. Elektrane na vjetar	34
4. Sunčana energija	38
4.1. Sunčevo zračenje	39
4.1.1. Uvod	39
4.1.2. Sunce	41
4.1.3. Ekstraterestričko zračenje; solarna konstanta	42
4.1.4. Prizemno Sunčevo zračenje	48
4.1.5. Mjerenje Sunčeva zračenja	49
4.1.6. Proračun prizemnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu	53
4.1.7. Procjena raspršenog zračenja	57
4.1.8. Sunčevo zračenje na nagnutu plohu	59
4.2. Solarni kolektori	63
4.2.1. Uvod	63
4.2.2. Ravni kolektor	63
4.2.3. Selektivni apsorberi	68
4.2.4. Toplinski gubici ravnog kolektora	72
4.2.5. Efikasnost kolektora	74
4.2.6. Testiranje ravnog kolektora	80
4.2.7. Koncentrirajući kolektori	84
4.3. Uskladištenje sunčane energije	86
4.3.1. Uvod	86
4.3.2. Uskladištenje energije zagrijavanjem materijala	88
4.3.3. Uskladištenje energije korištenjem latentne topline	92
4.3.4. Ostale metode uskladištenja energije	93
4.4. Solarno grijanje i hlađenje	96
4.4.1. Uvod	96
4.4.2. Solarni sustavi za dobivanje tople vode	96
4.4.3. Solarni sustavi za zagrijavanje prostora	99
4.4.4. O proračunu solarnih sustava	102
4.4.5. O ekonomičnosti solarnih sustava	106
4.4.6. Pasivni solarni sustavi	108
4.4.7. O solarnom hlađenju	110

4.5. Dobivanje električne energije	113
4.5.1. Uvod	113
4.5.2. Fotonaponska konverzija	113
4.5.3. Sadašnje stanje i perspektive razvoja solarnih ćelija	120
4.5.4. Solarne elektrane	122
4.6. Biokonverzija	125
4.6.1. Uvod	125
4.6.2. Fotosinteza	126
4.6.3. Proizvodnja energije iz biomase	127
5. Dodatak	130
5.1. Funkcije korisnosti i proračun solarnih sistema	130
5.2. Tablice	137
5.2.1. Položaj Sunca i faktori R_b za srednji dan u mjesecu	137
5.2.2. Broj stupanj-dana	137
5.2.3. Optimalni kut nagiba kolektora	140
5.3. Fizikalne veličine i jedinice	142
Literatura	145
Kazalo pojmova	151

Iz Predgovora prvom izdanju

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

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

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

U 3. poglavlju pokazuje se da u najuži izbor ulaze solarna i nuklearna energija u oba svoja oblika: fisiji i fuziji.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Zagreb, listopada 1981.

Autori

Predgovor 2. izdanju

Knjiga *Novi izvori energije — Sunčana energija i energija vjetra* napisana je kao udžbenik za studente Elektrotehničkog fakulteta, kao priručnik za stručnjake, ali i kao knjiga za širi krug zainteresiranih čitalaca. Nastala je iz knjige *Novi izvori energije* autora dr. Vladimira Knappa i dr. Petra Kulišića koja je izašla u izdanju „Školske knjige” 1985. godine. Knjiga ponovo izlazi, ali u dva dijela, koji obrađuju nuklearne izvore i solarne izvore. Osim 4. poglavlja i dijela Uvoda, sva su ostala poglavlja i Dodatak posve novi. Opseg knjige nije dopustio da se energija vjetra opširnije obradi, a zbog tehničkih razloga 4. poglavlje štampano je bez promjena. Kratak prikaz prijenosa topline dodan je radi lakšeg razumijevanja nekih sadržaja u 4. poglavlju. U Dodatku je obrađen proračun termičkih i fotonaponskih sistema, objašnjena je metoda stupanj-dana, a priložene su i tablice s podacima za naše klimatsko područje. Na kraju knjige je popis literature koja može poslužiti čitateljima za bolje i podrobnije upoznavanje određenih sadržaja.

Zahvaljujem prof. dr. H. Požaru, prof. dr. D. Feretiću koji su pregledali rukopis prvog izdanja te prof. dr. J. Vuletin, prof. dr. I. Penzaru i prof. dr. B. Penzaru koji su pregledali rukopis ovog izdanja i dali korisne primjedbe i sugestije.

Zagreb, u ljetu 1990.

Petar Kulišić

1. Uvod

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

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

Međutim, pri uvođenju novih izvora energije pojavljuje se niz problema. Dinamika uvođenja tih izvora, osim o njihovom energetske potencijalu, ovisi i o vremenu potrebnom za razvoj metoda korištenja. Od svih novih, nekonvencionalnih izvora energije danas je razvijena jedino tehnologija iskorištenja nuklearne energije dobivene fisijom (cijepanjem) teških jezgri. Tehnologija nuklearne fuzije nije još toliko razvijena da bi se moglo kontrolirano proizvoditi energiju.

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

Proučavanje uvođenja novih energetskih izvora u zadnjih stotinjak godina pokazalo je da je potrebno mnogo vremena da bi novi energetski izvor osvojio tržište. Procjenjuje se da je potrebno

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

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

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

U tablici 1.1 [izrađenoj prema podacima iz Do 78] prikazana je jedna procjena udjela sunčane energije u energetsom sustavu SAD od 1985. do 2020. godine. Od skromnih 0,8% godine 1985. potrošnja sunčane energije mogla bi se povećati na 25% 2020. godine.

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

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

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

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

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

Od svih dostupnih izvora Sunce ima najveću zalihu energije. Snaga koju Sunce emitira u čitav prostor jest $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Od toga Zemlja primi oko $1,7 \cdot 10^{17}$ W. Oko 30% te energije reflektira se natrag u svemirski prostor,

Tablica 1.1. Procjena udjela sunčane energije u energetsom sustavu SAD [prema Do 78]

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

*1 EJ (eksadžul) = 10^{18} J

47% pretvara se u toplinu i emitira kao infracrveno zračenje, 23% troši se na isparivanje vode i oborinski ciklus u troposferi, a samo mali dio troši se na fotosintezu, pretvara se u energiju vjetra i sl. Zemljina površina prima od Sunca godišnje energije oko $4 \cdot 10^{24}$ J, što je oko 15 000 puta više od današnje svjetske potrošnje energije svih primarnih izvora. Sunčeva je energija dostupna svim zemljama, pa njenim korištenjem zemlje u razvoju mogu smanjiti zavisnost od bogatih, razvijenih zemalja.

Velik dio Jugoslavije, osobito u južnom dijelu Jadranskog područja, ima povoljne uvjete za korištenje sunčane energije, mnogo sunčanih sati godišnje i jači intenzitet Sunčeve radijacije ($1200 - 1500 \text{ kWh/m}^2$ godišnje). Na površinu Jugoslavije godišnje upadne sa Sunca oko $1,3 \cdot 10^{21}$ J ($3 \cdot 10^{14}$ kWh) energije. Današnje su godišnje energetske potrebe Jugoslavije oko $2 \cdot 10^{17}$ J, a procjenjuje se da će 2000. godine biti potrebno oko $5 \cdot 10^{18}$ J. Godišnja je ozračenost (iradijacija) u najsunčanijim dijelovima zemlje oko 1600 kWh/m^2 . Kad bi se sunčanu energiju uspjelo iskoristiti s djelotvornošću samo 10%, ukupne sadašnje energetske potrebe mogle bi se podmiriti sunčanim kolektorima koji bi prekrili samo 1,5% Jugoslavije. Sunce je, dakle, energetski izvor koji bi teorijski mogao zadovoljiti energetske potrebe kroz vrlo dugo razdoblje.

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

Teškoće pri primjeni sunčane energije raznovrsne su. Neravnomjerno je raspoređena, u nekim je krajevima ima više

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

Mala gustoća energetskog toka također je problem pri korištenju sunčane energije. Srednja je vrijednost za Evropu oko 150 W/m^2 (prosjeak za 24 h dnevno), a za Jugoslaviju nešto više. Maksimalne su gustoće toka za vrijeme vedra dana i više od 1 kW/m^2 . Taj prosjeak za cijelu godinu, i za dan i za noć, može stvoriti utisak da je gustoća energije manja nego što zaista jest. Bolje je računati ukupnu energiju koja u toku dana upada na uređaj, odnosno sunčani doprinos takva uređaja u određenim uvjetima. Naime mnogo je jasnije ako kažemo da sunčani uređaj za grijanje vode u Splitu godišnje može osigurati 700 kWh/m^2 , a u Zagrebu 400 kWh/m^2 , nego ako kažemo da je godišnji prosjeak za Split $0,18 \text{ kW/m}^2$, a za Zagreb $0,13 \text{ kW/m}^2$.

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

Toplinska se energija može dobiti iz sunčane s pomoću pasivnih i aktivnih sustava. Aktivni sustavi uglavnom se sastoje od kolektora, spremnika i crpke s pomoću koje radni fluid prisilno cirkulira kroz kolektor i skupljenu toplinu prenosi u spremnik ili neposredno u trošilo. Pri pasivnom korištenju sunčane energije za zagrijavanje prostorija nema posebnih kolektora, nego se dijelovi zgrade koriste za skupljanje sunčane energije. Toplina se kroz zgradu prenosi prirodnom kon-

vekcijom, a ne s pomoću pumpa ili ventilatora kao u aktivnom sustavu. Sunčana kuća tako je projektirana i izrađena da je čitava zapravo djelotvoran kolektor i spremnik energije.

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

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

Cijene sunčanih sustava za grijanje vode jesu oko 2 000 \$, a za grijanje kuće 3–4 puta veće. Glavni je problem velika početna investicija i dugo razdoblje amortizacija. Iako je gorivo besplatno, početni troškovi mnogo su veći nego za konvencionalni sustav, što obeshrabruje potencijalnog kupca. Često, osobito u gusto naseljenim mjestima, postoje i praktični problemi koji onemogućuju primjenu sunčanog uređaja. Čak kad bi sunčani sustav bio podjednake cijene kao i konvencionalni, problemi u izgradnji i korištenju ometali bi njegovu primjenu. Stalni rast cijena goriva mijenja situaciju u korist sunčane energije. Posebnim olakšicama (npr. povoljnim kreditima) mogao bi se povećati interes za proizvodnju i korištenje sunčane opreme. U nekim se zemljama već radi tako.

Sunčanom energijom mogao bi se dobiti i jedan dio procesne topline za industriju. Tako bi se npr. dobivanje tople vode za prehrambenu industriju, toplog zraka za sušenje žitarica, voća i sl. moglo barem djelomično osigurati upotrebom sunčane energije. Tipičan industrijski sustav za grijanje vode uštedio bi toliko energije kao nekoliko stotina sunčanih

kuća. Međutim, ni takvi se sustavi, osim oglednih, još ne primjenjuju zbog visoke cijene, neekonomičnosti i duge amortizacije.

Postoji više načina dobivanja električne energije iz sunčane. Najjednostavniji je neposredna konverzija s pomoću sunčanih ćelija. Ta metoda ima najbolje mogućnosti tehnološkog razvoja i najperspektivnija je. Prednost je sunčanih ćelija jednostavnost upotrebe, a mana visoka cijena. Sadašnja cijena sunčanih modula (sunčanih ćelija instaliranih na odgovarajuće panele, zaštićenih od atmosferskih utjecaja i tako međusobno povezanih da čine kolektore pripremljene za montiranje) jest oko 10 \$ po vatu vršne snage. Cijena fotonaponskih sustava još je veća. Zbog tako visoke cijene sunčane se ćelije upotrebljavaju samo tamo gdje se ne mogu primijeniti drugi izvori, kao npr. na satelitima, gdje se silicijeve ćelije već dugo uspješno primjenjuju, zatim u komunikacijskim sustavima u usamljenim područjima gdje nema električne energije, na svjetionicima i sl. Navedimo da bi kolektori sunčanih ćelija površine 100 m² na krovu neke kuće koji bi mogli osigurati električnu energiju za potrebe te kuće bili vrlo skupi (100 000 \$ pa i više). Zbog toga je za sada iluzorno govoriti o ekonomičnoj i masovnoj primjeni sunčanih ćelija.

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

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

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

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

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

Na kraju ne smijemo zaboraviti ni biološku primjenu sunčane energije — fotosintezu kao važan način korištenja sunčane energije za dobivanje hrane i goriva. Istraživanja su usmjerena na povećanje djelatnosti fotosinteze, proizvodnju biomase za dobivanje energije, korištenje organskih otpadaka, dobivanje bioplina i sl. Znatnije korištenje sunčane

energije (npr. reda veličine teravatgodina) ovisit će o tehničkom i tehnološkom rješavanju dvaju osnovnih problema, spremanja energije i postizavanja ekonomičnosti sunčanih sustava, ali i o razvoju drugih izvora energije, dugoročno perspektivnih i prihvatljivih prema učincima na okoliš. Načini iskorištavanja sunčane energije toliko su raznovrsni da se uopćeno o rješavanju navedenih problema ne može govoriti. Da bi se mogla procijeniti perspektiva sunčane energije, valja detaljnije promotriti pojedine načine iskorištavanja te energije. Tek na temelju razvoja specifičnih načina konverzije odnosno iskorištavanja sunčane energije moglo bi se eventualno zaključiti o pravoj perspektivi i mogućnostima tog izvora energije.

Vjetar nastaje zbog neravnomjernog zagrijavanja Zemljine površine Sunčevim zračenjem. Energetski potencijal vjetra u prosjeku iznosi oko 2% od dozačene sunčane energije.

Osnovni nedostatak vjetra kao izvora energije jest promjenljivost brzine vjetra i njegove oscilacije u različito doba godine, mjeseca, dana i sata, kao i mala gustoća energijskog toka (oko 650 W/m^2 pri brzini 10 m/s).

Energija vjetra upotrebljavala se stoljećima za pogon brodova i pomoću vjetrenjača za pumpanje vode, pogon mlinova i sl. U 18. i 19. stoljeću bilo je npr. oko 10 000 vjetrenjača u Nizozemskoj. Takve vjetrenjače promjera oko 30 m mogle su proizvesti snagu otprilike 30 kW pri brzini vjetra oko 6 m/s, razviti dnevno oko 100 kWh energije što odgovara radu stotinjak radnika. Razvojem drugih strojeva, parnog kotla, motora s unutrašnjim izgaranjem, električnih motora, upotreba vjetrenjača postepeno je zamirala. Energetska kriza 1973. god. potakla je istraživanja i tog gotovo zaboravljenog izvora energije. Otada se istražuju i razvijaju turbine na vjetar od malih, pa do onih reda veličine megavata (MW), čiji polumjer rotora dostiže i do 100 m.

Turbine na vjetar povezane s električnim generatorima mogu proizvesti znatne količine električne energije. Spomeni-

mo npr. nekoliko velikih turbina instaliranih u SAD snage 2 MW (promjera 61 m) do 2,5 MW (promjera 91 m). Danas velike turbine na vjetar tjeraju generatore i proizvode električnu energiju koju koristi komercijalna električna mreža. Također raste proizvodnja malih generatora na vjetar koji se mogu us-

pješno koristiti tamo gdje nema električne mreže.

Iako ne može bitno pridonijeti energetskim potrebama, vjetar kao izvor energije može pridonijeti uštedi drugih izvora energije i u mnogim primjenama njegova upotreba može biti ekonomski opravdana i kompetitivna.

2. Prijenos topline

2.1. Toplina i temperatura

Temperatura je fizikalna veličina koja karakterizira stupanj zagrijanosti nekog tijela. To je jedna od sedam osnovnih fizikalnih veličina. Pravo fizikalno značenje temperature uočava se u kinetičkoj teoriji topline: temperatura je proporcionalna kinetičkoj energiji molekula.

U svim se tijelima čestice neprekidno giblju: to gibanje nazivamo toplinskim gibanjem. Zbog toga gibanja čestice posjeduju toplinsku energiju. Naš osjećaj toplijeg i hladnijeg ovisi o kinetičkoj energiji čestica tvari s kojom dolazimo u dodir.

Dovedemo li dva tijela, hladnije i toplije u međusobni kontakt, čestice s većom kinetičkom energijom u sudarima predaju energiju onima s manjom energijom. Na taj način energija u obliku topline prelazi s jednog tijela na drugo. Za tijelo koje pritom gubi energiju kažemo da je toplije, a za ono na koje energija prelazi da je hladnije. Prijelaz topline traje sve dok se ne uspostavi termička ravnoteža. Molekule koje se brže giblju u toplijem tijelu predaju svoju energiju molekulama hladnijeg tijela, uspoređujući se i toplije tijelo se hladi, molekule hladnijeg tijela ubrzavaju se i hladnije tijelo se grije. U termičkoj ravnoteži srednja kinetička energija istovrsnog gibanja molekula oba tijela jednaka je. Budući da je temperatura proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji molekula, to tijela koja se nalaze u termičkoj ravnoteži imaju istu temperaturu, odnosno kada dva tijela imaju jednaku temperaturu, kažemo da su u termičkoj ravnoteži.

Temperatura se obično izražava u Celsiusovoj ili u apsolutnoj, tj. Kelvinovoj temperaturnoj skali.

Apsolutna (Kelvinova, termodinamička) temperaturna skala ima početnu točku na apsolutnoj nuli ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Temperatura se u apsolutnoj skali izražavaju u kelvinima. Kelvin je jedinica za temperaturu u Međunarodnom sustavu. Tem-

peratura apsolutne nule je nula kelvina. Za definiciju kelvina uzima se temperatura trojne točke vode, kojoj odgovara $273,16\text{ K}$. Kelvin je $\frac{1}{273,16}$ termodinamičke temperature trojne točke vode. Veza između apsolutne temperature koja se označava sa T i Celsiusove temperature t jest

$$\frac{T}{\text{K}} = 273,15 + \frac{t}{^{\circ}\text{C}}. \quad (2.1)$$

Uočite da je temperaturni interval iskazan kelvinima jednak temperaturnom intervalu iskazanom u Celsiusovim stupnjevima, tj. $\Delta t = \Delta T$.

Toplina je energija u prijelazu s tijela više temperature na tijelo niže temperature, npr. od zagrijanog kolektora na radni fluid (npr. vodu koja protječe kolektorom), od tople vode u radiatoru na zrak u prostoriji i sl.

Unutrašnja energija neke tvari zbroj je potencijalne i kinetičke energije molekula (atoma) od kojih je tvar sastavljena. Pri izmjeni topline smanjuje se unutrašnja (termička ili toplinska) energija tvari iz koje toplina odlazi, a povećava unutrašnja energija tvari koja toplinu apsorbira. Toplina je jedan od oblika energije i mjeri se istim jedinicama kao energija i rad. U tablici 2.1. navedena je veza između nekih jedinica za energiju. Neke od njih se uvođenjem Međunarodnog sustava jedinica 1980. god. više ne upotrebljavaju (cal, tona ekvivalentnog ugljena), ali ih nalazimo u starijoj literaturi.

Kada sistemu dovodimo toplinu Q , tada se jedan njezin dio (a nekad i u cijelosti) može utrošiti na povećanje unutrašnje energije sistema ΔU , a ostatak se pretvara u rad W koji sistem daje okolini. Pritom iz zakona održanja energije proizlazi

$$Q = \Delta U + W. \quad (2.2)$$

To je prvi zakon termodinamike, izravna posljedica zakona očuvanja energije.

Tablica 2.1. Razne jedinice za energiju

	J	kWh	eV	kcal	tona ekvivalentnog ugljena
joule (džul) J	1	$2,778 \cdot 10^{-7}$	$0,624 \cdot 10^{19}$	$2,388 \cdot 10^{-4}$	$3,412 \cdot 10^{-11}$
kilovatsat kWh	$3,6 \cdot 10^6$	1	$2,746 \cdot 10^{25}$	859,8	$1,228 \cdot 10^{-4}$
elektronvolt eV	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$	1	$3,827 \cdot 10^{-23}$	$5,466 \cdot 10^{-30}$
kilokalorija kcal	$4,187 \cdot 10^3$	$1,163 \cdot 10^3$	$2,613 \cdot 10^{22}$	1	$1,429 \cdot 10^{-7}$
tona ekvivalentnog ugljena	$2,931 \cdot 10^{10}$	$8,142 \cdot 10^3$	$1,829 \cdot 10^{29}$	$7 \cdot 10^6$	1

British thermal unit (Btu): $1 \text{ Btu} = 1,055 \cdot 10^3 \text{ J}$

Toplinski kapacitet nekog tijela definira se kao omjer topline Q , koju je potrebno dovesti tijelu da bi mu se povisila temperatura za ΔT , i temperaturne razlike ΔT . Toplinski kapacitet ovisi o materijalu iz kojeg je tijelo napravljeno, o masi tijela, a često i o temperaturi tijela.

Da bi se dobila veličina karakteristična za određeni materijal, koja ne ovisi o masi tijela, definira se specifični toplinski kapacitet c tako da se toplinski kapacitet podijeli masom:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.3)$$

Jedinica za specifični toplinski kapacitet je džul po kelvinu i kilogramu, $\text{JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. Za veličinu c upotrebljavao se nekad i naziv specifična toplota, koji se međutim ne preporučuje.

Toplina Q koju dovodimo nekom tijelu, ili od tog tijela odvodimo, jednaka je

$$Q = mc\Delta T \quad (2.4)$$

gdje je m masa tijela, c specifični toplinski kapacitet materijala od kojeg je tijelo napravljeno, a ΔT razlika početne i konačne temperature tijela. Pritom smo pretpostavili da je u promatranom temperaturnom intervalu specifični toplinski kapacitet konstanta, što je za manje temperaturne intervale obično ispunjeno.

2.2. Spektar elektromagnetskog zračenja

Elektromagnetsko zračenje su valovi nastali ubrzanjem nabijenih čestica (elektrona). Sastoje se od titranja električnog i

magnetskog polja koje se kroz prostor širi brzinom svjetlosti c (u vakuumu je $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Ako valovi putuju kroz sredstvo indeksa loma n , brzina im se smanjuje n puta i iznosi c/n .

Kao i svaki drugi val, i elektromagnetski val prenosi energiju kroz prostor. Međutim za razliku od mehaničkih valova, elektromagnetski valovi prenose energiju i kroz vakuum, i to je način kako nam dolazi energija od Sunca. Energiju koju ravni elektromagnetski val u jedinici vremena prenese kroz jedinicu površine (okomite na smjer širenja vala) nazivamo gustoćom toka energije ili ponekad intenzitetom elektromagnetskog vala. Ta najvažnija fizička veličina za opisivanje prijenosa energije elektromagnetskim valovima naziva se i *Poyntingovim vektorom* jer je možemo smatrati i vektorskom veličinom u smjeru širenja vala. Jedinica je vat po četvornom metru, W/m^2 . Srednja vrijednost iznosa Poyntingova vektora za sinusoidalni ravni elektromagnetski val je

$$\bar{I} = \frac{1}{2} E_0 H_0 \quad (2.5)$$

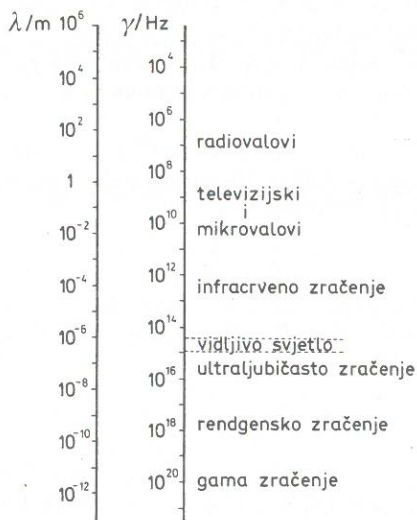
gdje su E_0 i H_0 amplitude električnog i magnetskog polja u elektromagnetskom valu.

Tako npr. gustoća energijskog toka na plohu okomitu na smjer sunčanih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca, ali iznad Zemljine atmosfere, tzv. *solarna konstanta*, jest 1367 W/m^2 .

Osobine elektromagnetskih valova ovise o frekvenciji ν odnosno valnoj dužini zračenja λ ($c = \lambda\nu$). Već prema tome kako su nastali, elektromagnetski valovi mogu imati različite valne duljine (frekvencije). Pod-

ručje valnih duljina odnosno frekvencija koje mogu imati elektromagnetski valovi naziva se spektrom elektromagnetskih valova. To je vrlo široko područje od oko 10^{-13} m odnosno 10^{21} Hz (do 10^5 m odnosno 10^3 Hz).

Na slici 2.1. prikazan je spektar frekvencija i valnih duljina elektromagnetskih valova. Nazivi pojedinih dijelova spektra (čije granice nisu oštro određene) nastali su prema načinu dobivanja valova. Opažamo da je vidljiva svjetlost samo malen dio tog spektra. Ekstraterestrički spektar Sunčeva zračenja (tj. prije prolaska kroz atmosferu) proteže se od oko $0,12 \mu\text{m}$ ($I_\lambda = 0,9 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) do više od $10 \mu\text{m}$ ($0,2 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) s maksimumom na oko $0,48 \mu\text{m}$ ($2060 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) i sastoji se, dakle, od ultraljubičastog ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$) vidljivog ($0,4 \mu\text{m} - 0,75 \mu\text{m}$) infracrvenog dijela ($\lambda > 0,75 \mu\text{m}$). Spektar toplinskog zračenja tijela na sobnoj temperaturi (oko 300 K) praktički se proteže od približno $3 \mu\text{m}$ ($0,18 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) do $80 \mu\text{m}$ ($0,14 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) s maksimumom na $9,7 \mu\text{m}$ ($31 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$).



Slika 2.1. Spektar elektromagnetskih valova

Budući da je za primjenu sunčane energije najvažniji toplinski dio spektra, to ćemo ga obraditi posebno.

2.3. Toplinsko zračenje

Toplinsko (termičko) zračenje nastaje kada atomi ili molekule tijela, pobuđeni termičkim gibanjem, emitiraju elektromagnetske valove. Užarena tijela zrače elektromagnetske valove uglavnom u infracrvenom području. Upaljena peč grije okolne predmete to jače što joj je temperatura veća. Intenzitet i spektralni sastav izračene toplinske energije nekog tijela uglavnom ovise o njegovoj temperaturi.

Pri nižim temperaturama tijela emitira ju infracrveno zračenje, a ako su temperatura veće od oko 800 K, tijela osim infracrvene počinju zračiti i vidljivu svjetlost; pri vrlo visokim temperaturama, osim infracrvene i vidljive, emitira se i ultraljubičasta svjetlost. Iako na visokim temperaturama tijela svijetle, ne smijemo zaboraviti da vidljiva svjetlost nije jedino zračenje koje ona emitiraju. Emisijski spektri užarenih čvrstih tijela kontinuirani su i sastoje se od svih valnih duljina (od najkraćih, ultraljubičastih, do najdužih, infracrvenih); pri tom su neke valne duljine isijavane jače, druge slabije. Raspored energije po pojedinim valnim duljinama bitno ovisi o temperaturi tijela koje zrači. Osim o temperaturi, oblik spektra i raspored energije po pojedinim valnim dužinama ovisi i o osobinama površine tijela koje zrači.

Infracrveno zračenje (koje često nazivamo i toplinskim zrakama) dio je spektra elektromagnetskih valova valne duljine između $0,75 \mu\text{m}$ i $1000 \mu\text{m}$, dakle između vidljive svjetlosti ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$) i mikroradiovalova ($\lambda > 1000 \mu\text{m}$). Veći dio spektra zračenja tijela na temperaturama manjim od 3000 K pripada infracrvenom području; pri običnoj temperaturi (300 K) cijeli je spektar zračenja u infracrvenom području i proteže se od oko $2 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$, s maksimumom na oko $10 \mu\text{m}$.

Crno tijelo. Kada zračenje upada na površinu nekoga neprozirnog tijela, dio upadnog zračenja se odbija, a dio se apsorbira. Omjer apsorbiranoga i upadnog toka zove se faktor *apsorpcije*:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_u}, \quad (2.6)$$

a omjer reflektiranoga i upadnog toka je faktor refleksije:

$$\varrho = \frac{\Phi_r}{\Phi_u}. \quad (2.7)$$

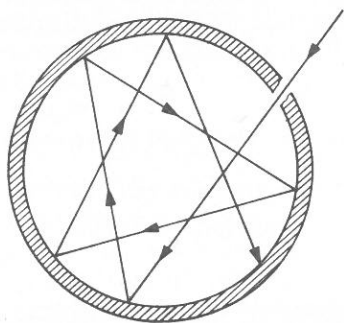
Upadni tok dijeli se na apsorbirani i reflektirani dio, pa stoga vrijedi:

$$\alpha + \varrho = 1. \quad (2.8)$$

Tijelo koje potpuno apsorbira određene valne duljine crno je za to područje spektra; njegov faktor apsorpcije je $\alpha = 1$, a faktor refleksije $\varrho = 0$. Takvo tijelo izgleda crno ako apsorbira vidljivu upadnu svjetlost. Tako čada ima $\alpha \approx 1$ za vidljivi dio spektra elektromagnetskog zračenja, a za velike infracrvene valne duljine $\alpha < 1$.

Tijelo koje reflektira cijelo upadno zračenje jest *bijelo* tijelo, s faktorom refleksije $\varrho = 1$. Tijelo koje djelomično reflektira sve valne duljine upadnog zračenja podjednako zove se *sivo* tijelo. Faktor refleksije sivog tijela kreće se između 0 i 1 i ne ovisi o valnoj duljini. Općenito, većina tijela nije siva i faktori refleksije i apsorpcije su im funkcije valne duljine.

Idealno crno tijelo potpuno apsorbira sve upadno zračenje. Idealno crno tijelo u prirodi ne postoji. Ipak, vrlo dobro aproksimacija crnog tijela jest *izotermna šupljina* s malim otvorom. Otvor takve šupljine (sl. 2.2) ponaša se kao crno tijelo jer gotovo potpuno apsorbira sve upadno zračenje koje kroz otvor uđe u šupljinu. Naime, zraka se nakon ulaska u šupljinu mnogobrojnim refleksijama u njoj pot-



Slika 2.2. Idealno crno tijelo

puno apsorbira i vjerojatnost da dio upadnog zračenja iziđe vrlo je malena. Otvor takve šupljine izgleda sasvim crn.

Ukupni energijski tok (energija u jedinici vremena) što ga zrači površina A tijela u sav poluprstor označimo sa Φ_e . Ako tok Φ_e podijelimo površinom tijela A , dobit ćemo gustoću toka energije, tj. intenzitet zračenja I , odnosno energiju koju zrači jedinica površine tijela u jedinici vremena:

$$I = \frac{\Phi_e}{A}. \quad (2.9)$$

To je ukupni intenzitet (energijska egzitancija) koji obuhvaća sve valne duljine (frekvencije). Dio dI ukupnog intenziteta I koji crno tijelo izrači s valnim duljinama od λ do $\lambda + d\lambda$ funkcija je valne duljine i temperature:

$$dI = I_\lambda d\lambda \quad (2.10)$$

$$dI = \frac{dI_{ct}}{d\lambda} = f_{ct}(\lambda, T) d\lambda,$$

pri čemu veličinu $f_{ct}(\lambda, T)$ zovemo emisiona moć (spektralna gustoća zračenja) crnog tijela.

Veličina $I_\lambda = dI/d\lambda$ naziva se i spektralnom egzitancijom i ponekad obilježava sa M_λ .

Ukupni intenzitet zračenja dobija se integriranjem emisione moći po svim valnim duljinama:

$$I = \int_0^\infty I_\lambda d\lambda = \int_0^\infty \frac{dI}{d\lambda} d\lambda$$

$$I = \int_0^\infty f_{ct}(\lambda, T) d\lambda. \quad (2.11)$$

Emisiona moć $f(\lambda, T)$ bilo kojeg tijela jest snaga toplinskog zračenja određene valne duljine (frekvencije) koju na temperaturi T emitira jedinica površine tijela, pa $f(\lambda, T)$ ovisi o valnoj duljini, temperaturi, materijalu i osobinama površine tijela.

Jedinica ukupnog intenziteta zračenja I je $\frac{W}{m^2}$, a jedinica spektralnog intenziteta I_λ , odnosno $f(\lambda, T)$ je $\frac{W}{m^3}$ ili $\frac{W}{m^2 \mu m}$, s obzirom na to da se valna duljina obično iskazuje u mikrometrima (μm).

Dosada smo promatrali crno tijelo. Problem zračenja *sivog tijela* riješit ćemo sljedećim razmatranjem. Neka se u posudi čiji zidovi imaju temperaturu T nalazi crno tijelo. Snaga koju tijelo predaje posudi u ravnoteži je jednaka nuli te je apsorbirani tok energije (koji je za crno tijelo jednak upadnome) jednak emitiranom toku:

$$\Phi_e = \Phi_a = \Phi_u. \quad (2.12)$$

Zamijenit ćemo crno tijelo sivim istog oblika. Upadni se tok time ne promijeni, a apsorbirani je tok manji jer se dio $\rho\Phi_u$ reflektira od sivog tijela:

$$\Phi_a = (1 - \rho) \Phi_u = \alpha \Phi_u. \quad (2.13)$$

Omjer emitiranog toka sivog tijela i crnog tijela pri jednakoj temperaturi $\frac{\Phi_e}{\Phi_e^{ct}} = \varepsilon$ zovemo faktorom emisije. U ravnoteži emitirani je tok jednak apsorbiranome i kombinirajući tu činjenicu s jednadžbom (2.13), dobivamo

$$\Phi_e = \varepsilon \Phi_e^{ct} = \alpha \Phi_e^{ct} \quad (2.14)$$

jer je upadni tok jednak emitiranom toku crnog tijela.

Ovim smo razmatranjem došli do rezultata da je faktor emisije sivog tijela jednak njegovu faktoru apsorpcije. Isti rezultat vrijedi za svaku valnu duljinu posebno. Možemo, naime, zamisliti (bar na papiru) posudu koja emitira samo svjetlost određene valne duljine (boje) – i razmatranje ponoviti. Tada ćemo umjesto (2.14) dobiti relaciju za emisijsku moć:

$$f_{ct}(\lambda, T) = \varepsilon f_{ct}(\lambda, T) = \alpha f_{ct}(\lambda, T), \quad (2.15)$$

što znači da su emisijski spektri sivoga i crnog tijela po obliku jednaki.

Općenito, tijelo nije sivo pa koeficijenti refleksije $\rho(\lambda)$ i apsorpcije $\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$ ovise o valnoj duljini. Tu činjenicu moramo uzeti u obzir i u (2.15):

$$f(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) f_{ct}(\lambda, T) = \alpha(\lambda) f_{ct}(\lambda, T). \quad (2.16)$$

Jednakost faktora emisije i faktora apsorpcije:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (2.17)$$

zove se *Kirchhoffov zakon*. Budući da je ε funkcija valne duljine, emisijski spektar, općenito, nije više sličan spektru crnog tijela.

2.4. Spektar zračenja crnog tijela. Planckov zakon

Kada je izotermna šupljina ugrijana na neku temperaturu T , iz njezina otvora izlazi zračenje kontinuirane raspodjele valnih duljina, od neke minimalne do maksimalne. Spektar tog zračenja vrlo je blizak spektru zračenja crnog tijela. Da bi se odredila emisijska moć $f(\lambda, T)$, potrebno je zračenje rastaviti u spektar (npr. pomoću ogibne rešetke) i mjeriti intenzitet dI dijelova spektra $d\lambda$ za razne λ .

Na slici 2.3. prikazani su spektri zračenja crnog tijela (tj. emisijska moć kao funkcija valne duljine) za razne temperature.

Iz spektara je vidljivo nekoliko važnih činjenica. Spektar bitno ovisi o temperaturi tijela: što je temperatura veća, to je i ukupna izračena energija veća. (Uočite da površina ispod krivulja $f(\lambda, T)$ označava ukupni intenzitet zračenja, tj. ukupnu energiju koju jedinična površina emitira u sekundi.) Svaki spektar ima maksimum na određenoj valnoj duljini (λ_m). Kako temperatura raste, maksimumi se pomiču prema manjim valnim duljinama. To pomicanje maksimuma spektra dobro nam je poznato iz iskustva: npr. bijelo usijano tijelo zrači mnogo više topline od crveno usijanog.

Stefan-Boltzmannov i Wienov zakon. Jožef Stefan je iz eksperimentalnih spektara zračenja ustanovio da je ukupni intenzitet zračenja, tj. energija koju zrači četvorni metar površine tijela u sekundi, razmjeran četvrtoj potenciji apsolutne temperature crnog tijela.

L. Boltzmann, neovisno o Stefanu, teorijskim je razmatranjima došao do istog rezultata i odredio izraz za ukupni intenzitet zračenja idealnoga crnog tijela:

$$I = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{dI}{d\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.18)$$

gdje je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ tzv. *Stefan-Boltzmannova konstanta*.
Izraz

$$I = \sigma T^4 \quad (2.19)$$

zove se **Stefan-Boltzmannov zakon**.

Iz (2.19) slijedi da ukupna snaga zračenja površine A crnog tijela iznosi:

$$P = A\sigma T^4.$$

Za realna tijela faktor emisije ε manji je od jedinice ($0 < \varepsilon < 1$), te Stefan-Boltzmannov zakon glasi:

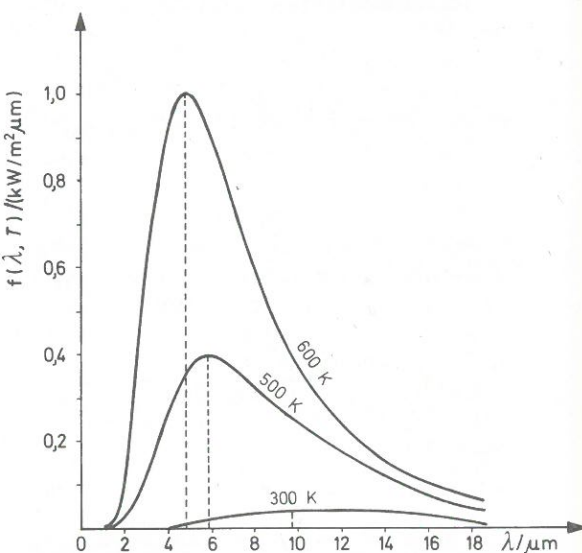
$$I = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2.20)$$

Ako je crno tijelo temperature T_2 okruženo zidovima temperature T_1 , tijelo će emitirati snagu σT_2^4 , ali i apsorbirati snagu σT_1^4 , pa je snaga koju tijelo gubi zračenjem jednaka:

$$P = A\sigma(T_2^4 - T_1^4). \quad (2.21)$$

Iz slike 2.3. jasno se vidi da svaka krivulja na određenoj valnoj duljini λ_m ima maksimum. To je ona valna duljina oko koje se na određenoj temperaturi emitira najviše energije. Maksimumi spektralne gustoće zračenja $f(\lambda, T)$ pomiču se prema kraćim valnim duljinama kada temperatura raste.

Tu činjenicu iskazuje **Wienov zakon pomicanja**, a kaže da je valna duljina koja odgovara maksimumu izračene energije (λ_m) obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi:



Slika 2.3. Spektri crnog tijela pri raznim temperaturama

$$\lambda_m T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}. \quad (2.22)$$

Tako pri sobnoj temperaturi (300 K) najviše emitirane energije ima valnu duljinu oko $10 \mu\text{m}$ (infracrveno toplinsko područje), a pri temperaturi 6000 K maksimum spektra je u području vidljive svjetlosti (oko $0,5 \mu\text{m}$).

Planckov zakon. Pri razmatranju emisije i apsorpcije zračenja (elektromagnetskih valova) te njihove interakcije s atomima u materijalu potrebno je uzeti u obzir korpuskularnu (čestičnu) prirodu zračenja i zračenje promatrati kao snop čestica tzv. fotona.

Fotoni su čestice bez naboja koje se giblju brzinom svjetlosti, c . Njihova masa mirovanja je nula, a relativistička im je masa $m = E/c^2$. Energija fotona dana je relacijom

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}, \quad (2.23)$$

gdje je Planckova konstanta $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, λ valna duljina i ν frekvencija elektromagnetskog zračenja. Energija fotona raste dakle s frekvencijom, a opada s valnom duljinom.

Pretpostavivši korpuskularnu prirodu zračenja i kvantizirana energetska stanja atoma, Max Planck je 1900. god. objasnio zračenje crnog tijela. Zaključio je, naime, da spektralnu gustoću $f_{ct}(\lambda, T)$ savršeno opisuje izraz:

$$f_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} - \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.24)$$

gdje su c brzina svjetlosti u vakuumu, k Boltzmannova konstanta, a $h = 6,626 \cdot$

10^{-34} Js tada novouvedena Planckova konstanta.

Planckov izraz za emisiju moć crnog tijela (2.24) odlično se slaže s eksperimentalnim krivuljama (slika 2.3) za sve valne duljine. I Wienov i Stefan-Boltzmannov zakon posljedice su Planckova zakona i mogu se iz njega izvesti.

U tablici 2.2. prikazan je spektar toplinskog zračenja crnog tijela $f_{ct}(\lambda, 300 \text{ K})$ ugrijanog na temperaturu 300 K (27°C).

Tablica 2.2. Spektar crnog tijela na temperaturi 300 K

λ/m	$I_\lambda/(\text{Wm}^{-3})$	λ/m	$I_\lambda/(\text{Wm}^{-3})$
$0,20 \cdot 10^{-5}$	$0,45 \cdot 10^3$	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^7$
$0,30 \cdot 10^{-5}$	$0,18 \cdot 10^6$	$0,43 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^7$
$0,40 \cdot 10^{-5}$	$0,23 \cdot 10^7$	$0,44 \cdot 10^{-4}$	$0,11 \cdot 10^7$
$0,50 \cdot 10^{-5}$	$0,82 \cdot 10^7$	$0,45 \cdot 10^{-4}$	$0,11 \cdot 10^7$
$0,60 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^8$	$0,46 \cdot 10^{-4}$	$0,99 \cdot 10^6$
$0,70 \cdot 10^{-5}$	$0,24 \cdot 10^8$	$0,47 \cdot 10^{-4}$	$0,92 \cdot 10^6$
$0,80 \cdot 10^{-5}$	$0,29 \cdot 10^8$	$0,48 \cdot 10^{-4}$	$0,86 \cdot 10^6$
$0,90 \cdot 10^{-5}$	$0,31 \cdot 10^8$	$0,49 \cdot 10^{-4}$	$0,80 \cdot 10^6$
$0,10 \cdot 10^{-4}$	$0,31 \cdot 10^8$	$0,50 \cdot 10^{-4}$	$0,74 \cdot 10^6$
$0,11 \cdot 10^{-4}$	$0,30 \cdot 10^8$	$0,51 \cdot 10^{-4}$	$0,69 \cdot 10^6$
$0,12 \cdot 10^{-4}$	$0,28 \cdot 10^8$	$0,52 \cdot 10^{-4}$	$0,65 \cdot 10^6$
$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,26 \cdot 10^8$	$0,53 \cdot 10^{-4}$	$0,61 \cdot 10^6$
$0,14 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^8$	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$0,57 \cdot 10^6$
$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,21 \cdot 10^8$	$0,55 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^6$
$0,16 \cdot 10^{-4}$	$0,19 \cdot 10^8$	$0,56 \cdot 10^{-4}$	$0,50 \cdot 10^6$
$0,17 \cdot 10^{-4}$	$0,17 \cdot 10^8$	$0,57 \cdot 10^{-4}$	$0,47 \cdot 10^6$
$0,18 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^8$	$0,58 \cdot 10^{-4}$	$0,44 \cdot 10^6$
$0,19 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^8$	$0,59 \cdot 10^{-4}$	$0,42 \cdot 10^6$
$0,20 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^8$	$0,60 \cdot 10^{-4}$	$0,39 \cdot 10^6$
$0,21 \cdot 10^{-4}$	$0,10 \cdot 10^8$	$0,61 \cdot 10^{-4}$	$0,37 \cdot 10^6$
$0,22 \cdot 10^{-4}$	$0,93 \cdot 10^7$	$0,62 \cdot 10^{-4}$	$0,35 \cdot 10^6$
$0,23 \cdot 10^{-4}$	$0,83 \cdot 10^7$	$0,63 \cdot 10^{-4}$	$0,33 \cdot 10^6$
$0,24 \cdot 10^{-4}$	$0,74 \cdot 10^7$	$0,64 \cdot 10^{-4}$	$0,31 \cdot 10^6$
$0,25 \cdot 10^{-4}$	$0,66 \cdot 10^7$	$0,65 \cdot 10^{-4}$	$0,30 \cdot 10^6$
$0,26 \cdot 10^{-4}$	$0,59 \cdot 10^7$	$0,66 \cdot 10^{-4}$	$0,28 \cdot 10^6$
$0,27 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^7$	$0,67 \cdot 10^{-4}$	$0,26 \cdot 10^6$
$0,28 \cdot 10^{-4}$	$0,48 \cdot 10^7$	$0,68 \cdot 10^{-4}$	$0,25 \cdot 10^6$
$0,29 \cdot 10^{-4}$	$0,43 \cdot 10^7$	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$0,24 \cdot 10^6$
$0,30 \cdot 10^{-4}$	$0,39 \cdot 10^7$	$0,70 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^6$
$0,31 \cdot 10^{-4}$	$0,35 \cdot 10^7$	$0,71 \cdot 10^{-4}$	$0,21 \cdot 10^6$
$0,32 \cdot 10^{-4}$	$0,32 \cdot 10^7$	$0,72 \cdot 10^{-4}$	$0,20 \cdot 10^6$
$0,33 \cdot 10^{-4}$	$0,29 \cdot 10^7$	$0,73 \cdot 10^{-4}$	$0,19 \cdot 10^6$
$0,34 \cdot 10^{-4}$	$0,27 \cdot 10^7$	$0,74 \cdot 10^{-4}$	$0,18 \cdot 10^6$
$0,35 \cdot 10^{-4}$	$0,24 \cdot 10^7$	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$0,18 \cdot 10^6$
$0,36 \cdot 10^{-4}$	$0,22 \cdot 10^7$	$0,76 \cdot 10^{-4}$	$0,17 \cdot 10^6$
$0,37 \cdot 10^{-4}$	$0,20 \cdot 10^7$	$0,77 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^6$
$0,38 \cdot 10^{-4}$	$0,19 \cdot 10^7$	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^6$
$0,39 \cdot 10^{-4}$	$0,17 \cdot 10^7$	$0,79 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^6$
$0,40 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^7$	$0,80 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^6$
$0,41 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^7$		

2.5. Vođenje topline

Toplina je energija koja zbog razlike temperatura prelazi iz područja više temperature u područje niže temperature. Postoje tri načina prijenosa topline: vođenje (kondukcija), strujanje (konvekcija) i zračenje (radijacija).

Ako u nekom sredstvu postoji temperaturna razlika, toplinska će energija vođenjem prelaziti s mjesta više temperature prema mjestu niže temperature. Tako se toplina prenosi kroz čvrsta tijela. U fluidima (tekućinama i plinovima) toplina se obično prenosi konvekcijom. Za razliku od vođenja gdje se prijenos topline ostvaruje molekularnim gibanjem, a samo sredstvo je na miru, pri prenošenju topline konvekcijom giba se i samo sredstvo. Zato je konvekcija moguća samo u tekućinama i plinovima. Vođenje topline u fluidima dolazi do izražaja samo ako nije moguć prijenos topline konvekcijom.

Pri prijenosu topline zračenjem, termička energija tijela pretvara se u elektromagnetsko zračenje koje tijelo emitira u okolni prostor.

Vođenje topline kroz homogeni materijal može se računati pomoću Fourierova zakona. Da bismo shvatili taj zakon, promatramo vođenje topline kroz štap poprečnog presjeka A . Pretpostaviti ćemo da se temperatura u štapu linearno smanjuje od jednog kraja do drugog i da je u svakoj točki određenog presjeka ista. Također ćemo razmatrati stacionarni prijenos topline, što znači da ćemo pretpostaviti da temperatura bilo koje točke sredstva ne ovisi o vremenu, već samo o mjestu u sredstvu. Uočiti ćemo dva presjeka na kojima je temperatura T_1 i T_2 međusobno udaljena za Δx i izračunati količinu topline koja u određenom vremenu prođe kroz taj dio sredstva.

Mjerenjem je utvrđeno da je količina topline Q koja u vremenskom intervalu t prođe kroz sloj debljine Δx izražena Fourierovim zakonom

$$Q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} A t, \quad (2.25)$$

gdje je λ koeficijent toplinske vodljivosti materijala, $\Delta T = T_1 - T_2$ razlika temperatura na krajevima sloja, a A površina kroz koju toplina prelazi. Veličina $\Delta T/\Delta x$ zove se temperaturni gradijent. Predznak minus dolazi zbog poznate činjenice da toplina prelazi iz područja više temperature prema području niže temperature, tj. da je Q pozitivno za negativni $\Delta T/\Delta x$.

Fourierov zakon (2.25) možemo napisati i pomoću toplinskog toka Φ odnosno gustoće toplinskog toka q . Toplinski tok je omjer topline i vremena, $\Phi = Q/t$, dok je gustoća omjer toplinskog toka i površine, $q = \Phi/A$:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}. \quad (2.26)$$

Uočite da su jedinice za te fizičke veličine sljedeće:

$$[q] = \text{W/m}^2, \quad [\lambda] = \text{W/(K m)},$$

$$[x] = \text{m}, \quad [\Delta T] = \text{K}.$$

Koeficijent toplinske vodljivosti λ toplinska je karakteristika određenog materijala, a ovisi o temperaturi i o tlaku. Često se, međutim, ta ovisnost može zanemariti i računati sa srednjom vrijednošću u promatranom temperaturnom intervalu. Materijal kojemu je λ velik dobar je toplinski vodič (npr. metali). Suprotno tome, materijal je to bolji toplinski izolator što mu je manji λ . Posebno je dobar toplinski izolator šupljikav (porozan) materijal, kao poliuretanska pjena, staklena vuna i sl.

Tablica 2.3. Koeficijenti toplinske vodljivosti nekih vrsta materijala na sobnoj temperaturi

Materijal	λ W/(K m)	Materijal	λ W/(K m)
srebro	420	azbestni	
bakar	385	cement	0,5
aluminij	205	drvo	0,13
željezo	60	guma	0,15
beton	1,3	papir	0,13
staklo	0,8	polistiren	0,01
žbuka	0,8	staklena vuna	0,035
cigla	0,7	poliuretanska	
zemlja	0,5	pjena	0,03
voda	0,6	zrak	0,025

Napišemo li jednadžbu za toplinski tok kao produkt gustoće toka i površine

$$\Phi = qA = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{\lambda S}} = \frac{\Delta T}{R} \quad (2.27)$$

tada veličinu $R = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{\Delta x}{\lambda A}$ možemo nazvati toplinskim otporom, u analogiji s Ohmovim zakonom $R = \frac{U}{I}$ u elektricitetu, jer se usporedbom tih dviju formula vidi da je toplinski tok analogan električnoj struji, ΔT razlici potencijala U , a toplinski otpor $R = \frac{\Delta x}{\lambda A}$ analogan je električnom otporu. Jedinica je toplinskog otpora kelvin po vatu, K/W. Analogija s električnom strujom pomaže nam u rješavanju problema prijenosa topline.

2.6. Konvekcija

U tekućinama i plinovima topline se prenosi uglavnom konvekcijom, tj. strujanjem fluida s jednog mjesta na drugo mjesto. Vođenje topline u fluidima je vrlo slabo i uvijek je zanemarivo kad je moguća konvekcija. Tako nastaje, npr., prijenos topline u posudi s vodom koju zagrijavamo nad plamenikom, na ploči štednjaka i sl. Topla voda sa dna posude diže se prema gore zbog manje gustoće, a hladnija se spušta prema dolje. Takva, tzv. prirodna ili slobodna konvekcija susreće se u mnogim primjerima prijenosa topline. Tako se zagrijevaju i prostori. Konvekcijom se topline s radijatora prenosi po cijeloj sobi, jer se zagrijani zrak iznad radijatora diže uvis, a hladan zrak dolazi do radijatora odozdo, te se strujanjem zraka topline raznosi po sobi. Sistemi koji rade na tom principu često se zovu termosifonski sistemi.

Osim slobodne postoji i prisilna konvekcija, kad se strujanje fluida postiže pomoću pumpi, ventilatora i sl. Prijenos topline je veći kod prisilne konvekcije nego kod slobodne, ali su potrebni uređaji za postizanje prisilnog strujanja i energija za pogon tih uređaja.

Prijenos topline konvekcijom možemo računati pomoću Newtonova zakona hlađenja:

$$q = h_c (T_p - T_f) \quad (2.28)$$

gdje je T_p temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid, T_f temperatura fluida dalje od granične plohe, a h_c koeficijent konvekcije koji se izražava u W/(m² K) i za jednostavnije slučajeve može se izračunati pomoću semiempiričkih relacija (koje se mogu naći u literaturi koja detaljnije opisuje prijenos topline). Taj koeficijent ovisi o nizu parametara, npr. o različitim temperaturama, geometrijskoj konfiguraciji, obliku i položaju plohe, brzini i načinu strujanja fluida (laminarno ili turbulentno), vrsti fluida, njegovim svojstvima — toplinskoj vodljivosti fluida, itd.

Koeficijent konvekcije često se određuje raznim empiričkim relacijama. Pritom se uvode bezdimenzionalne veličine:

$$\begin{aligned} \text{Reynoldsov broj } Re &= \frac{\rho v l}{\eta} = \frac{v l}{\nu} \\ \text{Nusseltov broj } Nu &= \frac{h_c l}{\lambda} \\ \text{Grashofov broj } Gr &= \frac{g \beta l^3}{\nu^2} \Delta T \\ \text{Prandtlov broj } Pr &= \frac{c_p \eta}{\lambda} = \frac{v}{\alpha} \\ \text{Rayleighov broj } Ra &= Gr \cdot Pr = \frac{g \beta l^3}{\alpha \nu} \Delta T \end{aligned} \quad (2.29)$$

U tim je formulama

- h_c koeficijent konvekcije (W m⁻² K⁻¹)
- λ koeficijent toplinske vodljivosti fluida (W m⁻¹ K⁻¹)
- c_p specifični toplinski kapacitet fluida (J kg⁻¹ K⁻¹)
- η dinamički koeficijent viskoznosti fluida (Pa s)
- ν kinematički koeficijent viskoznosti fluida, (m²/s), $\nu = \eta/\rho$
- ρ gustoća fluida (kg m⁻³)
- α termička difuznost fluida (m²/s), $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$
- β toplinski koeficijent širenja fluida (K⁻¹), koji je za idealne plinove jednak 1/T, gdje je T termodinamička temperatura plina (K)

- g akceleracija sile teže ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 l karakteristična dimenzija (npr. duljina), (m)
 ΔT razlika temperature koja ovisi o sistemu, npr. za strujanje fluida oko neke ravne površine to je razlika između temperature površine i temperature fluida koji je dovoljno daleko od površine pa miruje.

Prijenos topline konvekcijom ovisi o tome da li je strujanje fluida laminarno (pravilno, u slojevima, kada strujnice teku paralelno bez miješanja), ili turbulentno, kada se pojavljuje jako miješanje čestica fluida i vrtlozi. Strujanje je laminarno pri malim brzinama, a kada brzina postane veća od neke kritične, strujanje iz laminarnog prelazi u turbulentno. Hoće li fluid teći laminarno ili turbulentno, može se odrediti pomoću bezdimenzionalnog parametra – Reynoldsova broja Re . Ako je $Re < Re_k$, strujanje je laminarno, dok je za $Re > Re_k$ strujanje turbulentno. Za strujanje kroz cijevi kritični Reynoldsov broj Re_k je oko 2 300 (karakteristična duljina l je tu promjer cijevi), za strujanje preko ravne ploče (solarnog kolektora) Re_k je oko $3 \cdot 10^5$ (l je širina kolektora) i sl.

Toplinski tok (odnosno termički otpor) pri konvekciji ovisi o osobinama fluida, brzini protoka fluida te obliku i veličini površine. Gustoća toplinskog toka s površine temperature T_p u fluid može se prikazati relacijom

$$q = Nu \frac{\lambda(T_p - T_c)}{l} = h_c(T_p - T_f) \quad (2.30)$$

gdje je l karakteristična dimenzija koju treba definirati za svaki posebni primjer. Odatle je koeficijent konvekcije

$$h_c = \frac{Nu\lambda}{l} \quad (2.31)$$

i izražen je pomoću bezdimenzionalnog Nusseltova broja Nu . Poznavajući Nusseltov broj, možemo u konkretnom primjeru izračunati h_c , a i prijenos topline konvekcijom.

Povećanjem brzine strujanja raste i prijenos topline konvekcijom, posebno ako strujanje postaje turbulentno, jer tada se fluid gublje ne samo u smjeru već i okomito na smjer strujanja. Nusseltov

broj ovisit će, dakle, o vrsti strujanja, tj. o Reynoldsovu broju. Termička difuzivnost α pokazuje kako brzo se mijenja temperatura pri prijenosu topline:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

te će Nusseltov broj ovisiti i o α , pa i o Prandtlovu broju Pr koji je funkcija od α .

Općenito je Nusseltov broj funkcija Reynoldsova, Prandtlova i Grashofova broja:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr). \quad (2.32)$$

Ta se funkcija (koja je različita za različite primjere strujanja) određuje mjerenjem i prikazuje se grafički ili pomoću semiempiričkih relacija. U literaturi mogu se naći takve empirijske relacije za razne primjere prijelaza topline konvekcijom.

Pri slobodnoj konvekciji strujanje fluida uzrokovano je prijenosom topline (razlikom temperatura), dok je kod prisilne konvekcije obratno, tj. strujanje fluida povećava prijenos topline. Zbog toga je za prirodnu konvekciju Nusseltov broj praktički neovisan o Re , te je funkcija Gr i Pr , odnosno Rayleighova broja Ra . Upravo vrijednost Ra upućuje na jačinu prirodne konvekcije. Ako je $Ra < 10^3$, nema slobodne konvekcije. Kada je $Ra > 10^5$, nastaje turbulencija. Budući da se broj Ra povećava sa ΔT , to pri prirodnoj konvekciji broj Nu i termički otpor ovisi o ΔT i prijenos topline je to veći što je ΔT veće. Pri prisilnoj konvekciji broj Nu (i termički otpor) ovisi o vrijednostima Re i Pr , te je uglavnom neovisan o ΔT .

Najbolji način da se odredi prijenos topline konvekcijom jest mjerenje. Formule i grafovi za proračun koeficijenta konvekcije navedene u literaturi imaju ograničeno područje primjene i točne su jedino za sisteme za koje su iz mjerenja izvedene.

Radi ilustracije navedimo jednu takvu relaciju. Za slobodnu (prirodnu) konvekciju zraka između dvije ravne ploče nagnute pod kutom 45° prema horizontali (npr. ravni kolektor) Tabor je predložio empiričku relaciju

$$Nu = 0,093 Gr^{0,31} \quad (2.33)$$

Uvrštavajući za

$$T = 283 \text{ K}, \quad \beta = \frac{1}{283} \text{ K}^{-1}, \quad g = 9,81 \text{ m s}^{-2},$$

$$v = 1,43 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{i} \quad \lambda = 0,0249 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

u relaciju za Grashofov broj $Gr = \frac{g\beta l^3}{\nu^2} \Delta T$ dobivamo

$$Gr = 1,76 \cdot 10^8 l^3 \Delta T,$$

$$Nu = 0,093 Gr^{0,31} = 33,4 l^{0,93} \Delta T^{0,31}.$$

Ako je npr. $l = 1 \text{ cm}$, $\Delta T = 60 \text{ K}$ dobivamo za

$$Gr = 1,1 \cdot 10^4 \quad \text{i} \quad Nu = 1,67.$$

Iz $Nu = \frac{hl}{\lambda}$, dobivamo za srednju temperaturu 283 K (10°C) koeficijent konvekcije

$$h = \frac{\lambda Nu}{l} = 0,832 l^{-0,07} \Delta T^{0,31}$$

gdje je l izraženo u metrima i ΔT u kelvinima.

Navest ćemo samo red veličine koeficijenta konvekcije za neke primjere. Za prijenos topline konvekcijom od zida, prozora, krova i sl. u okolnu atmosferu koeficijent konvekcije je oko $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ kad nema vjetra, i raste s brzinom vjetra, te je, npr., $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za brzinu vjetra oko 15 km/h . Za slobodnu konvekciju oko vertikalne ploče u zraku (npr. između prozora i zraka u sobi) h_c je oko $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, za toplu vodu oko grijača $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, itd.

Primjer 2.1. a) Koliki je Prandtlov broj za zrak temperature 273 K , 300 K i 400 K ? U tablici 2.4. su navedeni potrebni podaci.

Tablica 2.4.

T/K	$c_p/(\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$	$\eta/(\text{Pa s})$
273	1005,5	0,024	$1,70 \cdot 10^{-5}$
300	1006,0	0,026	$1,98 \cdot 10^{-5}$
400	1014,0	0,034	$2,29 \cdot 10^{-5}$

b) Koliki je Prandtlov broj Pr za vodu temperature 283 K , 300 K i 353 K . U tablici 2.5. su navedeni potrebni podaci.

Tablica 2.5.

T/K	$c_p/(\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$	$\eta/(\text{Pa s})$
283	4190	0,57	$1,40 \cdot 10^{-3}$
300	4180	0,60	$0,78 \cdot 10^{-3}$
353	4195	0,67	$0,35 \cdot 10^{-3}$

a) Iz definicije

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

dobivamo

$$\begin{array}{ll} 273 \text{ K} & Pr = 0,71 \\ 300 \text{ K} & Pr = 0,77 \\ 400 \text{ K} & Pr = 0,68. \end{array}$$

Prandtlov broj Pr za zrak iznosi oko 0,7 i praktički ne ovisi o temperaturi.

b) Slično dobivamo za vodu:

$$\begin{array}{ll} 283 \text{ K} & Pr = 10,3 \\ 300 \text{ K} & Pr = 5,4 \\ 353 \text{ K} & Pr = 2,19. \end{array}$$

Prandtlov broj za vodu opada s temperaturom od 14 (0°C) do 1,7 (100°C).

Primjer 2.2. Dva staklena pokrova kolektora dimenzije $2\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ razmaknuta su 1 cm . Temperatura gornjeg stakla je 20°C , a donjeg 80°C .

Izračunajte Grashofov, Prandtl i Rayleighov broj. Koliki je toplinski tok ako je $Nu = 1,3$? Potrebni podaci su: $\nu = 1,88 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda = 0,028 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Srednja temperatura je 50°C (323 K) te je $\beta = 1/323 \text{ K}^{-1}$.

Grashofov broj je

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot 60 \text{ K} \cdot (0,01)^3 \text{ m}^3}{323 \text{ K}^{-1} (1,88 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})} = 5156.$$

Prandtl i broj je

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 0,72.$$

Rayleighov broj je

$$Ra = Gr \cdot Pr = 3710.$$

Ako je $Nu = 1,3$, toplinski je otpor

$$R = \frac{l}{Nu \cdot \lambda A} = 0,275 \text{ K/W}.$$

Koeficijent konvekcije je

$$h_c = \frac{Nu\lambda}{l} = 3,64 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

Toplinski tok iznosi:

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R} = \frac{60 \text{ K}}{0,275 \text{ K W}^{-1}} = 218 \text{ W}.$$

Primjer 2.3. Kroz cijev kolektora polumjera 1 cm i duljine 2 m protječe voda i tako prenosi toplinu. Temperatura vode je 50°C , protok $0,006\text{ L/s}$. Ostali su podaci: $\eta = 5,64 \cdot 10^5 \text{ Pa s}$, $c_p = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\lambda = 0,64 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Koliki je Reynoldsov i Prandtl i broj? Izračunajte koeficijent konvekcije uz pretpostavku da je Nusseltov broj $Nu = 4,5$.

Voda protječe kroz cijev brzinom

$$v = \frac{\Phi}{R^2 \pi} = 0,019 \text{ m s}^{-1}.$$

Reynoldsov broj iznosi:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} = 674.$$

Budući da je Reynoldsov broj manji od kritičnog ($Re_k = 2300$), protok je laminaran.

Prandtl i broj je

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} = 3,7.$$

Iz zadanog Nusseltova broja dobivamo koeficijent konvekcije:

$$h_c = \frac{\lambda \cdot Nu}{l} = \frac{0,64 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 4,5}{0,02 \text{ m}} = 144 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

2.7. Prijenos topline zračenjem

Pri razmatranju prijenosa topline zračenjem treba uzeti u obzir energiju koju tijelo izrači i energiju što je apsorbira, te resultantni toplinski tok dobiti kao razliku tih dvaju tokova. Pritom će razmjena energije ovisiti o svojstvima tijela i nje-

gove okoline, međusobnom položaju i površini pojedinih tijela. Najjednostavniji je primjer kada se tijelo površine A_1 , temperature T_1 i koeficijenta emisije ε_1 nalazi unutar šupljine čije stijenke imaju temperaturu T_2 . Ako je površina stijenki šupljine velika u usporedbi s površinom tijela, odnosno ako je površina stijenki

šupljine savršen apsorber, izmjena topline dana je jednakžbom

$$\Phi_{12} = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4). \quad (2.34)$$

U slučaju dviju ravnih, paralelnih ploha, čija je površina A mnogo veća od njihova međusobnog razmaka, a koeficijent emisije, odnosno apsorpcije jednak jedinici, rezultatni je toplinski tok

$$\Phi_{12} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.35)$$

jer je tok koji izrači prva ploha $\sigma A_1 T_1^4$, a tok što ga ona primi od druge plohe i apsorpira $\sigma A_2 T_2^4$. Međutim, ako plohe nisu crne, već sive, treba uzeti u obzir faktor emisije ε i imati na umu da će se dio energije koji se ne apsorpira reflektirati, doći na drugu plohu, ondje djelomično apsorbirati i djelomično reflektirati, itd., sve dok se najzad ne apsorpira sva energija.

Za zračenje između dvije „beskonačne“ paralelne plohe površine A i koeficijenta emisije ε_1 odnosno ε_2 toplinski tok koji prijeđe s ravnine više temperature na onu s nižom temperaturom dan je izrazom

$$\Phi_{12} = \frac{\sigma A (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (2.36)$$

Toplinski tok koji odlazi s predmeta

(npr. kolektora) površine A_1 temperature T_1 u okolinu (atmosfera) temperature T_2 jednak je

$$\Phi_{12} = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.37)$$

dakle isti kao s tijela unutar izotermne šupljine (izraz 2.34).

Ponekad je praktično prijenos topline zračenjem računati sličnom formulom kao i prijenos topline konvekcijom, odnosno vođenjem, tj. kao umnožak površine, koeficijenta prijenosa topline i razlike temperatura:

$$\Phi = h_r A (T_1 - T_2) \quad (2.38)$$

gdje je h_r koeficijent prijenosa topline zračenjem od jedne plohe temperature T_1 prema drugoj plohi temperature T_2 . Rastavimo li $T_1^4 - T_2^4$ u $(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2)$, vidimo da je koeficijent prijenosa topline zračenjem između dviju paralelnih ravnina u izrazu (2.36):

$$h_r = \frac{(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (2.39)$$

Za zračenje kolektora u okolnu atmosferu koeficijent prijenosa topline zračenjem je

$$h_r = \varepsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2). \quad (2.40)$$

3. Energija vjetra

3.1. Brzina vjetra

Zbog nejednakog zagrijavanja Zemljine površine Sunčevim zračenjem nastaje gibanje zraka, a dio toga gibanja paralelan s površinom Zemlje zove se vjetar. Vjetar je uzrokovan razlikom atmosferskog tlaka, a modificiraju ga Coriolisova sila i trenje. Gradijentska sila tjera zrak od mjesta višega tlaka prema mjestu nižega (u istoj horizontalnoj ravnini), Coriolisova sila djeluje okomito na smjer gibanja, i na sjevernoj polukugli u desno, a sila trenja djeluje suprotno od smjera gibanja. Zbog toga što je trenje najjače blizu Zemljine površine, vjetar u donjoj troposferi s povećanjem nadmorske visine postaje brži i postepeno mijenja smjer.

Za primjenu važni su lokalni vjetrovi koji nastaju na određenom manjem geografskom području zbog nejednake apsorpcije sunčevog zračenja (kopno, more) odnosno kao posljedica globalnih zračnih struja modificiranih reljefom zemljišta.

Mjerenja smjera vjetra u području mediteranske civilizacije i kulture obavljala su se već u staroj Grčkoj (oko 300. pr. n. e.), dok je prvi instrument koji je reagirao na tlak vjetra konstruiran krajem 16. st. [Santorio Santorio, liječnik rodom iz Kopra, mjerenja u Hrvatskoj].

Spomenimo metodu britanskog admirala Beauforta (1804) koja se još i danas primjenjuje a osniva se na efektima koje prouzrokuje vjetar na dimu, drveću, vodenoj površini i slično.

Beaufortova metoda bila je razrađena isključivo za upotrebu na moru (broj jedara na standardnom jedrenjaku, koja mogu biti razapeta pri određenom vjetru). Ona je poslije prilagođena učincima vjetra na kopnu i takva se danas upotreb-

ljava više za ocjenu jačine nego za mjerenje brzine vjetra. Tako vjetar od 5 bofora savija manja stabla, vjetar od 9 bofora lomi granje, skida crepove s krova i sl.

U tablici 3.1. navedena je približna veza između bofora i brzine vjetra iskazane u čvorovima (i m/s).

Pri prikazivanju mjernih podataka o vjetru potrebno je naznačiti visinu iznad tla i konfiguraciju tla na mjestu gdje je mjerenje izvedeno. Ako podaci o brzini vjetra nisu dobiveni na mjestu gdje je rotor turbine, mjerne vrijednosti trebaju se korigirati zbog razlike u visini i konfiguraciji terena. U literaturi se mogu naći korekcijski faktori za različite visine i terene s kojima treba množiti brzinu vjetra da bi se dobila potrebna korekcija. Ako su, naprimjer, brzine vjetra mjerene na visini od 10 m iznad tla (na toj se visini obično obavljaju mjerenja) iznad neke travnate površine, a turbina je, naprimjer, na visini 25 m u nekom urbanom području, potrebno je mjerne vrijednosti pomnožiti faktorom 1,3 i sl.

Anemometri su instrumenti za mjerenje brzine vjetra. Postoji više tipova anemometara. *Pitotova cijev* koja mjeri dinamički tlak pri strujanju fluida, može biti baždarena u jedinicama za brzinu pa može mjerenje poslužiti i za brzine vjetra. Kod mehaničkog tipa anemometra brzina vjetra mjeri se okretanjem male vjerenjače.

U toku dana vjetar često mijenja brzinu i smjer. Promjenljivost brzine vjetra je velika, tj. ne može se smatrati konstantnom ni u toku jednog sata. Minimumi mogu nastupiti u određeno doba godine, a vjetar malih brzina, kao i razdoblje bez vjetra može se pojaviti svakog dana, u bilo koje godišnje doba. Na nekim mjes-

Tablica 3.1. Beaufortova skala

bofor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
čvor	1-3	4-6	7-10	11-16	17-21	22-27	28-33	34-40	41-47	48-55	56-63	64-71
m/s	0,5-1,8	1,8-3,6	3,6-5,8	5,8-8,5	8,5-11	11-14	14-17	17-21	21-25	25-29	29-34	34-36

tima (npr. na obalama ili na obroncima) i u nekim razdobljima (npr. u toplom dijelu godine) takve promjene mogu biti pravilne i redovite.

Da bi se proračunala snaga vjetra, koja je proporcionalna trećoj potenciji brzine, i energija koja se u određenom periodu može dobiti pomoću turbine na vjetar, potrebni su podaci o frekvenciji pojave određene brzine vjetra. Mjerni podaci iskazuju se npr. postotkom vremena u godini u kojem je vjetar puhao u određenom smjeru odnosno postotkom vremena za koji je iznos brzine bio u određenim granicama, npr. između 8 i 10 m/s. Iz takvih podataka može se odrediti raspodjela vjerojatnosti brzina vjetra kao funkcija brzine, npr., kolika je vjerojatnost da u razdoblju od jedne godine brzina vjetra bude 5 m/s, kolika za neku drugu brzinu, kolika je srednja brzina itd.

Brzina vjetra, kao i njezin smjer mjeri se u sklopu meteoroloških mjerenja. Ta mjerenja često nisu dovoljna za proračune rada turbina na vjetar (vjetrenjača), te su potrebna dodatna mjerenja odnosno teorijske funkcije raspodjele brzine vjetra.

Rayleighova raspodjela. Za analizu rada uređaja koji se koriste energijom vjetra potrebno je poznavati raspodjelu vjerojatnosti brzina vjetra u toku nekog perioda, npr. jedne godine. U tu svrhu

obično se upotrebljava Rayleighova raspodjela:

$$p(v) = \frac{2}{c} \cdot \frac{v}{c} e^{-\frac{v^2}{c^2}} \quad (3.1)$$

gdje je c konstanta ovisna o srednjoj brzini vjetra $\bar{v}$ u tom periodu. Budući da je srednja brzina po definiciji

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} p(v) v dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad (3.2)$$

proizlazi da je konstanta c

$$c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}} \quad (3.3)$$

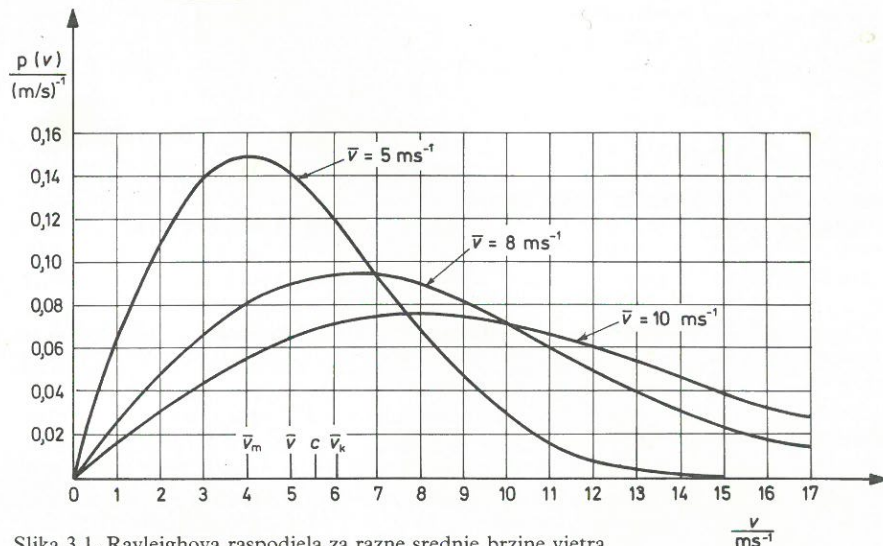
Na slici 3.1. prikazane su raspodjele za srednju brzinu 5 m/s ($c = 5,64$ m/s), 8 m/s ($c = 9,03$ m/s) i 10 m/s ($c = 11,3$ m/s).

Raspodjelu možemo pisati i ovako uzevši u obzir izraz za c :

$$p(v) = \frac{\pi v}{2 \bar{v}^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2} \quad (3.4)$$

Vjerojatnost da je brzina vjetra veća od neke određene brzine v' dana je izrazom:

$$p(v > v') = \int_{v'}^{\infty} p(v) dv = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v'}{\bar{v}}\right)^2} \quad (3.5)$$



Slika 3.1. Rayleighova raspodjela za razne srednje brzine vjetra

Ta je raspodjela za $\bar{v} = 5 \text{ m/s}$ prikazana na slici 3.2.

Izjednačujući prvu derivaciju $\frac{dp}{dv}$ s nulom, dobivamo da je maksimum raspodjele za brzinu:

$$v_m = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \bar{v} = 0,8 \bar{v}. \quad (3.6)$$

U izrazu za snagu vjetra pojavljuje se kub brzine, te je pri proračunima često potrebno poznavati srednju vrijednost te veličine

$$\bar{v}^3 = \frac{\int_0^{\infty} v^3 p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = \frac{6}{\pi} (\bar{v})^3 = 1,91 \bar{v}^3. \quad (3.7)$$

Odatle je tzv. srednja kubična brzina

$$\sqrt[3]{\bar{v}^3} = 1,24 \bar{v}. \quad (3.8)$$

Uočite da funkcije $p(v)$ i $v^3 p(v)$ imaju maksimum na različitim brzinama, što se vidi i kad se derivacija tih funkcija izjednači s nulom i izračuna pripadna brzina.

Izjednačavajući prvu derivaciju $\frac{d}{dv}(v^3 p(v))$ s nulom, dobivamo

$$\begin{aligned} v_{m_3} &= c \sqrt{2} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \bar{v} = \\ &= 1,596 \bar{v} \end{aligned} \quad (3.9)$$

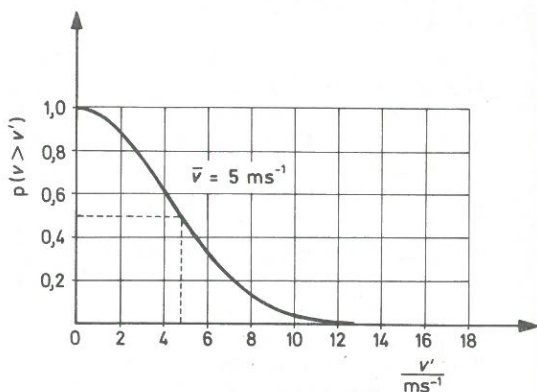
dok je $v_m = \sqrt{2/\pi} \bar{v} = 0,8 \bar{v}$.

Standardna devijacija σ neke raspodjele definira se kao

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} \quad (3.10)$$

i za Rayleighovu raspodjelu iznosi

$$\sigma = c \sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} = 2 \sqrt{\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4}} \bar{v}. \quad (3.11)$$



Slika 3.2. Kumulativna funkcija raspodjele brzine vjetra

U tablici 3.2. navedene su Rayleighove raspodjele za $\bar{v} = 3 \text{ m/s}$, 5 m/s , 8 m/s i 10 m/s , a u tablici 3.3. konstanta c , brzina v_m za maksimum raspodjele, srednja kubična brzina v_k , standardna devijacija raspodjele σ , i brzina v_{m_3} za maksimum funkcije $v^3 p(v)$.

Pri razmatranju raspodjele brzina vjetra pojavljuje se gama-funkcija definirana integralom

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt \quad (3.12)$$

gdje je $z > 0$.

Navedimo nekoliko relacija za gama-funkciju:

$$\begin{aligned} \Gamma(1+z) &= z \Gamma(z) \\ \Gamma(1) &= 1 \\ \Gamma(0) &= \infty \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$$

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

Tablica 3.2. Rayleighova raspodjela brzina

$\bar{v} = 3 \text{ m/s}$			$\bar{v} = 5 \text{ m/s}$	
$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{v^3 p(v)}{\text{m}^2 \text{s}^{-2}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{v^3 p(v)}{\text{m}^2 \text{s}^{-2}}$
1,0	0,1600	0,1600	0,0609	0,0609
2,0	0,2462	1,9698	0,1109	0,8871
3,0	0,2387	6,4458	0,1421	3,8378
4,0	0,1728	11,0589	0,1521	9,7334
5,0	0,0985	12,3092	0,1433	17,9072
6,0	0,0452	9,7730	0,1217	26,2767
7,0	0,0170	5,8222	0,0943	32,3497
8,0	0,0052	2,6823	0,0673	34,4383
9,0	0,0013	0,9745	0,0443	32,3259
10,0	0,0003	0,2829	0,0271	27,1127
11,0	0,0000	0,0663	0,0154	20,5131
12,0	0,0000	0,0126	0,0082	14,0985
13,0	0,0000	0,0020	0,0040	8,8490
14,0	0,0000	0,0002	0,0019	5,0934
15,0	0,0000	0,0000	0,0008	2,6972
16,0	0,0000	0,0000	0,0003	1,3176
17,0	0,0000	0,0000	0,0001	0,5951
18,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,2489
19,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0966
20,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0348

$\bar{v} = 8 \text{ m s}^{-1}$			$\bar{v} = 10 \text{ m s}^{-1}$	
$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{v^3 p(v)}{\text{m}^2 \text{s}^{-2}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{v^3 p(v)}{\text{m}^2 \text{s}^{-2}}$
1,0	0,0242	0,0242	0,0156	0,0156
2,0	0,0467	0,3739	0,0304	0,2435
3,0	0,0659	1,7802	0,0439	1,1855
4,0	0,0807	5,1631	0,0554	3,5463
5,0	0,0903	11,2871	0,0645	8,0670
6,0	0,0947	20,4494	0,0710	15,3433
7,0	0,0942	32,2986	0,0748	25,6665
8,0	0,0895	45,8359	0,0760	38,9199
9,0	0,0817	59,5953	0,0748	54,5504
10,0	0,0719	71,9415	0,0716	71,6180
11,0	0,0612	81,4007	0,0668	88,9129
12,0	0,0503	86,9361	0,0608	105,1166
13,0	0,0401	88,1063	0,0542	118,9733
14,0	0,0310	85,0834	0,0472	129,4483
15,0	0,0233	78,5483	0,0402	135,8422
16,0	0,0170	69,5075	0,0337	137,8524
17,0	0,0120	59,0835	0,0276	135,5729
18,0	0,0083	48,3310	0,0222	129,4463
19,0	0,0056	38,1029	0,0175	120,1742
20,0	0,0036	28,9873	0,0136	108,6163

Tablica 3.3. Vrijednosti nekih parametara za Rayleighovu raspodjelu brzina

$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{c}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{v_m}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{v_{m3}}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{v_k}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{\sigma}{\text{m s}^{-1}}$
3	3,385	2,39	4,79	3,72	1,57
5	5,642	3,99	7,98	6,20	2,61
8	9,027	6,38	12,77	9,93	4,18
10	11,284	7,99	15,96	12,41	5,23

Tablica 3.4. Gama-funkcija

z	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	
$\Gamma(z)$	2,5	1,77	1,5	1,28	1,15	1,06	1,0	0,96	0,92	0,91	
z	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	
$\Gamma(z)$	0,9	0,89	0,9	0,91	0,92	0,95	1,0	1,05	1,1	1,18	
z	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
$\Gamma(z)$	1,26	1,32	1,44	1,56	1,66	1,8	2,0	2,2	2,4	2,66	3,0

Primjer 3.1. Izračunajte koeficijent c u Rayleighovoj brzinskoj raspodjeli ako je poznata srednja brzina vjetra.

Rayleighova raspodjela je

$$p(v) = \frac{2}{c} \frac{v}{c} e^{-\frac{v^2}{c^2}}.$$

Srednja brzina definira se izrazom

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} v p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv}.$$

Zamjenom $v^2/c^2 = t$ $2v dv/c^2 = dt$, dobivamo

$$\int_0^{\infty} p(v) dv = \int_0^{\infty} e^{-t} dt = 1$$

$$\int_0^{\infty} v p(v) dv = c \int_0^{\infty} t^{1/2} e^{-t} dt.$$

Integral

$$\int_0^{\infty} t^{1/2} e^{-t} dt = \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

je gama-funkcija definirana izrazom

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

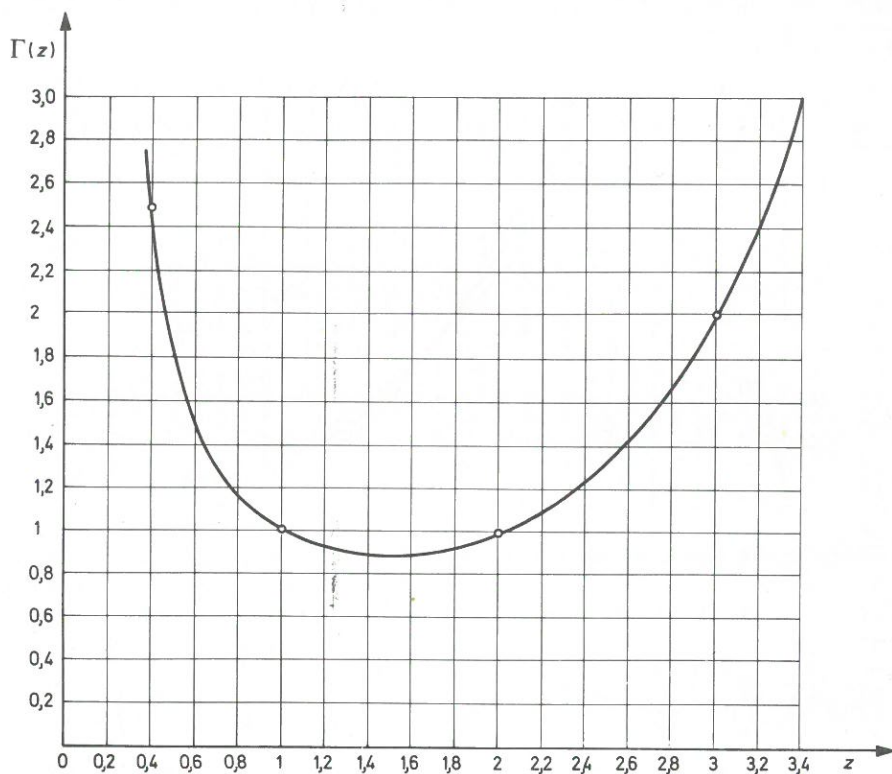
i za vrijednost $z = 3/2$ iznosi $\sqrt{\pi}/2$.

Dakle,

$$\bar{v} = c \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{c\sqrt{\pi}}{2}$$

te je

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{v} = 1,128 \bar{v}.$$



Slika 3.3. Gama-funkcija

Budući da se pri proračunu brzina vjetra pojavljuju gama-funkcije za argumente od oko 0,5 do 3,5, u tablici 3.4. su navedene približne vrijednosti gama-funkcije u tom području, a na slici 3.3. prikazan je njezin graf.

Weibullova raspodjela. Rayleighova raspodjela posebni je slučaj općenitije Weibullove brzinske raspodjele koja je dana izrazom

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k}. \quad (3.14)$$

Ona prelazi u Rayleighovu raspodjelu za $k=2$.

Srednja je brzina za tu raspodjelu

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} v p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right). \quad (3.15)$$

Najvjerojatnija brzina, tj. ona za koju raspodjela ima maksimum određuje se izjednačavanjem derivacije raspodjele s nulom i iznosi

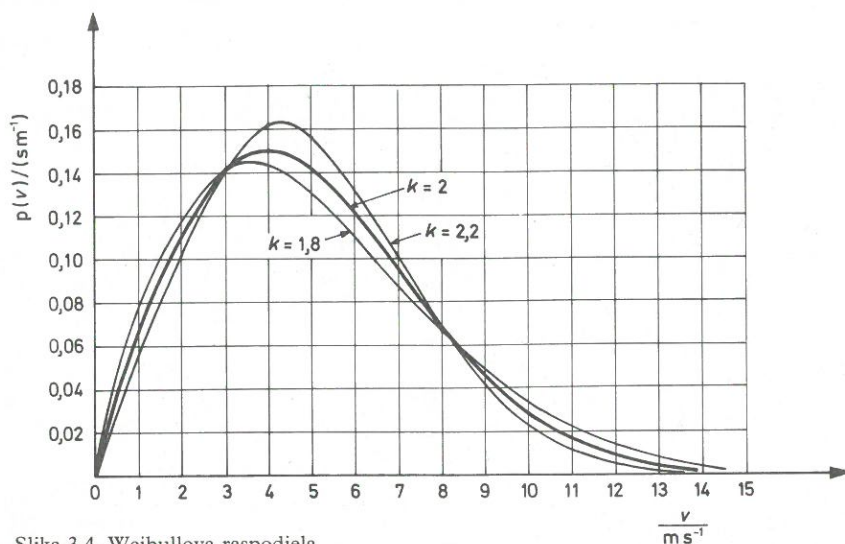
$$v_m = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (3.16)$$

Srednja vrijednost kuba brzine je

$$v_k^3 = \bar{v}^3 = \frac{\int_0^{\infty} v^3 p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right). \quad (3.17)$$

Standardna devijacija raspodjele je

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{\int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = \\ &= c^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]. \quad (3.18) \end{aligned}$$



Slika 3.4. Weibullova raspodjela

Vjerojatnost da su brzine vjetra iznad neke v' iznosi

$$p(v \geq v') = \int_{v'}^{\infty} p(v) dv = e^{-\left(\frac{v'}{c}\right)^k}. \quad (3.19)$$

$\bar{v} = 5$ m/s, za razne vrijednosti k .

Funkcija $v^3 p(v)$ ima maksimum za brzinu

$$v_{3m} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (3.20)$$

U tablici 3.5. i na sl. 3.4. prikazano je i nacrtano nekoliko raspodjela za

Te su funkcije također prikazane u tablici 3.5.

Tablica 3.5. Weibullova raspodjela brzina

$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$c = 5,56 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad k = 1,8$	$c = 5,64 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad k = 2,0$	$c = 5,56 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad k = 2,2$
	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$
1,0	0,0784	0,0609	0,0494
2,0	0,1219	0,1109	0,1044
3,0	0,1422	0,1421	0,1459
4,0	0,1431	0,1521	0,1642
5,0	0,1302	0,1433	0,1578
6,0	0,1093	0,1217	0,1329
7,0	0,0857	0,0943	0,0992
8,0	0,0632	0,0673	0,0661
9,0	0,0441	0,0443	0,0394
10,0	0,0292	0,0271	0,0211
11,0	0,0184	0,0154	0,0101
12,0	0,0110	0,0082	0,0044
13,0	0,0063	0,0040	0,0017
14,0	0,0035	0,0019	0,0006
15,0	0,0018	0,0008	0,0002
16,0	0,0009	0,0003	0,0001
17,0	0,0004	0,0001	0,0000
18,0	0,0002	0,0000	0,0000
19,0	0,0001	0,0000	0,0000
20,0	0,0000	0,0000	0,0000

Primjer 3.2. U tablici 3.6. naveden je primjer raspodjele brzina vjetra na području Zagreba [Go 83]. Uzeti su podaci meteorološke stanice za sredinu svakog od dvanaest mjeseci sa satnim vrijednostima brzina u toku 24 sata, dakle ukupno $24 \times 12 = 288$ podataka.

Usporedite mjerne podatke i Rayleighovu raspodjelu.

Tablica 3.6. Izmjerene satne brzine vjetra (m/s) u toku 24 sata u srednjem danu mjeseca u Zagrebu

sat	mjesec											
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
1.	1,2	0,6	0,6	2,8	3,1	1,0	0,1	0,4	2,2	2,5	3,9	0,7
2.	1,3	1,0	0,8	3,0	1,9	1,5	0,0	0,3	2,1	1,6	3,6	0,9
3.	1,4	1,2	0,8	2,9	1,9	1,6	1,0	0,1	1,5	0,7	3,7	0,6
4.	1,3	1,9	0,4	3,1	2,2	0,4	0,1	0,7	0,7	0,8	3,2	0,7
5.	0,5	1,4	0,9	3,6	2,3	1,6	0,4	0,5	0,6	1,1	4,1	0,6
6.	0,6	1,4	0,4	4,5	1,7	0,8	0,8	0,4	1,4	1,0	3,7	1,6
7.	0,5	1,8	1,2	4,5	1,4	2,1	0,4	0,4	1,9	1,1	3,2	0,7
8.	0,5	1,1	1,6	4,9	1,3	1,6	0,4	0,8	2,4	1,1	3,6	0,9
9.	0,9	1,3	1,8	4,5	1,6	1,7	1,8	1,2	2,3	1,7	3,3	0,8
10.	0,8	0,7	1,9	5,1	1,6	1,7	1,7	1,4	2,3	2,0	3,8	1,0
11.	1,1	0,9	3,7	5,3	1,4	1,9	2,1	1,2	2,0	1,5	5,3	0,7
12.	0,8	1,1	3,5	5,1	1,4	2,2	2,4	1,7	1,9	1,3	6,6	1,4
13.	0,6	1,1	2,6	4,9	1,9	1,7	2,1	2,0	2,1	1,5	8,0	1,1
14.	0,7	3,3	2,5	4,2	1,9	2,1	2,0	1,8	2,4	1,1	7,6	1,1
15.	0,9	1,9	1,9	4,9	2,0	1,7	2,3	1,9	2,3	1,1	6,4	0,9
16.	1,3	2,1	2,2	5,0	2,0	1,8	2,0	2,1	2,1	1,1	4,1	1,0
17.	1,2	2,1	2,1	4,3	2,2	1,5	2,0	2,1	2,3	0,9	3,4	0,6
18.	1,1	1,6	2,2	4,8	2,1	1,4	2,2	2,2	1,3	1,0	2,2	1,0
19.	1,1	1,6	1,4	3,9	2,0	1,2	1,3	1,1	2,5	1,1	2,8	1,1
20.	1,1	1,9	1,0	3,8	1,7	1,7	0,8	1,7	2,6	1,3	2,8	0,9
21.	1,3	1,0	0,5	4,4	2,1	2,4	1,5	2,1	2,8	1,9	2,3	1,9
22.	0,6	0,8	0,2	3,1	2,1	2,5	0,7	1,8	2,6	2,6	1,7	2,2
23.	0,6	0,6	1,4	4,5	1,8	1,0	0,9	1,8	2,1	2,2	2,1	1,6
24.	1,2	0,6	3,1	5,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,7	2,4	1,9	0,6

Da bismo odredili raspodjelu brzine, izbrojit ćemo koliko su puta izmjerene brzine u intervalima $\Delta v = 1 \text{ m/s}$ i rezultate unijeti u tablicu 3.7.

Frekvencija raspodjele brzine vjetra dN/dv (tj. broj koliko se puta u toku promatranog intervala pojavljuje brzina između v i $v + \Delta v$, npr. između $1,0 - 1,9 \text{ m/s}$) navedena je u drugom stupcu tablice 3.7. Ukupni zbroj je $N = 288$. Vjerojatnost raspodjele brzina vjetra izračunata iz tih podataka u trećem je stupcu tablice. Vjerojatnost se dobija tako da se dN/dv podijeli s $N = 288$, npr. $114/288 = 0,396$. Jedinica za $p(v)$ je $(\text{m/s})^{-1}$. Zbroj svih $p(v)\Delta v$ je, dakako, jedan.

Da bismo odredili srednju brzinu u četvrtom stupcu tablice, izračunali smo produkt $vp(v)$. Srednja brzina je po definiciji

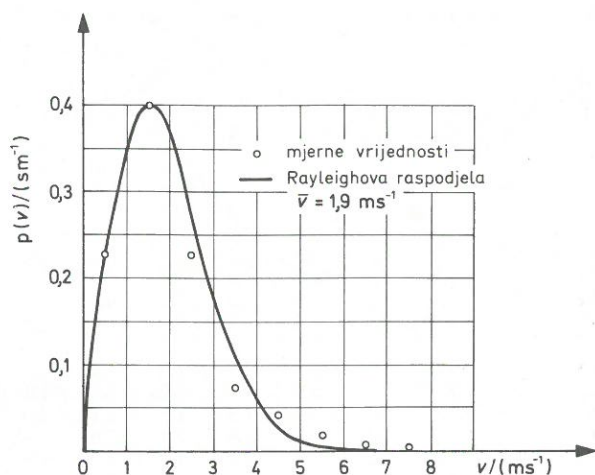
$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} vp(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} v_n p_n(v) \Delta v}{\sum_{n=1}^{\infty} p(v) \Delta v} = \frac{1,93 \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1 \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,93 \text{ m s}^{-1}$$

Pri računanju snage vjetra i uređaja na vjetar pojavljuje se treća potencija brzine v^3 . Da bismo izračunali srednju vrijednost kuba brzine (srednju kubičnu brzinu $\sqrt[3]{v^3}$), u petom stupcu tablice izračunali smo $v^3 p(v)$ i našli da je

$$\bar{v^3} = \frac{\int_0^{\infty} v^3 p(v) dv}{\int_0^{\infty} p(v) dv} = 20,55 (\text{m s}^{-1})^3$$

$$v_k = \sqrt[3]{\bar{v^3}} = 2,74 \text{ m s}^{-1}$$

Na slici 3.5. i u tablici 3.8. uspoređena je mjerena i teorijska (Rayleighova) raspodjela za srednju brzinu $1,93 \text{ m/s}$. Maksimum raspodjele (teorijske) je na $1,54 \text{ m/s}$, srednja brzina je $1,93 \text{ m/s}$, koeficijent $c=2,178 \text{ m/s}$ dok je srednja kubična brzina $2,4 \text{ m/s}$. Slaganje je dobro, osim malog odstupanja u visokobrzinskom repu raspodjele. To odstupanje uzrokuje razliku između teorijske ($2,4 \text{ m/s}$) i mjerene ($2,7 \text{ m/s}$) srednje kubične brzine. Nešto bolje slaganje u tom dijelu postiglo bi se s Weibullovom raspodjelom s koeficijentom k manjim od 2, npr. $k=1,5$.



Slika 3.5. Raspodjela vjetra u Zagrebu

Tablica 3.7. Analiza raspodjele brzina vjetra u Zagrebu (1974)

$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{dN/dv}{\text{s m}^{-1}}$	$\frac{p(v)}{\text{s m}^{-1}}$	$p(v)v$	$\frac{v^3 p(v)}{\text{m}^2 \text{s}^{-2}}$
0–0,9	67	0,233	0,116	0,029
1–1,9	114	0,396	0,594	1,337
2–2,9	63	0,22	0,547	3,438
3–3,9	21	0,073	0,255	3,13
4–4,9	13	0,045	0,203	4,1
5–5,9	6	0,021	0,115	3,49
6–6,9	2	0,007	0,045	1,92
7–7,9	2	0,006	0,026	2,5
Zbroj	288	1,00	1,93	19,9

Tablica 3.8. Rayleighova raspodjela za $\bar{v}=1,93 \text{ m s}^{-1}$

$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{dN/dv}{\text{s m}^{-1}}$	$vp(v)$	$\frac{v^3 p(v)}{\text{m}^2 \text{s}^{-2}}$
0,5	0,2000	0,1000	0,0250
1,5	0,3936	0,5903	1,3283
2,5	0,2823	0,7057	4,4103
3,5	0,1115	0,3904	4,7827
4,5	0,0266	0,1195	2,4201
5,5	0,0039	0,0217	0,6560
6,5	0,0004	0,0024	0,1020
7,5	0,0000	0,0002	0,0094
8,5	0,0000	0,0000	0,0005
Zbroj	1,0	1,93	13,7

3.2. Energija i snaga vjetra

Pri korištenju energije vjetra kinetička energija vjetra djelomično se pomoću zračne turbine (vjetrenjače) pretvara u mehaničku, koja se može upotrijebiti za tjeranje električnog generatora, pumpe vode, meljavu žita i sl.

Ako kroz zamišljenu površinu A protječe masa m zraka brzinom v kroz vrijeme t , kinetička je energija

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3t \quad (3.21)$$

gdje je ρ gustoća zraka, A zamišljena površina, npr. površina kruga koji opisuju lopatice vjetrenjače (turbine), v brzina vjetra ispred turbine, tj. u nesmetanoj struji.

Snagu naznačujemo kvocijentom energije i vremena te je

$$P = \frac{dE}{dt}$$

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.22)$$

i ovisi o trećoj potenciji brzine.

Kad bi se zrak iza turbine zaustavio, turbina bi preuzela svu tu energiju odnosno snagu. Međutim, zrak pri izlasku iz turbine ima neku brzinu, energija se djelomično gubi na trenje, te turbina iskorištava samo jedan dio te energije, u najboljem slučaju razliku kinetičkih energija zraka ispred i iza turbine.

Ako je v (neporemećena) brzina vjetra ispred turbine, efektivni presjek turbine $A = R^2\pi$, gdje je R polumjer rotora turbine dobivena snaga je

$$P = \frac{1}{2}c_p \rho A v^3 \quad (3.23)$$

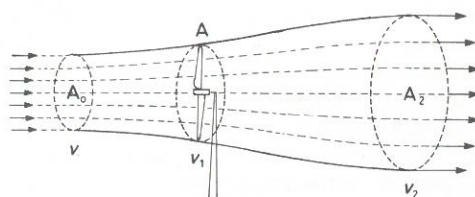
gdje je c_p koeficijent snage, ovisan o turbini i brzini vjetra.

Maksimalna vrijednost koeficijenta c_p je oko 0,4 za većinu turbina.

Teorijska vrijednost koeficijenta snage za idealnu 100%-tno efikasnu turbinu je 0,593, i to je tzv. Betzova granična vrijednost c_p .

Betzov koeficijent. Ako promatramo strujanje zraka kroz turbinu (sl. 3.6), opazit ćemo da se brzina i tlak zraka mijenjaju od ulaza prema izlazu iz turbine. Kako se zrak približava turbini (vjetrenjači) i prolazi kroz nju, tlak raste a brzina se smanjuje. Oblik, veličina, izrada, broj lopatica, sloboda gibanja, kutna brzina rotora i dr. utječu na promjene tlaka i brzine.

Pretpostavimo da se brzina vjetra smanjuje od brzine v na brzinu v_1 u turbini, a zatim na brzinu v_2 iza turbine i da je to smanjenje linearno (sl. 3.6).



Slika 3.6. Strujanje zraka kroz turbinu

Pri prolazu kroz turbinu strujnice se šire, pa se presjek strujne cijevi (dijela fluida omeđenog strujnicama) mijenja od A_0 na A (presjek rotora), te na A_2 iza turbine.

Ako smanjenje brzine opišemo parametrom $a = v_1/v$, tada je

$$v_1 = av, v_2 = 2v_1 - v = (2a - 1)v. \quad (3.24)$$

Primjenom jednadžbe kontinuiteta $A_0v = Av_1 = A_2v_2$, dobivamo

$$A_0 = aA, A_2 = \frac{a}{2a-1}A. \quad (3.25)$$

Ulazna snaga vjetra je

$$P_u = \frac{1}{2}\rho A_0 v^3 \quad (3.26)$$

dok je izlazna snaga

$$P_{iz} = \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3. \quad (3.27)$$

Snaga koju turbina iskoristi jednaka je razlici tih snaga:

$$P = P_u - P_{iz} = \frac{1}{2}\rho \cdot 4a^2(1-a)Av^3. \quad (3.28)$$

Odredimo koeficijent a tako da bi prijenos snage bio maksimalan. U tom je slučaju

$$\frac{dP}{da} = 0 \Rightarrow a = \frac{2}{3}. \quad (3.29)$$

Maksimalni koeficijent snage iznosi

$$c_{p \text{ maks}} = 4a^2(1-a) = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (3.30)$$

dok je maksimalna snaga

$$P_{\text{maks}} = \frac{1}{2} \rho c_{p \text{ maks}} A v^3 = 0,384 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot A v^3. \quad (3.31)$$

Relacija (3.31) poznata je Betzova formula iz 1927. god.

Koeficijent $c_{p \text{ maks}}$ zato se i zove Betzov koeficijent. Idealna turbina mogla bi iskoristiti samo 59% energije vjetra. U praksi maksimalni koeficijent iskorištenja je manji, oko 40%.

Koeficijent c_p ovisi i o brzini vjetra; tipična ovisnost prikazana je na sl. 3.7.

Navedimo kao primjer da je uz $c_p = 0,4$ gustoća snage turbine oko 130 W/m^2 pri brzini vjetra 8 m/s , 260 W/m^2 pri brzini 10 m/s , 450 W/m^2 pri 12 m/s i sl.

U izrazu za snagu vjetra pojavljuje se i gustoća zraka ρ , koja je funkcija temperature i tlaka zraka. Obično se uzima $p_0 = 101325 \text{ Pa}$, $T_0 = 288,15 \text{ K}$ (15°C) i $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (tzv. standardna atmosfera na razini mora). Gustoću možemo izračunati pomoću plinske jednadžbe ako poznamo tlak i temperaturu:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT} = \frac{p}{R'T} \quad (3.32)$$

gdje je $R' = R/M$ omjer plinske konstante i molne mase i za zrak iznosi $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Za normirane uvjete (101325 Pa , 0°C) gustoća je $1,2925 \text{ kg/m}^3$ što se lako dobije uvrštavajući te vrijednosti u jednadžbu (3.32).

Ako je turbina na nadmorskoj visini h , tada je prema barometarskoj formuli

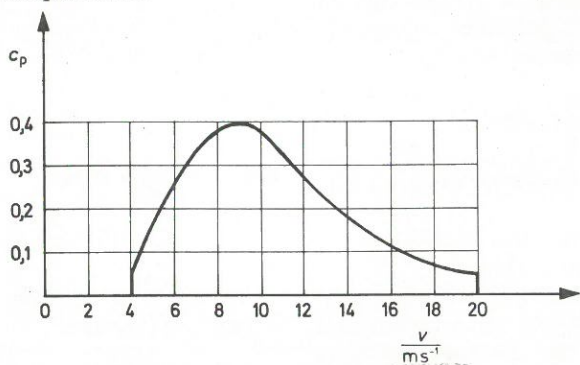
$$\frac{\rho}{\rho_0} = e^{-\frac{h \cdot m^{-1}}{8432}} \quad (3.33)$$

uz pretpostavku da je $T = 288,15 \text{ K}$ i $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

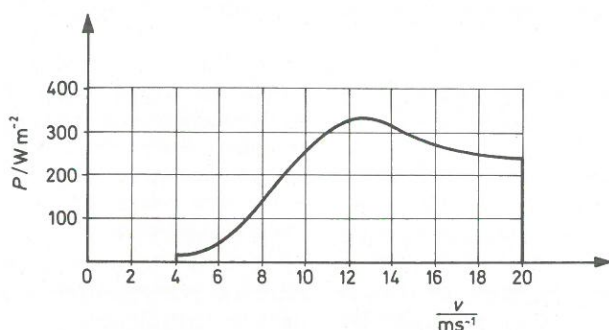
Ako je temperatura drukčija, treba izračunati korekciju zbog temperature. Budući da pri primjeni turbine u toku godine tlak može varirati od npr. 970 mbar do 1060 mbar , a temperatura od -15°C do 30°C , promjene u gustoći zraka utjecat će na snagu turbine s otprilike 10%.

Nazivna snaga turbine na vjetar dana je za određenu brzinu vjetra (tzv. nazivnu brzinu — engl. rated speed). To je maksimalna snaga koju postiže turbina uključena u sistem (npr. s priključenim električnim generatorom).

Tipična ovisnost snage turbine o brzini vjetra prikazana je na slici 3.8. Kada brzina dosegne određenu vrijednost v_1 (obično između 3 m/s i 5 m/s), turbina se uključuje, snaga joj raste s porastom brzine vjetra, dostiže nazivnu snagu pri nazivnoj brzini vjetra (npr. 12 m/s) i ostaje približno stalna (ili malo opada) sve dok brzina vjetra ne premaši vrijednost v_2 , kada se turbina isključuje.



Slika 3.7. Ovisnost koeficijenta snage turbine o brzini vjetra



Slika 3.8. Ovisnost snage turbine o brzini vjetra

3.3. Turbine na vjetar

Strojeve koji se koriste snagom vjetra nazivamo turbinama na vjetar (sl. 3.9) (zračnim turbinama). Oni se nazivaju i vjetrenjačama, ako se upotrebljavaju kao mlinovi, i generatori na vjetar, ako se radi o proizvodnji električne energije.

Turbine na vjetar smještaju se na visoke stupove jer brzina vjetra raste s visinom iznad tla. Visina stupova ovisi o snazi turbine (promjeru elise).

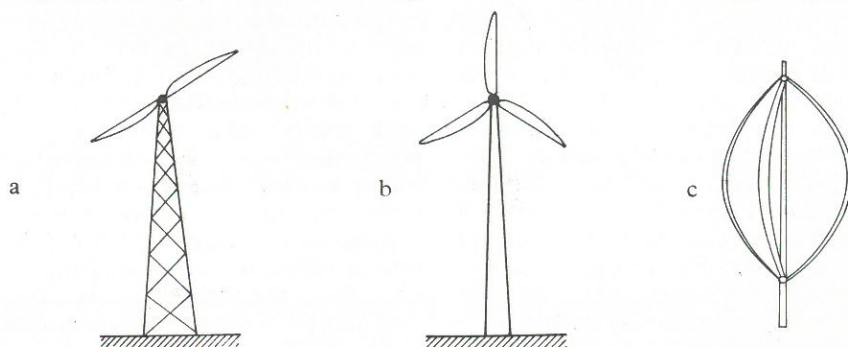
Dva su osnovna tipa turbina: turbine s horizontalnom i s vertikalnom osi rotacije. Češće se upotrebljavaju turbine s horizontalnom osi, posebno u elektranama za vjetar. Turbina se pri radu postavi tako da je krug što ga opisuju vrhovi lopatica okomit na smjer vjetra.

Površina koja se pojavljuje u formuli za snagu turbine (3.22) upravo je površina kruga koji opisuju lopatice propelera (rotora). Turbina se uvijek zakreće u najpovoljniji položaj pomoću posebnog

dotatka, tzv. vjetrenice. (Za veće turbine orijentacija se postiže električnim motorom.) Omjer površine lopatica prema površini kruga koji opisuju lopatice naziva se krutost rotora turbine (engl. solidity) i najmanji je za rotor s dvije lopatice, dok za turbine s više lopatica (npr. za pumpanje vode) taj omjer može biti i veći od 50%.

Regulacija kutne brzine rotora obavlja se zakretanjem turbine, zakretanjem lopatica (mijenjanjem nagiba profila lopatice prema struji zraka) ili dodatnim kočenjem.

Posebno je važan oblik lopatice i njezin profil. Svojim aerodinamičnim karakteristikama lopatica je slična avionskom krilu. Kada vjetar nailazi na lopaticu, pojavljuje se sila koja gura lopaticu u smjeru strujnica zraka (engl. thrust force). Kada vjetar struji oko lopatice koja se giba, silu koja se pritom pojavljuje možemo rastaviti na dvije komponente: silu u smjeru relativne brzine lopatice



Slika 3.9. Razne turbine na vjetar

prema vjetru (engl. drag force), tj. u smjeru $\vec{v}_{\text{vjetra}} - \vec{v}_{\text{lopatice}}$ i silu okomitu na taj smjer, tzv. aerodinamički uzgon (engl. lift force). Aerodinamički uzgon slično kao kod avionskog krila nastaje zbog cirkulacije zraka oko lopatice i ovisi o obliku i nagibu lopatice prema struji zraka (kut nagiba – engl. pitch angle). Strujnice su s jedne strane lopatice gušće, brzina veća, a tlak manji nego s druge strane gdje su strujnice rjeđe. Zbog te razlike tlakova upravo i nastaje aerodinamički uzgon koji omogućava da se lopatice giblju mnogo brže nego vjetar (slično kao jedrilica na moru ili na ledu se giba brže nego vjetar).

U turbina s horizontalnom osi (tj. turbina s propelerima) predominantna sila je aerodinamički uzgon. Za električne obično se koriste rotor s dvije ili tri lopatice jer mogu postići velike brzine, dok se za crpljenje vode i obavljanje mehaničkog rada koriste rotor s više lopatica. U većini komercijalnih sistema turbine imaju horizontalnu os. Strojevi s vertikalnom osi koriste se vjetrom bez obzira na to s koje strane dolazi, bez posebnog prilagođavanja turbine prema smjeru vjetra.

Spomenimo Darrieusovu zračnu turbinu. Njezin se rotor sastoji od dvije ili tri tanke zakrivljene lopatice aerodinamičnog oblika koje zbog utjecaja aerodinamičkog uzgona rotiraju oko vertikalne osi.

Osobine i rad turbine na vjetar često se opisuju pomoću omjera λ (engl. tip speed ratio) koji se definira kao

$$\lambda = \frac{v_1}{v} = \frac{R\omega}{v} \quad (3.34)$$

gdje je v_1 obodna brzina vrha lopatica turbine, R polumjer lopatica (rotora), ω kutna brzina vrtnje (rad/s) i v brzina vjetra. U tom bezdimenzionalnom parametru sadržane su osobine turbine (polumjer i frekvencija vrtnje) i osobine vjetra (brzina) i upravo zato je pogodna veličina pri projektiranju i proračunu turbina na vjetar. Korisno je i svojstvo da je bezdimenzionalan, dakle isti bez obzira na izabrani sustav jedinica.

Istaknimo onaj omjer λ (nazovimo ga λ_{opt}) za koji je koeficijent snage turbine

maksimalan. On ovisi o izvedbi turbine, posebno o broju lopatica. Ako je broj lopatica malen (npr. dvije), zrak lakše prolazi kroz rotirajuću turbinu i prenese na je snaga manja. Da bi se postigla veća snaga, potrebno je povećati kutnu brzinu, dakle i λ . Ako je broj lopatica veći, optimalna snaga postiže se pri manjim brzinama vrtnje, te je i λ manji.

Kad bi takvoj turbini s većim brojem lopatica povećavali brzinu, sve više bi nastalo turbulentno strujanje, gubila bi se energija na nastajanje vrtloga i snaga bi se smanjivala. Za turbine s dvije lopatice λ_{opt} je oko 6–9, za tri lopatice oko 4–5, za 4 lopatice 2–3, za desetak lopatica oko 1 i sl.

Zakretni moment koji proizvodi turbina ovisi o izradi turbine, posebno o broju lopatica, i može se napisati u obliku

$$M = c_M \frac{\rho}{2} A v^2 R \quad (3.35)$$

gdje je c_M koeficijent zakretnog momenta.

Snaga turbine je

$$P = M\omega = c_M \frac{\rho}{2} A v^2 R \omega$$

$$P = c_M \frac{\rho}{2} A v^3 \lambda. \quad (3.36)$$

Budući da je snaga također $P = c_p \frac{\rho}{2} A v^3$, proizlazi veza između koeficijenata snage i momenta:

$$c_M = \frac{c_p}{\lambda}. \quad (3.37)$$

Turbine s više lopatica rade pri malim λ , njihov c_M je velik te im je i zakretni moment pri startu velik. One su pogodne u primjenama gdje je potreban velik početni zakretni moment, npr. pri pumpanju vode. Za proizvodnju električne energije (vrtnju generatora) zakretni moment potreban za pokretanje generatora zanemariv je, ali je potrebno postići veliku frekvenciju vrtnje generatora. Zbog toga takve turbine imaju obično dvije uske lopatice aerodinamičnog oblika i rade pri većim vrijednostima λ (oko 5–10).

Spomenimo neke probleme koji se pojavljuju pri radu s turbinama na vjetar. Velike turbine polumjera većeg od 15 do 20 m uzrokuju smetnje u prijemu televizijskog signala jer reflektiraju elektromagnetske valove i nastaje interferencija i smetnje u amplitudno moduliranom signalu slike. (Na frekventno modulirani signal tona ta interferencija ne utječe.)

Turbine zauzimaju i priličnu površinu zemljišta, što u određenim područji-

ma može biti znatan problem. Estetski sve ovisi o njihovoj izradi i o mjestu gdje su instalirane. Negdje se mogu zgodno uklopiti u okolinu a ponegdje ne. Mjerenja su pokazala da buka čak i velikih turbina nije neki ozbiljan problem. Nivo infrazvuka i zvuka koji nastaju pri radu vjetrenjača u granicama je tolerancije, osim u neposrednoj blizini turbine.

Može se zaključiti da ne postoje nesavladive ekološke prepreke za upotrebu svih vrsta turbina na vjetar.

Primjer 3.3. Koeficijent snage neke turbine u ovisnosti o brzini vjetra naveden je u tablici 3.9. Godišnji prosjek brzine vjetra je 5 m/s odnosno 7 m/s. Površina presjeka turbine je 1 m². Procijenite energiju koja se godišnje može dobiti takvom turbinom.

Tablica 3.9.

$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
c_p	0	0,15	0,25	0,33	0,38	0,4	0,38	0,33	0,27	0,23	0,18	0,13	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0
P	0	12	35	74	126	189	247	285	303	328	321	307	266	255	227	223	208	0
W m^{-2}																		

Gustoća snage turbine izračunata za pojedine brzine vjetra po formuli

$$P = \frac{1}{2} c_p \rho v^3 A$$

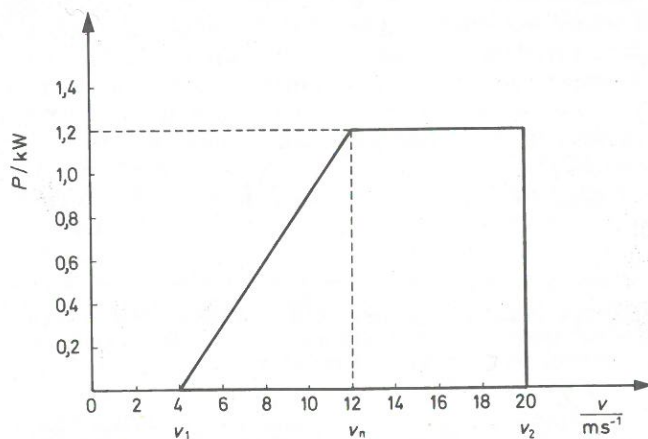
navedena je u trećem stupcu tablice 3.9.

Pretpostavit ćemo Rayleighovu raspodjelu brzina vjetra i izračunati godišnji broj sati za koje vjetar puše određenom brzinom v (tablica 3.10). Množeći broj sati $N(v)$ i snagu turbine $P(v)$ za određenu brzinu v , dobivamo godišnju energiju turbine. Rezultati računa su u tablici 3.10.

Tablica 3.10.

$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$P(v)$	$\frac{N}{\text{h}}$	$\frac{E}{\text{kWh}}$	$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$P(v)$	$\frac{N}{\text{h}}$	$\frac{E}{\text{kWh}}$
1,0	0,0609	533,3		1,0	0,0315	276,3	
2,0	0,1108	970,8		2,0	0,0601	526,7	
3,0	0,1421	1244,5		3,0	0,0833	729,2	
4,0	0,1520	1331,8		4,0	0,0992	869,1	
5,0	0,1432	1254,7	15,1	5,0	0,1074	940,5	11,3
6,0	0,1217	1065,7	37,3	6,0	0,1080	946,1	33,1
7,0	0,0943	826,4	61,1	7,0	0,1023	896,2	66,3
8,0	0,0673	589,6	73,3	8,0	0,0919	805,3	101,5
9,0	0,0444	388,8	73,6	9,0	0,0788	689,9	130,4
10,0	0,0272	237,8	58,7	10,0	0,0645	565,3	139,6
11,0	0,0154	135,2	38,5	11,0	0,0507	444,1	126,6
12,0	0,0082	71,6	21,7	12,0	0,0383	335,1	101,5
13,0	0,0040	35,3	11,6	13,0	0,0278	243,1	79,7
14,0	0,0019	16,3	5,2	14,0	0,0194	169,8	54,5
15,0	0,0008	7,0	2,1	15,0	0,0131	114,3	35,1
16,0	0,0003	2,8	0,7	16,0	0,0085	74,2	19,7
17,0	0,0001	1,0	0,26	17,0	0,0053	46,4	11,8
18,0	0,0000	0,3		18,0	0,0032	28,0	6,4
			399 kWh	19,0	0,0019	16,3	3,6
				20,0	0,0011	9,2	1,9
							923 kWh

Primjer 3.4. U tablici 3.11. su podaci o vjetru u toku jedne godine u obliku postotka vremena u kojem vjetar puše određenom brzinom. Ovisnost snage sistema o brzini vjetra prikazana je na sl. 3.10. Odredite godišnju energiju takvog sistema.



Slika 3.10. Snaga turbine u primjeru

Tablica 3.11.

$\frac{v}{\text{ms}^{-1}}$	0,5–1,8	1,8–3,6	3,6–5,8	5,8–8,5	8,5–11	11–14	14–17	17–21	bez vjetra
% vremena	12	26	30	18	6	2	1	0,5	4,5
N/h	1050	2278	2628	1577	526	175	88	44	394
P/kW	—	—	0,11	0,48	0,87	1,2	1,2	1,2	—
E/kWh	—	—	289	757	458	210	106	53	—

Zadanu frekvenciju vjetra pretvorimo u broj sati godišnje tako da postotak pomnožimo brojem sati u godini koji iznosi $365 \times 24 = 8760$. Pretpostavljamo da su podaci o brzini vjetra na mjestu gdje je rotor turbine i da nije potrebna korekcija zbog različite visine i konfiguracije terena. Ukupna energija koju daje turbina jest zbroj energija za pojedine brzinske intervale i iznosi 1873 kWh/god.

3.4. Elektrane na vjetar

U elektranama na vjetar turbina na vjetar (elisa) tjera električni generator. Osnovni su nedostaci takvih elektrana mala gustoća snage (otprilike 250 W/m^2 po m^2 površine kruga koji opisuju vrhovi elise pri brzini vjetra od 10 m/s), često mijenjanje brzine vjetra, kao i razdoblja vjetra malih brzina (koji se ne može energetski koristiti) i razdoblja bez vjetra.

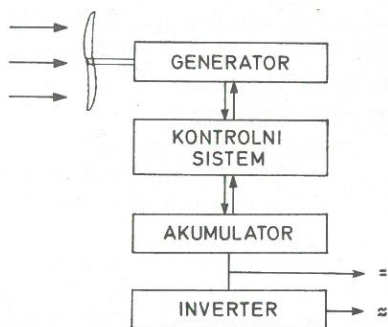
Zbog promjenljivosti brzine vjetra potrebno je akumuliranje energije ili dopu-

na iz drugih izvora. Za sisteme male snage mogu se koristiti akumulatori, ali za sisteme veće snage upotreba akumulatora bila bi preskupa i nepraktična. U tom je slučaju potrebno sistemu dodati dopunski agregat ili ga priključiti na elektroenergetski sistem.

Aerogeneratori snage oko 200 kW uspješno se koriste u raznim krajevima svijeta. Projektiraju se i veliki sistemi $3\text{--}4 \text{ MW}$ koji će proizvoditi električnu energiju jeftinije od termoelektrana na naftu, manji sistemi od 10 do 100 kW

primjenjuju se u domaćinstvima, na farmama, posebno na mjestima gdje su drugi izvori nedostupni ili skupi, posebno ako je u tom području srednja brzina vjetra relativno velika, recimo veća od 6 m/s.

Osnovni dijelovi generatora na vjetar su zračna turbina, električni generator i mehanička veza između turbine i generatora (sl. 3.11). Osim toga, već prema primjeni, potrebni su ispravljači regulatori, akumulatori, inverteri, stabilizatori napona i frekvencije i dr.



Slika 3.11. Shema male elektrane na vjetar

Izlazni napon može biti izmjeničan, promjenljive ili stalne frekvencije i istosmjernan. Sistem može biti sinhroniziran na mrežu ili povezan s agregatom ili s akumulatorom.

Električni generatori s turbinama na vjetar mogu se koristiti za dobivanje električne energije, posebno u područjima gdje nema komercijalne mreže. Oni mogu biti povezani s dizel-agregatima i tako štedjeti gorivo kad ima dovoljno vjetra. Generatori na vjetar, posebno oni veće snage, mogu se povezati s električnom mrežom i davati energiju mreži slično kao i druge elektrane.

Energija dobivena iz autonomnih generatora može se uskladištiti u akumulatorima ili pretvarati pomoću električnih grijača u toplinu.

Električni generatori. Elektromagnetska indukcija iskorištava se u tehnici proizvodnje električne energije. Ako među polovima magneta rotira okvir od žice, u njemu se inducira elektromotorna

sila i na njegovim se krajevima pojavljuje izmjenični napon. Na krajevima žice su metalni prsteni po kojima klize dvije četkice koje čine stalnu električnu vezu između rotora i vanjskog trošila. Ako se okvir giblje stalnom kutnom brzinom u homogenom magnetskom polju, nastaje izmjenični sinusoidni napon. Frekvencija nastalog napona jednaka je broju okretaja okvira u jednoj sekundi.

U praksi se umjesto jednog zavoja koristi zavojnice s mnoštvom zavoja jer je inducirani napon proporcionalan broju zavoja. Jako magnetsko polje može se proizvesti elektromagnetom (zavojnicom kroz koju teče struja). Generatori mogu imati jedan ili više magneta (permanentnih ili elektromagneta). Generator s jednim magnetom (tj. s dva pola – dvopolni generator) koji se vrti frekvencijom f_1 , dat će izmjenični napon te iste frekvencije. Međutim, ako je generator s više magneta, ako je broj parova polova n , frekvencija dobivenog napona f veća je n puta od frekvencije vrtnje generatora $f = nf_1$. Dakle, frekvencija dobivenog izmjeničnog napona povezana je s frekvencijom vrtnje generatora (a time i turbine na vjetar), i čim se promijeni frekvencija vrtnje, mijenja se i frekvencija napona. Zato se takvi generatori nazivaju sinhronima. Da bi takav generator proizvodio napon frekvencije 50 Hz (i bio kompatibilan s gradskom mrežom i mogao se u nju uključiti), mora se vrtjeti stalnom kutnom brzinom (koja se zove sinhrona brzina) i koja ovisi o broju polova generatora.

Tako se za dobivanje napona frekvencije 50 Hz dvopolni generator mora vrtjeti sa 50 okretaja/s odnosno 3000 okretaja/min, a ako je generator šestopolni ($n=3$), potrebni broj okretaja je 1000 okretaja/min, za $n=6$, $f_1 = 50/6 \text{ s}^{-1} = 500 \text{ min}^{-1}$ i sl.

Za sinhronne generatore, koji su sinhronizirani na gradsku mrežu, uvjet konstantne brzine vrtnje vrlo je važan. Za generatore na vjetar teško je ispuniti taj uvjet zbog nestalne brzine vjetra i stalnih fluktuacija u toj brzini.

Elektromagneti u generatoru mogu biti na statoru ili na rotoru. U velikim generatorima obično su na rotoru. Tako

se na rotor dovodi relativno slaba struja za elektromagnete preko četkica, a jaka se struja za potrošač odvodi izravno sa statora u mrežu i tako se izbjegavaju problemi s iskrenjem koji bi nastali prijelazom jakih struja s kliznih koluta na klizne četkice.

Kod višepolnih generatora određen broj parova polova magneta ravnomjerno je raspoređen po unutrašnjem opsegu statora ili na rotoru, što ovisi o izvedbi generatora. Magneti se postavljaju tako da je uz sjeverni pol jednoga južni pol susjednoga. (Za elektromagnete to se postiže obratnim smjerom motanja zavojnice na susjednom polu.)

Generator istosmjernog napona sličan je sinhronom generatoru izmjeničnog napona. Ako se prstenovi po kojima klize četkice razrežu na dva jednaka međusobno izolirana dijela, na četkicama se dobiva elektromotorna sila uvijek istog smjera (ali promjenljivog iznosa) i tako se od izmjeničnog generatora dobiva istosmjerni generator s komutatorom.

Asinhroni generator sličan je asinhronom motoru na izmjeničnu struju. Ako se stator takvoga generatora (koji se naziva i indukcionim generatorom) priključi na gradsku mrežu, a rotor vrti (npr. pomoću turbine na vjetar) brzinom većom od sinhrone, takav generator proizvodi će izmjenični napon frekvencije 50 Hz.

U asinhronom motoru rotor nikada ne može postići brzinu vrtnje okretnoga magnetskog polja mreže jer bi se tada u namotima rotora prestala inducirati elektromotorna sila (ne bi bilo presijecanja magnetskih silnica) te ne bi bilo ni rotorske struje. Ta pojava zaostajanja rotora za okretnim magnetskim poljem zove se klizanje — s :

$$s = \frac{f - f_1}{f} \quad (3.38)$$

gdje je f sinhrona frekvencija struje kroz stator, f_1 frekvencija rotorske struje. Kod motora $f_1 > f$ te je klizanje pozitivno i obično je manje od 5%. Kod generatora klizanje je negativno i manje od 10%.

Takvi generatori su praktičniji za primjenu u sistemima na vjetar jer je problem sinhronizacije na mrežu manji, a uvjet da brzina vrtnje bude konstantna nije tako striktan kao kod sinhronih generatora. Ako takav generator nije spojen s mrežom, tada se pri startanju primjenjuje rezidualni magnetizam u generatoru za dobivanje početnih struja, a kondenzatorima se postiže potrebna fazna razlika između struje u statoru i rotoru. Prednost je generatora povezanih s gradskom mrežom u tome da se višak energije može predati mreži, a kada vjetar nije dovoljan, energija se može uzeti iz mreže.

Da bi se iz generatora na vjetar, koji se vrti promjenljivom brzinom, na izlazu dobio napon stalne frekvencije (npr. 50 Hz), potrebno je između generatora i izlaza uključiti sistem koji će od napona promjenljive frekvencije dati napon stalne frekvencije. Jedan od načina da se to postigne jest ispravljanje izmjenične struje promjenljive frekvencije (koja se dobije iz alternatora na vjetar) u istosmjernu pulzirajuću struju, koja se zatim inverterom pretvara u trofaznu izmjeničnu struju frekvencije 50 Hz kompatibilnu s gradskom mrežom.

Jednostavni mali sistemi sastoje se često od alternatora s permanentnim magnetima. Na statoru su tri zavojnice za dobivanje trofaznog napona, a na periferiji rotora n parova polova permanentnog magneta. Napon i frekvencija takvog alternatora ovisi o brzini (frekvenciji) vrtnje odnosno brzini vjetra. Upotrebom ispravljača i invertera može se od tog napona dobiti trofazni izmjenični napon 380 V/50 Hz. Postoje također električni motori koji se mogu izravno priključiti na izlaz alternatora i raditi s promjenljivim naponom i promjenljivom frekvencijom. Također, mnoga trošila nisu osjetljiva na promjenu frekvencije te se i ona mogu izravno priključiti na alternator.

Mali autonomni sistemi u područjima gdje nema komercijalne mreže (planine, vikend-kuće, releji i sl.) moraju biti povezani s akumulatorima ili drugim siste-

mima za uskladištenje energije. Veliki sistemi obično su u vezi s komercijalnom mrežom i na taj se način rješava problem uskladištenja energije. Energija se može uskladištiti i pumpanjem vode u akumulacijska jezera i korištenjem potencijalne energije te vode u razdoblju kada je nedovoljna energija vjetra.

Turbine i generatori za punjenje akumulatora i za omske potrošače (grijala) mogu se koristiti pri raznim brzinama vrtnje, za razliku od sistema koji trebaju dati izmjeničan napon stalne frekvencije. Zbog toga takvi sistemi mogu dati i do 50% više energije od onih kod kojih brzina vrtnje mora biti stalna.

4. Sunčana energija

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

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

Prema broju sunčanih sati godišnje i intenzitetu Sunčeva zračenja ($1\,200 - 1\,500$ kWh/m² godišnje) velik dio Jugoslavije, osobito južni dio Jadranskog područja, ima dobre perspektive za korištenje sunčane energije. Na površinu Jugoslavije u toku jedne godine upadne sa Sunca energije oko $1,3 \cdot 10^{21}$ J ($3 \cdot 10^{14}$ kWh) energije, Jugoslaviji je sada potrebno godišnje oko $2 \cdot 10^{17}$ J, a procjenjuje se da će joj 2000. g. biti potrebno oko $5 \cdot 10^{18}$ J. Godišnja ozračenost (iradijacija) u naj-sunčanijim dijelovima naše zemlje jest oko $1\,600$ kWh/m². Sunce je, dakle, energetski izvor koji bi mogao zadovoljiti dio energetskih potreba u budućnosti.

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

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

Osobiti su problemi u iskorištavanju sunčane energije: mala gustoća energetskog toka (srednja je vrijednost za ukupnu Zemljinu površinu oko 630 W/m², a oko 1 kW/m² za Jugoslaviju), oscilacija intenziteta Sunčeva zračenja u različito doba dana, u različitim klimatskim prilikama, godišnjim dobima i sl. Zbog intermitentnosti Sunčeve energije i činjenice da se ni dnevne ni sezone oscilacije intenziteta zračenja ne poklapaju s oscilacijom potrošnje energije (električna energija i toplota najpotrebnije su kada je Sunčeva zračenja malo ili ga nema), Sunčevo zračenje moći će se znatnije praktično iskorištivati tek kad se riješe problemi ekonomski opravdane konverzije i akumuliranja energije za dulja razdoblja. Ekonomičan solarni uređaj mora trajati dulje od vremena amortizacije. Sunčana energija postat će značajan energetski izvor tek kada postane ekonomski konkurentna drugim energetskim izvorima. Zbog stalnog porasta cijena konvencionalnih goriva uređaj za korištenje sunčane energije vjerojatno će postati ekonomičan.

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

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

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

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

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

4.1. Sunčevo zračenje

4.1.1. Uvod

Pri proračunu i projektiranju solarnih uređaja potrebno je poznavati energiju Sunčeva zračenja koje upada na plohu kolektora. Sunčevo zračenje različito je na različitim mjestima, ovisi o klimatskim uvjetima područja i mijenja se tokom dana, mjeseca i godine. U meteorologiji se mjeri zračenje na horizontalnu plohu i za mnoga mjesta postoje takvi podaci o ukupnom (globalnom) Sunčevu zračenju. Za mjesta, za koja takvi podaci nisu dobiveni mjerenjem mogu se pro-

računati iz ostalih klimatoloških podataka, trajanja sijanja Sunca (insolacije), vlažnosti zraka, oblačnosti i dr. Međutim, Sunčevo zračenje na kosu plohu nije mjereno te se pri proračunu rada kolektora takvi podaci moraju izračunati.

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

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

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

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

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

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

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

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

Tok zračenja (snaga zračenja) Φ definira se izrazom

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (4.1)$$

i izražava jedinicom vat.

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

$$G = \frac{d\Phi}{dA} \quad (4.2)$$

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

Ukupno ozračenje neke plohe na koju upada Sunčevo zračenje jest

$$G = G_b + G_d + G_r \quad (4.3)$$

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

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

$$H = \int_{t_1}^{t_2} G dt. \quad (4.4)$$

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

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

$$\Phi_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dt}, \quad (4.5)$$

spektralno ozračenje

$$G_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dA}. \quad (4.6)$$

Ukupni tok zračenja izražen s pomoću spektralnoga je

$$\Phi = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi_\lambda d\lambda \quad \text{ i } \quad G = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} G_\lambda d\lambda. \quad (4.7)$$

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

$$M = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (4.8)$$

gdje je Φ_e tok zračenja koji emitira površina A . Jedinica za egzitantciju jest vat po četvornom metru (W/m^2).

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

Apsorpcijski faktor (apsorptancija) neke površine definira se omjerom

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_u} \quad (4.9)$$

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

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

površine i ukupnog upadnog toka zračenja na tu površinu

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

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

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

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

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

$$\epsilon = \frac{M}{M_{\text{et}}} \quad (4.12)$$

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

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

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

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

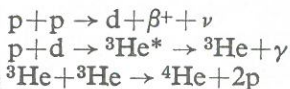
4.1.2. Sunce

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

polumjer $6,96 \cdot 10^8$ m,
masa $1,99 \cdot 10^{30}$ kg (oko $3,3 \cdot 10^5$ veća od mase Zemlje),
srednja gustoća 1400 kg/m³,
srednja udaljenost od Zemlje $1,49 \cdot 10^{11}$ m.

Procjenjuje se da je temperatura u unutrašnjosti Sunca reda veličine 10^7 K, tlak 10^{14} Pa i gustoća 10^5 kg/m³. Pri takvim okolnostima zbiva se termoneuklearna fuzija vodika u helij i pri tome oslobađa ogromna količina energije.

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1.3. Ekstraterestričko zračenje; solarna konstanta

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

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

Solarna konstanta definira se kao tok Sunčeva zračenja kroz jediničnu površinu okomitu na smjer Sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca ($r = 1,5 \cdot 10^{11}$ m), ali izvan Zemljine atmos-

fere tako da nema slabljenja zbog apsorpcije i raspršenja u atmosferi.

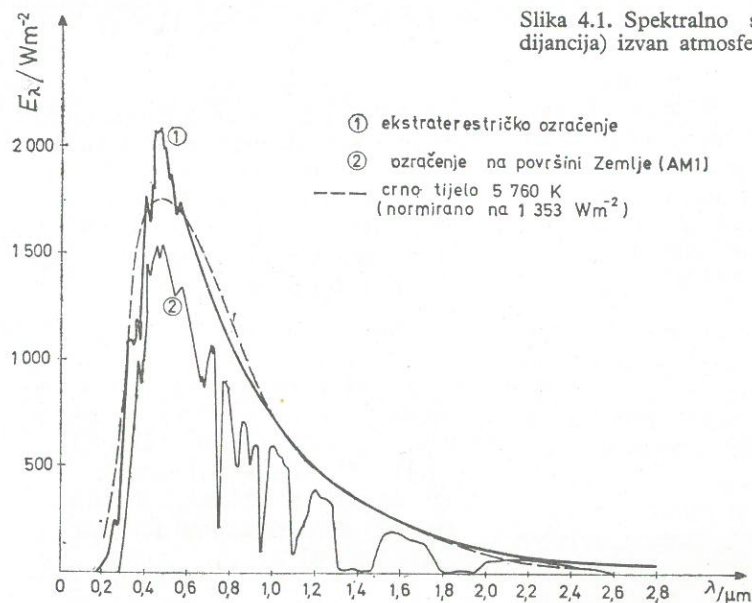
Navedena vrijednost solarne konstante (4.13) dobivena je mjerenjima s pomoću balona i satelita; predložili su je Thekaekara i Drummond 1971. godine [Th 73, Du 74] i prihvaćena je na kongresu ISES (1970. god.) te od NASA-e i nekih drugih organizacija kao standardna vrijednost. Prije toga (a ponegdje i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

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

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

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

* Nedavno je utvrđena vrijednost $\bar{E}_0 = (1\,367 \pm 7) \text{ W/m}^2$ (WMO 1982).



Slika 4.1. Spektralno solarno ozračenje (iradijancija) izvan atmosfere i na površini Zemlje

55%. Spektral zračenja se proteže od $0,3 \mu\text{m}$ do $2 \mu\text{m}$.

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

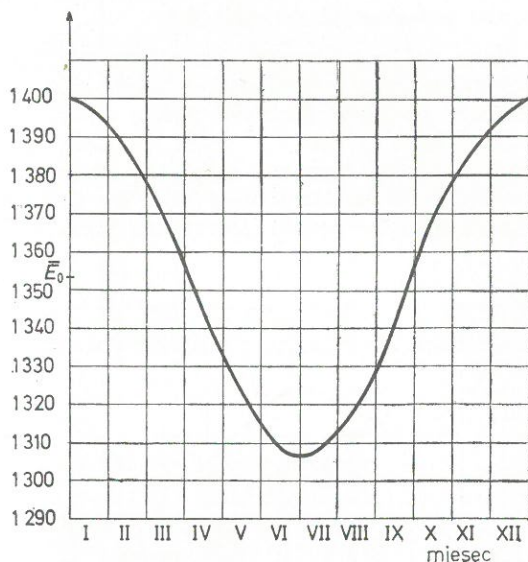
$$E_0 = \bar{E}_0 r / R^2$$

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

$$E_0(n) = \epsilon(n) \bar{E}_0 = \left[1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right] \bar{E}_0 \quad (4.14)$$

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

Na slici 4.2. prikazan je godišnji hod ekstraterestričkog sunčanog ozračenja (iradijancije). Ono je u našem području najmanje ljeti (npr. 1307 W/m^2 1. VII) kada je Zemlja najdalje od Sunca, a najveće zimi (npr. 1399 W/m^2 1. I) jer je tada Zemlja najbliže Suncu.



Slika 4.2. Godišnji hod ekstraterestričkog solarnog ozračenja (iradijancije)

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

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

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

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

($\psi=15,98^\circ$) ta je razlika 11 min (15. II) i 20 min (31. X).

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

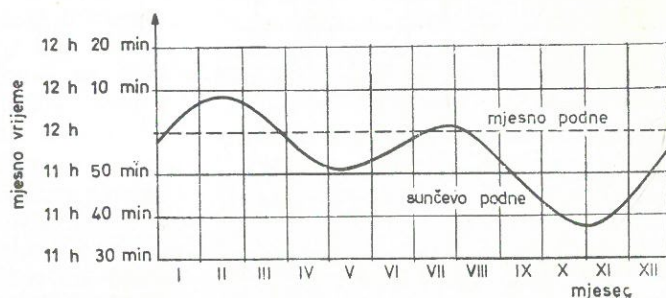
Deklinacija Sunca δ jest kut između spojnice središta Zemlje sa središtem Sunca i ravnine u kojoj leži ekvator. Deklinacija ovisi o danu u godini i mijenja se od $-23,45^\circ$ (21. XII) do $+23,45^\circ$ (21. VI). Vrijednosti deklinacije mogu se naći u tablicama ili izračunati s pomoću aproksimativne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

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

gdje je n broj dana počevši od 1. siječnja.

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

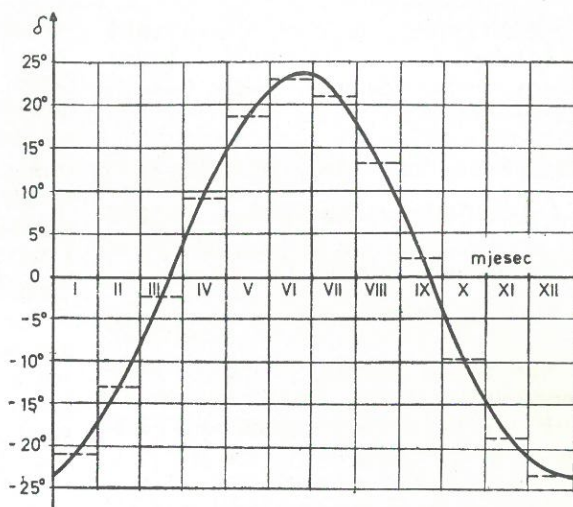
Satni kut Sunca ω vrijeme je izraženo s pomoću kuta i računa se počevši od Sunčeva podneva. Sunčevo podne doba je dana kada je Sunce u svom najvišem položaju i taj trenutak odgovara kutu $\omega=0^\circ$. Satni se kut dobije tako da se odgovarajući vremenski interval od Sun-



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

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

Dan	15. I	15. II	15. III	15. IV	15. V	15. VI	15. VII	15. VIII	15. IX	15. X	15. XI	15. XII
redni broj dana	15	46	74	105	135	166	196	227	358	288	319	349
deklinacija δ	-21,3°	-13,3°	-2,8°	9,4°	18,8°	23,3°	21,5°	13,8°	2,2°	-9,6°	-19,2°	-23,3°
srednja mjesečna deklinacija $\bar{\delta}$	-20,9°	-13,1°	-2,2°	9,4°	18,8°	23,1°	21,1°	13,3°	2,2°	-9,6°	-18,9°	-23,1°



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

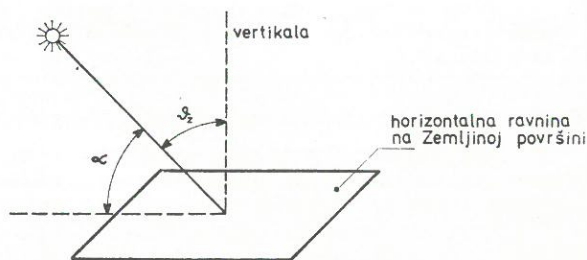
čeva podneva (izražen u satima) pomnoži s 15° i računa negativno za prijepodne, a pozitivno za poslijepodne. (U nekim knjigama navodi se i obratno: pozitivno za prijepodne, a negativno za poslijepodne.) Na primjer 10 h Sunčeva vremena odgovara satnom kutu $\omega = -30^\circ$. 13 h 30 min odgovara satnom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

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

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

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

$$\vartheta_z = 90^\circ - \alpha.$$



Slika 4.5. Visina Sunca i zenitna udaljenost

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

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

a iz toga slijedi da je

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

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

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

odnosno

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

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

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

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

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

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

Tablica 4.2. Kutovi visine Sunca α_p u Sunčevo podne

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

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

Kut izlaska Sunca određujemo iz izraza (4.17) $\omega_s = \arccos (-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta) = \arccos [-\operatorname{tg}(43,68^\circ) \operatorname{tg} (-19,15^\circ)] = 70,63^\circ$ što je 4,71 sata. Sunce, dakle izlazi u 12 h – 4,71 h = 7,3 h, a zalazi u 16,71 h prema Sunčevu vremenu. Iz slike 4.3. možemo očitati da to odgovara izlasku u 6,96 h i zalasku u 16,38 h prema mjesnom vremenu.

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

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

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

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

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

$$H_0 = \int_{t_1}^{t_2} \epsilon(n) \bar{E}_0 \sin \alpha(n) dt =$$

$$= \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} \left[1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right] \bar{E}_0 \cdot$$

$$\cdot \sin \alpha(n) \cdot \frac{86\,400}{2\pi} d\omega. \quad (4.19)$$

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

$$H_0 = \frac{86\,400}{\pi} \bar{E}_0 \left[1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right].$$

$$\cdot \left[\frac{2\pi}{360} \omega_s \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_s \cos \varphi \cos \delta \right] \quad (4.20)$$

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

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

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

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

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

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

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

1. I	$H_0 = 10,64$ MJ/m ²
15. I	$H_0 = 11,8$ MJ/m ²
31. I	$H_0 = 14,14$ MJ/m ²

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

Tablica 4.4. Srednje dnevne vrijednosti ekstraterestričkog zračenja

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

4.1.4. Prizemno Sunčevo zračenje

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

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

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

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

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

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

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

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

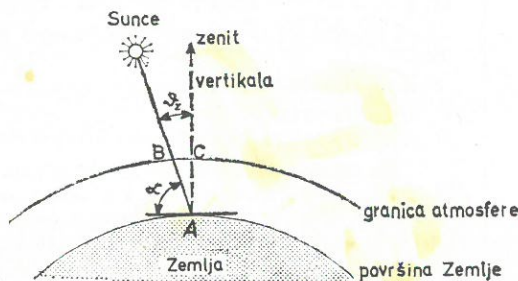
$$m = \frac{BA}{CA} = \frac{1}{\cos \vartheta_z} = \frac{1}{\sin \alpha} = \sec \alpha \quad (4.22)$$

CA je visina vertikalnog stupca zraka od površine Zemlje do ruba atmosfere,

BA je visina odgovarajućeg stupca zraka kroz koji prolaze Sunčeve zrake,

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

α je visina Sunca.



Slika 4.6. Uz definiciju optičke mase zraka

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

Smanjenje energije zračenja pri prolazu kroz atmosferu može se prikazati izrazom

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

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

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

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

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

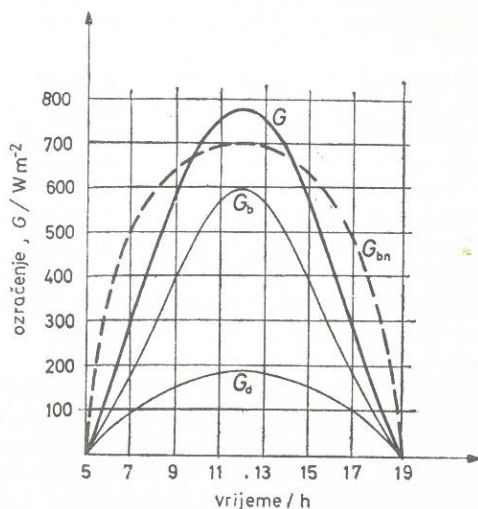
$$G_b = G_{bn} \cos \vartheta_z = G_{bn} \sin \alpha \quad (4.24)$$

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

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

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

Na slici 4.7. prikazan je dnevni hod izravnog ozračenja G_{bn} okomite plohe,



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

izravnog ozračenja G_b horizontalne plohe, ukupnog G i raspršenog G_d ozračenja horizontalne plohe za vedra ljetnog dana u Zagrebu [Pe 65].

4.1.5. Mjerenje Sunčeva zračenja

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

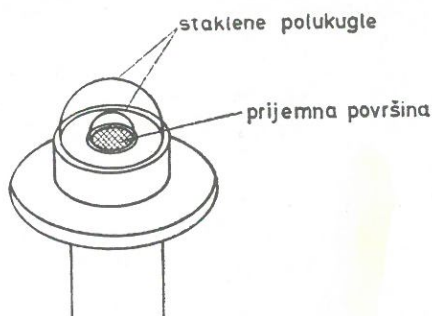
Trajanje insolacije, tj. vrijeme kad izravno Sunčevo zračenje dopire do površine Zemlje (odnosno horizontalne plohe uređaja) mjeri se s pomoću heliografa. Takvi se podaci bilježe na oko 130 mjesta u Jugoslaviji. Iako heliograf daje samo informaciju o tome da li ima izravno zračenja ili ne, a ne daje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

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

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

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

Spomenimo nekoliko tipova piranometara: Moll-Gorczyński, Eppley PSP, Schenk i bimetalni Robitzschew [Sa 81,



Slika 4.8. Shematski prikaz piranometra

Ta 81]. Ukupno Sunčevo zračenje mjerilo se npr. u Zagrebu (Grič) od 1948. do 1957. Robitzschewim aktinografom, a od 1958. dalje solarigrafom Moll-Gorczyński [Pe 70].

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

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

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

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

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

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

Podaci o Sunčevu zračenju dobiveni aktinometrijskim mjerenjima u Jugoslaviji

objavljaju se u izdanjima Saveznog hidro-meteorološkog zavoda, a djelomično se mogu naći i u drugim radovima [npr. u Pe 65, Pe 70, Pe 79, Gb 80].

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

U tablicama 4.5, 4.6. i 4.7. navedene su srednje satne ozračenosti za Bar, Split i Zagreb, prema podacima iz literature [Pe 70, Pe 79 i Gb 80]. Vrijednosti su izražene mjernom jedinicom vatsat po četvornom metru ($W h/m^2$).

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

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

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

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

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

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

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

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

Mjesec	ozračenost/ (MJ/m ²)				
	Bar	Split	Beograd	Zagreb	Ljubljana
siječanj	6,5	6,5	5,2	3,7	2,7
veljača	8,8	9,8	7,8	6,5	5,5
ožujak	13,6	14,3	12,2	9,7	9,2
travanj	17,4	18,6	16,5	14,8	13,1
svibanj	22,6	23,3	21	19,3	17,6
lipanj	25,1	25,9	21,8	20,6	18,2
srpanj	25,9	25,4	22	21,3	19,1
kolovoz	22,5	22,4	19,7	18,7	15,6
rujan	17,1	17,4	14,9	14,0	11,5
listopad	12,5	12,7	10,2	8,3	7,2
studen	7,3	7,4	8,1	3,6	3,4
prosinac	5,6	5,7	3,7	2,7	2,2

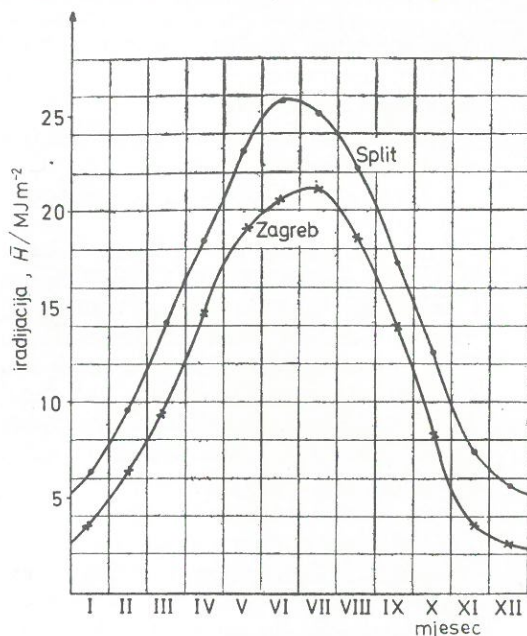
Godišnji
srednjak/(MJ/m²) 15,4 15,8 13,6 11,9 10,4

ukupna go-
dišnja ozra-
ćenost/(kWh/m²) 1560 1600 1380 1200 1050

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

4.1.6. Proračun prizemnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu

Budući da je mreža stanica hidrometeorološke službe Jugoslavije u kojima se



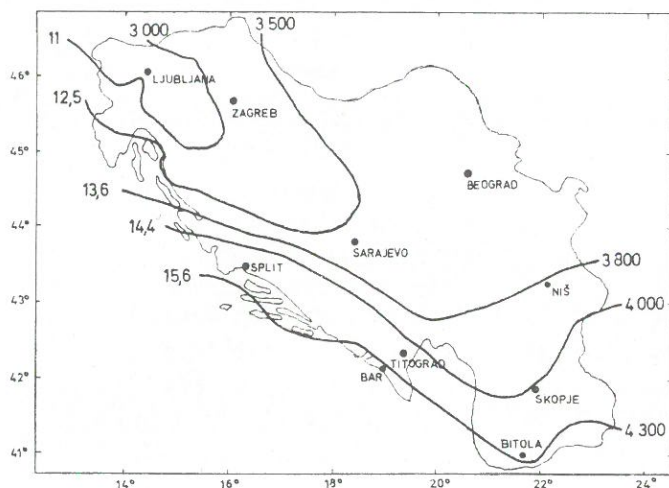
Slika 4.9. Godišnji hod srednjih dnevnih ozračenosti (iradijacija) H na horizontalnu plohu u Zagrebu i Splitu

mjeri ukupna ozračenost ipak relativno rijetka, često je potrebno izračunati podatke o ukupnom Sunčevu zračenju.

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

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

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



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

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

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

Tablica 4.10. Trajanje insolacije u Zagrebu

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

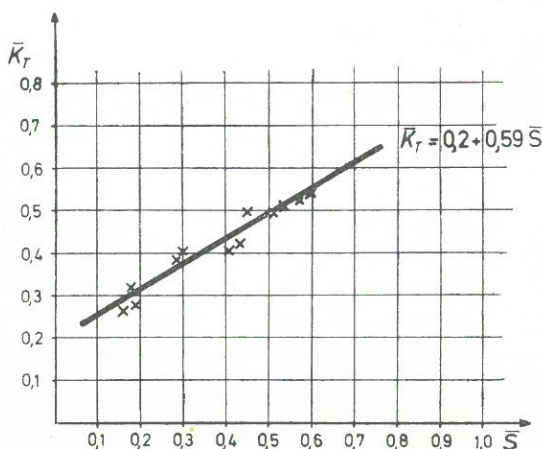
Označimo li indeks prozračnosti $\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0$, Angström-Pageovu formulu (4.26) možemo tad pisati u obliku

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

Slika 4.13. Uz izračunavanje koeficijenta a i b za Zagreb

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

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



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

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

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

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

gdje su koeficijenti

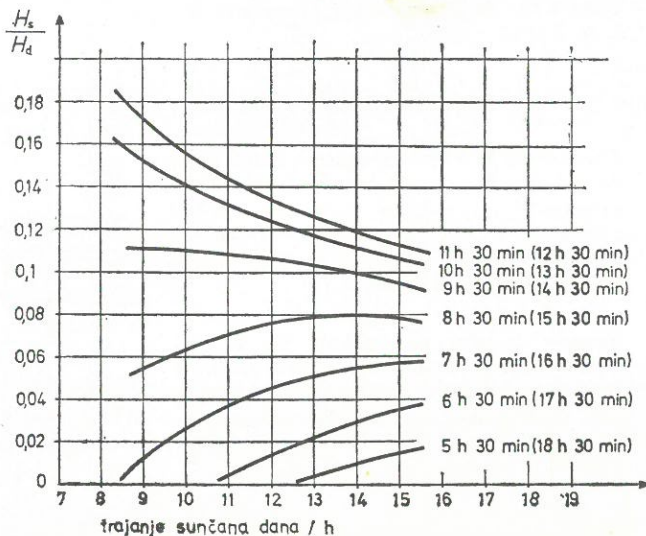
$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ).$$

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

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

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



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

4.1.7. Procjena raspršenog zračenja

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

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

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

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

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

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

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

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

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

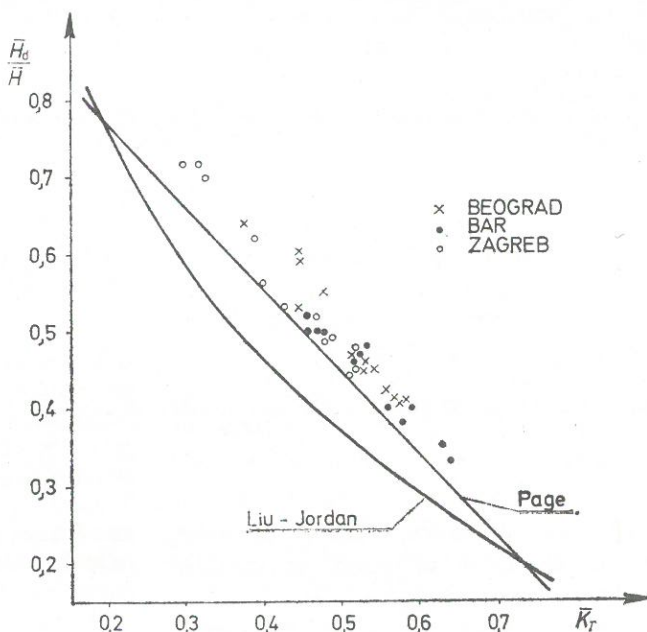
Kada se podaci mjerenja za Bar, Beograd i Zagreb [Ga 77, Br 81] usporede s rezultatima dobivenim iz izraza (4.29), opaža se određeno neslaganje: izmjerene vrijednosti difuzne ozračenosti veće su od onih koje predviđa Liu-Jordanov izraz! Iz podataka mjerenja o raspršenom ukupnom zračenju za Bar, Beograd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

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

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

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

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



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

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

i dobio srednju vrijednost za koeficijente $A=1,00$ i $B=1,096$, uzimajući podatke mjerenja za niz mjesta u raznim dijelovima svijeta. Koeficijenti A i B ovise o pojedinom klimatskom području i potrebno je prije upotrebe empiričkih izraza

(4.29) i (4.30) provjeriti njihovu valjanost za područje za koje se žele primijeniti. Odredimo li iznose koeficijenata iz podataka mjerenja za Bar, Beograd i Zagreb (sl. 4.12), dobivamo $A=1,05$ i $B=1,125$ [Ku 81]. Na slici 4.15. uz Liu-Jordanov nacrtan je i Pageov izraz (4.30). Taj se crtež može koristiti umjesto izraza (4.29) i (4.30) za određivanje omjera raspršenog zračenja u našem klimatskom području (v. idući primjer).

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

Indeks prozračnosti jest

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

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

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

Tablica 4.12. Indeks prozračnosti

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XI	X	XI	XII
Split ($\varphi=43,52^\circ$, N)												
$\bar{H}$, MJ m ⁻²	6,5	9,8	14,3	18,6	23,3	25,9	25,4	22,4	17,4	12,7	7,4	5,7
$\bar{H}_0$, MJ m ⁻²	12,9	18,1	25,5	33,2	38,5	41,3	40,1	35,3	28,1	20,2	14,1	11,4
$\bar{K}_T$	0,51	0,54	0,55	0,56	0,60	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	0,52	0,50
Bar ($\varphi=42,1^\circ$, N)												
$\bar{H}$, MJ m ⁻²	6,5	8,8	13,6	17,4	22,6	25,1	25,9	22,5	17,1	12,5	7,3	5,6
$\bar{H}_0$, MJ m ⁻²	13,8	19,0	26,2	33,7	39,1	41,3	40,1	35,6	28,7	21,0	14,9	12,3
$\bar{K}_T$	0,47	0,46	0,52	0,52	0,58	0,61	0,64	0,63	0,60	0,60	0,49	0,46
Zagreb ($\varphi=45,82^\circ$, N)												
$\bar{H}$, MJ m ⁻²	3,7	6,5	9,7	14,8	19,3	20,6	21,3	18,7	14	8,3	3,6	2,7
$\bar{H}_0$, MJ m ⁻²	11,6	16,8	24,4	32,6	38,6	41,2	40,0	34,8	27,1	18,9	12,7	10,0
$\bar{K}_T$	0,32	0,39	0,40	0,45	0,50	0,50	0,53	0,54	0,52	0,44	0,28	0,27

Tablica 4.13. Udio raspršenog zračenja $\bar{H}_d/\bar{H}$ u Splitu i Zagrebu dobiven proračunom i usporedens izmjerenim vrijednostima za Zagreb

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

*podaci mjerenja (1974–1980)

4.1.8. Sunčevo zračenje na nagnutu plohu

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

Prema metodi koju su razvili Liu, Jordan i Klein [Li 62, K1 77, Be 77] može se iz podataka o Sunčevu zračenju na horizontalnu plohu (koje mjeri meteoro-

loška služba) izračunati srednja dnevna ozračenost (prosjeak za čitav mjesec) kose plohe za određeni mjesec. Opisat ćemo ukratko taj proračun.

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} R'_b &= \frac{\cos \vartheta_\beta}{\sin \alpha} = \\ &= \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \end{aligned} \quad (4.33)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} R_b &= \\ &= \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \end{aligned} \quad (4.35)$$

gdje je $\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta)$ vremenski kut izlaska (zalaska) Sunca za horizontalnu plohu, $\omega'_s = \min \{ \omega_s, \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg} \delta] \}$ vremenski kut zalaska Sunca

za nagnutu plohu, δ deklinacija Sunca i β nagib površine (kolektora). Srednja vrijednost dobiva se kao aritmetička sredina faktora R_b izračunatog s pomoću izraza (4.35) za svaki dan u mjesecu ili uvrštavanjem mjesečnog prosjeka za δ u izraz (4.35).

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

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

gdje je β kut koji ploha zatvara s horizontom.

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

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

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

Prema tome ukupna ozračenost nagnute plohe jest

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

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

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

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

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

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

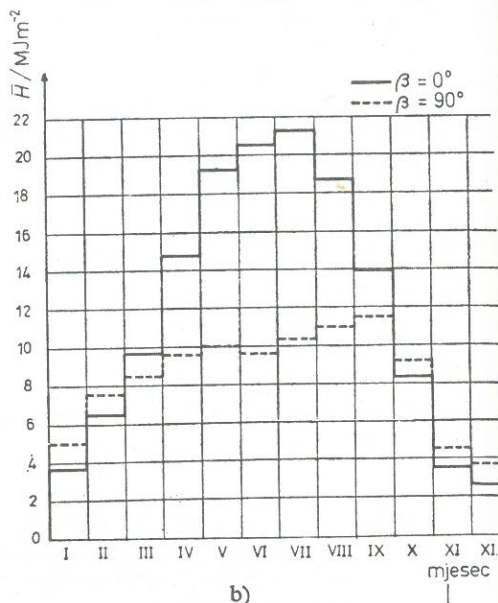
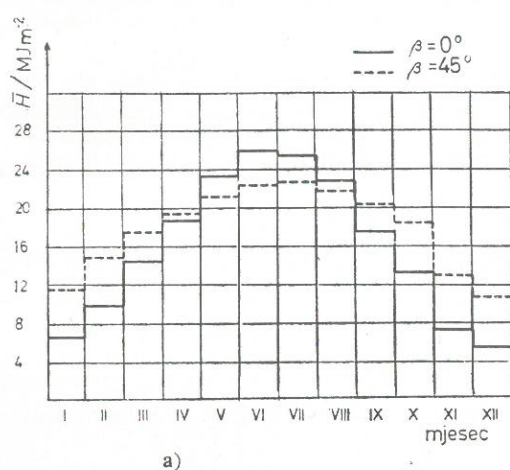
Primjer 2. Koliki je mjesečni prosjek dnevne ozračenosti kolektora nagnutog $\beta = \varphi = 43^\circ 31' N$ u Splitu? Refleksijski faktor (albedo) tla jest $\rho = 0,2$.

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

Tablica 4.15. Ozračenost kolektora u Splitu

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

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



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

Slično se mogu izračunati ozračenosti kolektora i u drugim područjima. Rezultat takvih proračuna za Bar, Beograd i Zagreb prikazani su u tablici 4.16. Pretpostavljeno je da je kolektor okrenut prema jugu i nagnut pod kutom $\varphi = \beta$ odnosno 90° prema horizontali. Ako se umjesto srednje dnevne ozračenosti izračunaju godišnje ozračenosti, dobiva se da je ukupna energija koja godišnje upadne na plohu kolektora $6\,300 \text{ MJ/m}^2$ u Baru, $5\,700 \text{ MJ/m}^2$ u Splitu, $5\,400 \text{ MJ/m}^2$ u Beogradu i $4\,500 \text{ MJ/m}^2$ u Zagrebu.

Slični proračuni objavljeni su u [De80] i [VI81]. U [VI81] izrađene su karte Jugoslavije za srednje dnevne vrijednosti globalnog zračenja na nagnutu južnu plohu ($\beta = 45^\circ$) za svaki mjesec.

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

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

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

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

4.2. Solarni kolektori

4.2.1. Uvod

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

U ovom poglavlju opisat ćemo detaljnije ravne kolektore, a samo ukratko druge vrste. Iznijet ćemo glavne razlike između zračnih kolektora i kolektora s tekućinom. Posebno ćemo opisati izradu apsorbera i njihova selektivna svojstva. Nakon

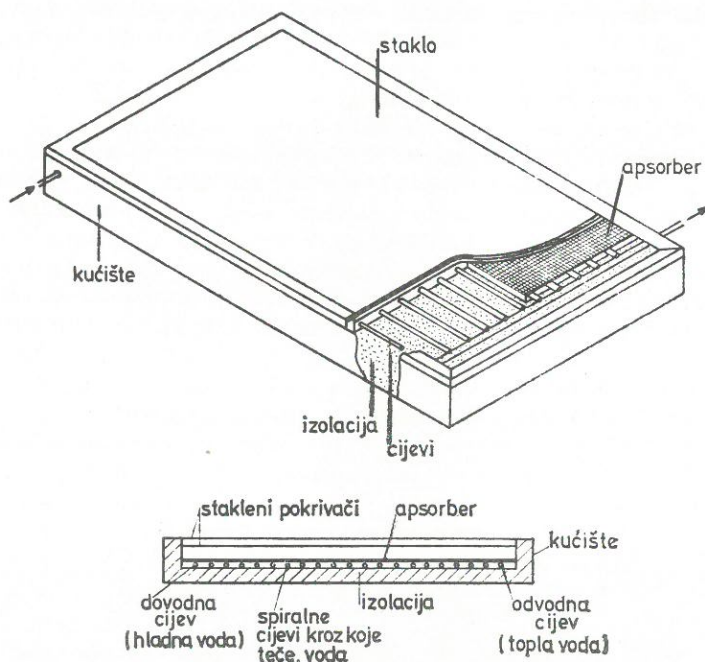
toga obradit ćemo toplinske gubitke ravnog kolektora i njegovu efikasnost, te metode za standardno testiranje kolektora. Sustave s ravnim kolektorima opisat ćemo u četvrtom poglavlju.

4.2.2. Ravni kolektor

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

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

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



Slika 4.17. Skica ravnog kolektora

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

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

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

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

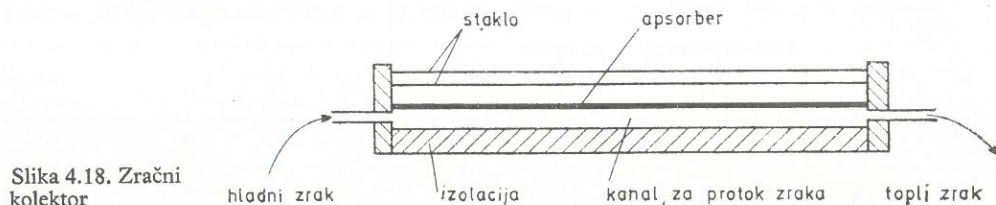
Promatrat ćemo uglavnom ravne kolektore s tekućinom, međutim slično bismo mogli promatrati i zračne kolektore. Obično se u sustavima za grijanje vode (o

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

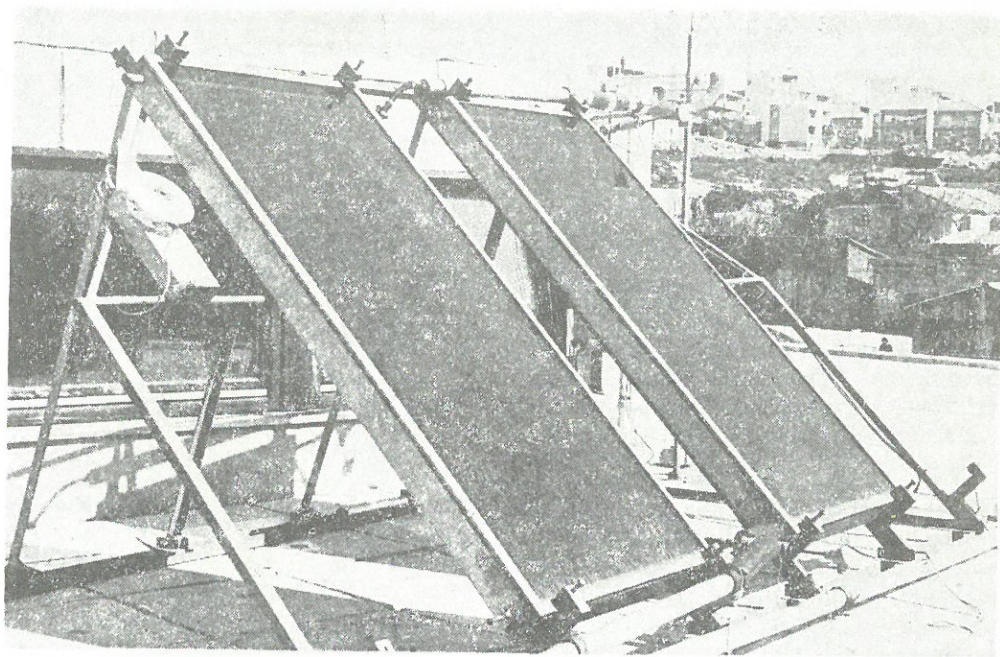
U posljednjih nekoliko godina u našoj zemlji dvadesetak radnih organizacija obavlja istraživanja i pripreme za proizvodnju sunčane (solarne) opreme, osobito sunčanih kolektora [v. npr. Gr 80]. Nekoliko tipova kolektora već se može nabaviti i na tržištu.

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

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



Slika 4.18. Zračni kolektor



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

upotrebljavaju se kolektori s dvostrukim prozorom.

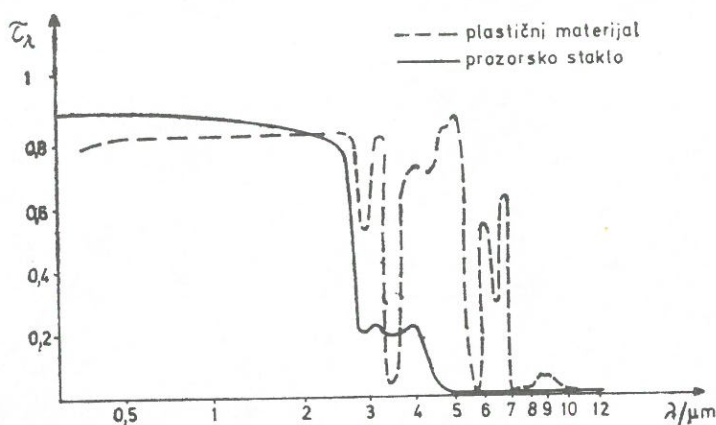
Najprikladniji materijal za prozore jest staklo, a mogu se upotrijebiti i neke vrste plastičnih materijala. Većina kolektora koji se izrađuju u našoj zemlji ima stakleni pokrov, najčešće debljine 3 mm do 5 mm. Obično prozorsko staklo debljine 3 mm očito je najjednostavnije rješenje, međutim, radi smanjenja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

Prozirni materijal za prozore treba imati što veći transmisijski faktor za područje Sunčeva spektra ($0,3 \mu\text{m} < \lambda < 2 \mu\text{m}$), a što manji za toplinsko zračenje koje emitira apsorber (λ veće od oko $2 \mu\text{m}$). Staklo ima upravo takva svojstva: ono je propusno (transmisijski faktor $\tau(\lambda)$ oko 0,9) za gotovo cijeli Sunčev spektar, a nepropusno ($\tau \approx 0$) za infracrveno zračenje. Zbog toga Sun-

čevo zračenje na putu do apsorbera lako prođe kroz stakleni prozor, a infracrveno zračenje koje emitira ugrijani apsorber ne može izići iz kolektora nego se apsorbera i reflektira na staklenom prozoru. To se vidi na slici 4.20. na kojoj je prikazan spektralni transmisijski faktor (pri normalnom upadanju zraka) stakla i plastične folije. Transmisijski faktor stakla u području Sunčeva spektra ($0,3 \mu\text{m} < \lambda < 2 \mu\text{m}$) uglavnom je konstantan, oko 0,8–0,9 (ovisno o vrsti i debljini stakla). U infracrvenom području ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) transmisijski faktor vrlo je malen pa je staklo nepropusno za infracrveno zračenje što povećava efikasnost kolektora sa staklenim prozorom. Za razliku od stakla, plastična folija (spektralni transmisijski faktor za jednu takvu foliju također je prikazan na slici 4.20), obično nema tako dobra optička svojstva i njezin infracrveni transmisijski faktor mijenja se ovisno o valnoj duljini. Slična svojstva imaju i neki drugi plastični materijali.

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

Slika 4.20. Ovisnost faktora transmisije (transmitancije) o valnoj dužini za staklo i plastično foliju



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

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

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

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

$$\rho_{||} = \frac{\operatorname{tg}^2(u-l)}{\operatorname{tg}^2(u+l)}. \quad (4.41)$$

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

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

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

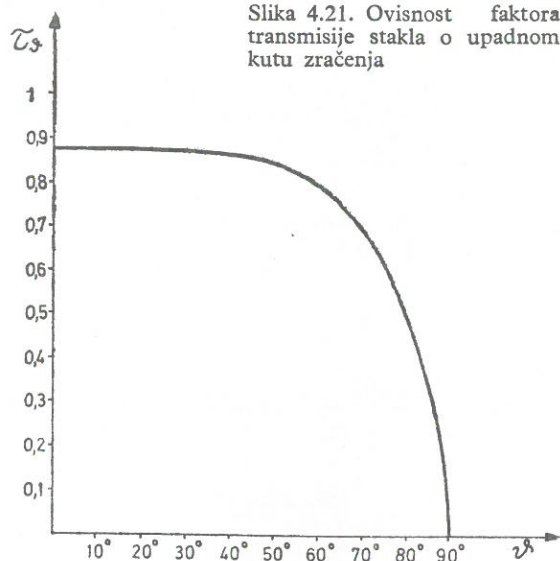
$$\rho = \frac{1}{2} \rho_{||} + \frac{1}{2} \rho_{\perp} = \frac{\operatorname{tg}^2(u-l)}{2\operatorname{tg}^2(u+l)} + \frac{\sin^2(u-l)}{2\sin^2(u+l)}. \quad (4.43)$$

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

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

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

Slika 4.21. Ovisnost faktora transmisije stakla o upadnom kutu zračenja



dvostrukog prozora umnožak je transmisijskih faktora za svaki prozor.

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

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

Apsorber je najlakše napraviti tako da se metalna ploča (npr. željezna, bakrena ili aluminijska premaže odgovarajućom crnom bojom. S druge strane ploče nalaze se bakrene cijevi kroz koje struji voda i prenosi toplinu iz kolektora; toplinski kontakt između cijevi i ploče treba biti što bolji da bi se prijenos topline ostvario što lakše i brže. Postoji nekoliko rješenja za izradu apsorberske ploče i

detalji o tome mogu se naći u literaturi [v. npr. Sa 78, Lö 81]. Crni lak za premaz ploče apsorbera mora biti otporan na više temperature i dugog trajanja. Na tržištu se mogu nabaviti različiti lakovi za apsorbere.

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

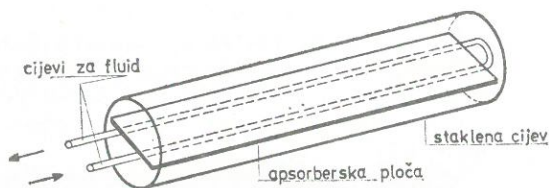
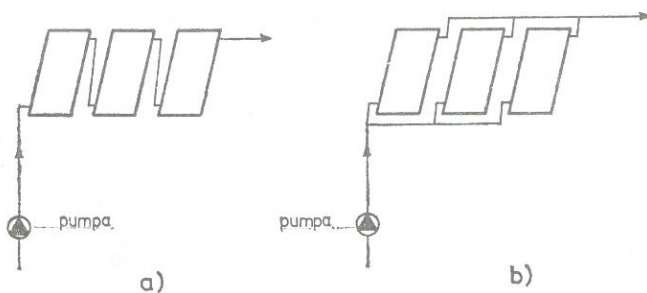
Prijenos topline iz apsorbera ovisi o izradi kolektora, vrsti i brzini strujanja radnog fluida. Tipična je brzina strujanja u kolektorima s tekućinom 0,01–0,03 L/s, a u zračnim kolektorima 10–20 L/s po četvornom metru kolektora.

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

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

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

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



Slika 4.23. Vakuumski cijevni kolektor

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

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

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

Ravni kolektori uglavnom se upotrebljavaju u sustavima za zagrijavanje vode za domaćinstvo, grijanje stanova i klimatizaciju. Obično se instaliraju na krov zgrade okrenuti prema jugu i nagnuti prema horizontali. Ravni kolektori, apsorbiraju osim izravnoga i raspršeno zračenje te je za njihov rad bitno ukupno zračenje koje upada na njihovu površinu. Kut nagiba kolektora prema horizontali potrebno je izabrati tako da kolektor bude najefikasniji u onom dijelu godine kad je najpotrebnija energija koju kolektor daje. Obično se u našim zemljopisnim širinama odabire na-

gib kolektora 40° do 45° i tako čini kompromis kojim se postiže da od proljeća do jeseni kolektor prima Sunčevo svjetlo prosječno 7 do 8 sati dnevno. Želimo li da kolektor bude najefikasniji zimi, a manje ljeti, trebamo ga postaviti strmije. Čak i okomito postavljen kolektor (npr. na južni zid zgrade) može zimi dobro djelovati. Ipak je najbolje prema zadanim uvjetima proračunati optimalan nagib kolektora.

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

4.2.3. Selektivni apsorberi

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

od približno $2\text{ }\mu\text{m}$ do oko $30\text{ }\mu\text{m}$ (širina i oblik spektra ovisi o temperaturi tijela).

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

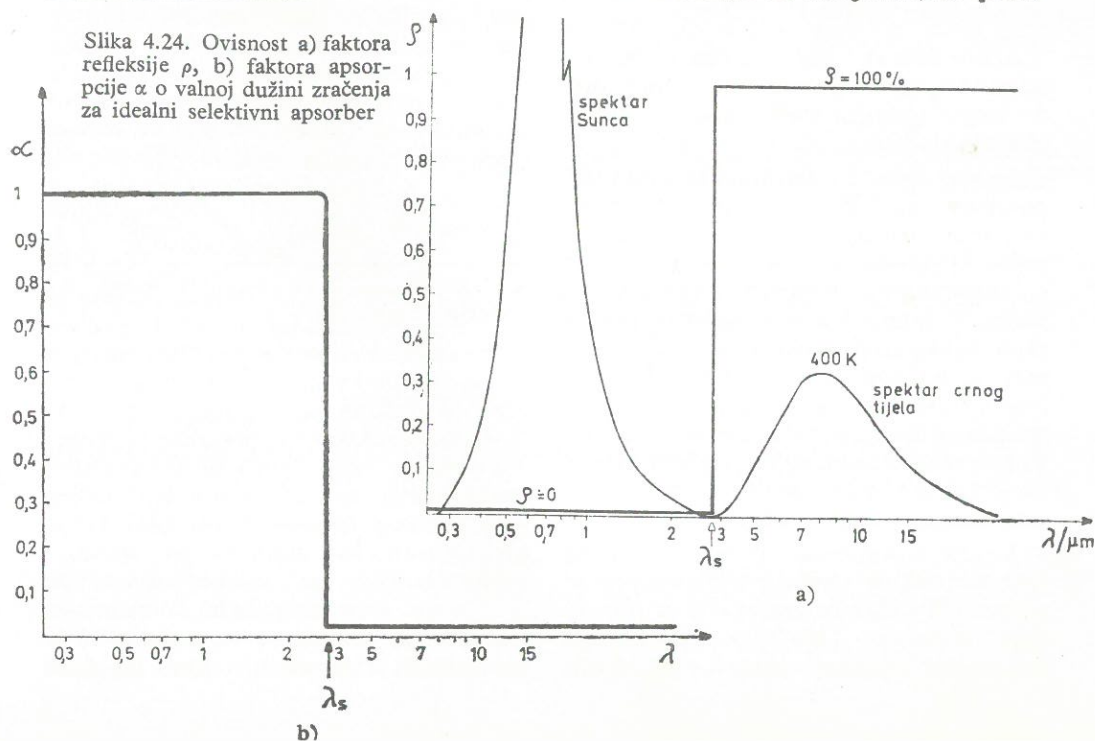
Optička svojstva apsorbera (koja se izražavaju s pomoću apsorpcijskog i transmisijskog faktora) jako utječu na rad i efikasnost kolektora. Idealni selektivni apsorber trebao bi gotovo potpuno apsorbirati upadno Sunčevo zračenje, a minimalno emitirati toplinsko (infracrveno) zračenje. Poželjno je, dakle,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

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

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

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

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



polarnih koordinata u poluprostoru od 2π steradiana.

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

Integralne vrijednosti tih faktora dobiju se s pomoću izraza

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

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

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

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

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

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

Solarni apsorpcijski faktor α i toplinski emisijski faktor ϵ neke površine može se odrediti ili izravnim mjerenjem ili posrednom metodom [Me 76]. Izravnim se mjerenjem kalorimetrijskim uređajem od-

ređuje integralni hemisferni apsorpcijski faktor odnosno emisijski faktor, a posrednom se metodom mjeri spektralni refleksijski faktor s pomoću spektrofotometra, a iz njega se izračunava apsorpcijski faktor α i emisijski faktor ϵ .

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

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

i Kirchhoffov zakon

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

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

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

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

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

i tada izabrati najbolje i najekonomičnije rješenje.

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

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

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

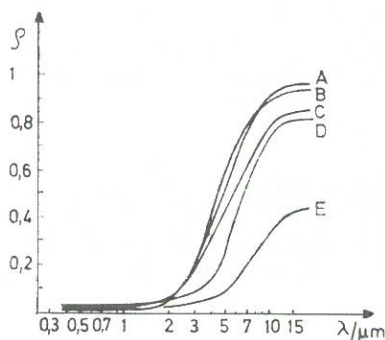
Na slici 4.25. prikazan je spektralni refleksijski faktor za uzorke „crnog kroma“ koji su dobiveni pri raznim uvjetima elektrolize na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu [Vu 81]. Vrlo male promjene u procesu proizvodnje mogu bitno utjecati na selektiv-

Tablica 4.17. Svojstva nekih apsorpcijskih površina

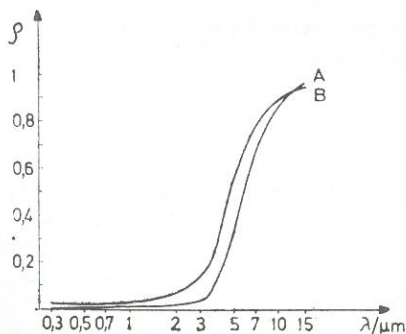
Površina	apsorpcijski faktor α	emisijski faktor ϵ	omjer selektivnosti α/ϵ
neselektivna crna boja	0,9	0,9	1
čada	0,95	0,95	1
crni nikal	0,9	0,12	7,5
crni krom	0,95	0,15	6,3
crni bakar	0,89	0,1	8,9
željezo-oksida	0,8	0,1	8

nost uzorka što otežava proizvodnju takvih apsorbera.

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



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



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

4.2.4. Toplinski gubici ravnog kolektora

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

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

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

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

A_c je površina apsorbera, k je koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka kolektora,

T_a je temperatura apsorberske ploče, T_z je temperatura okolnog zraka.

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

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

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

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

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

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

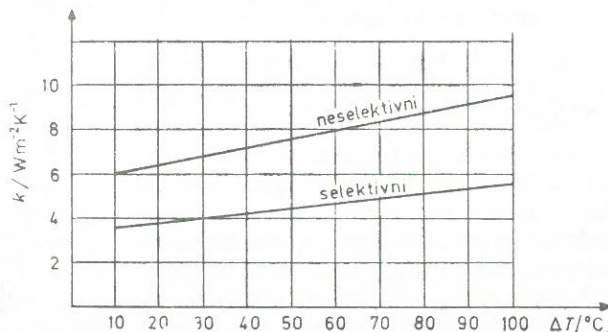
Na slici 4.28. prikazan je spoj toplinskih otpora za ravni kolektor s jednostrukim prozorom.

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

Gustoća toplinskog toka kroz stražnju stranu kolektora može se izraziti

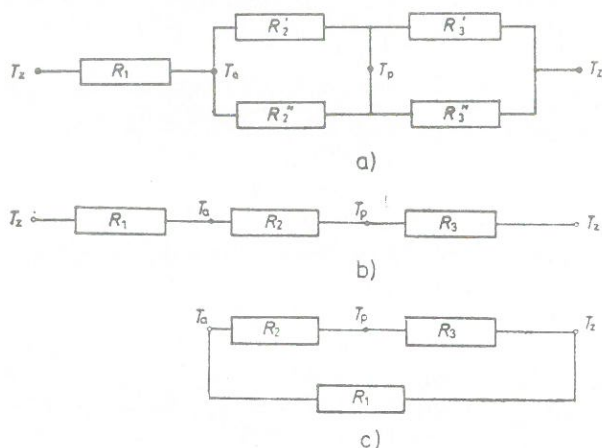
$$q_1 = \frac{\lambda}{d_1} \Delta T = k_1 \Delta T = \frac{\Delta T}{A_c k_1}. \quad (4.52)$$

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



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

Slika 4.28. Termička shema ravnog kolektora



k_1 koeficijent toplinskih gubitaka vođenjem,

A_e površina kolektora i

$$R_1 = \frac{d_1}{A_e \lambda} = \frac{1}{k_1 A_e} \text{ toplinski otpor}$$

stražnje strane kolektora.

Za dobro izolirani kolektor ti su gubici maleni, oko 10% – 15% od ukupnih toplinskih gubitaka. Tako npr. za izolacijski sloj debljine 10 cm staklene vune ($\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$), koeficijent toplinskih gubitaka $k_1 \approx 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Gubici kroz bočne strane kolektora obično su za red veličine manji (osobito za kvalitetne kolektore većih površina s dobrom bočnom izolacijom) i mogu se zanemariti.

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

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

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

gdje je $\Delta T_2 = T_a - T_p$ razlika temperature između apsorbera i prozora, $\Delta T_3 = T_p -$

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

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

odnosno

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

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

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

Odgovarajući koeficijent prijenosa topline k_2 jednak je

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

gdje je k_2' koeficijent konvekcije u zraku između apsorbera i stakla, k_2'' koeficijent prijenosa topline zračenjem iz apsorbera prema prozoru $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Stefan-Boltzmannova konstanta, T_a temperatura apsorbera, T_p temperatura prozora, a ϵ_a i ϵ_p emisijski faktori apsorbera odnosno prozora.

Koeficijent toplinskih gubitaka konvekcijom između apsorbera i prozora k'_2 ovisi o razlici temperature apsorbera i prozora i o njihovom razmaku d te se može izračunati s pomoću empiričkih izraza koji se mogu naći u literaturi [npr. u Du 74, Kr 78]

$$\frac{k'_2}{\text{W}/(\text{m}^2\text{K})} = \left[1 - 0,0018 \left(\frac{T_a + T_p}{2} - 283 \right) \right] \frac{0,826 (T_a - T_p)^{0,31}}{d^{0,07}} \quad (4.58)$$

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

Iz prozora toplina se gubi također zračenjem i konvekcijom. Za te gubitke bitna je brzina vjetra jer vjetar povećava konvekciju. Toplinski otpor R_3 paralelan je spoj toplinskog otpora konvekcije R'_3 i zračenja R''_3 ($1/R_3 = 1/R'_3 + 1/R''_3$), odnosno koeficijent prijenosa topline jest

$$k_3 = k'_3 + k''_3 = k'_3 + \sigma \epsilon_p (T_p^2 + T_z^2) (T_p + T_z). \quad (4.59)$$

Koeficijent konvekcije k'_3 može se također izračunati iz brzine vjetra v_v s pomoću empiričke relacije [v. npr. Du 74]

$$\frac{k'_3}{\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}} = 5,7 + 3,8 \frac{v_v}{\text{ms}^{-1}}. \quad (4.60)$$

Dakle, ukupni toplinski otpor kolektora R prema okolini jest

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

a ukupni koeficijent toplinskih gubitaka

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

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

Gore navedeni proračuni daju za kolektor bez pokrova pri brzini vjetra 5 m/s koeficijent toplinskih gubitaka konvekcijom $k'_2 = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Ako je koeficijent toplinskih gubitaka zbog zračenja $k''_2 = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, ukupni je koeficijent $k_2 = 31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Prekrijemo li apsorber staklenim prozorom, tipične su vrijednosti

$$\begin{aligned} k'_2 &= 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}), \\ k''_2 &= 7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}), \\ k'_3 &= 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ i} \\ k''_3 &= 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

te je ukupni koeficijent gubitaka za prednju stranu

$$k_p = 7,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}).$$

Pretpostavimo li da je sa stražnje strane $k_1 = 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, ukupni je koeficijent toplinskih gubitaka za takav (neselektivni) kolektor $k = k_1 + k_p =$

$= 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; to je tipična vrijednost za neselektivni kolektor s jednostrukim prozorom.

Za kolektor s dvostrukim prozorom ukupni je koeficijent toplinskih gubitaka $k = 4,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Za selektivni kolektor zbog malenog faktora emisije koeficijent toplinskih gubitaka zračenjem iz apsorbera mnogo je manji ($k''_2 = 3 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$) te je i ukupna vrijednost k manja, od 4 do 5 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Još se više mogu smanjiti toplinski gubici uklanjanjem zraka iz kolektora ($k'_2 = 0$). Koeficijent toplinskih gubitaka vakuumskih cijevnih kolektora jeste oko 2 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. (Pri proračunima toplinskih gubitaka korišteni su podaci: $\epsilon_p = 0,88$, $\epsilon_a = 0,95$ za neselektivni i $\epsilon_a = 0,2$ za selektivni, $d = 0,025 \text{ m}$, $v_v = 5 \text{ m/s}$, $\lambda_1 = 0,04 \text{ W}/\text{mK}$ i $d_1 = 0,05 \text{ m}$).

4.2.5. Efikasnost kolektora

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

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{dQ_a}{dt} - \frac{dQ_g}{dt}. \quad (4.63)$$

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

Q_a apsorbirana energija, a

Q_g energija koja se izgubi u okolicu.

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

Snaga koju apsorbira kolektor jednaka je

$$\frac{dQ_a}{dt} = \tau \alpha G A_c. \quad (4.64)$$

α je sunčani apsorpcijski faktor apsorberske ploče,

τ sunčani transmisijski faktor prozora kolektora,

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

A_c površina apsorbera kolektora (m^2).

Toplinski gubici (toplinski tok) kolektora mogu se prikazati jednadžbom

$$\frac{dQ_g}{dt} = k A_c (T_a - T_z). \quad (4.65)$$

T_a je srednja temperatura apsorbera ($^{\circ}C$),

T_z je temperatura okolnog zraka ($^{\circ}C$) i

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

$$\frac{dQ_k}{dt} = A_c [\tau \alpha G - k(T_a - T_z)]. \quad (4.66)$$

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

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

Temperaturu apsorbera T_a teško je mjeriti pa se jednadžba (4.67) obično upotrebljava u malo drukčijem obliku. Koristi se ili temperatura fluida na ulazu u kolektor T_u ili srednja temperatura fluida u kolektoru $\bar{T}_f = (T_u + T_{iz})/2$,

pa jednadžba ravnog kolektora glasi [v. npr. Du 74, Lu 80]

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

odnosno

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

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

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

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

gdje je $\dot{m} = dm/dt$ protok fluida (kg/s), c specifični toplinski kapacitet ($J/kg K$), A_c površina kolektora (m^2), k koeficijent toplinskih gubitaka (W/m^2K), a F' geometrijski faktor ovisan o izradi kolektora.

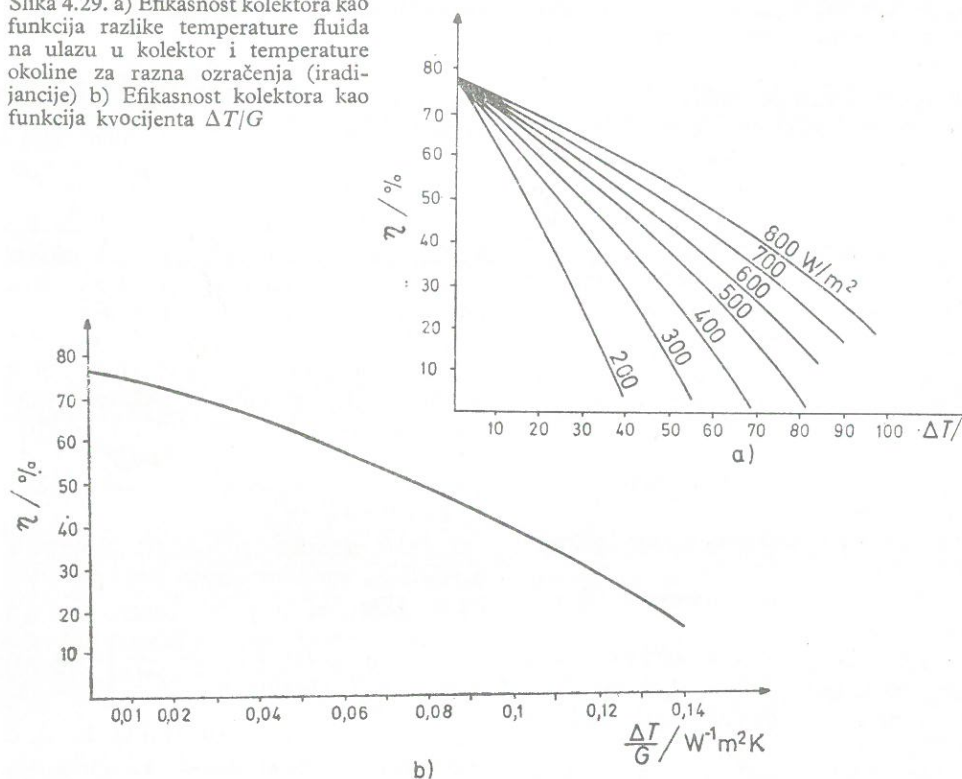
Faktor F_R uvijek je manji od jedan; bio bi jednak jedan ako bi T_u bilo jednako T_a , što se tehnički ne može postignuti. Obično je T_a veće od T_u i ta razlika sve je veća što je protok fluida sporiji. Tipične vrijednosti tog faktora za kolektor s vodom jesu oko 0,8–0,9 te za zračni kolektor oko 0,7.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

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

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

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

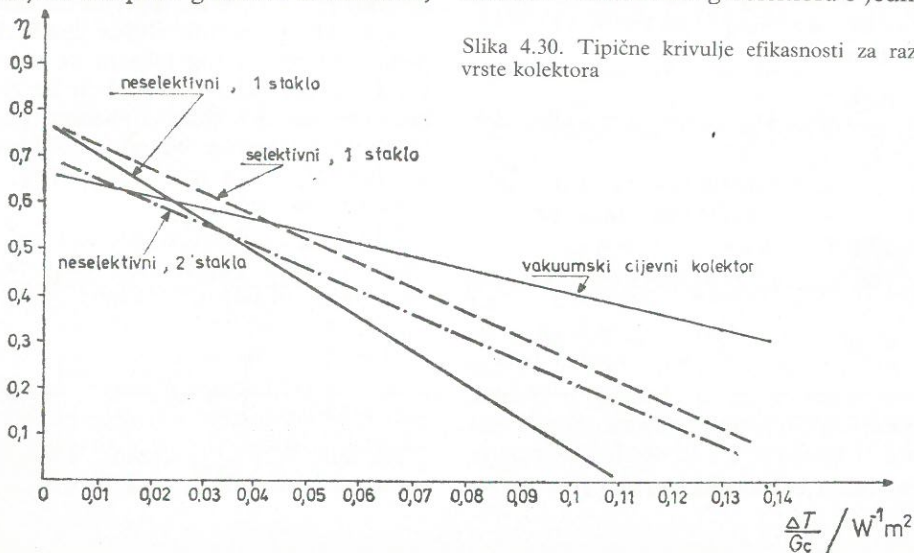
Slika 4.29. a) Efikasnost kolektora kao funkcija razlike temperature fluida na ulazu u kolektor i temperature okoline za razna ozračenja (iradijancije) b) Efikasnost kolektora kao funkcija kvocijenta $\Delta T/G$



nostrukim prozorom kao funkcija razlike temperature $\Delta T = T_u - T_z$ za razna sunčana ozračenja (iradijancije). Da bi se efikasnost umjesto skupom krivulja prikazala jednom krivuljom, prikazuje se η kao funkcija $\Delta T/G$ (sl. 4.29.b). Ako je koeficijent ukupnih gubitaka konstantan,

ta je krivulja pravac kojemu odrezak na ordinati daje $F_R(\tau\alpha)$, a nagib mu je $-F_Rk$. Za kolektor kojemu je efikasnost prikazana na slici 4.29. $F_R\tau\alpha = 0,76$ i $F_Rk = 0,64 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

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



Slika 4.30. Tipične krivulje efikasnosti za razne vrste kolektora

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

Krivulje efikasnosti kolektora načinjene su za stacionarne uvjete i prema njima se ne može izravno vidjeti koliki će biti solarni doprinos tog kolektora u nekom sustavu. One služe za procjenjivanje kvalitete kolektora, za dobivanje podataka o najvažnijim parametrima određenim izradom kolektora te za uspoređivanje kolektora. Rad sunčanog sustava potrebno je proračunati za svaki konkretni slučaj, a te proračune opisat ćemo u poglavlju 4.4. Zasad spomenimo da je pri našim kontinentalnim uvjetima (npr. u Zagrebu) u sustavu za dobivanje tople vode od 6 m^2 kolektora, efikasnost selektivnog kolektora oko 30% zimi, do 45% ljeti, a neselektivnoga za oko 25% manja (od 20% do 35%).

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

$$\eta = \frac{\int_0^t q \, dt}{\int_0^t G \, dt} \quad (4.72)$$

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

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

gdje je H ukupna sunčana ozračenost (iradijacija) plohe kolektora (J/m^2), $\overline{\tau\alpha}$ efektivni produkt $\tau\alpha$, $\overline{T}_u$ srednja temperatura fluida na ulazu u kolektor i $\overline{T}_z$ srednja temperatura zraka u tom razdoblju.

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

$$\overline{\tau\alpha} = K_g (\tau\alpha)_n \quad (4.74)$$

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

Primjer 1. Kolika je satna i dnevna efikasnost kolektora površine 6 m^2 instaliranog u Zagrebu za jedan dan u prosincu? Srednja sunčana ozračenja kolektorske ploče i temperature zraka za svaki sat navedene su u tablici 4.18. Koeficijent toplinskih gubitaka kolektora jest $k=5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, efektivni produkt $\overline{\tau\alpha}=0,86$, faktor prijenosa topline $F_R=0,86$. Temperatura vode na ulazu u kolektor jest stalno 30°C .

Tablica 4.18. Temperature zraka i ozračenja kolektora

Vrijeme/h	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16
$G_c/(W/m^2)$	48	135	210	245	255	220	145	55
$T_z/^\circ C$	0	1	1,5	2	2,5	3	3	2,5

Dobivenu toplinu za svaki sat možemo izračunati s pomoću izraza

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

a efikasnost s pomoću

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

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

Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.19.

Tablica 4.19. Rezultati proračuna efikasnosti za primjer 1.

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

Dnevna efikasnost jest

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

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

Tablica 4.20. Temperature zraka i ozračenosti horizontalne plohe

Sat	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17
$H/(MJ \text{ m}^{-2})$	—	0,25	0,68	1,01	1,13	1,24	1,04	0,72	0,4	—
$t/^\circ C$	5,5	6	6,5	7	8,3	9,4	9,8	9,4	8,6	8,5

Dobivena toplina jest

$$Q = A F_R [(\overline{\tau\alpha}) H_c - k (T_u - T_z)]$$

(4.75)

a efikasnost je kolektora

$$\eta = \frac{Q}{A_c H_c} = F_R (\tau\alpha) - F_R k \frac{T_u - T_z}{H_c} \quad (4.76)$$

Da bismo izračunali te veličine, potrebno je najprije izračunati ozračenost (iradijaciju) H_c kolektorske plohe iz zadane ozračenosti H horizontalne plohe.

Ukupna ozračenost kolektora zbroj je izravne, raspršene i odbijene ozračenosti

$$H_\beta = H_{\beta b} + H_{\beta d} + H_{\beta r}.$$

Izravna satna ozračenost kolektora može se izračunati iz izravne horizontalne iradijacije (vidi poglavlje 4.1.8) s pomoću izraza

$$\begin{aligned} H_{\beta b} &= H_b \cdot R_b = \\ &= H_b \frac{\sin(\varphi - \beta) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega}{\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega}. \end{aligned}$$

φ je zemljopisna širina ($43,52^\circ$),

β nagib kolektora (45°)

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left(\frac{284 + 15}{365} \right) = 21,27^\circ \text{ deklinacija Sunca u Splitu 15. I,}$$

ω sati kut Sunca $7,5^\circ$, $22,5^\circ$, $37,5^\circ$ i $52,5^\circ$.

Budući da je raspršena ozračenost kolektora jednaka

$$H_{\beta d} = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) H_d,$$

a odbijena komponenta

$$H_{\beta r} = \frac{1 - \cos \beta}{2} H,$$

ukupna je ozračenost kolektora

$$H_\beta = H_b R_b + H_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + H_r \frac{1 - \cos \beta}{2}.$$

Uvrštavajući zadane podatke u izraze (4,75), (4,76) i (4,77) možemo za svaki sat izračunati dobivenu toplinu i efikasnost kolektora.

Tablica 4.21. Rezultati za primjer 2.

Sat	T_z °C	H MJ/m ²	R_b	H_β MJ/m ²	$(\tau\alpha)_{\text{ef}} H_\beta$ MJ/m ²	$k(T_u - T_z)$ MJ/m ²	Q/A MJ/m ²	Q MJ	η
8-9	6	0,25	3,57	0,6	0,5	0,69	—	—	—
9-10	6,5	0,68	2,6	1,26	1,05	0,68	0,3	1,2	0,28
10-11	7	1,01	2,32	1,71	1,45	0,67	0,64	2,56	0,37
11-12	8,2	1,13	2,07	1,76	1,5	0,65	0,7	2,8	0,40
12-13	9,4	1,24	2,07	1,93	1,64	0,63	0,83	3,3	0,43
13-14	9,8	1,04	2,32	1,76	1,5	0,62	0,72	2,88	0,41
14-15	9,4	0,72	2,6	1,33	1,1	0,63	0,38	1,52	0,28
15-16	8,6	0,4	3,57	0,94	0,78	0,64	0,11	0,44	0,12

Rezultati su prikazani u tablici 4.21.

Ukupna dnevna ozračenost jest $11,3 \text{ MJ/m}^2$, ukupna dobivena toplina $14,7 \text{ MJ}$, pa je dnevna efikasnost kolektora

$$\eta_d = \frac{14,7 \text{ MJ}}{4 \text{ m}^2 \cdot 11,3 \text{ MJ m}^{-2}} = 33\%.$$

Trenutna efikasnost kolektora (v. poglavlje 4.2.5) definirana je izrazom

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{A_c G_c} \quad (4.78)$$

gdje je $\dot{Q}_k = \frac{d\dot{Q}_k}{dt}$ toplinski tok koji iz kolektora (apsorbera) pređe u radni fluid, A_c površina kolektora (apsorbera) i G_c ukupno sunčano ozračenje plohe kolektora.

Toplinski tok računamo s pomoću izraza

$$\dot{Q}_k = \frac{dm}{dt} c_p (T_{iz} - T_u) \quad (4.79)$$

tako da mjerimo brzinu protoka fluida, dm/dt i temperaturu fluida T_u na ulazu i T_{iz} na izlazu kolektora. (c_p specifični je toplinski kapacitet radnog fluida, npr. za vodu $c_p = 4187 \text{ J/(kgK)}$.)

Mjerenje efikasnosti treba obavljati u stacionarnim uvjetima, tj. pri konstantnim uvjetima rada ($G_c = \text{konst.}$, $T_u = \text{konst.}$, $\frac{dm}{dt} = \text{konst.}$, kut upada Sun-

čevih zraka do oko 30°). Budući da mjerenje efikasnosti traje oko 10 do 20 min, teško je postignuti sasvim stacionarne uvjete u cijelom tom intervalu jer će se neki od parametara, uz sva naša nastojanja, barem malo mijenjati; zato kažemo da se kolektori testiraju u kvazistacionarnim uvjetima i dobivenu efikasnost nazivamo „trenutnom” označujući je navodnim znakovima. Određivanje „trenutne” efikasnosti obavlja se tako da za određeni G_c i T_u (odnosno $\Delta T = T_u - T_z$) mjerimo $\dot{Q}$ odnosno izračunavamo η , zatim mijenjamo ili G_c ili ΔT i tako dobivamo efikasnost za dovoljan broj (petnaestak) radnih točaka. Ukupno ozračenje kolektorske plohe G_c mjerimo piranometrom, temperature se mogu mjeriti baždarenim otpornim termometrima. Mjerenje protoka može se odrediti vaganjem. Osim navedenih veličina potrebno je mjeriti temperaturu okolnog zraka (T_z) i brzinu vjetra v_v .

Koristeći Hottel-Whillerovu jednadžbu (4.68), trenutna efikasnost može se prikazati u obliku

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R k \frac{\bar{T}_u - T_z}{G_c} \quad (4.80)$$

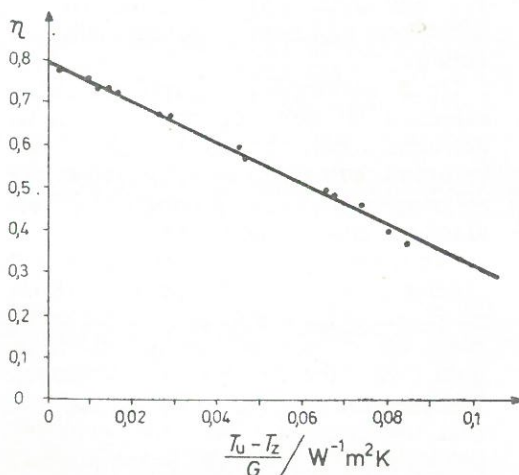
ili uvođenjem tzv. srednje temperature fluida $\left(\bar{T}_f = \frac{T_u + T_{iz}}{2} \right)$

$$\eta = F'_R (\tau\alpha) - F'_R k \frac{T_f - T_z}{G_c} \quad (4.81)$$

gdje su F_R i F'_R faktori prijenosa topline iz kolektora u fluid, $(\tau\alpha)$ efektivni produkt transmisijskog i apsorpcijskog faktora, k ukupni koeficijent toplinskih gubitaka, T_z temperatura okolnog zraka.

Obično se rezultati mjerenja „trenutne” efikasnosti prikazuju grafički dijagramom kojemu je os ordinata trenutna efikasnost

η , a os apscisa $\frac{\Delta T}{G}$, gdje je ΔT ili $T_u - T_z$ ili $T_f - T_z$, što je potrebno eksplicite naglasiti. Jedna takva krivulja efikasnosti prikazana je na slici 4.32. Za ravni kolektor efikasnost je približno linearna i može se aproksimirati pravcem koji se



Slika 4.32. Tipični rezultati testiranja ravnog kolektora

metodom najmanjih kvadrata provuče kroz eksperimentalne točke. Jednadžba tog pravca može se npr. pisati u obliku

$$\eta = \eta_0 - k_{ef} \frac{T_u - T_z}{G_c} \quad (4.82)$$

gdje je η_0 tzv. optička efikasnost za $T_u = T_z$, a k_{ef} efektivni koeficijent toplinskih gubitaka. Testiranjem se, dakle, dobivaju dva važna parametra kolektora

$$\eta_0 = F_r (\alpha\tau)_n \quad i \quad k_{ef} = F_R k. \quad (4.83)$$

Ukupni koeficijent toplinskih gubitaka k , za koji smo pretpostavili da je konstantan, zapravo je funkcija ΔT , te efikasnost uistinu nije linearna nego kvadratična funkcija, tako da se katkad umjesto pravca kroz točke na slici 4.32. metodom najmanjih kvadrata provlači parabola

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{\Delta T}{G_c} - a_2 \left(\frac{\Delta T}{G_c} \right)^2 \quad (4.84)$$

pa se efikasnost kolektora umjesto s pomoću dva određuje s pomoću tri parametra η_0 , a_1 i a_2 .

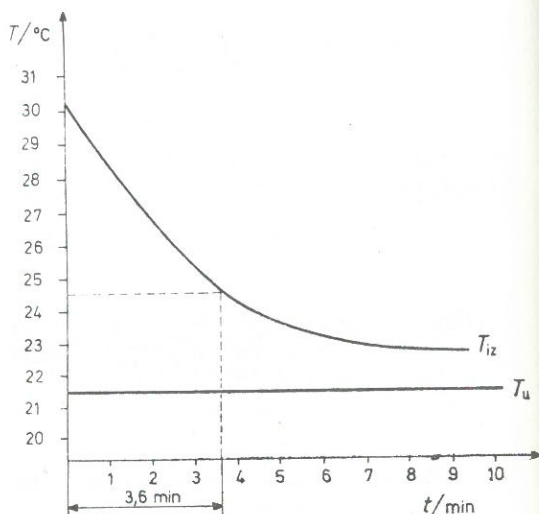
Kad se prikazuju rezultati mjerenja trenutne efikasnosti kolektora, potrebno je uz dijagram navesti upotrebljenu metodu i uvjete testiranja $\left(\frac{dm}{dt}, T_z, G_c, \text{brzinu vjetra i sl.} \right)$ te dati jednadžbu efikasnosti u linearnom ili paraboličnom obliku.

Da bi se moglo promatrati ponašanje kolektora u nestacioniranim uvjetima, potrebno je poznavati njegovu vremensku konstantu koja pokazuje kako brzo kolektor reagira na naglu promjenu zračenja ili temperature ulaznog fluida.

Vremenska konstanta definira se kao vrijeme potrebno da temperatura fluida na izlazu kolektora opadne za određeni iznos ako se zračenje naglo smanji na nulu (npr. tako da se zakloni kolektor). Temperatura ulaznog fluida pri tome se drži konstantnom i približno jednakom temperaturi okolice. Ako je temperatura na ulazu kolektora T_u , a na izlazu kolektora T_{i2} , u trenutku kad zaklonimo kolektor, tada se vremenska konstanta

definira kao vrijeme potrebno da temperatura na izlazu kolektora padne na vrijednost T_{i2} određenu jednadžbom

$$\frac{T_{i2} - T_u}{T_{i1} - T_u} = \frac{1}{e} = 0,368. \quad (4.85)$$



Slika 4.33. Vremenska konstanta kolektora

Na slici 4.33. prikazani su rezultati mjerenja vremenske konstante jednog vodenog kolektora. Tipične vrijednosti vremenske konstante jesu nekoliko minuta za kolektore s tekućinom, odnosno 10 do 15 minuta za zračne kolektore.

Faktor upadnog kuta definira ovisnost „trenutne” efikasnosti η o upadnom kutu ϑ Sunčevih zraka. Faktor upadnog kuta eksperimentalno se može odrediti mjerenjem „trenutne” efikasnosti pri različitim upadnim kutovima Sunčevih zraka [As 77]. Ako je u toku mjerenja temperatura ulaznog fluida T_u jednaka temperaturi zraka T_z , „trenutna” efikasnost bit će

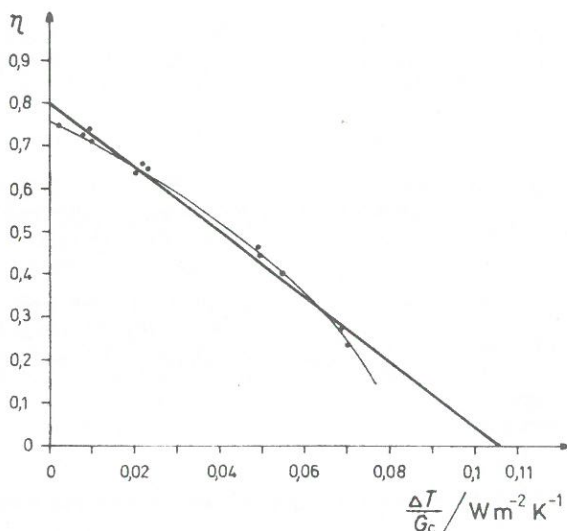
$$\eta = K_{\tau u} F_R (\tau\alpha) = K_{\tau u} \eta_0 \quad (4.86)$$

Mjerenjem „trenutne” efikasnosti pri različitim upadnim kutovima uz prethodno određenu optičku efikasnost kolektora određuje se ovisnost faktora upadnog kuta $K_{\tau u}$ o upadnom kutu Sunčevih zraka ϑ .

Obično se efikasnost prikazuje kao funkcija $\frac{\Delta T}{G_c} = \frac{T_{iz} - T_u}{G_c}$ u obliku

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{\Delta T}{G_c} - a_2 \left(\frac{\Delta T}{G_c} \right)^2$$

gdje je $\eta_0 = F_R (\tau\alpha)_n$.



Slika 4.35. Krivulja efikasnosti za zadani kolektor

Na slici 4.35. koja se dobiva s pomoću izračunatih vrijednosti iz tablice 4.23. nacrtana je parabola kroz eksperimentalne točke. Jednadžba te parabole jest

$$\eta = 0,77 - 4,79 \frac{\Delta T}{G_c} - 35,7 \left(\frac{\Delta T}{G_c} \right)^2$$

te je

$$\eta_0 = F_R (\tau\alpha)_n = 0,77.$$

Ako ovisnost efikasnosti o $\Delta T/G_c$, umjesto parabolom, aproksimiramo pravcem povučnim metodom najmanjih kvadrata kroz eksperimentalne točke, dobivamo

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n - k \frac{\Delta T}{G_c} = 0,8 - 7,6 \frac{\Delta T}{G_c}$$

$$F_R (\tau\alpha)_n = 0,8$$

$$F_R k = 7,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

4.2.7. Koncentrirajući kolektori

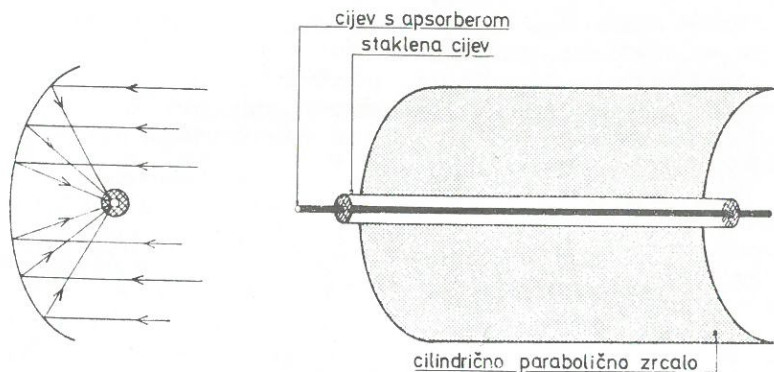
Ravnim kolektorom mogu se dobiti temperature do oko 100 °C, što ograničuje njihovu primjenu samo za niskotemperaturne sustave (npr. grijanje prostorija i vode). Više radne temperature dobivaju

se koncentrirajućim kolektorima koji s pomoću zrcala ili leća fokusiraju Sunčevo zračenje i tako povećavaju ozračenost (iradijaciju) apsorbirajuće površine. Za razliku od ravnih, koncentrirajućih kolektori koriste samo izravno Sunčevo zračenje i zbog toga trebaju složeni sustav za praćenje Sunca. Mana im je

da za vrijeme naoblake nisu upotrebljivi. Uglavnom se upotrebljavaju pri pretvaranju topline u mehanički rad jer su za tu pretvorbu potrebne visoke temperature koje ravni kolektori ne mogu proizvesti.

Postoje razne izvedbe koncentrirajućih kolektora. Oni mogu koncentrirati zra-

čenje ili u točku ili na dio pravca, tj. fokus im može biti točkast ili linearan. Posebna vrsta koncentrirajućeg sustava jest polje ravnih zrcala (heliostata) koja prate Sunce i reflektiraju izravno Sunčevo zračenje na prijemnik na vrhu tornja (v. poglavlje 4.5.4).



Slika 4.36. Parabolični kolektor

Na slici 4.36. prikazan je parabolični kolektor koji se sastoji od cilindričnog paraboličnog zrcala u fokusu kojeg je apsorberska cijev kroz koju protječe radni fluid za odvođenje topline.

Koncentrirajući kolektori primaju suncanu energiju velikom površinom i koncentriraju je na malu površinu. Pri tome je važan omjer koncentriranja R , tj. omjer između površine otvora kolektora koji prima Sunčevo zračenje i površine apsorbera koja prima koncentrirano zračenje. Taj omjer za ravni kolektor jest, naravno, jedan, a za koncentrirajuće kolektore može biti od 2 do 1 000. Što je radna temperatura viša, potreban je kolektor većeg omjera koncentriranja. Kolektore omjera $R < 10$ dovoljno je povremeno, sezonski zakretati, a kolektori velikih omjera koncentriranja moraju se stalno okretati i precizno pratiti Sunce, što im povećava složenost i cijenu. Iznos omjera koncentriranja linearno fokusirajućih kolektora kreće se do 50, a točkasto fokusirajućih mnogo je veći (do 1 000, a i više od 1 000).

Efikasnost koncentrirajućeg kolektora jest

$$\eta = F_R \left[\rho \gamma (\tau\alpha)_{\text{ef}} - \frac{k}{R} \frac{T_u - T_z}{G_h} \right] \quad (4.87)$$

F_R je faktor koji opisuje efikasnost prijenosa topline iz apsorbera u fluid,

ρ je spekularni refleksijski faktor površine reflektora,

γ je faktor koji određuje koliki dio reflektirane energije od reflektora dođe na apsorber,

$(\tau\alpha)_{\text{ef}}$ je efektivni produkt transmisij-skog faktora cijevi u kojoj je apsorber i apsorpcijskog faktora apsorbera,

k je faktor ukupnih toplinskih gubitaka,

T_u je temperatura fluida na ulazu u kolektor,

T_z je temperatura okolnog zraka,

G_h je izravno suncano ozračenje koje upada na kolektor i

R omjer koncentriranja kolektora.

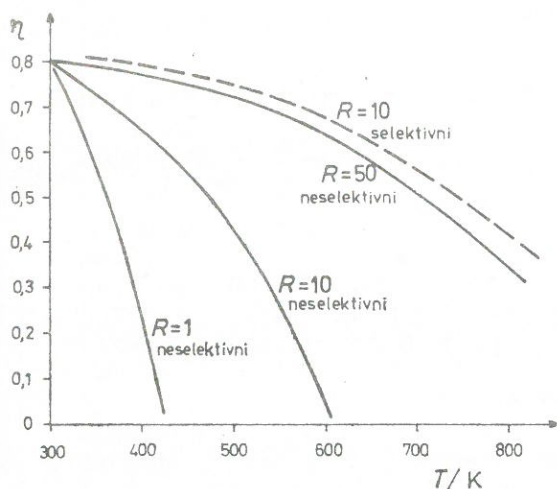
Budući da koncentrirajući kolektori rade uglavnom na višim temperaturama, prevladavaju gubici zračenjem, te se izraza (4.87) može pisati u obliku

$$\eta = F_R \left[\rho \gamma (\tau \alpha)_e - \frac{\epsilon \sigma}{R G_b} (T_u^4 - T_z^4) \right] \quad (4.88)$$

$$\eta = F_R \left(a - \frac{\sigma \epsilon T^4}{R G_b} \right) \quad (4.89)$$

gdje su $a = \rho \gamma (\tau \alpha)_e$, ϵ toplinski emisijski faktor apsorbera, T radna temperatura ($T \gg T_z$) i σ Boltzmannova konstanta.

Faktor a zapravo je udio (%) upadnog solarnog toka koji dođe do apsorberske površine. Uspoređujući tu jednadžbu s jednadžbom za efikasnost ravnog kolektora (4.71) uočavamo da je za koncentrirajući kolektor prvi član malo manji, ali i da je drugi (negativni) član bitno manji, osobito za vrijeme vedrih dana kad je izravno zračenje relativno veliko. Koncentrirajući kolektori efikasniji su za više temperature (npr. za više od 100 °C), a za niže radne temperature bolji su ravni kolektori.



Slika 4.37. Ovisnost efikasnosti koncentrirajućih kolektora o radnoj temperaturi apsorbera

Na slici 4.37. prikazana je efikasnost koncentrirajućih kolektora ovisno o radnoj temperaturi. Za zadane uvjete potrebno je naći kompromis između ekonomičnosti i efikasnosti.

Iz jednadžbe (4.89) vidi se da upotreba selektivnih apsorbera bitno povećava efi-

kasnost koncentrirajućih kolektora. Selektivni apsorber za postizavanje istog učinka omogućuje upotrebu manjeg omjera koncentriranja i tako smanjuje cijenu uređaja za koncentriranje i praćenje Sunca [Se 81].

Za primjenu koncentrirajućih kolektora važno je ekonomično dobivanje selektivnih površina i koje mogu izdržati visoke temperature. Intenzivno se istražuje tehnologija selektivnih slojeva otpornih na visoku temperaturu (npr. 500 °C) u nizu laboratorija u svijetu. Izrada takvih površina utjecala bi na bržu realizaciju ekonomičnih sunčanih (solarnih) centrala na termodinamičkom principu.

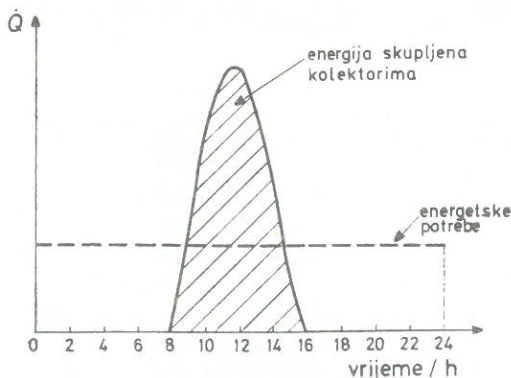
Koncentrirajući kolektori koriste se za dobivanje visokih temperatura u metalurgiji, s pomoću njih može se dobiti vodena para za pokretanje turbina u sunčanim elektranama i sl.

Poznata sunčana peć snage 1 MW u francuskim Pirinejima (u mjestu Odeillo) sastoji se od 63 ravna zrcala (heliostata) koja prate Sunčeve zrake i reflektiraju ih na parabolično zrcalo koje koncentrira oko 60% ukupne upadne snage (0,6 MW) na površini oko 7 dm² u žarišnoj ravnini zrcala i tako omogućuje dobivanje visokih temperatura. Omjer koncentriranja tog sustava jest 3 000, toplinska snaga 1 MW, a temperatura u fokusu 3 000 °C.

4.3. Uskladištenje sunčane energije

4.3.1. Uvod

Zbog intermitentnog svojstva sunčane energije (oblaci, dan — noć, godišnje doba) jedan je od najvažnijih problema uskladištenje (akumuliranje) energije. U svaki solarni sustav potrebno je ugraditi akumulacijski uređaj u kojem se skuplja energija za vrijeme sunčanih razdoblja, odnosno iz kojeg se energija crpi za vrijeme kad Sunčeva zračenja nema ili nije dovoljno. Ta je činjenica ilustrirana na slici 4.38. koja prikazuje dnevnu raspodjelu energije skupljene kolektorima



Slika 4.38. Raspodjela skupljene i potrebne energije za zagrijavanje neke zgrade kao ilustracija vremenske neusklađenosti dobivanja i potrošnje sunčane topline

i energetske potrebe neke zamišljene zgrade. (Radi jednostavnosti pretpostavljeno je da je toplinsko opterećenje konstantno.) Višak energije koju skupi kolektor za vrijeme dok Sunce sja uskladištava se i koristi za vrijeme kad Sunčeva zračenja nema. Tako npr. sustav za grijanje (hlađenje) prostorija i grijanje vode mora imati i odgovarajući spremnik u koji se pohranjuje, odnosno iz kojeg se uzima toplinska energija. Razliku između energije koja je potrebna i one koju skupi kolektor osigurava pomoćni konvencionalni grijač.

Postoje različite metode za uskladištavanje energije: toplinska, kemijska, termokemijska, mehanička i magnetsko-električna... Obradit ćemo uglavnom samo akumuliranje toplinske energije koje se najviše koristi pri primjeni sunčane energije.

Izbor načina uskladištavanja ovisi o mnogim činiteljima i u konkretnim slučajevima uskladištenje ne treba promatrati izolirano, nego u sklopu odgovarajućeg solarnog sustava. Metoda koja je uspješna u jednoj vrsti primjene često nije prihvatljiva za neku drugu. Jedan od najvažnijih parametara koji utječe na izbor načina akumuliranja jest vremenski interval uskladištenja: očito je da će za sezonsko uskladištenje (ljetno - zima) problemi biti sasvim drukčiji nego ako je energiju potrebno akumulirati za kraće

razdoblje (dan - noć, odnosno nekoliko dana).

Glavni problem pri izradi akumulacijskog uređaja jest izbor materijala koji ima fizikalno-kemijska svojstva pogodna za uspješno uskladištenje energije. Faktori koje je pri tome potrebno promatrati jesu: gustoća energije, tj. količina energije koja se može pohraniti po jedinici volumena (J/m^3), odnosno po jedinici mase (J/kg), zatim temperaturni interval, tj. temperatura pri kojoj se toplina dovodi i temperatura pri kojoj se toplina uzima, temperaturni gradijent u spremniku, gubici pri uskladištenju, troškovi izgradnje i održavanja sustava, reverzibilnost procesa, utjecaj korozije, zapaljivost i toksičnost materijala, brzina kojom se toplina može dovoditi i odvoditi iz sustava itd.

Sustave za toplinsko uskladištenje možemo podijeliti na niskotemperaturne (20°C do 120°C), srednjotemperaturne (100°C do 250°C) i visokotemperaturne (250°C do 1000°C). Ovdje ćemo govoriti samo o spremanju toplinske energije u području nižih temperatura (20°C do 120°C), dakle o spremnicima kakvi se npr. koriste u sustavima za grijanje zgrada i dobivanje tople vode.

Toplinska energija može se uskladištiti u toplinski izoliranim spremnicima na više načina:

1. zagrijavanjem određenog materijala (čvrstog ili tekućeg), tj. povećanjem njegove unutrašnje energije molekularnog gibanja;

2. taljenjem čvrstih tijela, tj. korištenjem latentnih toplina taljenja nekih materijala, odnosno općenito toplina transformacije pri prijelazu jedne faze u drugu;

3. korištenjem raznih kemijskih reakcija pri kojima se oslobađa odnosno veže toplina; itd.

Uglavnom se koristi prva metoda, tj. zagrijavanje raznih tvari, npr. vode, usitnjenog kamena; danas već postoje komercijalni uređaji koji rade tako. Prednost spremnika koji koriste promjenu faze, jest da mogu spremiti određenu koli-

činu energije u manjem volumenu nego spremnici s vodom. Međutim, postoji još dosta problema u primjeni te metode. Takvo je spremanje za sada skuplje i rjeđe se upotrebljava. Od nedavno se intenzivno istražuju materijali pogodni za spremanje energije u obliku latentne topline i očekuje se da će ta atraktivna metoda u skorij budućnosti postati ekonomičnija.

Razvoj ostalih metoda još je na početku i potrebna su detaljna istraživanja prije nego što se one eventualno komercijalno primijene. Opisat ćemo samo prve dvije metode.

4.3.2. Uskladištenje energije zagrijavanjem materijala

Pri toj se metodi u spremniku upotrebljava materijal koji u intervalu radnih temperatura ne mijenja fazu, nego mu se dovođenjem topline povećava temperatura: toplina se pretvara u unutrašnju energiju molekularnog gibanja. Koristi se, dakle, toplinski kapacitet određenog materijala.

U materijalu mase m i specifičnog toplinskog kapaciteta c može se spremi toplina $Q = mc\Delta T$, gdje je ΔT povećanje temperature sustava. Pri tome je masa potrebnog materijala

$$m = \frac{Q}{c\Delta T} \quad (4.90)$$

odnosno volumen

$$V = \frac{Q}{\rho c \Delta T} \quad (4.91)$$

gdje je ρ gustoća materijala.

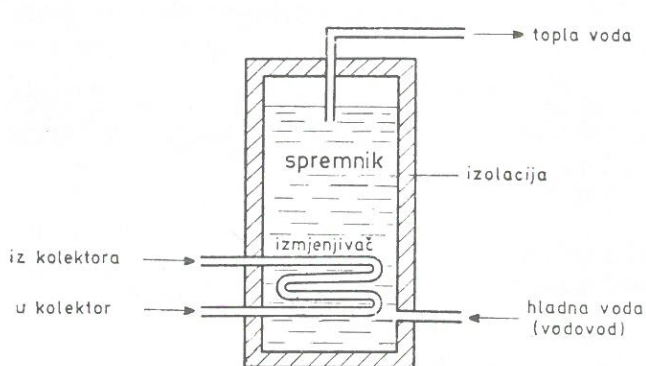
Za takve spremnike zbog relativno malenih specifičnih toplinskih kapaciteta potrebni su veliki volumeni, odnosno velike mase upotrebljene tvari. Npr. za spremanje 1 MJ energije u intervalu temperature $\Delta T = 20$ K potrebno je oko 12 L (12 kg) vode ili 27 dm³ (60 kg) kamena (šljunka).

Pri izboru materijala relevantni parametri jesu gustoća ρ , specifični toplinski kapacitet po jedinici mase c odnosno po jedinici volumena ρc , toplinska vodljivost λ , cijena itd. U tablici 4.24. navedeni su neki od tih parametara za materijale koji bi se mogli upotrijebiti u spremnicima. Osobito je važno uočiti da djelotvorni materijali moraju imati velik volumni toplinski kapacitet ρc , ali i što veću vodljivost λ kako bi se toplina mogla što brže prenositi kroz spremnik. Pri tome se ne smije zaboraviti ni cijena izrade spremnika.

Najčešće se kao materijal za spremanje toplinske energije koristi voda. Ona ima najveći specifični volumni kapacitet, ima je u izobilju, jeftina je, nije otrovna, nije zapaljiva itd. Nedostaci su mogućnost smržavanja, korozivno djelovanje vode, relativno nisko vrelište itd.

Tablica 4.24. Svojstva nekih materijala koji bi se mogli koristiti za toplinsko akumuliranje [Me 76, Ab 78]

Materijal	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c kJ/(kgK)	Volumni topl. kapacitet ρc J/(m ³ K)	Vodljivost k W/mK
voda	10 ³	4,19	4,19	0,9
usitnjeni kamen	2,2 · 10 ³	0,84	1,8	2,5
željezo	7,6 · 10 ³	0,46	3,5	47
granit	2,7 · 10 ³	0,80	2,2	2,7
beton	2,5 · 10 ³	0,92	2,26	2,4
cigle	1,7 · 10 ³	0,84	1,42	0,62
suha zemlja	1,26 · 10 ³	0,80	1	0,3
mokra zemlja	1,7 · 10 ³	2,1	3,6	2,5



Slika 4.39. Toplinski spremnik s vodom (sunčani bojler)

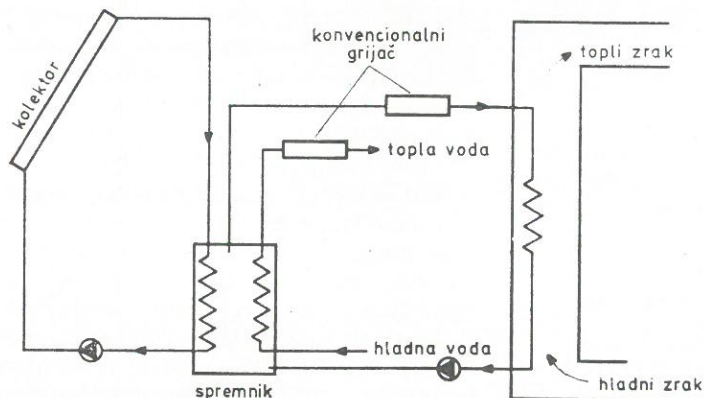
Kamen je također dobar materijal jer je jeftin, ali mu je volumni toplinski kapacitet relativno malen. Vodeni spremnici obično se koriste do 100°C , a pod tlakom i za više temperature, ali najviše do oko 200°C . Jedna je od prednosti kamena pred vodom što se može upotrijebiti i za više temperature od 100°C .

Komercijalno se za kolektore u kojima je voda radni fluid za prijenos topline obično kao spremnik koristi toplinski izolirani rezervoar napunjen vodom (sl. 4.39). Često se toplota iz kolektora u spremnik prenosi preko izmjenjivača topline tako da se tekućina u kolektorskom krugu ne miješa s vodom u spremniku. Izmjenjivač je svakako potreban ako je u kolektorskom sustavu otopina antifrizna.

Na slici 4.40. prikazan je jedan takav sustav u kojem se kao spremnik koristi rezervoar napunjen vodom. Topla voda iz spremnika koristi se za zagrijavanje zgrada ili za grijanje sanitarne vode za

domaćinstvo. Topla voda iz spremnika može se koristiti i za zagrijavanje zraka preko izmjenjivača topline voda - zrak tako da se — premda su kolektori s tekućinom — prostorije griju toplim zrakom.

Temperatura vode u spremniku može biti svuda jednaka što se postiže pri većim brzinama protoka vode iz spremnika kroz kolektor ili kroz sustav za centralno grijanje. Druga je mogućnost da pojedini slojevi vode imaju različite temperature (tj. u spremniku postoji temperaturni gradijent) — slojevi vode pri vrhu spremnika više su temperature, a pri dnu spremnika voda je najhladnija. Topla voda iz kolektora dolazi pri tome na vrh spremnika, a hladna voda s dna odlazi u kolektor. Slojevi se vode ne miješaju, nego se spuštaju prema dolje tako da se postupno cijeli spremnik puni sve toplijom i toplijom vodom. Topla voda uzima se s vrha spremnika, a istodobno na dno dolazi hladna iz vodovodne mreže. (Takav slojeviti sprem-



Slika 4.40. Shematski prikaz solarnog sistema s vodenim spremnikom

nik jest npr. obični električni bojler u kupaonici odnosno kuhinji.) Proračuni pokazuju da je rad sustava s jednom ili drugom vrstom spremnika približno isti: za prvu vrst protok je veći što povećava efikasnost, a temperatura je kolektora malo veća što smanjuje efikasnost; za drugu je vrst obratno [Lu 80].

Jedan od praktičnih problema takvih sustava jest relativno velik i skup rezervoar za spremnik koji mora biti nepropustan i otporan na koroziju. Osobito su skupi spremnici velikih volumena.

Rezervoari se izrađuju od čelika, betona, plastičnih materijala, umjetnih smola i sl. Najekonomičniji su vjerojatno rezervoari od betona obloženi s unutrašnje strane slojem koji ne propušta vodu. Čelične rezervoare treba također obložiti zaštitnim slojem s unutrašnje strane da bi se spriječilo korozivno djelovanje vode.

Spremnik (a i cijevi za dovod vode u spremnik i odvod iz njega) potrebno je dobro toplinski izolirati tako da bi gubici topline bili što manji. (Ako se spremnik nalazi u prostoriji koju zagrijavamo, gubici iz spremnika zapravo i nisu gubici.)

Toplinski gubici spremnika mogu se prikazati izrazom

$$\Phi_g = k_s A_s (T_s - T_z), \quad (4.92)$$

gdje su: Φ_g toplinski tok,

k_s koeficijent gubitaka topline iz spremnika,

A_s vanjska površina spremnika,

T_s temperatura materijala spremnika i

T_z temperatura okolice u kojoj je smješten spremnik.

Obično se spremnik dobro izolira tako da mu je koeficijent gubitaka topline k_s što manji. Tako npr. za staklenu vunu toplinska vodljivost jest $\lambda = 0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ i za izolaciju spremnika debelu 2 cm koeficijent prijelaza topline iznosi

$$k_s = \frac{\lambda}{d} = 1,9 \text{ W/m}^2 \text{ K} = 6,8 \text{ k J/hK}.$$

Ako je Φ_u toplinski tok koji iz kolektora ulazi u spremnik, Φ_i toplinski tok koji

je izašao iz spremnika (npr. u obliku tople vode za domaćinstvo ili centralno grijanje), tada je

$$m_s c_s \frac{\Delta T_s}{\Delta \tau} = \Phi_u - \Phi_i - k_s A_s (T_s - T_z), \quad (4.93)$$

m_s je masa materijala u spremniku, c_s je njegov specifični toplinski kapacitet,

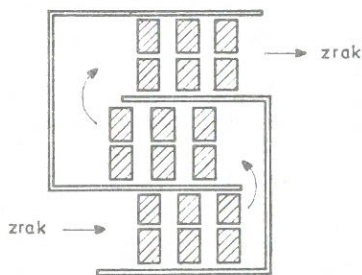
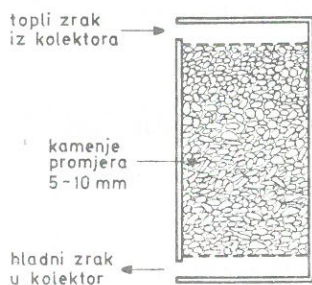
ΔT_s je promjena temperature materijala za vrijeme $\Delta \tau$ i

A_s je površina spremnika.

Pri tome pretpostavljamo da je temperatura materijala u spremniku svuda jednaka, tj. da nema slojeva različitih temperatura što nije u praksi uvijek ispunjeno.

Što je veći volumen spremnika, kolektor prikupi više energije jer radi na nižim temperaturama. Međutim, povećanjem volumena raste i vanjska površina spremnika pa i toplinski gubici. Zato postoji optimalni volumen spremnika. Računi pokazuju da je optimalni volumen vodenog spremnika u sustavu za dobivanje tople vode oko 300 do 400 litara vode, dakle oko 50 do 60 litara vode po četvornom metru kolektorske površine [Ma 77, Ku 79]. Upotreba većih spremnika od optimalnih vrlo malo pridonosi povećanju efikasnosti. Na primjer dobivena energija u sustavu sa spremnikom volumena 1 000 L samo je za oko 2% veća od energije dobivene istim sustavom sa spremnikom volumena 400 L. Međutim, ako se upotrijebi premalen spremnik (npr. 100 L) efikasnost sustava smanjuje se za oko 20% [Br 77, Ma 77]. Slično vrijedi i za sustave za zagrijavanje prostorija. Komercijalni sustavi za dobivanje tople vode za domaćinstvo obično imaju volumen spremnika od 300 do 400 litara za kolektor površine od 4 do 6 m².

Ako se toplina prenosi s pomoću zraka, u spremniku može biti obično kamenje ili neki drugi čvrst materijal naslagan tako da zrak može cirkulirati između tog materijala i na taj način izmjenjivati toplinu (sl. 4.41). Materijal (voda, parafin i sl.) može se nalaziti u manjim posudama (npr. bocama, plastičnim vre-



Slika 4.41. Spremnici kroz koje struji zrak

ćicama i sl.) naslaganim tako da se omogući strujanje zraka kroz spremnik.

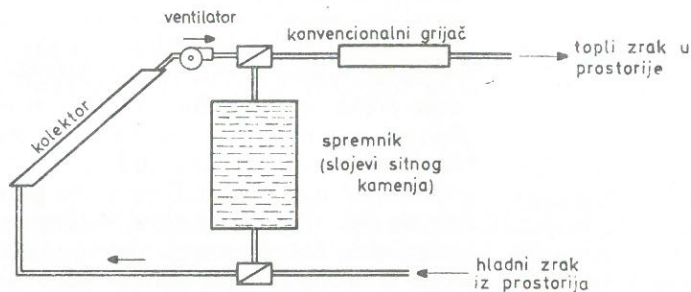
Od svih čvrstih materijala najčešće se u spremnicima upotrebljava usitnjen kamen ili riječni šljunak. Iako se na prvi pogled upotreba kamenja čini najekonomičnijom, postoji mnogo teškoća u izvedbi spremnika s kamenjem. Budući da je potrebno oko 400 do 1 000 kg usitnjenog kamenja po četvornom metru kolektora, dosta je teško nabaviti kamenje određene veličine i izraditi spremnik. Kamenje (šljunak) u takvu spremniku treba biti približno iste veličine (promjera 3—5 cm), čisto, bez sitnih čestica (pijeska) između pojedinih komada, kako bi zrak mogao lagano cirkulirati kroz spremnik. Ako je promjer kamenja manji, potrebna je veća snaga ventilatora za protok zraka, a ako je kamenje većih dimenzija izmjena je topline lošija. Obično se uzima 0,2—0,3 m² kamenja po četvornom metru površine kolektora [Lö 81] pa sustav s kolektorima površine 50 m² treba spremnik volumena oko 10 do 15 m³. Spremnici za kamen mogu se izrađivati od betona, željeza ili drveta. Za sustav kolektora površine 50 m² dimenzije takvog spremnika mogle bi biti

npr. 3 m · 2 m · 2 m. Brzina protoka zraka kroz spremnik kolektora jest reda veličine 5 m/min.

Na slici 4.42. prikazan je tipičan sustav za grijanje s pomoću toplog zraka. Zagrijan u kolektorima, zrak se vodi ili u spremnik gdje predaje toplinu ili se upotrebljava izravno za zagrijavanje prostorija. Sanitarna topla voda može se dobiti preko izmjenjivača topline voda — zrak i eventualno pomoćnog grijača koji je dogrije na potrebnu temperaturu.

Topli zrak iz kolektora obično ulazi pri vrhu spremnika, struji oko kamenja, predaje im toplinu, hladi se, izlazi na dnu spremnika i odlazi u kolektor; ciklus se zatim ponavlja. U spremniku tako nastaje temperaturni gradijent, sloj na vrhu spremnika ima najvišu temperaturu (npr. 60 °C). Topli zrak iz kolektora može se odvoditi i izravno u prostorije i zagrijavati ih ili u izmjenjivač topline zrak — voda u sustavu za dobivanje sanitarne tople vode.

Pri uzimanju topline iz spremnika hladni zrak iz prostorija ulazi na dnu spremnika, prolazi oko kamenja, grije se i na vrhu spremnika dobivamo topli zrak za zagrijavanje prostorija [Lö 81].



Slika 4.42. Sistem za grijanje prostorija s toplim zrakom

4.3.3. Uskladištenje energije korištenjem latentne topline

Kad se energija u obliku topline dovodi nekom materijalu, njegova se unutrašnja energija povećava i kao posljedica toga povećava mu se temperatura (zagrijavanje) ili mijenja faza (latentno zagrijavanje). Akumuliranje s pomoću latentnog zagrijavanja koristi npr. toplinu taljenja nekog kemijskog spoja, npr. neorganskih soli, parafinskih voskova itd. Materijal u spremniku, naime, utjecajem dovedene topline prelazi iz čvrstog u tekuće stanje na određenoj temperaturi — koja je za čiste tvari konstantna i odgovara talištu. Jedan od najuobičajenijih materijala za spremanje energije s pomoću takve metode — Glauberova sol tali se na 32°C , parafin na 40°C itd.

Toplina koja se apsorbira ili sprema u tvari za vrijeme mijenjanja faze jest

$$Q = mL, \quad (4.94)$$

gdje je m masa tvari, a L specifična toplina faznog prijelaza potrebna da tvar pređe iz jedne u drugu fazu.

Kada se tvar nalazi u čvrstom kristalnom stanju, molekule su poredane u kristalnoj rešetki i titraju oko položaja koji su određeni minimalnom potencijalnom energijom molekule. Titranje svake molekule superpozicija je vrlo mnogo harmoničkih titranja kojih frekvencije ovise o molekularnim silama. Dovođenjem topline raste titranje i srednja kinetička energija, što se očituje kao porast temperature tvari. Na slici 4.43. prikazan je T — Q dijagram grijanja neke čiste kristalne tvari. Područje OA odgovara

zagrijavanju čvrste faze tog materijala. Kad temperatura dosegne talište (T_A na sl. 4.43), uzbuda molekula dovoljno je velika da većina molekula napusti svoja mjesta u rešetki i rešetka se počinje raspadati: tvar se tali, čvrsta faza prelazi u tekuću. Sve dok se sva tvar ne rastali, energija koja se u obliku topline dovodi tvari troši se na gibanje i sudaranje molekula i uvjetuje povećanje potencijalne energije molekula, a srednja kinetička energija (dakle i temperatura) pri tom ostaje konstantna (dio dijagrama AB na sl. 4.43). Kad se sva tvar rastali, daljnje dovođenje topline ponovno povećava temperaturu tekućine (pravac BC na sl. 4.43).

Spremnici koji koriste latentnu toplinu rade u temperaturnom intervalu oko tališta (dio DABE na sl. 4.43), tako da je temperatura T_D nešto ispod tališta, a T_E nešto iznad tališta tvari.

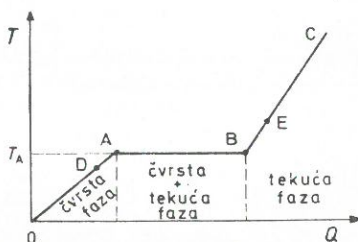
Ukupna količina topline dovedena tvari u intervalu D—E (sl. 4.43) može se pisati ovako

$$Q = m \int_{T_D}^{T_A} c_1(T) dT + mL + \int_{T_B}^{T_E} c_2(T) dT \quad (4.95)$$

gdje su: m masa tvari, c_1 i c_2 specifični toplinski kapacitet čvrste i tekuće faze a mL latentna toplina taljenja.

Odvođenjem topline iz tvari, događa se obratan proces: tekućina se hladi do temperature T_B , očvršćuje na toj temperaturi ($T_B = T_A$) te se nastala čvrsta faza hladi do temperature T_D .

Zbog relativno velikih specifičnih latentnih toplina, može se energija spremati u relativno malom volumenu i uskom temperaturnom intervalu — to je jedna od bitnih karakteristika takve metode. Na primjer za uskladištenje energije 1 MJ u temperaturnom intervalu $\Delta T = 20\text{ K}$ potrebno je oko 12 dm^3 odnosno (12 kg) vode, 27 dm^3 odnosno 60 kg kamena ili 3,1 kg Glauberove soli ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{ H}_2\text{O}$). Glauberova sol može uskladištiti oko 6 puta više topline nego voda istog volumena. U tablici 4.25. prikazane su potrebne količine raznih materijala za uskladištenje



Slika 4.43. T — Q dijagram

Tablica 4.25. Uskladištenje toplinske energije iznosa 40 MJ

Materijal	voda	kamen	Glauberova sol	parafin
spec. topl. kapacitet/kJ/(kg K)	4,2	0,84	2,1	2,9
spec. latentna toplota/kJ/kg	—	—	250	180
gustoća/(kg/m ³)	1 000	2 200	1 460	890
masa materijala/kg	480	2 400	138	168
obujam materijala/m ³	0,48	1,08	0,094	0,19
omjer obujma spremnika s vodom i obujma spremnika ispunjenog odgovarajućim materijalom	1	2,3	0,2	0,4

energije 40 MJ. (40 MJ prosječna je dnevna potreba energije za toplu vodu u domaćinstvu.)

Posebna nada polaže se u parafine kao sredstvo za uskladištenje topline [Ma 81]. Postoji više od 20 vrsta parafina koji bi se mogli primijeniti u spremnicima. Parafini su zasićeni ugljikovodici C_xH_{2x+2} relativne velike specifične topline taljenja (150 kJ/kg do 250 kJ/kg), s talištem u intervalu od oko 10 °C do 70 °C. Ne djeluju korozivno na kontejner, nisu otrovni, relativno su jeftini i imaju još neke prednosti. Međutim, pri njihovoj primjeni postoje i neki problemi (mala toplinska vodljivost, velika promjena volumena pri promjeni faze itd.).

Spremnici u kojima se koristi latentna toplota (latentno zagrijavanje) imaju i druge prednosti pred onima u kojima se koristi samo metoda zagrijavanja: interval je radnih temperatura manji, kolektor radi na nižoj temperaturi, manji su jer je za akumuliranje određene energije potrebno manje materijala nego u metodi zagrijavanja itd.

Metoda latentnog zagrijavanja tek se razvija; istražuju se pogodni materijali i nastoje riješiti tehnički problemi. Najviše je istraženo uskladištenje s pomoću Glauberove soli i takvi se spremnici već pojavljuju na tržištu.

Iako se istražuju različite metode uskladištenja toplinske energije, ipak većina komercijalnih sustava koristi prvu meto-

du uskladištenja (toplinski kapacitet), upotrebljavajući uglavnom spremnike s vodom. U literaturi se spominju i spremnici koji koriste kemijske procese, ali potrebno ih je još istraživati prije nego se spremnici temeljeni na transformaciji faze i kemijskim reakcijama počnu mnogo primjenjivati.

4.3.4. Ostale metode uskladištenja energije

Osim korištenjem toplinskih kapaciteta i latentnih toplota, termička se energija u principu može uskladištiti i s pomoću raznih reverzibilnih kemijskih reakcija. Spomenut ćemo neke od njih. Pri razrjeđivanju sulfatne kiseline oslobađa se toplota, a dovođenjem topline povećava se koncentracija otopine sulfatne kiseline [Ma 81]. Toplina otapanja nekih soli (npr. KNO_3 , $NaNO_3$, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, NH_2CONH_2 i dr.) relativno su velike, a topljivost ovisi o temperaturi. Tako je npr. za zasićenu vodenu otopinu KNO_3 u vodi promjena entalpije (tj. toplota otapanja) $\Delta H = -24$ kJ/mol, a temperaturni je gradijent topljivosti pozitivan ($\alpha = 0,18$ mol/LK). Takvo se svojstvo može iskoristiti za spremanje toplinske energije. Dovodimo li toplinu u takvu zasićenu otopinu (npr. KNO_3 u vodi), otopina se grije, postaje nezasićena i sposobna da otopi dodatne količine soli pri čemu se toplota apsorbira. Hlađenjem

otopine nastupa kristalizacija i oslobada se vezana energija. Na primjer otopina načinjena od 125 kg kalij-nitrata i 147 L vode (volumen je otopine 205 litara) može uskladištiti istu količinu topline kao i spremnik s 320 L vode [Ku 80]. Otopina načinjena od 100 kg Glauberove soli ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) i 100 L vode (volumen je otopine 160 L) može uskladištiti u temperaturnom intervalu od 15°C do 25°C istu toplinu kao i spremnik od 400 L vode (17 MJ). Potrebno je međutim, ispitivanjem ocijeniti praktičnost i ekonomičnost takva uskladištenja topline.

Uskladištenje toplinske energije za dulje razdoblje može se ostvariti u tlu ili podzemnim rezervoarima (bazenima) vode, koristeći pri tome toplinske kapacitete velikih (izoliranih) volumena zemlje odnosno vode. Međutim, pojavljuju se razni praktični problemi pri pripremanju i korištenju takvih dugoročnih (sezonskih) spremnika.

Osobito je zanimljiv slani bazen za skupljanje i uskladištenje sunčane energije [Ta 81]. To je bazen dubine 1–2 m napunjen vodenom otopinom anorganske soli (NaCl ili MgCl_2) tako da je masena koncentracija soli pri vrhu malena (oko 20 kg/m^3) i raste s dubinom pa je pri dnu otopina gotovo zasićena (oko 300 kg/m^3). Tako se dobiva vertikalna raspodjela slojeva razne gustoće od oko 1000 kg/m^3 pri vrhu do 1300 kg/m^3 pri dnu. Kad Sunčevo zračenje upada u takav bazen, ono se apsorbira kroz vodu odnosno u crno obojenom dnu bazena. Tako slojevi pri dnu postaju sve topliji, a budući da gradijent gustoće sprečava konvekciju, ne dižu se prema vrhu, slojevi se ne miješaju i u bazenu se uspostavlja temperaturni gradijent. Dok je površinski sloj bazena na temperaturi okoline ili nešto većoj od nje, temperatura donjih slojeva sve je veća i veća što su dublje pod površinom i pri dnu može narasti i do 90°C . Slani sunčani (solarni) bazen u kojem nema konvekcije služi dakle kao kolektor i spremnik sunčane energije. Jedan od problema pri izradi jest osiguranje nepropusnosti, odno-

sno sprečavanje propuštanja u okolna zemljišta.

Toplina uskladištena u sunčanom solarnom slanom bazenu može se koristiti za grijanje (hlađenje) prostorija, dobivanje mehaničke i električne energije i druge primjene. S pomoću njih se može ostvariti sezonsko uskladištenje: toplina skupljena ljeti može se koristiti zimi. Izrađene su manje termoelektrane koje koriste toplinu iz takvih bazena, a projektiraju se i termoelektrane snage nekoliko megavata [Ta 81].

Jedan od načina uskladištenja sunčane energije jest i dobivanje goriva koje izgaranjem daje energiju. Upotrebom nekonvencionalnih energetske izvora (npr. sunčane energije) mogao bi se iz vode (elektrolizom ili pirolizom) proizvesti vodik koji bi se koristio ili uskladištavao za kasniju upotrebu [Ve 81]. Tako dobiveni vodik mogao bi se upotrijebiti izravno kao gorivo (kuhanje, grijanje, pogon vozila), u industriji ili pak za proizvodnju električne energije. Mogao bi se koristiti na mjestu proizvodnje ili cjevovodima odvoditi od mjesta proizvodnje do potrošača.

Vodik ima niz prednosti pred fosilnim gorivima: ima ga u neograničenim količinama u vodi, može se uspješno pretvoriti u druge oblike energije, pri izgaranju se dobiva voda, dakle nema štetnih produkata koji onečišćuju atmosferu pa se iz njega bez polucije atmosfere mogu dobiti druge vrste energije (toplinska, električna).

Jedan od problema jest uskladištenje. Vodik se može uskladištiti na tri načina: u obliku plina, kao tekući vodik i u obliku hidrida. Spremanje tekućeg vodika povezano je s nizom problema (veliki volumen spremnika, dobra izolacija, niske temperature itd.). Perspektivna je mogućnost uskladištenja vodika u obliku metalnih hidrida. Apsorpcijom vodika u nekim materijalima (metalima ili legurama) nastaju hidridi a oslobađa se toplina. Dovodenjem topline (ili smanjenjem tlaka) reakcija se odvija u suprotnom smjeru i oslobađa vodik. Tako npr,

magnezij veže vodik u obliku labilnog spoja, magnezij(II)-hidrida:



gdje je ΔQ (oslobođena) toplina.

Osim magnezijeva može se koristiti niz drugih hidrida, npr. TiH_2 , VH_2 itd. [v. npr. Ve 81]. Hidriranje je vrlo praktična metoda uskladištenja vodika; izbjegavaju se nepogodnosti i opasnosti povezane s upotrebom tekućeg vodika ili vodika pod visokim tlakom. Takav način uskladištenja energije ispituje se a postignuti rezultati dosta obećavaju.

Upotreba vodika još nije ekonomski prihvatljiva: danas je elektrolizom proizveden vodik 2 do 4 puta skuplji od fosilnih goriva. Međutim, postoje opravdane nade da će energetski sustav s vodikom dati obilnu čistu energiju u budućnosti [Bo 76, Ve 81].

Energija se može uskladištiti i u obliku mehaničke energije upotrebom zamašnjaka velikih momenata tromosti. Kinetička

energija rotacije $\frac{1}{2} I \omega^2$ može biti znatna

pri velikom broju okretaja zamašnjaka i mogla bi se upotrijebiti za dobivanje električne energije u elektranama ili za pogon vozila. Proračuni pokazuju da bi masa takvih zamašnjaka za pogon automobila bila reda veličine 100 kg i da bi takva vozila bila ekonomičnija od vozila na benzinski pogon. Takvim načinom mogu se uskladištiti ograničene količine energije zbog napetosti koje u materijalu nastaju zbog centripetalne sile, a one ne smiju prijeći određene (maksimalne) vrijednosti. Pri tome je bitni faktor čvrstoća i gustoća materijala, a da bi se postigla maksimalna gustoća spremljene energije poželjno je za danu čvrstoću izabrati najlakši materijal. U svijetu postoji velik interes za istraživanje pojedinih materijala i izvedbu takvih zamašnjaka. Međutim, čini se da primjene zamašnjaka za uskladištenje mehaničke energije dobivene iz solarne u budućnosti neće biti.

Poseban je problem uskladištenje sunčane električne energije. Električna ener-

gija dobivena iz sunčane mogla bi se uskladištiti i upotrebom kemijskih akumulatora (npr. olovnoga) koji bi se punili za vrijeme sunčanog razdoblja, a davali energiju kada nije sunčano. Današnji fotonaponski sustavi obično koriste olovne akumulatora kao spremnike energije. Akumulatori se pune za vrijeme kada je insolacija dovoljno velika, a iz njih se uzima energija kad solarne ćelije zbog nedovoljne insolacije ne mogu opskrbiti potrošač s dovoljno energije. Moduli solarnih ćelija (tj. sustavi u kojima su ćelije spojene serijski i paralelno da bi se osigurao potreban napon i struja) spojeni su s akumulatorom preko bloking-diode koja sprečava pražnjenje akumulatora kad nije dovoljna insolacija i preko uređaja koji isključuje punjenje akumulatora kad je akumulator već napunjen. Takvi sustavi solarnih ćelija i olovnih akumulatora pogodni su jedino za manje potrošače (do 1 kW); za veće snage moraju se primjenjivati drugi načini uskladištenja.

Cijena današnjih olovnih akumulatora (oko 60 \$/kWh) još je visoka te takvi sustavi nisu konkurentni, osim tamo gdje drugi izvori nisu dostupni, praktični ili ekonomični. Osim toga olovni akumulatori imaju određene mane: relativno kratko trajanje pri režimu neprekidnog punjenja i pražnjenja (oko 1 500 ciklusa), malen specifični kapacitet uskladištenja (oko 20 W h/kg) i dr. Istražuju se i druge pogodne vrste akumulatora, pa se očekuje da će u drugim vrstama akumulatora takve mane biti uklonjene ili barem smanjene. Akumulatori pogodni za upotrebu u sustavima solarnih ćelija trebaju imati velik specifični kapacitet uskladištenja (oko 100 W h/kg), vijek trajanja oko 2 500 ciklusa punjenja—pražnjenja, a ne bi smjeli stajati više od 30 \$/kWh.

Osim u akumulatora solarna električna energija može se uskladištiti i na druge načine. Jedan od njih jest crpljenje vode na veće visine, tj. povećanje njezine potencijalne energije koja se, kad je potrebno, može u turbinama ponovno pretvoriti u električnu energiju. Problem je pri tome izgradnja i smještaj akumulatorskih jezera, veličina takvih sustava

i dr. Takav način uskladištenja pogodan je samo za velike sustave.

4.4. Solarno grijanje i hlađenje

4.4.1. Uvod

Jedna od najvažnijih primjena Sunčeve energije jest njezina niskotemperaturna toplinska konverzija, tj. dobivanje tople vode, zagrijavanje prostorija i dobivanje topline za industrijske procese. Metode za tu primjenu već su dosta razvijene, svakim se danom usavršavaju i na tržištu se pojavljuju razni solarni sustavi, osobito za grijanje vode.

Mnogo energije troši se na grijanje prostorija i dobivanje tople vode za domaćinstva, hotele, bolnice i sl., za potrebe raznih industrijskih procesa. Korištenjem Sunčeve energije mogla bi se smanjiti potrošnja drugih izvora.

Do sada se nije osobito pazilo na upotrebu Sunčeve energije u industrijskim procesima. Procjenjuje se da se u industriji troši oko 40% energije, a od toga jedan dio i za dobivanje tople vode do 100 °C koja bi se mogla proizvesti (barem djelomično) s pomoću raznih solarnih kolektora. Sunčana energija mogla bi se, naime, primijeniti za predgrijavanje vode potrebne za određeni tehnološki proces, a zatim bi se ta voda na konvencionalni način zagrijala do potrebne temperature. Velike količine topline skupljene za vrijeme ljeta, mogle bi se u industriji, za razliku od domaćinstva, potpuno iskoristiti. Takva primjena mogla bi osobito uspješna biti u prehrambenoj industriji kojoj su potrebne velike količine vode relativno niske temperature (do 100 °C); tako bi se s pomoću ravnih sunčanih kolektora ostvarile odgovarajuće uštede konvencionalnih izvora.

Prve primjene sunčane energije u našoj zemlji očekuje se upravo u području toplinske konverzije. Neke naše tvornice već rade prve sunčane kolektore, a po-

javljuje se i pokoji sunčani uređaj. U zadnjih nekoliko godina pojavilo se u našoj literaturi niz radova o toplinskoj konverziji Sunčeve energije, a održano je i nekoliko znanstvenih skupova o temama toga područja.

U ovom poglavlju najviše ćemo govoriti o sustavima za dobivanje tople vode; principi rada koje ćemo tu upoznati mogu se primijeniti i na složenije sustave za grijanje i hlađenje prostorija. Za projektiranje sunčanih (solarnih) sustava i pronalaženje optimalnih rješenja koristi se simulacija rada računskim putem ili s pomoću složenih kompjutorskih programa ili jednostavnijim proračunima s pomoću džepnih računala odnosno semiempiričkih relacija i dijagrama. O proračunu jednog takvog tipičnog sustava govorit ćemo u poglavlju 4.4.4.

Postoje aktivni i pasivni sustavi za grijanje prostora; opisat ćemo ukratko obje te vrste zagrijavanja, njihove principe rada i osnovne karakteristike.

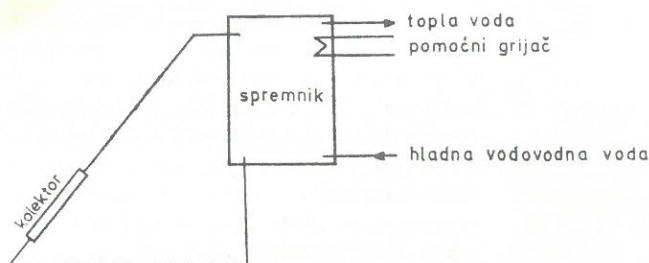
Na kraju ćemo govoriti o hlađenju s pomoću sunčane energije. Prikazat ćemo dva aktivna sustava za hlađenje i klimatizaciju: apsorpcijski uređaj u kojem se koristi toplinska energija dobivena iz sunčane i kompresijski uređaj koji koristi mehanički rad dobiven s pomoću sunčane energije.

4.4.2. Solarni sustavi za dobivanje tople vode

Od svih primjena Sunčeve energije, dobivanje je tople vode najjednostavnija i najraširenija. Razloga za to ima više, a najvažniji su visoka efikasnost takvog sistema i relativno malo početno ulaganje u njegovu izgradnju.

Topla voda potrebna je tokom čitave godine pa se solarni sustav stalno koristi (za razliku od onog za grijanje prostorija) i tako brže amortizira.

Takvi su se sustavi počeli primjenjivati već prije pedesetak godina, ali su ih šezdesetih godina ovog stoljeća drugi, jeftiniji izvori energije (plin, električna



Slika 4.44. Termosifonski sistem

energija) sasvim istisnuli. Nakon početka energetske krize 1973. interes za takve uređaje ponovno počinje naglo rasti i danas je mnogo takvih sistema (koji se mogu komercijalno nabaviti) instalirano i u upotrebi širom svijeta.

Najjednostavniji sustav za sunčano grijanje vode radi na tzv. termosifonskom principu. Ravni kolektor nalazi se npr. na krovu zgrade i spojen je sa spremnikom koji se nalazi iznad njega (sl. 4.44). Voda se zagrijava prolazeći kroz sustav i cirkulira zbog razlike gustoće između toplije vode na vrhu i hladnije na dnu sustava. Zagrijavana se voda zbog manje gustoće diže nad hladnu vodu i tako nastaje prirodna cirkulacija koja omogućuje prenošenje topline iz kolektora u spremnik.

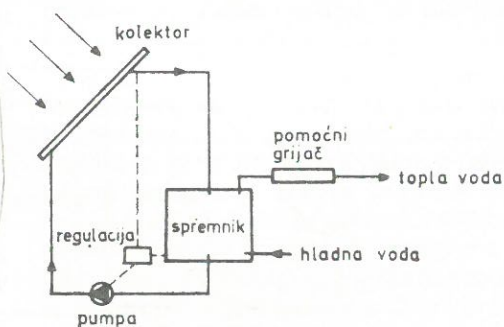
Prednost je takvih sustava jednostavnost i efikasnost osobito u područjima s velikom insolacijom. Za njihov pogon nisu potrebne pumpe pa ni energija za pogon tih pumpi. Međutim, uz niz prednosti imaju i mana. Spremnik mora biti iznad kolektora, najmanje oko 20 cm iznad gornjeg kolektorskog ruba, te u potkrovlju mora biti dovoljno mjesta za teški spremnik što je katkad praktični problem. Da bi se omogućio nesmetan i efikasan protok, cijevi između kolektora i spremnika moraju biti što šire (promjera većeg od 2 cm) i što kraće. Brzina protoka u takvim sustavima relativno je vrlo malena: 30 do 40 L vode u satu i za četvorni metar kolektora za vrijeme sunčanog razdoblja. Problem pri upotrebi takvog sustava jest i opasnost od smrzavanja u razdobljima niskih temperatura; to se može spriječiti upotrebom antifrizu ili ispuštanjem vode iz kolektora. Obično se termosifonski sustav

upotrebljava bez izmjenjivača topline, ali ako se u kolektorskom krugu upotrebljava otopina antifrizu mora se upotrijebiti specijalna izvedba izmjenjivača koja usprkos malenoj brzini protoka omogućuje uspješnu izmjenu topline.

Na svjetskom tržištu nude se jednostavni komercijalni termosifonski sustavi sastavljeni od kolektora i spremnika u obliku bojlera montiranog iznad kolektora tako da s njim čini jednu (kompaktnu) cjelinu praktičnu za instaliranje na ravnim krovovima, terasama i sl. Površina je kolektora npr. oko 2 m², a volumen bojlera oko 100 L: više se takvih jedinica može paralelno spajati i tako povećati kapacitet ustava.

Sustav s ugrađenom crpkom i prisilnom cirkulacijom (sl. 4.45) složeniji je od termosifonskoga, međutim, ima i niz prednosti pa se u novije vrijeme sve više upotrebljava. U takvom sistemu spremnik ne mora biti iznad kolektora (pa se npr. može smjestiti u podrumu zgrade), protok može biti brži, lakše je izraditi izmjenjivače topline i sl.

Dvije su vrste takvih sustava: sustav s izmjenjivačem topline u kolektorskom



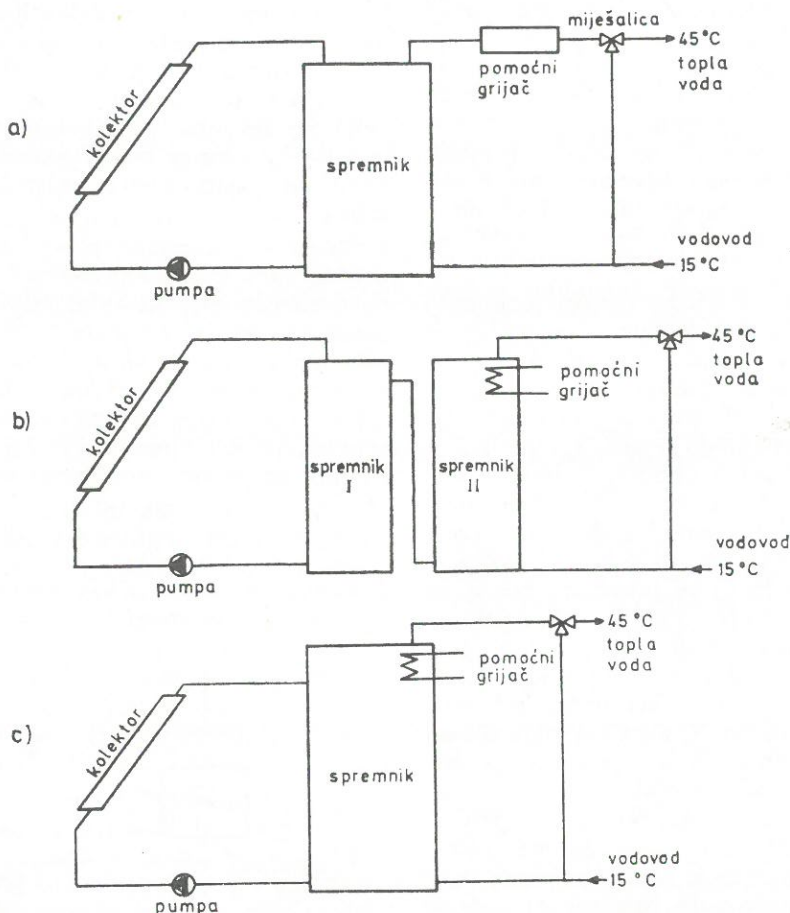
Slika 4.45. Sistem s crpkom

krugu i sustav bez izmjenjivača. U prvom tipu fluid koji struji kroz kolektor (voda, zrak, antifriz) nije isti kao u spremniku, što je posebno praktično za područja gdje postoji opasnost od smrzavanja vode u kolektorskom krugu. Ugrađivanje izmjenjivača topline, međutim, povećava trošak i smanjuje (oko 15%) efikasnost sustava. U izravnim sustavima (bez izmjenjivača) voda iz spremnika prolazi izravno kroz kolektor, tu se zagrijava i vraća natrag u spremnik.

Aktivni sustav za dobivanje tople vode sastoji se od ovih glavnih dijelova: kolektora, spremnika, pumpe, automatike i regulacije i konvencionalnog (pomoćnog) grijača (elektricitet, plin i sl.). Toplina skupljena u kolektoru odvodi se u sprem-

nik. Pumpa radi samo kad je temperatura fluida u kolektoru viša od temperature u spremniku, tako da se izbjegava hlađenje kolektora. To se postiže diferencijalnim termostatom koji uspoređuje temperaturu na izlazu kolektora i temperaturu pri dnu spremnika i uključi pumpu kad je temperatura vode u kolektoru malo viša nego u spremniku, odnosno isključi je kad ta razlika temperature postane vrlo malena. Pomoćni (konvencionalni) grijač dogrijava vodu do potrebne temperature kad Sunčevo zračenje nije dovoljno (zimi, za oblačna vremena i sl.).

Na slici 4.46. prikazano je nekoliko izvedbi sustava za grijanje vode. U sustavu na slici 4.46. a pri dnu spremnika



Slika 4.46. Nekoliko izvedbi sistema za dobivanje tople vode

temperatura te je takav sustav najefikasniji. Njegova je mana protočni pomoćni grijač koji mora imati veliku snagu. Na slici 4.46.b spremnik je podijeljen u dva dijela, drugi je dio klasični električni bojler koji dogrijava vodu (ako je potrebno). Na slici 4.46. c pomoćni (električni) grijač uključen je izravno u spremnik.

Sustav radi efikasnije što je temperatura apsorbera manja. Da bi sustav na slici 4.46.c efikasnije radio potrebno je da u spremniku postoji temperaturni gradijent, da temperatura vode pri dnu spremnika (gdje se nalazi odvod za kolektor) bude što niža. Zato je potrebno (pomoćni) električni grijač ugraditi pri vrhu spremnika iznad dovoda vode iz kolektora i upotrijebiti spremnik u obliku visokog i užeg valjka da bi se postigla slojevitost odnosno temperaturni gradijent.

Sustav za dobivanje tople vode za domaćinstvo obično se sastoji od 4 m^2 — 6 m^2 kolektorske površine i spremnika od 200 do 400 litara vode (50 L—70 L za svaki četvorni metar kolektora). Potrebna je temperatura tople vode između 45°C i 60°C . Obično se pretpostavlja da je potrošnja vode oko 50 do 60 litara po osobi, odnosno 250 do 300 litara u tipičnom domaćinstvu, što odgovara godišnjim energetske potrebama oko $4\,500 \text{ kW h}$. Solarni sustav u sjevernom kontinentalnom dijelu naše zemlje mogao bi osigurati oko $2\,500 \text{ kW h}$ s neselektivnim odnosno oko $3\,000 \text{ kW h}$ sa selektivnim kolektorima, a u jadranskom području solarni doprinos bio oko 20% — 25% više.

Ekonomska opravdanost takvih solarnih sustava ovisi o njihovom solarnom doprinosu, proizvodnji energije, o cijeni odnosno vremenu amortizacije. Radi orijentacije napomenimo da je cijena u SAD oko 200 do 400 \$ za četvorni metar instaliranog sistema odnosno oko 2 000 \$ za čitav sistem [Di 80].

4.4.3. Solarni sustavi za zagrijavanje prostora

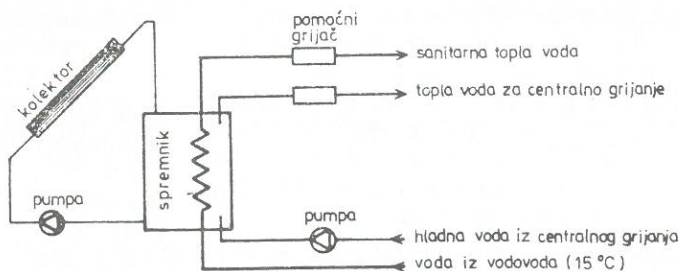
Zagrijavanje prostorija jedan je od važnih načina korištenja Sunčeve energije i ono bi u budućnosti, kada postane ekonomski opravdano, moglo pridonijeti znatnijoj uštedi drugih, konvencionalnih izvora energije. Za grijanje prostorija troši se i u našoj zemlji mnogo energije pa su i troškovi svakog domaćinstva za grijanje veliki. Zato je razumljivo da je interes za takvu primjenu sunčane energije vrlo velik.

Sunčano grijanje prostorija može biti aktivno i pasivno. U aktivnim sustavima Sunčeva se energija skuplja kolektorima, pohranjuje u toplinski spremnik i odatle uzima ili u obliku tople vode ili toplog zraka za zagrijavanje prostorija. Pri pasivnom korištenju Sunčeve energije sami elementi zgrade igraju ulogu kolektora i spremnika i toplina se prenosi vođenjem odnosno prirodnom cirkulacijom (konvekcijom) bez dodatnih pumpi, ventilatora i sl. O aktivnim sustavima govorit ćemo u ovom odjeljku, a o pasivnima u idućem.

Izgrađeno je niz solarnih (aktivnih i pasivnih) kuća širom svijeta koje svoje energetske potrebe dobrim dijelom zadovoljavaju s pomoću solarne energije. U takvim kućama obično se dio energetske potreba (50%—70%) podmiruje sunčanom energijom, a ostatak klasičnim konvencionalnim sustavom koji je tako dimenzioniran kao da solarni ni ne postoji. Međutim, korištenjem solarne energije troškovi za gorivo znatno se smanjuju i tako se postižu uštede.

Solarno grijanje prostora može se ostvariti na više načina. Zagrijani zrak iz kolektora može se koristiti izravno za grijanje ili provoditi kroz spremnik (obično od naslaganog sitnijeg kamenja, odnosno šljunka) da bi se tako uskladištena toplina koristila kasnije. U sustavima s tekućinom (vodom) za grijanje može se upotrebljavati topla voda ili se preko izmjenjivača topline voda—zrak dobiva topli zrak za zagrijavanje prostorija.

Slika 4.47. Solarni sistem s tekućinom



Jedna od izvedbi solarnog sustava sa zračnim kolektorima za zagrijavanje prostorije prikazana je na slici 4.42, a sustav koji koristi kolektore s tekućinom na slici 4.47.

Solarni sustav za centralno grijanje sastoji se uglavnom od ovih dijelova: kolektora Sunčeva zračenja (koji su okrenuti prema jugu i nagnuti pod kutom približno jednakom zemljopisnoj širini mjesta gdje su postavljeni), spremnika topline, radijatora, odnosno odgovarajućih grijača tijela, automatike i regulacije, te klasičnog grijača koji daje energiju kad Sunčeva energija nije dovoljna.

Sustav također omogućuje dobivanje sanitarne tople vode s pomoću odgovarajućeg izmjenjivača topline.

Konvencionalni uređaj za zagrijavanje (električni, plinski i sl.) mora biti tako dimenzioniran da zadovolji potrebe kad Sunčev doprinos nije dovoljan; zato mora biti gotovo iste veličine kao da solarnog i nema.

Toplinski spremnik u sistemu za grijanje toplom vodom obično je rezervoar koji sadrži 50 do 120 L vode za svaki četvorni metar površine kolektora, a u sistemu za zagrijavanje toplim zrakom sadrži šljunak veličine 1 do 4 cm i to 0,2–0,3 m³ za svaki četvorni metar

kolektora. Tipični sustav (stambena površina oko 100 m²) ima kolektorsku površinu oko 50 m² i spremnik od oko 4 m³ do 5 m³ vode odnosno oko 10 m³ kamenja.

Toplina potrebna za zagrijavanje zgrada ovisi o vanjskoj temperaturi (T_z) i toplinskim karakteristikama zgrade. Podaci o temperaturi zraka poznati su za mnoga mjesta i mogu se naći u literaturi. U tablici 4.26. navedene su srednje mjesečne vrijednosti temperature zraka ($\bar{T}_z/^\circ\text{C}$) za Beograd, Split i Zagreb.

Toplinski gubici neke zgrade mogu se prikazati izrazom

$$\Phi = kA(T_r - T_z) = kA\Delta T, \quad (4.96)$$

gdje je Φ tok ukupnih toplinskih gubitaka nastalih prijenosom topline kroz zidove, krov i prozore zgrade i zagrijavanje zraka koji u zgradu ulazi infiltracijom odnosno ventilacijom.

Produkt kA jest toplinska karakteristika pojedine zgrade i određuje se mjerenjem ili proračunom.

Kao referentna temperatura T_r za unutrašnjost zgrade obično se odabire 18 °C, što je malo niže od temperature koja se obično održava u prostorijama (20 °C–22 °C). Namjerno je tako odabrana da bi se na neki način uključila toplina koja dolazi od kućanskih aparata i

Tablica 4.26. Srednje mjesečne temperature zraka

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Beograd	−0,4	1,5	5,9	11,9	16,6	20,2	22,1	21,7	17,7	12,6	7,1	2,2
Split	7,5	8,3	10,5	14,3	19,0	22,9	25,7	25,3	21,6	16,7	12,6	9,1
Zagreb	−0,2	1,9	6,8	11,8	15,9	19,6	21,5	20,6	16,9	11,9	6,1	1,9

ljudi unutar prostorije kao i od pasivnog grijanja Sunčevom energijom kroz zidove, krov i prozore zgrade.

Toplinski tok kroz krov, zidove i prozore jednak je

$$\Phi' = k_k A_k \Delta T + k_z A_z \Delta T + k_p A_p \Delta T, (4.96a)$$

gdje su k_k , k_z i k_p koeficijenti toplinskih gubitaka krova, zidova i prozora, a A_k , A_z i A_p odgovarajuće površine.

Toplinski tok za zagrijavanje zraka koji se infiltrira u zgradu (ventilacijom i sl.) jest

$$\Phi'' = c_z \dot{m} \Delta T = c_p \frac{dV}{dt} \Delta T \quad (4.97)$$

gdje je c_z specifični toplinski kapacitet zraka ($1\,000\text{ J}/(\text{kgK})$), $\dot{m}$ masa zraka koja uđe u zgradu u jedinici vremena, $\rho = 1,2\text{ kg}/\text{m}^3$ gustoća zraka a dV/dt volumen zraka koji uđe u zgradu (odnosno iz nje iziđe) u jedinici vremena. Ako pretpostavimo da se cijeli volumen V zraka u zgradi izmjeni jedanput za jedan sat tada je

$$\Phi'' = \frac{c_p V}{3\,600} \Delta T = 0,34 V \Delta T.$$

Koeficijenti toplinskih gubitaka ovise o konstrukciji zgrade. Za toplinski dobro izoliranu zgradu tipične su vrijednosti tih koeficijenata:

$k_z = 0,4\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za vanjske zidove,

$k_k = 0,3\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za tavan i krov i

$k_p = 1,8\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ za prozore.

Međutim, mnogo zgrada ima lošiju toplinsku izolaciju pa je često $k_z \approx k_k \approx 1\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ i $k_p = 2,6\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Za obične jednostruke prozore $k_p \approx 6,5\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Ukupni koeficijent toplinskih gubitaka za dobro izoliranu zgradu jest oko 6 do $8\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Produkt kA za neku zgradu određuje se ili iz podataka o konstrukciji zgrade ili iz podataka o toplinskim potrebama zgrade. Ako je npr. pri srednjoj vanjskoj temperaturi $8\text{ }^\circ\text{C}$ bilo potrebno $Q = 60\text{ kW h}$ da bi se prostorije unutar zgrade 24 sata održavale na temperaturi koja je ugodna za boravak ($20\text{ }^\circ\text{C} - 22\text{ }^\circ\text{C}$), tada je

$$Q = kA \tau \Delta T,$$

odnosno

$$kA = \frac{Q}{\tau \Delta T} = 250\text{ W/K}.$$

Ako se produkt kA računa iz podataka o zgradi, najprije se procijeni koeficijent k za svaki pojedini dio zgrade (npr. zidove) i pomnoži s površinom tog dijela, odredi se infiltracija zraka i zbrajanjem dobije ukupni kA . Ilustrirajmo takav proračun primjerom.

Primjer. Koliki su toplinski gubici u toku jednog dana kuće koja ima krov i zidove površine 300 m^2 , a prozore 50 m^2 ? Pretpostavite da je koeficijent toplinskih gubitaka za krov i zid $k_z = 0,35\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, a za prozore $k_p = 1,8\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Infiltracijom u zgradu uđe 20 litara zraka svake sekunde. Srednja je temperatura okolice $8\text{ }^\circ\text{C}$. (Gustoća je zraka $1,25\text{ kg}/\text{m}^3$, specifični toplinski kapacitet zraka $c_p = 1\,000\text{ J}/(\text{kgK})$).

Toplinski gubici kuće mogu se procijeniti primjenom izraza (4.96);

$$\Phi = kA \Delta T = (k_z A_z + k_p A_p) \Delta T + \rho \frac{dV}{dt} c_p \Delta T = 2\,210\text{ W}.$$

Umnožak kA za tu kuću jest $\Phi/\Delta T = 221\text{ W/K}$, što pokazuje da je vrlo dobro toplinski izolirana.

4.4.4. O proračunu solarnih sustava

Da bi se proračunao rad sustava za dobivanje tople vode i zagrijavanje zgrada iz podataka o Sunčevu zračenju, parametara sustava i podataka o toplinskim potrebama, potrebno je za svaki dan u mjesecu integracijom po satima izračunati doprinos solarne energije. Taj opsežan posao najčešće se obavlja s pomoću kompjutora. Izrađen je niz programa za kompjutorsku simulaciju rada solarnih sustava. Jedan je npr. TRNSYS sa Sveučilišta Wisconsin u Madisonu [K1 76, Be77].

Na temelju mnogih kompjutorskih simulacija razvijene su semiempiričke metode s pomoću kojih se i bez kompjutora, ali s pomoću raznih dijagrama i empiričkih formula, može odrediti mjesečni solarni doprinos određenog sustava, koristeći mjesečne prosjeke za temperaturu zraka i sunčanu ozračenost (solarnu iradijaciju).

Toplina Q_c koja se skupi kolektorom koristi se dijelom za podmirenje toplinskih potreba (Q_p) a dijelom se uskladištava u spremniku (Q_s). Ta se energetska bilanca za jedinicu vremena može napisati u obliku

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_s + \dot{Q}_p. \quad (4.98)$$

Obično se rad sustava računa od sata do sata te jednadžba (4.98) integrirana u vremenskom intervalu jednog sata glasi

$$Q_s = A_c F_R [\tau \alpha H_s - k (\bar{T}_u - \bar{T}_z) t_s] - Q_p, \quad (4.99)$$

gdje je Q_p toplina koja se potroši za jedan sat, H_s satna sunčana ozračenost kolektorske plohe, $\bar{T}_u$ srednja temperatura vode na ulazu u kolektor (odnosno pri dnu spremnika), $t_s = 3600$ s i $\bar{T}_z$ srednja temperatura okolnog zraka.

Da bismo jednadžbu (4.99) mogli primijeniti za proračun rada sustava, potrebno je poznavati $\bar{T}_u$. Aproksimativno se može umjesto $\bar{T}_u$ u (4.99) uvrstiti T_{s1} — početna temperatura vode pri dnu spremnika i s pomoću nje izračunati količina topline Q_s uskladištene u spremniku u tom satu. Zatim se primjenom relacije

$$Q_s = m_s c_s (T_{s2} - T_{s1}) \quad (4.100)$$

izračuna konačna temperatura vode pri dnu spremnika T_{s2} te se postupak nastavlja za idući sat. (Ako se želi postići veća točnost, može se umjesto T_{s1} uzeti srednju vrijednost $(T_{s1} + T_{s2})/2$, ponoviti račun i tako iteracijom točnije odrediti T_{s2} .)

Primjer. Proračunajte rad solarnog sustava za grijanje vode u Splitu za dan u siječnju za koji su satne temperature zraka T_z i satne ozračenosti plohe kolektora H_c dane u tablici 4.27. Površina je kolektora 4 m^2 , $F_R \tau \alpha = 0,69$ i $F_R k = 5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Dnevna je potrošnja 280 L vode temperature 60°C , a troši se kontinuirano, tj. $11,7 \text{ L/h}$. Temperatura je vode iz vodovoda 15°C . Početna je temperatura vode u spremniku 20°C . Volumen je spremnika 200 litara .

Tablica 4.27. Temperature zraka i ozračenosti kolektora

Sat	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	15–14	15–16
$H_c / (\text{MJ/m}^2)$		0,6	1,26	1,71	1,78	1,95	1,76	1,33	0,94
$T_z / ^\circ \text{C}$		6	6,5	7	8,2	9,4	9,8	9,4	8,5

Primjenom izraza (4.99) i (4.100) može se izračunati T_{s2} temperatura vode u spremniku na kraju svakog sata od 9 sati do 16 sati. Rezultati proračuna navedeni su u tablici 4.28. Količina topline Q_K skupljena je kolektorima i predana radnom fluidu, količina Q_p uzeta je u obliku predgrijane vode, a $Q_s = Q_K - Q_p$ predana je spremniku i pretvorena u njegovu unutrašnju energiju. Količina topline Q_s računa se relacijom (4.99), a Q_p dobije se s pomoću

$$Q_p = \dot{m} c (T_{s1} - T_{s2}) \Delta t,$$

gdje je $\dot{m} = 12,7 \text{ L/h}$, $c = 4190 \text{ J/kg}$.

Tablica 4.28.

Sat	$T_z/^\circ\text{C}$	$H_c/(\text{MJ/m}^2)$	Q_c/MJ	Q_p/MJ	Q_s/MJ	$T/^\circ\text{C}$	T_s
7-8							
8-9	6	0,6	0,63	0,25	0,38	0,5	20,5
9-10	6,5	0,87	2,48	0,27	2,21	2,6	23,1
10-11	7	1,18	3,56	0,4	3,16	3,8	26,9
11-12	8,2	1,23	3,56	0,58	2,98	3,6	30,5
12-13	9,4	1,35	3,88	0,76	3,12	3,7	34,2
13-14	9,8	1,21	3,1	0,94	2,16	2,6	36,8
14-15	9,4	0,92	1,72	1,07	0,65	0,8	37,6
15-16	8,6	0,65	0,5	1,1	-0,6	-0,7	36,9
16-17							
Zbroj			19,4MJ	5,4 MJ	14 MJ		

Ukupne su toplinske potrebe 52,8 MJ. Solarni je doprinos 19,4 MJ, a ostatak treba osigurati konvencionalnim (npr. električnim) grijačem.

U primjeru je pokazana simulacija rada solarnog sustava za jedan dan. Slično bi se moglo proračunati skupljena toplina tokom čitava mjeseca, zbrajajući količine topline skupljene za svaki dan. Obično se računa solarni doprinos za svaki mjesec i izražava kao

$$f = \frac{Q_k}{Q_p}$$

gdje je Q_k ukupna toplinska energija dobivena iz sunčane u čitavom mjesecu, a Q_p ukupne toplinske potrebe u tom mjesecu. Jednostavniji proračuni mogu se obaviti i s pomoću džepnog računala, a za potpunu simulaciju rada solarnog sustava potreban je kompjutor.

Osobito praktična metoda za određivanje prosječnog doprinosa sunčanog sustava u toku mjeseca jesu tzv. f -dijagrami dobiveni kao rezultat mnogobrojnih kompjutorskih simulacija rada takvog sustava [Be 77].

Pokazano je [Be 77] da je solarni doprinos f , tj. dio od ukupne potrebne energije koji osigurava sunčani uređaj

u pojedinom mjesecu, funkcija dvaju parametara

$$X = \frac{A_c F_R k (T - T_z) \Delta t}{Q_L}$$

$$Y = \frac{A_c F_R (\overline{\tau\alpha})_{ef} \overline{H_c} N}{Q_L}$$

gdje je A_c površina kolektora, F_R faktor koji određuje prijenos topline iz kolektora u spremnik, k ukupni koeficijent toplinskih gubitaka, T referentna temperatura (100°C), T_z srednja temperatura zraka u pojedinom mjesecu, Δt ukupni broj sekundi u mjesecu, Q_L ukupna potrebna energija za grijanje vode za čitav mjesec, $(\overline{\tau\alpha})_{ef}$ srednji efektivni umnožak transmisijskog faktora i apsorpcijskog faktora, N broj dana u mjesecu i $\overline{H_c}$ mjesečni prosjek dnevne ozračenosti plohe kolektora. Solarni doprinos f ovisi i o volumenu spremnika i obično se računa za spremnike volumena 50—75 L/m² kolektora.

Funkcija $f(X, Y)$ i odgovarajući dijagrami za tipične solarne sustave za gri-

janje vode i prostorija objavljeni su u literaturi [npr. Be 77] i mogu se koristiti za brzo određivanje solarnog doprinosa. Za poznate X i Y za određeni sustav i mjesec može se, naime, iz dijagrama odmah očitati solarni doprinos f i tako i bez upotrebe kompjutatora simulirati rad sunčanog sustava.

Da bi se projektirao solarni sustav, potrebno je izabrati optimalne parametre i proračunati solarni doprinos i ekonomsku opravdanost. Takvi detaljni proračuni relativno su skupi i često je preliminarnim procjenama moguće utvrditi da li je opravdano obavljati detaljne proračune. Preliminarne procjene mogu se napraviti s pomoću jednostavnih proračuna integracijom po satima za prosječni dan u svakom mjesecu ili primjenom semiempiričkih dijagrama iz literature [npr. f-dijagrama iz Be 77]. Takvi jednostavni proračuni daju samo red veličine ušteda dobivenih solarnim sustavom, ali svatko ih može napraviti (i bez kompjutatora) i tako dobiti određenu informaciju o radu sustava.

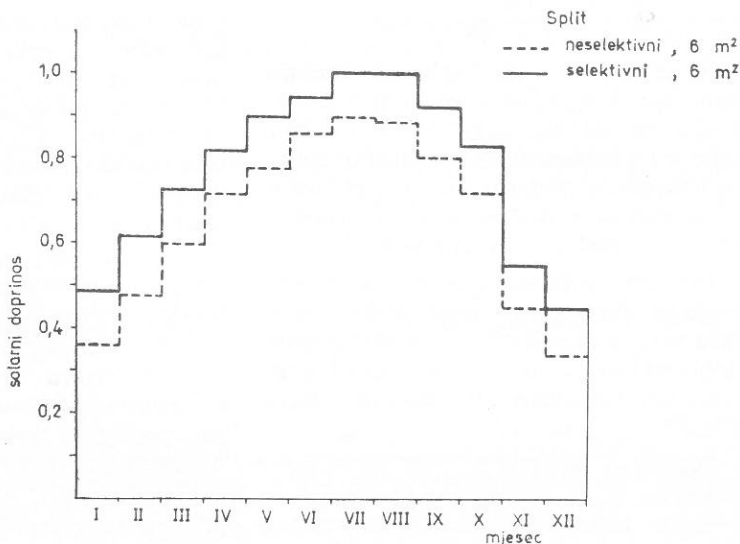
U literaturi se mogu naći proračuni sustava za dobivanje tople vode i za zagrijavanje prostora za neka područja naše zemlje [v. npr. De 79, Pi 80, Ku 81, De 83]. Neki od tih proračuna rađeni su kompjutorskom simulacijom, a drugi s pomoću f-dijagrama odnosno simulirajući rad sustava od sata do sata za prosječni dan u mjesecu i računajući doprinos bez upotrebe kompjutatora.

Navest ćemo neke rezultate takvih proračuna, najprije one dobivene jednostavnijim proračunima, a zatim rezultate dobivene detaljnom kompjutorskom simulacijom.

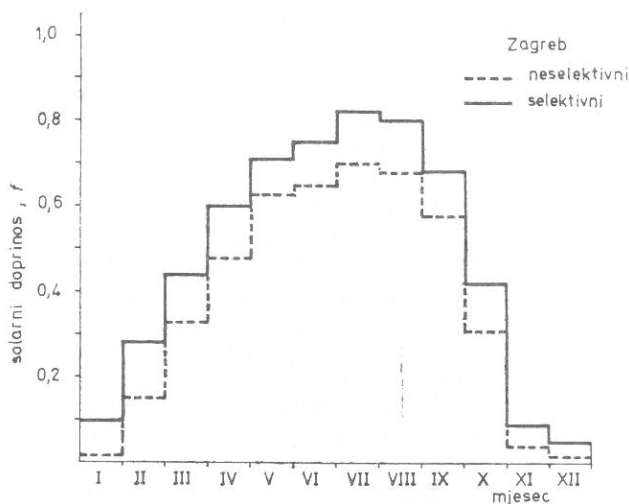
Na sl. 4.48. prikazan je udio Sunčeve energije u grijanju sanitarne vode po mjesecima za područje Splita. Pretpostavljajući da su dnevne potrebe 300 L tople vode temperature 60 °C (što odgovara godišnjoj potrošnji $2,06 \cdot 10^{10}$ J odnosno 5 700 kW h), sustav s neselektivnim kolektorom ($F_{Rk}=7$ W/(m²K), $F_{R\tau\alpha}=0,76$) površine 6 m² mogao bi osigurati oko 66% potrebne količine tople vode odnosno $1,4 \cdot 10^{10}$ J (3 800 kW h) godišnje.

Selektivni kolektor ($F_{Rk}=4,8$ W/m²K¹) dao bi oko 16 % više, tj. $1,6 \cdot 10^{10}$ J (4 400 kW h) godišnje. Izraženo energijom na jedinicu površine kolektora doprinos bi bio 2 350 MJ/m² za neselektivni odnosno 2 670 MJ/m² za selektivni kolektor. Selektivni sustav uštedi godišnje za oko 100 kWh/m² više od neselektivnog sustava.

Selektivni kolektor ($F_{Rk}=4,8$ W/m²K¹) dao bi oko 16 % više, tj. $1,6 \cdot 10^{10}$ J (4 400 kW h) godišnje. Izraženo energijom na jedinicu površine kolektora doprinos bi bio 2 350 MJ/m² za neselektivni odnosno 2 670 MJ/m² za selektivni kolektor. Selektivni sustav uštedi godišnje za oko 100 kWh/m² više od neselektivnog sustava.



Slika 4.48. Solarni doprinos sistema za dobivanje tople vode u području Splita po mjesecima



Slika 4.49. Solarni doprinos sistema za dobivanje tople vode u području Zagreba

Na sl. 4.49. prikazani su rezultati sličnog proračuna za Zagreb. Sustav s neselektivnim kolektorom s jednim staklom površine 6 m^2 mogao bi prema tim proračunima osigurati 38% potrebne količine tople vode ($7,9 \cdot 10^9 \text{ J}$ odnosno 2200 kW h godišnje). Upotrebimo li selektivni kolektor solarni je doprinos 48% (10^{10} J odnosno 2800 kW h godišnje) dakle za 27% veći.

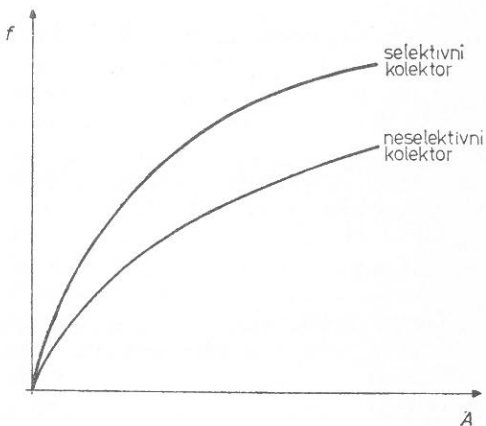
Izrazimo li solarni doprinos po četvornom metru kolektora, prema tim aproksimativnim proračunima domaćinstvo u Splitu moglo bi dobiti godišnje oko 650 kW h/m^2 s neselektivnim i oko 750 kW h/m^2 sa selektivnim kolektorom površine 6 m^2 i spremnikom 75 L/m^2 . Solarni doprinos u Zagrebu mnogo je manji: 370 kW h/m^2 za sustav s neselektivnim i 470 kW h/m^2 za sustav sa selektivnim kolektorom.

U. Desnica i suradnici [De 83] simulirali su rad solarnog sustava za dobivanje tople vode i grijanje prostorija za neka područja naše zemlje upotrebljavajući TRNSYS kompjutorski program i dobili slične rezultate.

Solarni doprinos ovisi i o površini kolektora.

Na slici 4.50. prikazana je ovisnost godišnjeg solarnog doprinosa za dobivanje tople vode o površini kolektora za područje Zagreba. Ovisnost o volumenu

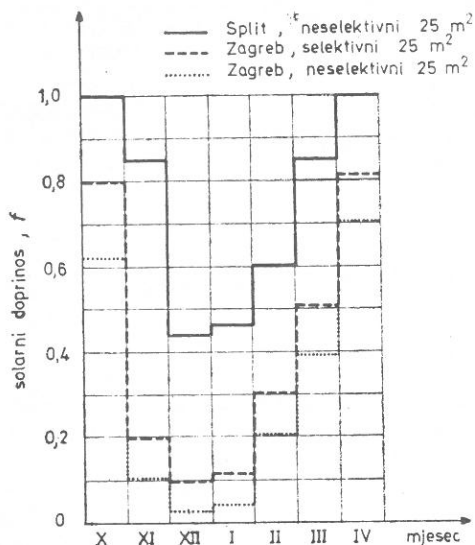
spremnika manja je i povećanje volumena iznad optimalnoga (50 L/m^2 do 75 L/m^2) bitno ne utječe na solarni doprinos.



Slika 4.50. Ovisnost godišnjeg solarnog doprinosa sistema za dobivanje tople vode o površini kolektora

Navedimo i rezultate proračuna tipičnog sustava za zagrijavanje zgrada.

Na slici 4.51. prikazan je solarni doprinos sustava za zagrijavanje zgrade u Splitu i u Zagrebu. Pri proračunu je pretpostavljeno da je površina kolektora 25 m^2 a toplinski gubici kuće 250 W/K . Račun je obavljen za neselektivni s jednim staklom ($F_{Rk} = 7 \text{ W/m}^2\text{K}$) i selektivni s jednim staklom ($F_{Rk} = 4,26 \text{ W/m}^2\text{K}$)



Slika 4.51. Solarni doprinos sustava za zagrijavanje zgrada u Zagrebu

apsorber. Volumen je spremnika 1,9 m³. Ukupni solarni doprinos u sezoni grijanja, tj. od 1. X do 1. V u Zagrebu jest 22 % od ukupnih toplinskih potreba za neselektivni kolektor, a 32 % za selektivni. Neselektivni kolektor s dvostrukom većom površinom (50 m²) zadovoljio bi oko 35 % toplinskih potreba. Sličan sustav u Splitu zadovoljio bi oko 64 % toplinskih potreba; solarni bi sustav u Splitu dao u sezoni grijanja oko 36 % više toplinske energije. Ako se uspoređuje rad uređaja od 1.X do 1.III tada je razlika još očitija. Uređaj u Splitu dao bi oko 3,5 puta više energije od jednakog uređaja u Zagrebu. Selektivni sustav u zimskim mjesecima dao bi oko 2 puta više energije od neselektivnoga.

4.4.5. O ekonomičnosti solarnih sustava

Prije kupovanja i instaliranja solarnog sustava potrebno je proračunati njegovu ekonomičnost i izabrati optimalno (najrentabilnije) rješenje. Opseg ove knjige

ne dopušta da se upustimo u detaljnu ekonomsku analizu solarnih sustava, za to postoji opsežna literatura [v. npr. Di 79 Lu 80, Du 81, No 80, itd.]. Mi ćemo iznijeti samo najosnovnije činjenice i proračune. Da bi se odredila ekonomičnost solarnog sustava, potrebno je uzeti u obzir niz parametara od kojih su neki dobro, a neki samo približno poznati. Potrebno je poznavati troškove projektiranja, nabavke i instaliranja sustava, troškove pogona i troškove održavanja. Najveći su troškovi za kolektore i spremnike topline i uglavnom su proporcionalni površini kolektora. Ostali troškovi (za reguliranje, cjevovode, motore, pumpe) manje ovise o veličini sustava. Obično se ukupni troškovi instaliranog sustava izražavaju po jedinici površine kolektora, npr. 10 000 din/m² pa bi cijena sustava za dobivanje tople vode kolektorima površine 6 m² bila 60 000 dinara. Treba dodati i troškove projektiranja, pogona i održavanja sustava. Obično se određuje da su godišnji troškovi pogona i održavanja 1 %–2 % cijene instaliranog sustava.

Samo solarni sustav ne može osigurati svu potrebnu energiju te je uz njega potrebno predvidjeti i konvencionalni sustav iste veličine kao da sunčanoga i nema. Solarni je sustav, dakle, dodatna investicija koja se jedino može isplatiti odgovarajućom uštedom konvencionalnog goriva (npr. ugljena, mazuta, električne energije). Da bi se proračunala ušteda goriva, potrebno je procijeniti solarni doprinos uređaja. To se može učiniti na razne načine, npr. proračunom solarnih sustava (v. poglavlje 4.4.4). Solarni doprinos ovisi o kakvoći sustava i zemljopisnom području gdje je instaliran. Izračunato je da sunčani prinos sustava za zagrijavanje zgrade u Zagrebu [De 80] koji se sastoji od 22 m² kolektora nagnutih 60° iznosi 16,5 · 10⁹ J (4 580 kW h) godišnje odnosno 208 kW h/m². Na Jadranu bi taj doprinos bio veći (oko 10⁹ J/m² odnosno 280 kW h/m²). Sustavi za dobivanje sanitarne tople vode imaju još veći solarni doprinos. Približni proračuni pokazuju da su ti solarni doprinosi

u Zagrebu oko 400 kW h/m², a u Splitu oko 700 kW h/m² godišnje. Budući da ove vrijednosti ovise o nizu parametara, potrebno ih je precizno proračunati u svakom konkretnom slučaju.

Kad se odredi solarni doprinos, izračuna se ušteda u konvencionalnom gorivu ili cijena tako uštedenog goriva. Ako je η efikasnost konvencionalnog grijača (koja je za električni grijač vrlo velika, viša od 90 %, pri zagrijavanju mazutom oko 60 % do 70 %), ušteda je goriva

$$\Delta m = f \frac{Q}{Q_{iz} \eta}$$

gdje je Δm uštedena masa goriva, Q potrebna godišnja energija, f solarni doprinos, Q_{iz} specifična toplina izgaranja.

Ako npr. solarni sustav za grijanje daje 4 600 kW h godišnje, a specifična toplina izgaranja ulja za loženje jest $3,9 \cdot 10^7$ J/kg (10,8 kW h/kg) i $\eta = 65$ %, uštedjelo bi se 655 litara ulja za loženje ili — ako je litra ulja 20 din — uštedjelo bi se 13 000 din.

Proračuni koje su napravili B. Pivac i suradnici [Pi 80] za Beograd pokazuju da bi sustav za dobivanje tople vode s neselektivnim kolektorima površine 6 m² i spremnikom 300 L mogao godišnje osigurati $1,16 \cdot 10^{10}$ MJ (3 220 kW h) odnosno $1,93 \cdot 10^9$ J/m² ili 540 kW h/m². Selektivni kolektor dao bi 17,5 % više (630 kW h/m²). Ako se pretpostavi da se voda grije električnim grijačem efikasnosti 95 % i da je cijena električne energije 2 din/kW h, godišnja ušteda selektivnog sustava bila bi 8 000 din, a neselektivnog 6 780 din. Slični proračuni pokazali su da bi u Zagrebu solarni doprinos neselektivnog sustava sa 6 m² kolektora bio oko 380 kW h/m² (godišnja ušteda 2 760 kW h). Uštede u jadranskom području bile bi primjetno veće.

Da bi se odredilo realno vrijeme amortizacije solarnog uređaja, tj. razdoblje n godina u kojima će postignuta ušteda biti jednaka uloženom novcu, potrebno je predvidjeti porast cijena goriva, vijek trajanja, troškove održavanja i sl.

Ako bi porast cijena gorivu (karakteriziran eskalacijskim faktorom e) bio jednak kamatnoj stopi k , vrijeme amortizacije moglo bi se dobiti tako da se troškovi investicije podijele s godišnjom uštedom. U općenitom slučaju račun je složeniji. Ako je npr. investicija 60 000 din, kamatna stopa 10 %, predviđeno godišnje poskupljenje energije 15 % i godišnja ušteda 6 000 din, u prvoj godini vrijednost bi uštede bila $u_1 = u \frac{1+e}{1+k} = uR = 6 220$

din, u drugoj godini $u_2 = u_1 R = u_2 R^2 = 6 445$ din, u trećoj 6 856 din itd. Ukupna ušteda kroz n godina bila bi

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n = u(R + R^2 + \dots + R^n) = uR \frac{R^n - 1}{R - 1}$$

gdje je

$$R = \frac{1+e}{1+k}$$

Ako je ukupna ušteda nakon n godina jednaka uloženoj glavnici, tada je

$$G = uR \frac{R^n - 1}{R - 1} = u \left(\frac{1+e}{1+k} \right) \frac{\left(\frac{1+e}{1+k} \right)^n - 1}{\left(\frac{1+e}{1+k} \right) - 1}$$

Označimo li $\frac{1+e}{1+k} = 1 + k_1$, tada jednadžba dobiva jednostavniji oblik

$$G = u(1 + k_1) \frac{(1 + k_1)^n - 1}{1 + k_1 - 1} = u(1 + k_1) \frac{(1 + k_1)^n - 1}{k_1}$$

Iz jednadžbe se može odrediti realno vrijeme amortizacije n ako poznamo G/u i faktor k_1 . U gornjem je primjeru $G/u = 10$, $k_1 = 0,045$. Vrijednost n možemo naći grafički ili pogađanjem. Uvrs-timo li $n = 8,2$, dobivamo da je $G/u = 10,1$ pa možemo zaključiti da će se uređaj uz navedene pretpostavke otplatiti za oko 8 godina.

Da bi se mogla odrediti optimalna veličina solarnog uređaja potrebno je

proračunati ovisnost godišnje uštede o ukupnim investicijskim ulaganjima G , tj. dijagram $u=f(G)$. Umjesto da crtamo uštedu i troškove u dinarima možemo na ordinatu crtati solarni doprinos (omjer energije dobivene solarnim sustavom i ukupne potrebne energije), a na apscisu površinu kolektora ili omjer površine kolektora i godišnjih energetske potreba [Lu 80]. Iz tog dijagrama može se procijeniti koliki su minimalni troškovi da bi uređaj bio ekonomičan, koliki su maksimalni investicijski troškovi iznad kojih uređaj prestaje biti ekonomičan i kakav treba biti uređaj u optimalnom slučaju. Detalji o proračunu rentabilnosti mogu se naći u literaturi.

4.4.6. Pasivni solarni sustavi

Prostorije se mogu zagrijavati (hladiti) aktivnim ili pasivnim solarnim sustavom ili njihovom kombinacijom. Aktivne sustave opisali smo u prethodnom odjeljku; oni se sastoje od kolektora koji skupljenu Sunčevu energiju pretvaraju u toplinu. Prisilnom cirkulacijom radnog fluida tako skupljena toplina odvodi se u spremnik, a odatle za zagrijavanje prostorija. U pasivnim sustavima koriste se dijelovi zgrade za skupljanje topline (nema posebnih kolektora), toplina se prenosi uglavnom prirodnom konvekcijom, vođenjem ili zračenjem. (Katkad se i u pasivnom sustavu može upotrijebiti ventilator da bi cirkulacija zraka bila brža i efikasnija, ali njegova je funkcija tu sasvim drukčija nego u aktivnom sustavu gdje je prisilna cirkulacija prijeko potrebna.) Pri pasivnom zagrijavanju elementi zgrade integralni su dio sustava. Kolektori su tu dijelovi zgrade: prozori, krov, zidovi, bazeni s vodom i sl. Spremnici topline mogu biti zidovi, krov i drugi dijelovi prostorije, a katkad se mogu i u pasivnom, kao i u aktivnom sistemu upotrijebiti posebni spremnici, npr. naslagani šljunak oko kojega struji zrak. Toplinski gubici noću ili kad nije sunčano, smanjuju se pokretnim izolacijskim pločama odnosno

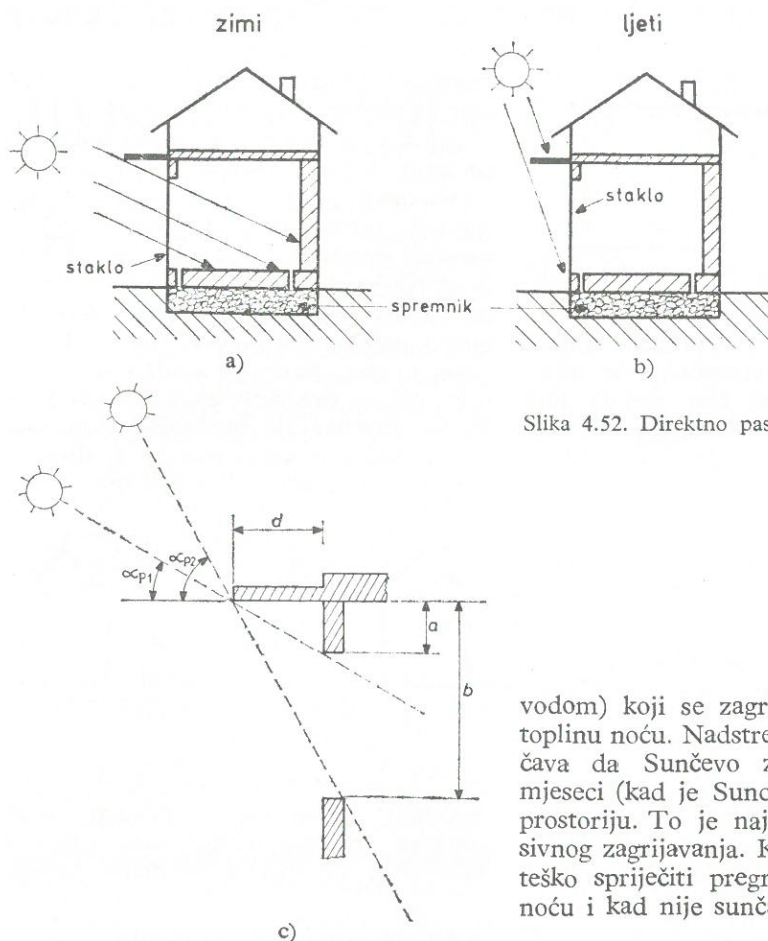
kapcima kojima se npr. prekrivaju ostakljeni zidovi, prozori, krovovi koji su za vrijeme dana bili otkriveni radi skupljanja Sunčeve energije.

Pri izgradnji solarnih kuća (s aktivnim ili pasivnim sustavom) potrebno je što više smanjiti toplinske gubitke jer se dobrom toplinskom izolacijom mogu znatno povećati energetske uštede. Koeficijent toplinskih gubitaka zidova i krova ne bi smio prijeći $0,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, prozori bi trebali biti s dvostrukim, a sa sjeverne strane i s trostrukim staklom, i ako je potrebno trebali bi se moći zasjeniti odnosno prekriti izolacijskim kapcima.

Građevina mora biti projektirana tako da se postignu maksimalne uštede i osigura što bolja upotreba Sunčeva zračenja. Pasivni sustav najlakše je inkorporirati u građevinu pri projektiranju i zato je pogodniji za nove, još neizgrađene zgrade. Pri projektiranju pasivne sunčane kuće valja dobro odrediti položaj zgrade, njezinu orijentaciju, položaj i veličinu prozora, položaj i boju zidova i krova i sl. [Gi 81]. Potrebno je da zgrada, npr. južni zid i prozori na toj strani prime što više Sunčeve energije zimi, a naprotiv ljeti te površine treba zaštititi od sunca.

Vješto izrađen pasivni sustav može biti isto tako efikasan kao i odgovarajući aktivni sustav. Pasivni sustavi imaju niz prednosti: održavanje je minimalno, upravljanje sustavom jednostavno, cijena je manja, a vijek trajanja dulji. Često se isti pasivni sustav može koristiti za zagrijavanje zimi i rashlađivanje prostorija ljeti [Gi 81]. Mana im je da se često ne mogu primijeniti na već izgrađene zgrade jer položaj, orijentacija i konstrukcija zgrade ne odgovara zahtjevima pasivnog načina grijanja.

Postoji više načina pasivnog grijanja zgrade. Jedan od najjednostavnijih prikazan je na slici 4.52. Sunčevo zračenje upada kroz velik staklen prozor ili staklen zid i izravno zagrijava prostoriju. Skupljena toplina uskladištava se u elementima prostorije (zidovima, podu) ili u posebnom spremniku sa šljunkom (ili posudama s



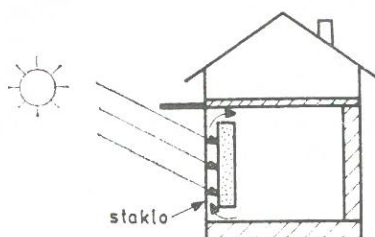
Slika 4.52. Direktno pasivno zagrijavanje

vodom) koji se zagrijava danju, a daje toplinu noću. Nadstrešnica (balkon) sprečava da Sunčevo zračenje za ljetnih mjeseci (kad je Sunce visoko) prodire u prostoriju. To je najefikasniji način pasivnog zagrijavanja. Katkad je, međutim, teško spriječiti pregrijavanje ili gubitke noću i kad nije sunčano.

Primjer. Dimenzije nadstrešnice (balkona) mogu se proračunati npr. tako da Sunce u podne nesmetano ulazi kroz prozor u periodu od 15. XI do 1. II a da od 1. V do 15. VIII prozor bude potpuno u sjeni (sl.4.52 c). Budući da je u Zagrebu kut visine Sunca 1. II $\alpha_{p1}=26^\circ$ a 1. V $\alpha_{p2}=59^\circ$, to gornja ivica prozora treba biti ispod nadstrešnice za $a=d \operatorname{tg} \alpha_{p1}=0,49d$, a donja ivica prozora za $b=d \operatorname{tg} \alpha_{p2}=1,66d$ gdje je d širina nadstrešnice. Ako je npr. $d=0,8$ m, tada je $a=0,4$ m i $b=1,3$ m.

Ostakljeni južni zid zgrade, tzv. Trombeov zid, također je efikasan pasivni sustav koji je istodobno i kolektor i spremnik (sl. 4.53). Vertikalni zid zgrade obojen je crnom bojom i ostakljen jednostrukim ili dvostrukim staklom. Sunčevo zračenje upada kroz staklo, apsorbira se u zidu i zagrijava ga. Gore i dolje na zidu nalaze se otvori za cirkulaciju zraka. (Kad je potrebno, ti se otvori mogu i zatvoriti.) Hladni zrak ulazi iz prostorije

i prolazi kroz prostor između stakla i zida, grije se, diže prirodnom konvekcijom i kao topli zrak struji kroz gornje otvore u zgradu. Toplinska energija akumulirana u masivnom zidu danju, koristi se noću i tako se postiže gotovo kontinuirano zagrijavanje prostorija. Između stakla i zida obično je nekoliko centimetara prostora, ali on može biti i veći da bi se olakšalo održavanje i radove u tom međuprostoru [Gi 81]. Noću je potrebno pre-

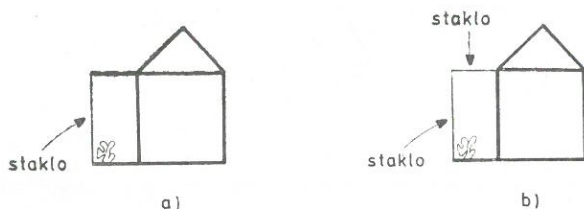


Slika 4.53. Trombeov zid

kriti staklo da bi se spriječili gubici topline. Katkad se Trombeov zid može i naknadno ugraditi ako zgrada ima masivni zid okrenut prema jugu. Takav način pasivnog grijanja pogodan je i za veće zemljopisne širine.

Veliki ostakljeni i pokriveni balkoni (lođe) okrenuti prema jugu, odnosno staklene verande ispred kuće s ostakljenim ili običnim krovom (sl. 4.54. a i b) mogu zimi djelotvorno skupljati Sunčevu energiju. Vrući zrak koji nastaje u tako ostakljenom prostoru vodi se u zgradu, zagrijava sobe ili prenosi toplinu u odgovarajući spremnik. Ljeti se prozori otvore ili ostakljenje ukloni (a stakleni krov prekrije) da bi zrak mogao cirkulirati i osigurati ugodnu hladovinu. Ako je takav prostor veći, može se iskoristiti i kao vrlo dobar staklenik za uzgoj biljaka. Takvo zagrijavanje može se primijeniti i u postojećim zgradama pa i višekatnicama koje imaju južne balkone.

Slika 4.54. Staklenik ispred kuće kao element pasivnog sistema

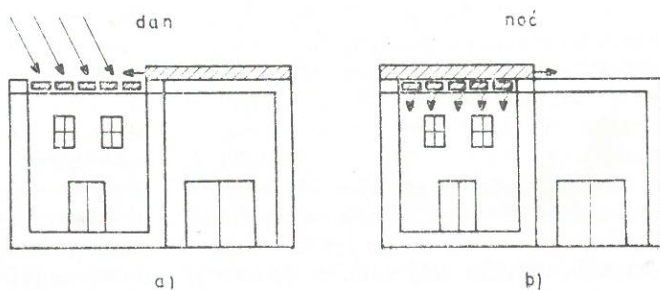


Energija se može skupiti i uskladištiti i u posebno napravljenom krovu [Gi 81], (sl. 4.55.a i b). Metalni krov s plastičnim vrećama napunjenim vodom (ili u obliku plitkog bazena napunjenog vodom) zagrijava se Sunčevom energijom, a skupljena toplina služi za zagrijavanje zgrade. Noću se krov pokriva pomičnim izolacijskim pločama da bi se spriječio gubitak topline. Tako se može osigurati efikasno kontinuirano zagrijavanje danju i noću. Ljeti takav krov može služiti za rashlađivanje prostorija. Noću je krov otkriven pa se voda u spremnicima na krovu hladi. Danju je krov prekriven izolacijskim pločama

da bi se spriječilo zagrijavanje vode. Na takav način noću rashlađena voda održava sniženu temperaturu danju i tako služi za pasivno hlađenje zgrade.

4.4.7. O solarnom hlađenju

Iako je, barem za sada, najvažnija primjena solarne energije zagrijavanje prostorija i vode (osobito u klimatskim područjima poput našega), istražuju se i solarni uređaji za rashlađivanje i klimatizaciju. Na svjetskom tržištu već se pojavljuju uređaji za hlađenje za pogon kojih se može koristiti Sunčeva energija.



Slika 4.55. Krov kao solarni kolektor u pasivnom sistemu

Očekuje se da će se ti uređaji usavršiti i postati ekonomski prihvatljivi.

Poput grijanja, sunčano hlađenje zgrade može biti aktivno i pasivno. Aktivni sustavi koriste toplinu dobivenu solarnim kolektorima ili elektricitet iz sunčanih ćelija za pogon rashladnih uređaja. Pasivni sustavi mogu koristiti nižu temperaturu atmosfere noću te tu „hladnoću” spremiti za hlađenje za vrijeme vrućeg dana; noću rashlađen spremnik može oduzimati toplinu zraku koji danju kroz njega struji iz prostorija koje se hlade. Pasivno hlađenje može se ostvariti i isparivanjem vode koristeći njezinu relativno veliku latentnu toplinu te na još neke načine.

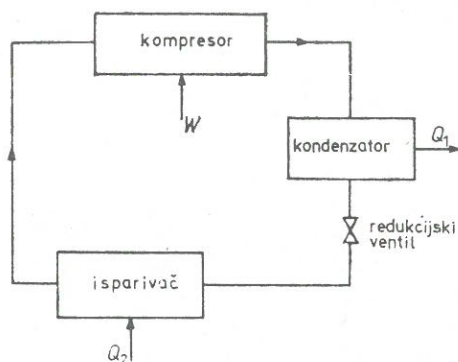
Primjena Sunčeve energije za hlađenje vrlo je atraktivna jer je potreba za hlađenjem najveća upravo u vrijeme kad je Sunčeve energije najviše; sezonske i dnevne promjene Sunčeva zračenja upravo pogoduju primjeni sunčane energije za hlađenje (klimatizaciju) prostorija. Vjerojatno će takva primjena u budućnosti biti vrlo važna. Često je potrebno osigurati hlađenje ljeti, a grijanje zimi, pa bi kombinirani sustav mogao biti relativno ekonomičan jer bi se koristio čitave godine [Du 74].

Sunčana energija mogla bi se uspješno koristiti u solarnim hladnjacima za čuvanje hrane, što je osobito važno za zemlje u razvoju u tropskim krajevima.

Na žalost uređaji za solarno hlađenje još nisu ekonomični; oni su 3—5 puta skuplji od sličnih konvencionalnih uređaja. Očekuje se da će istraživanjima i ti uređaji postati ekonomični u skoroj budućnosti.

Razlikujemo dva tipa aktivnih sustava za hlađenje: apsorpcijski koji koristi toplinsku energiju dobivenu solarnim kolektorima i kompresijski koji koristi mehaničku energiju dobivenu iz sunčane elektrane. To su zapravo konvencionalni rashladni uređaji koji za pogon koriste sunčanu energiju.

Shema kompresijskog sunčanog sustava za hlađenje prikazana je na slici 4.56. To je klasični kompresijski hladnjak koji za pogon koristi solarni toplinski stroj.



Slika 4.56. Shema kompresijskog solarnog sustava za hlađenje

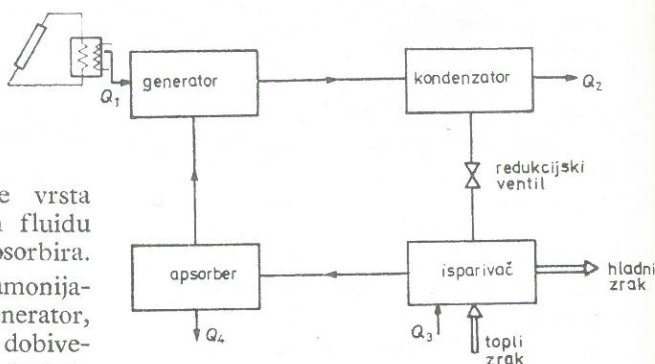
Kao radni fluid koriste se lako isparive tekućine: amonijak (NH_3), ugljik-dioksid (CO_2) i dr., ali ipak najčešće freon 12 (CCl_2F_2).

S pomoću kompresora, ulaganjem mehaničkog rada W , adijabatski se zbija para rashladnog sredstva (npr. freona) u kondenzator. Tu se para pretvara u tekućinu predajući toplinu Q_1 okolini, npr. vodi koja cirkulira oko kondenzatora. Iz kondenzatora tekućina dolazi u redukcijski ventil gdje joj se adijabatskom ekspanzijom snižava tlak i temperatura. Tako nastala ohlađena mješavina tekućine i pare („vlažna para”) dolazi u isparivač gdje se isparuje pri stalnom tlaku i temperaturi, oduzimajući toplinu Q_2 prostoru oko isparivača. (Strujanjem zraka oko isparivača može se npr. dobiti hladni zrak za klimatizaciju prostorija.) Iz isparivača para odlazi u kompresor gdje joj se adijabatskom kompresijom povećava tlak i temperatura; tako dobivenom suhom zasićenom parom ciklus se ponavlja.

U apsorpcijskom sustavu toplinska energija dobivena iz sunčane izravno se koristi za pogon rashladnog stroja. Može se npr. upotrebljavati topla voda temperature 90°C — 100°C dobivena sunčanim kolektorima. Apсорpcijski solarni rashladni sustav razlikuje se od konvencionalnoga samo prema izvoru topline.

Shema apsorpcijskog hladnjaka prikazana je na slici 4.57. Glavni dijelovi sustava jesu apsorber, generator, konden-

Slika 4.57. Shema apsorpcijskog sistema za hlađenje



zator i isparivač. Postoji više vrsta takvih hladnjaka prema radnom fluidu odnosno tvari u kojoj se fluid apsorbira.

U $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ sustavu otopina amonijaka u vodi crpi se iz apsorbera u generator, gdje se grije primajući toplinu Q_1 dobivenu sunčanim uređajem. Porastom temperature i tlaka smanjuje se topivost amonijaka u vodi te se amonijak počinje isparavati. Tako dobivene pare prelaze u kondenzator, a razrijeđena otopina vraća se u apsorber.

U kondenzatoru (koji se hladi cirkulacijom vode ili zraka) pare se kondenziraju u tekući amonijak predajući toplinu Q_2 fluidu koji kruži oko kondenzatora. Zatim tekući amonijak prolazi kroz reduksijski ventil gdje mu se adijabatskom ekspanzijom snizi tlak i temperatura. Pri tom nastala mješavina tekućeg i parovitog amonijaka vodi se u isparivač. Tu se amonijak potpuno isparava oduzimajući toplinu Q_3 , tj. hladeći okolni prostor ili fluid koji struji oko isparivača (npr. vodu koja se zatim upotrebljava za klimatizaciju). Pare NH_3 iz isparivača odlaze u apsorber i otapaju se u vodi uz oslobađanje topline Q_4 . Iz apsorbera se vodena otopina amonijaka crpi u generator i proces se ponavlja.

Iako sustav radi uglavnom s pomoću dovedene topline iz nekog toplinskog izvora relativno visoke temperature (oko 100°C), potrebna je i mehanička pumpa — da bi se otopina prebacila iz apsorbera u generator — i konvencionalni izvor za njezino napajanje (npr. električna energija); tako sustav nije sasvim neovisan o drugim izvorima energije. (Postoje i izvedbe bez mehaničke pumpe; poznati plinski apsorpcijski hladnjak grijan plinskim plamenikom koristi smjesu amonijaka i vodika, a cirkulacija fluida obavlja se prirodnom konvekcijom.) Snaga potrebna za pumpanje tekućine iz apsorbera u generator relativno je malena (samo

nekoliko promila snage hladnjaka) i mnogo manja nego snaga kompresora u kompresijskim hladnjacima pa se glavni potrošak vanjske energije u obliku topline može relativno lako osigurati s pomoću solarnih kolektora.

U novije vrijeme sve se više koristi apsorpcijski sustav $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$. U njemu se koristi litij-bromid kao apsorber a voda odnosno vodena para kao radni fluid. Zagrijavanjem litij-bromida u kojem je apsorbirana voda u generatoru oslobađa se vodena para koja odlazi u kondenzator. Ta se para kondenzira u vodu, predajući toplinu vodi koja hladi kondenzator. Voda nastala kondenzacijom pare preko reduksijskog ventila prelazi u isparivač. Tu se voda isparuje i oduzima toplinu okolnom sredstvu (npr. fluidu koji struji kroz izmjenjivač topline u isparivaču) te se tako postiže hlađenje. Nastala vodena para prelazi zatim u apsorber, apsorbera se u LiBr , nastala otopina $\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$ odlazi u generator i ciklus se ponavlja.

U tom sustavu razlike tlakova manje su nego u sustavu s amonijakom pa se hladnjak može napraviti i bez mehaničkih pumpi.

Budući da se sunčana energija može lakše i djelotvornije pretvarati u toplinsku energiju nego u mehanički rad (odnosno električnu energiju) zasad su apsorpcijski uređaji perspektivniji nego kompresijski. Relativno visoku temperaturu (80°C — 120°C) potrebnu za rad apsorpcijskog solarnog hladnjaka dosta je teško postići s pomoću ravnih kolektora te će se vjerojatno u budućnosti selektivni

fokusrirajući kolektori primjenjivati u takvim sustavima. Kad se cijena elektricитета iz solarnih ćelija bitno smanji, i kompresijski će se sustavi više upotrebljavati.

4.5. Dobivanje električne energije

4.5.1. Uvod

Postoji više načina da se iz sunčane energije dobije električna energija. Najjednostavnija je izravna pretvorba s pomoću solarnih ćelija. Princip rada sunčanih ćelija temelji se na fotovoltaičnom efektu: kad se Sunčevo zračenje apsorbira u solarnoj ćeliji, na njezinim se krajevima pojavljuje elektromotorna sila tako da se ćelija obasjana Sunčevim zračenjem može koristiti kao izvor električne energije. Prema rezultatima najnovijih istraživanja i na taj način moći će se vjerojatno uskoro više koristiti sunčana energija [Ba 81, De 81].

Drugi je način da se sunčana energija najprije pretvori u toplinsku, a zatim iz toplinske u električnu energiju; to je zapravo klasičan način dobivanja električne energije s pomoću turbina i generatora, samo se kao toplinski izvor koristi solarna energija. U svijetu se gradi ili je već dovršeno više takvih energana odnosno elektrana; u njima se stječu iskustva za eventualnu buduću komercijalnu proizvodnju električne energije iz solarne.

Energija vjetra, koja je također uzrokovana solarnom energijom, može se također pretvoriti u mehaničku, a zatim u generatorima u električnu energiju. Energija valova, morskih struja i toplinskog gradijenta mora također bi se u principu mogla upotrijebiti za dobivanje električne energije. Od svih tih načina najjednostavniji je i najperspektivniji dobivanje električne energije s pomoću solarnih ćelija; o tome ćemo najviše i govoriti.

4.5.2. Fotonaponska konverzija

S pomoću fotonaponskog efekta može se sunčana energija izravno pretvoriti u električnu u solarnim ćelijama. Kad solarna ćelija apsorbira Sunčevo zračenje, fotovoltaičnim efektom na njezinim se krajevima proizvede elektromotorna sila (napon) i tako solarna ćelija postaje izvor električne energije.

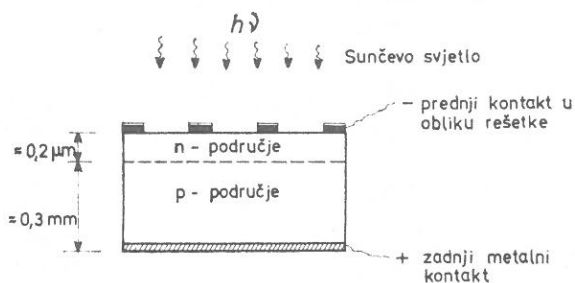
Razvoj fotoelektričkih pretvarača energije počinje istraživanjima Becquerela 1839. godine. On je uočio da se jakost struje između metalnih elektroda u elektrolitu povećava kad se elektrode osvijetle. Oko 40 godina kasnije napravljena je prva fotoćelija od selen. U početku ovog stoljeća nastavljaju se istraživanja i objavljuje se fotoefekt (Einstein, 1905). Nešto kasnije razvijaju se ispravljači od selen i bakar-oksida i prema tom principu izrađuju se prvi svjetlomjeri. Nagli razvoj solarnih ćelija počinje 1954. godine, kada Pearson, Fuller i Chapin izrađuju prvu solarnu ćeliju od monokristalnog silicija. Kasnije se silicijeva sunčana ćelija usavršuje i efikasnost joj se od 6% povećava do 14%. Gotovo istodobno pronađena je i solarna ćelija od kadmijeva sulfida [Reynolds 1955].

Intenzivna istraživanja solarnih ćelija od 1956. do 1962. nisu uspjela sniziti njihovu cijenu i učiniti ih ekonomičnima za terestričku primjenu. Ekonomska kriza 1973. ponovno je ubrzala istraživanja i razvoj solarnih ćelija.

Prve važnije primjene solarnih ćelija bile su u satelitima. Od 1958. godine kad je krenuo prvi satelit, svi sateliti i svemirski brodovi opskrbljeni su silicijevim solarnim ćelijama. U tom razdoblju silicijeva ćelija tehnološki se tako razvila da je danas vrlo pouzdan (iako, na žalost, ne jeftin) izvor solarnog elektriciteta.

Nakon energetske krize 1973. godine počinje se intenzivno istraživati proizvodnja solarnih ćelija i za terestričke primjene. Danas se solarne ćelije koriste tamo gdje drugi izvori elektriciteta nisu dostupni. Najveći problem u terestričkoj proizvodnji električne energije s pomoću

Slika. 4.58. Shematski prikaz silicijeve solarne ćelije



sunčanih ćelija jest vrlo visoka cijena solarnih fotonaponskih sustava.

Silicijeva solarna ćelija (sl. 4.58) je p-n spoj koji se dobija npr. tako da se na površini pločice p-tipa silicija difundiraju primjese (npr. fosfora) tako da na tankom površinskom sloju nastane područje n-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorpcijom fotona iz Sunčeva zračenja, na prednjoj površini nalazi se metalna rešetka, a zadnja je strana prekrivena metalnim kontaktom. Rešetkasti kontakt na prednjoj strani načinjen je tako da ne prekrije više od oko 5% površine te on gotovo ni ne utječe na apsorpciju Sunčeva zračenja. Prednja površina ćelije prekrivena je i prozirnim antirefleksijskim slojem koji sprečava refleksiju Sunčeva svjetla i tako povećava efikasnost.

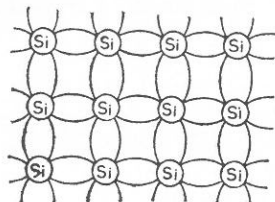
Sunčane ćelije proizvode napon oko 0,5 V i jakost struje oko 20 mA/cm². Da bi se dobio odgovarajući napon odnosno snaga, ćelije se mogu spajati serijski i paralelno. Tako se dobivaju moduli solarnih ćelija u obliku ploče (panela) na kojoj su ćelije učvršćene i zaštićene od atmosferskih i drugih utjecaja. Moduli se slažu jedan do drugog u fotonaponske ravne kolektore, a kolektori zajedno s ostalim potrebnim elementima (pretvaračima, regulatorima, akumulatorima i sl.) tvore fotonaponski sustav.

Da bismo razumjeli princip rada solarnih ćelija, podsjetimo se kristalne strukture poluvodiča i osnovne teorije p-n spoja [v. npr. Ju 75]. Atomi u kristalnoj rešetki poluvodiča (npr. Si) vezani su međusobno kovalentnom vezom. Silicijev atom ¹⁴Si ima 2 elektrona u prvoj K ljusci, 8 elektrona u drugoj L, i 4

elektrona u trećoj, vanjskoj M ljusci. Ta 4 valentna elektrona raspoređena su tako da se dva nalaze u 3s, a dva u 3p stanju. Budući da se u 3p podljusci može nalaziti 6 elektrona, to nedostaju 4 elektrona da bi vanjska 3p podljuska bila popunjena.

U kristalnoj rešetki silicija atomi su pravilno raspoređeni tako da se oko svakog atoma nalaze četiri susjedna atoma koji s njim imaju zajednički jedan elektron i tako se međusobno vežu kovalentnom vezom.

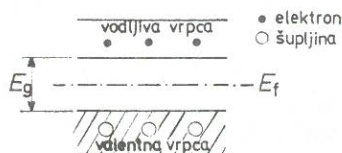
Na slici 4.59. prikazana je dvodimenzionalna slika kristalne rešetke silicija u kojoj svaki silicijev atom ima zajedničke parove elektrona s četiri susjedna silicijeva atoma.



Slika 4.59. Dvodimenzionalna slika kristalne rešetke čistog silicija

Energetski nivoi elektrona pojedinih atoma u kristalnoj rešetki poluvodiča preklapaju se i čine tzv. energetske vrpce.

Na slici 4.60. prikazan je energetski dijagram intrinzičnog čistog poluvodiča. Na apsolutnoj nuli valentna je vrpca popunjena elektronima, a vodljiva je vrpca prazna. Između valentne i vodljive vrpce nalazi se zabranjena vrpca, a širina te vrpce E_g važan je parametar o kojem ovise svojstva poluvodiča.



Slika 4.60. Energetski dijagram za intrinzični poluvodič

Raspodjela elektrona u dozvoljene nivoe može se opisati Fermijevom funkcijom $f(E)$ koja daje vjerojatnost da je stanje energije E popunjeno elektronom. Fermijeva raspodjela ima oblik:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1} \quad (4.101)$$

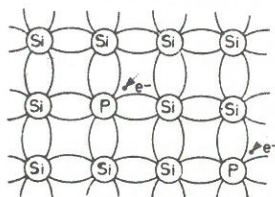
gdje je E energija dozvoljenog stanja, E_f Fermijeva energija, k Boltzmannova konstanta i T apsolutna temperatura.

Uočite da je Fermijeva energija E_f intrinzičnog poluvodiča u sredini između valentne i vodljive vrpce.

Ako je u nekom materijalu gornja dopuštena vrpca (tj. vodljiva vrpca) potpuno prazna, a valentna vrpca potpuno puna, vanjsko električno polje ne može proizvesti struju u takvom materijalu (jer nema slobodnih nosilaca naboja) i materijal se ponaša kao odličan izolator. Upravo je to slučaj i s poluvodičem na apsolutnoj nuli. Međutim, pri običnim temperaturama, zbog relativno malene vrijednosti za širinu zabranjene vrpce E_g (za poluvodiče oko 1 eV, za izolatore oko 10 eV) elektroni u poluvodičima iz valentne vrpce mogu prijeći u vodljivu vrpcu (npr. toplinskom uzbudom), ostavljajući pri tom šupljine u valentnoj vrpci. Tako nastaju parovi elektron-šupljina i porastom temperature povećava se vodljivost poluvodiča. Vodljivost je poluvodiča prema tome uzrokovana elektronima u vodljivoj i šupljinama u valentnoj vrpci; što je koncentracija elektrona odnosno šupljina veća, i vodljivost je poluvodiča veća. U čistom poluvodiču broj slobodnih elektrona u vodljivoj vrpci jednak je broju šupljina u valentnoj vrpci

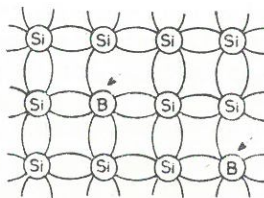
te u vodljivosti ravnopravno sudjeluju i elektroni i šupljine.

Dodaju li se siliciju primjese, može se od čistog (intrinzičnog) silicija dobiti p-tip odnosno n-tip. Time se znatno povećava vodljivost poluvodiča. Valentnost atoma takvih primjesa razlikuje se od valentnosti silicijeva atoma za jedinicu, tj. atomi primjesa imaju tri odnosno pet valentnih elektrona. Ako se atom silicija u kristalnoj rešetki zamijeni atomom fosfora (sl. 4.61), koji ima 5 valentnih elektrona, četiri valentna elektrona fosfora uključe se u kovalentnu vezu sa susjednim atomima a preostali peti elektron lako se odvaja od jezgre, postaje gotovo slobodan, giba se kroz kristalnu rešetku i tako povećava vodljivost poluvodiča. Takav poluvodič s viškom negativnih nosilaca naboja (elektrona) naziva se n-tip.

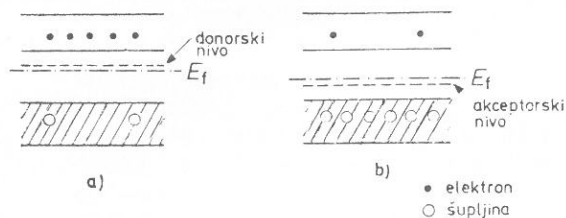


Slika 4.61. Kristalna rešetka silicija s peterovalentnim (donorskim) primjesama (n-tip)

Slično, ako se silicijevu kristalu dodaju trovalentne primjese (bor, galij...), za svaki dodani atom nedostaje jedan elektron (sl. 4.62). Valentni elektron lako može popuniti tu vezu stvarajući šupljinu u valentnoj vrpci. Tako nastaje p-tip poluvodiča u kojeg prevladavaju nosioci naboja pozitivne šupljine.



Slika 4.62. Kristalna rešetka silicija s trovalentnim (akceptorskim) primjesama (p-tip)



Slika 4.63. Energetski dijagram za a) n-tip i b) p-tip poluvodiča

Na slici 4.63.a i b prikazan je dijagram energetskih vrpca za n-tip odnosno p-tip poluvodiča. Primjese su stvorile dodatni energetski nivo unutar zabranjene vrpce. U p-tipu na taj način nastaje akceptorski nivo u koji mogu prijeći elektroni iz valentne vrpce stvarajući pozitivne nosioce naboja (šupljine) u valentnoj vrpci. Slično, u n-tipu postoji donorski nivo iz kojeg mogu prijeći elektroni u vodljivu vrpцу i tako povećati koncentraciju negativnih nosilaca naboja (elektrona) u toj vrpci.

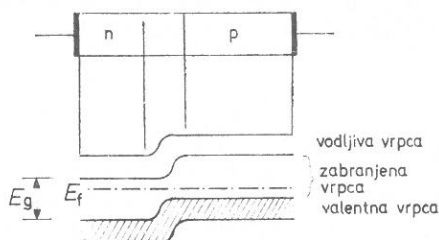
U intrinzičnom poluvodiču Fermijeva energetska razina E_f u sredini je zabranjene vrpce (jer je broj elektrona u vodljivoj vrpci jednak broju šupljina u valentnoj vrpci), u n-tipu Fermijeva razina E_f pomaknuta je prema vodljivoj, a u p-tipu prema valentnoj vrpci. Pomak Fermijeve razine ovisi o koncentraciji primjese i o temperaturi.

Pri nastajanju p-n spoja, kao npr. pri izradi solarne ćelije (sl. 4.58), elektroni iz n-područja (u kojem su oni većinski nosioci naboja) difundiraju u p-područje, a šupljine (više koncentrirane u p-području) difundiraju u n-područje. Ta difuzija traje sve dok se na p-n spoju ne uspostavi odgovarajuća potencijalna barijera koja zaustavlja difuziju. U p-n spoju uspostavlja se, dakle, unutrašnje električno polje (usmjereno od n-područja prema p-području) koje će elektrone koji se eventualno nađu u tom području ubrzati prema n-strani, a šupljine prema p-strani.

Na slici 4.64. energetski je prikaz p-n spoja u ravnoteži. Dodatna potencijalna energija mijenja energetski dijagram te se dno vodljive i vrh valentne vrpce na

p-strani podigne. Fermijev nivo mora biti isti u čitavom spoju jer je to sustav elektrona u ravnoteži: na n-strani nalazi se bliže vodljivoj, a na p-strani bliže valentnoj vrpci.

Važno je svojstvo p-n spoja njegovo ispravljačko djelovanje: on mnogo lakše vodi struju kad je p-strana pozitivna, a n-strana negativna (napon u propusnom smjeru), nego kad je obratno (napon u zapornom smjeru); p-n spoj radi, dakle, kao dioda.



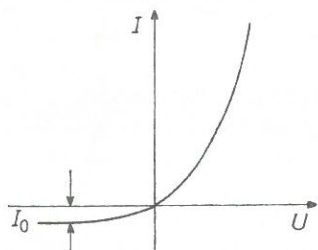
Slika 4.64. Dijagram energetskih vrpca homogene n-p solarne ćelije

Kad se na p-n spoj priključi izvor napona tako da je pozitivni pol na p-strani, a negativni pol na n-strani, smanjuje se visina barijere i potekne struja elektrona (prema p-strani) i šupljina (prema n-strani). Ta struja eksponencijalno raste s primijenjenim naponom i p-n spoj radi kao dioda u propusnom smjeru. Pri inverznom naponu (tj. ako je p-strana priključena na negativni, a n-strana na pozitivni pol izvora napona) povećava se visina potencijalne barijere i kroz p-n spoj teče vrlo mala struja (tzv. struja zasićenja) uzrokovana parovima elektron—šupljina nastalom toplinskom pobudom u blizini spoja.

Veza između vanjskog napona U i struje I kroz p-n spoj, tzv. I - U karakteristika diode, može se prikazati jednadžbom

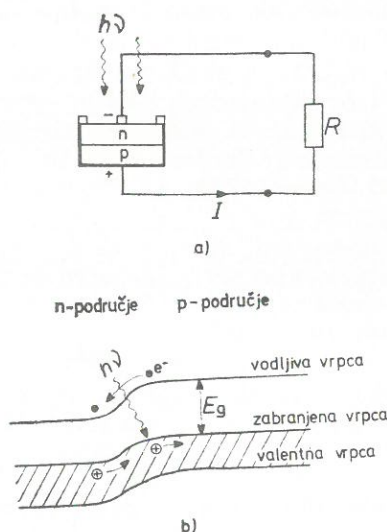
$$I = I_0 (e^{eU/kT} - 1) \quad (4.102)$$

gdje je I_0 struja zasićenja (zaporna struja) koja ovisi o p-n spoju, e elementarni naboj, k Boltzmannova konstanta, a T apsolutna temperatura.

Slika 4.65. $I-U$ karakteristika p-n spoja

Na slici 4.65. prikazana je $I-U$ karakteristika p-n spoja.

Solarna ćelija načinjena je tako da se, kada je osvijetlamo, na njezinim krajevima javlja elektromotorna sila. Kada se solarna ćelija (p-n spoj) obasja svjetlošću (sl. 4.66. a i b), apsorbirani fotoni dovoljno velike energije proizvode parove elektron—šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od p-n spoja, nastali par ubrzo rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija unutar ili u blizini p-n spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, odvaja nastali elektron i šupljinu — elektron se giba prema n-strani, šupljina prema p-strani.



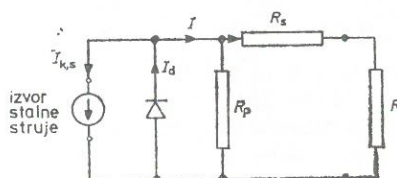
Slika 4.66. Solarna ćelija obasjana svjetlošću; a) shematski prikaz ćelije, b) unutrašnje električno polje razdvaja nosioce naboja nastale apsorpcijom fotona

Takvo skupljanje elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama p-n spoja uzrokuje elektromotornu silu na krajevima ćelije. Ako su kontakti solarne ćelije spojeni s vanjskim potrošačem, kroz osvijetljenu solarnu ćeliju proteći će električna struja.

Kad je solarna ćelija spojena s vanjskim potrošačem i osvijetljena, u ćeliji će se generirati fotostruja I_s , te će kroz vanjski potrošač teći struja I jednaka razlici normalne struje diode I_d određene jednadžbom (4.102) i fotostruje I_s

$$I = I_d - I_s = I_0 (e^{eU/kT} - 1) - I_s. \quad (4.103)$$

Osvijetljena solarna ćelija ponaša se kao izvor konstantne struje. Njezin ekvivalentni sklop prikazan je na slici 4.67.



Slika 4.67. Ekvivalentni sklop solarne ćelije

Izvor konstantne struje paralelno je spojen s diodom. Serijski otpor R_s ovisi o materijalu i izradi solarne ćelije, a poželjno je da bude što manji. Paralelni otpor (shunt) R_p ovisi o kvaliteti ćelije i većinom je dovoljno velik da ga možemo zanemariti. Uz te pretpostavke struja kroz vanjski otpor R određena je izrazom (4.103). Međutim, u slučaju da serijski otpor R_s nije zanemariv jednadžba (4.103) ima oblik

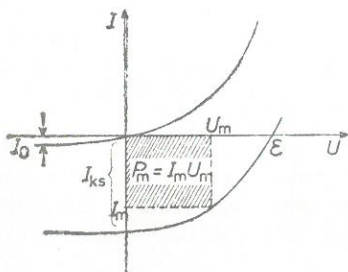
$$I = I_0 (e^{(U+R_s I)/kT} - 1) - I_s. \quad (4.104)$$

Jedan od najvažnijih parametara sunčane ćelije jest njezina elektromotorna sila, tj. napon na njezinim stezaljkama pri otvorenom strujnom krugu ($I=0$). Uvrštavajući $I=0$ u jednadžbu (4.103), dobivamo da je napon

$$\epsilon = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_s}{I_0} + 1 \right). \quad (4.105)$$

Elektromotorna sila solarne ćelije ϵ ovisi o fotostruji I_s (koja raste s porastom sunčana ozračenja — solarne iradijancije) i o zapornoj struji diode, a poželjno je da je ona što manja. Zaporna struja diode I_0 ovisi o temperaturi te će i elektromotorna sila solarne ćelije ovisiti o temperaturi i biti manja što je temperatura veća.

Važan podatak za ćeliju jest i struja kratkog spoja, tj. jakost struje kad je napon na stezaljkama ćelije jednak nuli. Uvrstimo li u (4.103) $U=0$, dobivamo da je struja kratkog spoja jednaka fotogeneriranoj struji I_s .



Slika 4.68. $I-U$ karakteristika osvijetljene i neosvijetljene solarne ćelije

Na slici 4.68. prikazana je $I-U$ karakteristika osvijetljene i neosvijetljene solarne ćelije. Vidi se, uz ostalo, i elektromotorna sila i struja kratkog spoja ćelije.

Snaga koju može dati sunčana ćelija dobiva se množenjem napona i struje

$$P = UI = U(I_s - I_0 e^{U/kT} + I_0). \quad (4.106)$$

Maksimalna snaga koju ćelija može dati $P_m = U_m I_m$ označena je na slici 4.68. i odgovara površini iscrtkanog pravokutnika. Računski se može odrediti traženjem ekstrema funkcije (4.106), odnosno pravokutnika na slici 4.68. koji ima maksimalnu površinu.

Maksimalna snaga solarne ćelije može se prikazati i s pomoću elektromotorne sile i struje kratkog spoja

$$P_m = I_m U_m = \epsilon I_{ks} F \quad (4.107)$$

gdje je

$$F = \frac{U_m I_m}{\epsilon I_{ks}} \quad (4.108)$$

tzv. faktor punjenja koji je jednak omjeru između površine pravokutnika sa stranicama U_m i I_m i pravokutnika sa stranicama ϵ i I_s . On pokazuje koliko se stvarna ćelija približuje idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije. Obično je $0,7 < F < 0,9$.

Efikasnost ćelije omjer je između njezine maksimalne snage i ulazne snage Sunčeva zračenja

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{GA} = \frac{I_m U_m}{GA} = \frac{\epsilon I_s F}{GA}, \quad (4.109)$$

gdje je G sunčano ozračenje, a A površina ćelije.

Da bi efikasnost bila veća, potrebno je da i I_s bude što veći, a faktor punjenja što bliži jedinici. Tipične vrijednosti za silicijevu ćelije jesu $F \approx 0,82$, $R_s = 0,96 \, \Omega$, $\epsilon = 0,57 \, \text{V}$, $\eta = 10\%$ [Ba 81].

Primjer. Pri ozračenju $1 \, \text{kW/m}^2$ elektromotorna sila solarne ćelije jest $0,54 \, \text{V}$, a struja je kratkog spoja $50 \, \text{mA}$. Maksimalna snaga dobije se pri opterećenju $9 \, \Omega$ i naponu $0,43 \, \text{V}$. Površina je ćelije $4 \, \text{cm}^2$. Kolika je efikasnost ćelije i faktor punjenja?

Efikasnost ćelije možemo odrediti s pomoću jednadžbe (4.109)

$$\eta = \frac{I_m U_m}{GA} = \frac{U_m^2}{RGA} = 5\%.$$

Faktor je punjenja

$$F = \frac{U_m I_m}{\epsilon I_{ks}} = \frac{U_m^2}{\epsilon I_{ks} R} = 0,76.$$

Napomenimo da je maksimalna teoretska vrijednost za fotostruju oko $40 \, \text{mA/cm}^2$ [Wi 79] pri ozračenju $1 \, \text{kW/m}^2$ (tj. za AM 1), što bi za elektromotornu silu $0,6 \, \text{V}$ i maksimalni teoretski faktor punjenja $0,88$ dalo efikasnost 21% — što je teoretska vrijednost za maksimalnu efikasnost silicijevu (n-p) solarne ćelije.

Pri apsorpciji fotona unutar poluvodičke solarne ćelije nastaje par elektron—šupljina kojega je energija ovisna o energiji (frekvenciji) upadnog fotona. Pri tom mora biti ispunjen uvjet

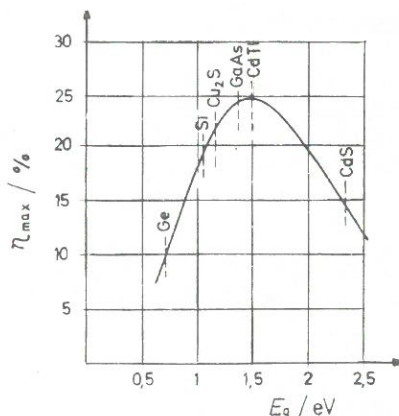
$$h\nu \geq E_g \text{ odnosno } \lambda \leq \frac{hc}{E_g}, \quad (4.110)$$

gdje je ν frekvencija upadnog fotona, c brzina svjetlosti, h Planckova konstanta, a E_g širina zabranjenog pojasa u poluvodiču. Fotoni valnih duljina većih od granične $\lambda_g = hc/E_g$ ne apsorbiraju se u solarnoj ćeliji. Pri apsorpciji fotona valne duljine manje od granične, višak energije $h\nu - E_g$ prelazi u kristalnu rešetku povećavajući joj unutrašnju energiju. Iz toga bi se moglo zaključiti da je poluvodič prikladniji što mu je širina zabranjene vrpce E_g manja, jer poluvodič s manjim E_g može apsorbirati veći opseg valnih duljina iz Sunčeva spektra. Međutim, elektromotorna sila solarne ćelije također ovisi o E_g : za veći E_g manja je inverzna struja zasićenja kroz diodu, a tako je veća i elektromotorna sila. Poluvodiči malog E_g nisu, dakle, prikladni jer su dobiveni naponi preniski. Ta dva efekta suprotna su jedan drugome: zbog jednog se povećanjem E_g smanjuje efikasnost, a zbog drugog povećava, tako da je efikasnost složena funkcija od E_g .

Na slici 4.69. prikazana je maksimalna teoretska efikasnost solarne ćelije kao funkcija širine zabranjenog pojasa E_g . Na slici su također označeni neki od poluvodiča koji bi mogli poslužiti za izradu solarnih ćelija. Efikasnost u početku raste s E_g , postiže maksimum, a zatim opada. Maksimum efikasnosti jest oko 25% na oko 1,5 eV (što odgovara maksimalnoj valnoj duljini 0,83 μm).

Postoji mnogo vrsta poluvodiča od kojih bi se mogle izraditi ćelije. Međutim, u praksi se mnogi od tih poluvodiča ne mogu upotrijebiti zbog tehnologije izrade, cijene ili malene efikasnosti.

Širina zabranjenog pojasa u siliciju jest 1,1 eV, što odgovara efikasnosti oko 20%; dakle, silicij nije teoretski najbolji materijal za izradu solarnih ćelija.

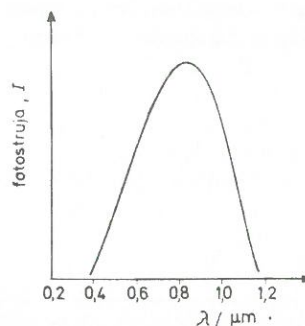


Slika 4.69. Ovisnost maksimalne teoretske efikasnosti solarne ćelije o širini zabranjenog pojasa

Najbolje bi bilo, barem teoretski, upotrebljavati materijale širine zabranjenog pojasa od 1,4 eV do 1,6 eV. Međutim, efikasnost postignuta u praksi manja je od teoretske. Najbolja je postignuta efikasnost za silicijeve ćelije oko 15%. Neki u novije vrijeme istraživani materijali [GaAs, CdTe i dr.] velikih teoretskih efikasnosti također se upotrebljavaju za izradu solarnih ćelija. Međutim, dosad postignute efikasnosti nisu veće od efikasnosti silicijevih ćelija, a takve su ćelije skuplje i nestabilnije od silicijevih. Cilj je razvoja solarnih ćelija povećanje efikasnosti i sniženje cijene.

Solarna ćelija različito je osjetljiva na različite valne duljine Sunčeva spektra [Di 79a].

Na slici 4.70. prikazana je spektralna ovisnost struje silicijeve solarne ćelije.



Slika 4.70. Spektralna osjetljivost silicijeve solarne ćelije

Najveća joj je osjetljivost u području valnih duljina oko $0,8 \mu\text{m}$ jer se većina fotona u tom području apsorbira blizu ili u osiromašenom području (p-n spoju). Fotoni kratkih valnih duljina apsorbiraju se odmah na ulazu u ćeliju (dakle, daleko od p-n spoja) te ne utječu bitno na struju ćelije. Fotoni velikih valnih duljina (infracrvena svjetlost) prolaze kroz spoj i apsorbiraju se pri dnu ćelije ili čak prođu kroz nju tako da i oni bitno ne pridonose struji.

4.5.3. Sadašnje stanje i perspektive razvoja solarnih ćelija

Iako su u laboratorijima napravljene i ispitane solarne ćelije od raznih poluvodičkih materijala, jedino se, zasad, silicijske solarne ćelije mogu komercijalno nabavljati. Te se ćelije izrađuju od monokristala silicija. Površina im je ovisno o površini monokristala od kojeg se proizvode, od 5 cm^2 do 10 cm^2 , a debljine su oko $0,2 \text{ mm}$ do $0,3 \text{ mm}$. Elektromotorna je sila od $0,55 \text{ V}$ do $0,7 \text{ V}$, struja kratkog spoja reda je veličine stotinjak mA i ovisi o površini, a efikasnost od 10% do $13,5\%$. Silicijeva solarna ćelija pouzdana je, dugog vijeka trajanja (više od 15 godina u terestričkim uvjetima, a u svemirskim zbog utjecaja radioaktivnog zračenja malo manje), vrlo je pogodna za upotrebu u satelitima i jedino visoka cijena onemogućuje njezinu masovnu primjenu.

Najveći problem u terestričkoj primjeni solarnih ćelija jest njihova visoka cijena. Iako se zadnjih godina vrlo napredovalo u tehnologiji sunčanih ćelija, one su, na žalost, danas još preskupe za dobivanje solarnog elektriciteta i uglavnom se primjenjuju tamo gdje se ne mogu upotrijebiti drugi izvori. Međutim, cijena im ipak stalno pada. Kad su se 1954. pojavile, cijena im je bila oko $10\,000 \$$ po 1 W vršne snage (tj. snage pri maksimalnom osvjetljenju), 1965. cijena im je pala na $1\,000 \$/\text{W}$, 1973. na $300 \$/\text{W}$, 1975. na $100 \$/\text{W}$, a 1977. na oko $15 \$/\text{W}$. Današnja im je cijena oko

$10 \$/\text{W}$. Prema predviđenoj cijeni električne energije iz nuklearnih elektrana i specifičnostima Sunčeve energije cijena solarnih ćelija ne bi smjela biti veća od oko $0,3 \$/\text{W}$ ($30 \$/\text{m}^2$) da bi one bile ekonomski prihvatljive. A to je bitno sniženje cijene (do 50 puta) prema današnjima. Taj se cilj može postignuti jedino ako se intenzivnim istraživanjem uspiju naći novi materijali i pojednostavniti tehnologiju proizvodnje. Sadašnju tehnologiju proizvodnje ćelija od monokristalnog silicija treba učiniti jeftinijom i povećati efikasnost tih ćelija; potrebno je razviti tehnologiju proizvodnje ćelija od tankih filmova polikristalnog ili amornog silicija te drugih fotovoltaičnih materijala. Masovna proizvodnja solarnih ćelija također će utjecati na smanjenje cijene.

Kada govorimo o cijeni, valja točno označiti da li je to cijena samo ćelije, modula ćelija ili pak kompletnog instaliranog sustava koji se sastoji od kolektora s modulima, ožičenja i potrebnih instalacija. Ne treba, naime, zaboraviti da je cijena ćelija u nekom sustavu samo dio cijene ukupnog sustava.

Sadašnja je cijena modula solarnih ćelija oko $10 \$/\text{W}$ (što odgovara oko $2 \$/\text{kW h}$); to je vrlo skupo i ograničuje njihovu upotrebu. Očekuje se da će cijena solarnih ćelija (u modulima) do 1986. godine pasti na $0,7 \$$ po vatu vršne snage [Ba 81], što bi odgovaralo cijeni $2 \$/\text{W}$ za sistem, odnosno $0,5 \$/\text{kW h}$ električne energije. Cijena bi do 2000. godine trebala pasti na oko $0,2 \$/\text{W}$.

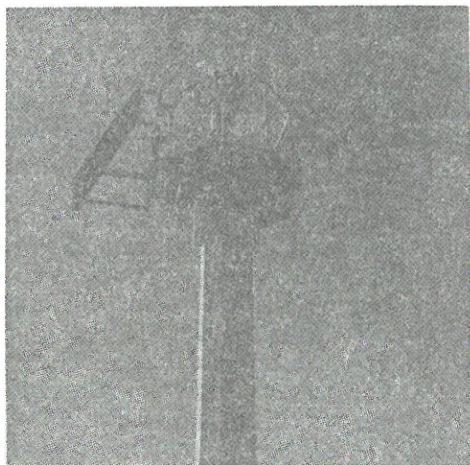
Pri upotrebi sunčanih ćelija s fokusirajućim uređajima (Fresnelovim lećama) dobiju se dosta veće gustoće struje, međutim, potrebni su uređaji za praćenje Sunca i hlađenje ćelija što povećava cijenu sustava. Povećanjem koncentracije dolazi do povišenja temperature, a time do pada napona i efikasnosti. Silicijeve ćelije pogodne su za koncentracije do 100 puta i za temperature do 100°C .

Iako je sada doprinos solarnih ćelija energetske potrebama zanemariv, ipak su one važne u mnogim primjenama. Njihova je upotreba svakako potrebna

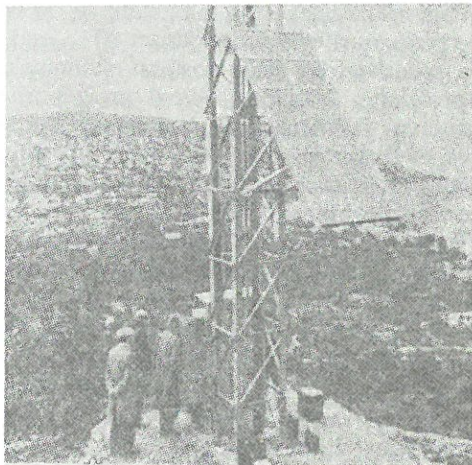
u satelitima i svemirskim brodovima, gdje su se upravo najprije i počele primjenjivati. Njihove terestričke primjene zasad su ograničene uglavnom na mjesta gdje nema drugih izvora elektriciteta. Signali na prelazima preko željezničke pruge, udaljeni telekomunikacijski sustavi (npr. u planinama, na otocima i sl.), telefonske centrale, relejne stanice, svjetionici, električne ograde na pašnjacima, sustav za navodnjavanje, neki su od primjera gdje se solarne ćelije mogu praktično primijeniti. Solarni fotonaponski sustav mogao bi se upotrebljavati i za opskrbu električnom energijom manjeg

naselja, osobito u predjelima gdje je insolacija velika, a drugih izvora nema. Ono bi se mogao kombinirati s generatorima koje pokreće vjetar u područjima gdje nema električne mreže (npr. za planinske kuće, hotele, planinske domove i sl.) tako da bi se vjetar i sunce nadopunjavali u tom sustavu.

Kao ilustraciju primjene solarnih ćelija na slici 4.71a. prikazan je kolektor sa solarnim ćelijama na jednom svjetioniku. Snaga je kolektora oko 30 W. Kao spremnik služi olovni akumulator od 12 V. Na slici 4.71b. prikazan je kolektor sa solarnim ćelijama za napajanje elevizijskog pretvarača na Pelješcu.



Slika 4.71a. Svjetionik u Splitu sa solarnim ćelijama



Slika 4.71b. Kolektor sa solarnim ćelijama za napajanje televizijskog pretvarača na Pelješcu

Danas se komercijalne solarne ćelije uglavnom izrađuju od čistog silicija. Komplikiran tehnološki proces proizvodnje glavni je uzrok visoke cijene. Da bi se spoznala složenost izrade, navest ćemo, ukratko, tok proizvodnje. Iz rastaljenog čistog silicija (cijena oko 65 \$/kg) nakon ubacivanja malog monokristala koji služi kao klica kristalizacije dobiva se izvlačenjem monokristal silicija promjera oko 8 cm i duljine oko 50 cm. Rezanjem tog komada monokristala dobivaju se tanke okrugle pločice silicija (debljine 0,2 mm — 0,4 mm). Pri tom postupku samo jedan dio kristala uspije

se iskoristiti, ostalo (oko 70%) pri rezanju propadne, što bitno povećava troškove izrade. Da bi se od tankih silicijevih pločica dobila solarna ćelija, potreban je još niz postupaka obrade (poliranje, difuzija drugog poluvodičkog sloja na površini itd.) što još više smanjuje dio korisno upotrebljenog silicija i povećava troškove izrade.

Da bi se cijena solarnih ćelija bitno smanjila, bit će potrebno pojednostavniti izradu i upotrijebiti druge, jeftinije materijale, npr. tanki film polikristalnog odnosno amorfno silicija, heterospojeve, npr. $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ itd. Intenzivnim istra-

živanjima zadnjih godina već su postignuti određeni rezultati i može se očekivati da će se cijena solarnih ćelija i u budućnosti smanjivati.

Ćelije od polikristaliničnog silicija izrađuju se u obliku tankog filma na jeftinijoj podlozi pa se tako uštedi materijal i izbjegava skupa tehnologija izrade pločica od monokristalnog silicija. Cilj je napraviti ćelije efikasnosti 10% i više, stabilne dovoljno dugo (20 godina), a cijene niže od 0,5 \$/W.

Prva ćelija od amorfno silicija (α -Si:H) proizvedena je 1974. (Carlson i Wronski), imala je $\epsilon=0,8$ V, $I_{ks}=12$ mA/cm², $A=0,02$ cm² i efikasnost $\eta=5,5\%$. Nakon intenzivnog istraživanja proizvedena je ćelija efikasnosti 7%, a očekuje se da će se postignuti efikasnost barem 10% jer je to preduvjet da ćelije postanu ekonomski opravdane. Naime, troškovi proizvodnje modula i instalacije uređaja za ćelije male efikasnosti ($\eta < 10\%$) tako su veliki da bez obzira na cijenu ćelije sustav ne može postati ekonomski konkurentan [Ba 81]. Prema najnovijim istraživanjima ćelije od amorfno silicija izgledaju najperspektivnije.

Uz silicijeve, najperspektivnije su i najviše istražene solarne ćelije od kadmijeva sulfida. $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ solarna ćelija sastoji se od tankog sloja CdS (oko 20 μm) kao n-područja na koji je nanesen p-sloj bakar-sulfida Cu_2S debljine oko 0,2 μm . Efikasnost je takvih ćelija 7%—9%, a vijek im je trajanja kraći nego silicijevim solarnim ćelijama. Tehnologija takvih ćelija još se razvija, očekuje se da bi im se cijena mogla spustiti i do 5 \$/m². Vjerojatno će ubrzo početi i njihova komercijalna proizvodnja.

Ćelije od galij-arsenida prave se u obliku tankog filma od jedne (GaAs) ili

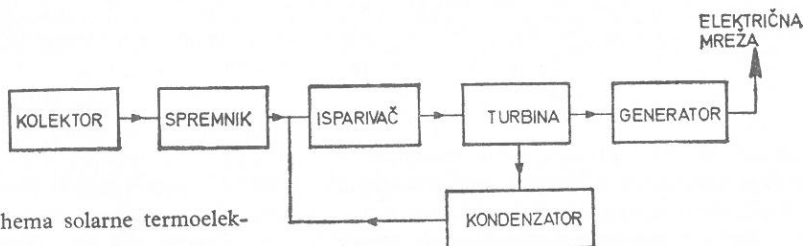
dvije komponente ($\text{GaAs} + \text{Cu}_2\text{S}$) na nekoj podlozi. Takva bi ćelija, barem prema teoretskim predviđanjima, bila vrlo efikasna. Širina zabranjene vrpce GaAs (v. sl. 4.69) jest 1,4 eV što odgovara teoretskoj efikasnosti 24%. Međutim, dobivene efikasnosti kreću se oko 11% do 13%. Istraživanjima tih i drugih materijala valja pronaći jednostavne i jeftine tehnologije izrade, povećati efikasnost i sniziti cijenu solarne ćelije.

Izravna konverzija solarne energije u električnu još je preskupa da bi bila ekonomski konkurentna. Rezultati dosadašnjih istraživanja, međutim, pobuđuju optimizam...

4.5.4. Solarne elektrane

Osim izravnom konverzijom s pomoću solarnih ćelija, električna energija može se iz sunčane dobiti u solarnim elektranama. Solarna se energija pretvara u toplinsku, njome se grije radni fluid koji zatim pokreće turbine i električne generatore. Toplinska energija potrebna za rad takvih elektrana dobiva se fokusirajućim kolektorima (sustavima zrcala odnosno leća) jer se ravnim kolektorima ne mogu postignuti dovoljno visoke temperature za proizvodnju pare. Obično se pregrijana vodena para, dobivena solarnom energijom, uvodi u turbine i nakon obavljenog rada vraća u kondenzator gdje se pretvara u vodu predajući latentnu toplinu i zatim kao voda vraća u isparivač gdje ciklus počinje ponovno. To je poznati Rankinov proces s pomoću kojeg se obično proizvodi električna energija u termoelekttranama.

Solarna je energija tu djelomičan ili potpuni izvor potrebne topline. Glavni su dijelovi solarne elektrane (sl. 4.72) dakle: kolektori (koncentrirajući, obično



Slika 4.72. Blok shema solarne termoelektrane

cilindrično parabolični ili heliostati), prijemnik (apsorber), spremnik topline i turbine s generatorom za proizvodnju električne energije.

Zbog intermitentnosti Sunčeve energije takve elektrane moraju imati dobro riješeno toplinsko uskladištenje energije ili pomoćni izvor topline kad Sunčeva zračenja nema ili nije dovoljno. Vjerojatno bi najpovoljniji bio tzv. hibridni sustav koji bi imao konvencionalni izvor topline i relativno maleni toplinski spremnik.

Iako sunčane elektrane ne rade na principu Carnotova nego Rankinova procesa, može se njihova efikasnost približno procijeniti primijenjujući teoriju idealnog Carnotova procesa za koji je

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4.111)$$

gdje je T_1 temperatura toplijeg spremnika, a T_2 temperatura hladnijeg spremnika (obično okolne atmosfere).

Odatle se vidi da je uvjet za visoku efikasnost visoka temperatura radnog fluida koja je u solarnim elektranama ograničena raznim faktorima (izradom kolektora, efikasnošću kolektora na višim temperaturama, materijalnim troškovima izrade itd.). Budući da je ukupna efikasnost umnožak efikasnosti termodinamičkog ciklusa i efikasnosti kolektora, postoji optimalna temperatura za svaku solarnu termoelektiranu.

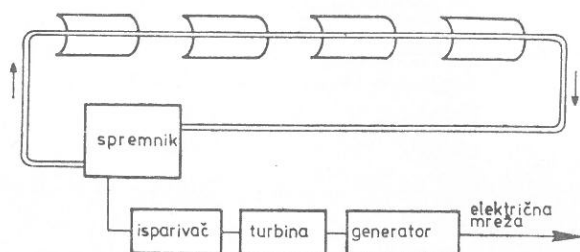
Postoje uglavnom dva načina kako se može dobiti potrebna solarna toplina za pogon takve elektrane: sustav s raspoređenim kolektorima (DCS-Distributed Collector System) i sustav sa središnjim

prijemnikom (CRS-Central Receiver System).

U sustavu s raspoređenim kolektorima (sl. 4.73) s pomoću niza koncentrirajućih cilindrično-paraboličnih zrcala (omjera koncentracije 10—100) raspoređenih na većoj površini skuplja se Sunčeva energija i fokusira na apsorberske cijevi koje se nalaze u žarišnoj liniji kolektora i kroz koje protječe fluid za prijenos topline. Tako se dobiva para potrebna za pokretanje turbine povezane s električnim generatorom. Taj je sustav pogodan za manje elektrane. Njegove su mane veliki broj zrcala koja moraju pratiti Sunce, kompliciran sustav cijevi kroz koje teče fluid itd.

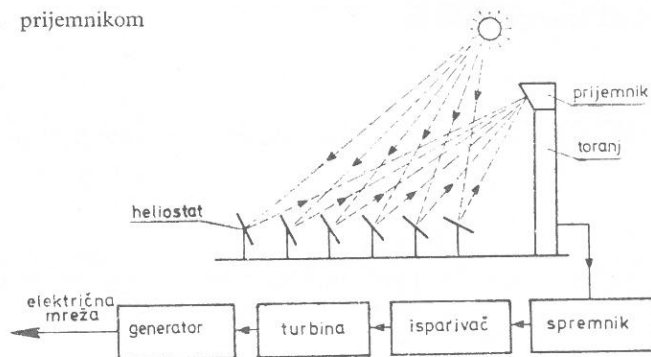
U elektranama sa središnjim prijemnikom (sl. 4.74) izravno Sunčevo zračenje s pomoću velikog broja heliostata reflektira se u prijemnik koji se nalazi na vrhu visokog tornja. Heliostati su ravna (točnije — malo zakrivljena) zrcala koja stalno prate Sunce i usmjeravaju njegovu energiju na vrh tornja gdje se zagrijava odgovarajući fluid. Tako dobivena toplinska energija koristi se za pogon termoelektrane. Omjer koncentriranja takvog sistema reda je veličine 500. Sustav je pogodan za elektrane veće snage.

Za električnu centralu snage 100 MW. bilo bi npr. potrebno oko 20000 zrcala (heliostata) — svaki površine oko 40 m² — poredanih na oko 3,5 km². Izrada takve solarne centrale vrlo je skupa i složena. Jedan od problema jest izrada heliostata. Svaki heliostat mora sadržavati precizni mehanizam s pomoću kojeg prati Sunce. Zrcala se moraju tako razmjestiti da sjenom ne smetaju jedan drugom. Cijena je polja heliostata oko 50% ukupnog troška



Slika 4.73. Sistem s raspoređenim kolektorima

Slika 4.74. Sistem s centralnim prijemnikom



čitavog postrojenja. Heliostati su danas vrlo skupi i takvo postrojenje postat će ekonomično tek kad im cijena bude oko 10 puta manja od današnje. Istraživanjima se želi smanjiti cijena heliostata i eventualno poboljšati njihova svojstva.

U svijetu se gradi nekoliko solarnih elektrana, ali sve su eksperimentalne jer je cijena solarne električne energije još vrlo visoka za komercijalnu upotrebu. Spomenimo neke od njih.

Pokusne solarne elektrane prvog tipa izgrađene su i rade u nekoliko zemalja. Uglavnom su male snage. U Seibersdorfu (Austrija) izgrađena je solarna elektrana snage 10 kW [Fa 81]. U cijevima smještenim u fokusu paraboličnih kolektora zagrijava se voda do 130 °C. Dobivena toplina upotrebljava se za isparivanje freona. S pomoću freonskih para pokreću se turbine i dobiva električna energija. Međunarodna agencija za energiju (IEA — Pariz) izgradit će u Španjolskoj (Almeria) dvije solarne elektrane, po jednu svakog tipa, snage oko 500 kW [Br 81b]. U prijemniku na vrhu tornja kao radni fluid bit će natrij (530 °C), a u kolektorima druge elektrane kao radni fluid upotrebljavat će se mineralno ulje (280 °C). Te dvije eksperimentalne elektrane omogućit će usporedbu oba načina dobivanja električne energije iz solarne.

Pokusna elektrana u Albuquerqueu (USA), završena 1979. godine, ima 222 heliostata (svaki površine 37,3 m²) koji koncentriraju Sunčevo zračenje na toranj visok 66 m [Fa 81]. Toplinska je snaga 5 MW. Elektrana u Aldranu (Sicilija)

ima toplinsku snagu 4,8 MW, a električnu 1 MW. Sastoji se od 182 heliostata i prijemnika na vrhu tornja visokog 55 m.

Procjene troškova izgradnje termičke solarne elektrane [v. npr. Ca 77] razlikuju se ovisno o tome na temelju kojih su pretpostavaka radene. No, može se procijeniti da će biti oko 2000 \$ po 1 kW električne snage (0,08 \$/kW h), a troškovi su konvencionalnih elektrana dva do četiri puta manji. Međutim, prema tim procjenama očekuje se da će troškovi izgradnje nuklearne i solarne elektrane postati usporedivi pri kraju stoljeća. Osobito ako se uzme u obzir i porast cijena goriva, cijena će elektriciteta iz solarnih elektrana oko 2000. godine vjerojatno biti uporediva s cijenom električne energije iz nuklearnih elektrana i termoelektrana.

Spomenimo na kraju još jedan način dobivanja električne energije posrednim korištenjem solarne energije. S pomoću razlike u temperaturi slojeva na površini i slojeva u velikoj dubini oceana može se također dobiti električna energija. Zbog malene razlike u temperaturi (npr. 20 °C) efikasnost takvih toplinskih strojeva vrlo je malena (reda veličine 1%), a izvedba elektrane vrlo skupa [Br 81, Ha 80]. Jedna takva mala OTEC (Ocean Thermal Electric Conversion) elektrana (50 kW) radi na Havajima, međutim, efikasnost je malena pa se većina dobivene energije upotrebljava za pogon same elektrane.

4.6. Biokonverzija

4.6.1. Uvod

Čovjek se služio biološkim energetskim izvorima otkad postoji, koristeći proizvode fotosinteze u biljkama ne samo kao hranu nego i kao gorivo. Do početka intenzivne upotrebe fosilnih goriva (ugljena i nafte) drvo je bilo primarno gorivo za kuhanje, grijanje i industriju. U mnogim krajevima svijeta drvo je i danas jedan od važnih izvora energije. U zadnjih stotinjak godina fosilna goriva postala su primarni izvor energije i uspješno su zadovoljavala energetske potrebe, pogotovo u razvijenijim zemljama. U novije je vrijeme i nuklearna energija važna u energetici mnogih zemalja. Biološki energetski izvori sve su se manje koristili, osobito sve manje, što je zemlja postajala razvijenija. Energetska kriza 1973. godine uputila je na razvoj i primjenu nekonvencionalnih izvora energije: tako se uz ostala istraživanja sve više istražuje i primjena biomase za proizvodnju energije.

Primjena biomase, dobivene uzgojem biljaka, za proizvodnju energije ima niz prednosti, ali i nedostataka. Navest ćemo samo neke od njih. U agrikulturi i šumarstvu do sada su postignuti vrijedni uspjesi koji se mogu izravno primijeniti i za proizvodnju biomase kao goriva. Biomasi dobivamo uzgajanjem i na zemljištu koje nije pogodno za poljoprivredu. Sunčeva je energija izravno uskladištena u biomasi i može se prenositi i koristiti prema potrebi. (Pri ostalim primjenama Sunčeve energije uskladištenje je velik problem koji većinom još nije zadovoljavajuće riješen). Međutim, biomasa ne može osigurati pokrivanje većeg dijela energetskih potreba neke zemlje jer bi na ogromnim površinama trebalo uzgajati sasvim određene biljke. To bi vrlo negativno djelovalo na ekološki sustav i ravnotežu u prirodi, smanjilo poljoprivredna zemljišta i proizvodnju hrane; pretvaranje tako velikih količina biomase u energiju onečistilo bi znatno okolicu

itd. Prema prednostima i manama moglo bi se reći da će i biokonverzija, uz ostale nekonvencionalne izvore, u budućnosti biti važna u proizvodnji energije, te da će služiti kao dopuna ostalim izvorima.

Dobro je poznato da je modernoj poljoprivredi potrebno mnogo energije — za proizvodnju umjetnih gnojiva, pesticida, za mehanizaciju i dr. Pri proizvodnji bioloških energetskih izvora valja nastojati da omjer između dobivene energije i energije uložene za proizvodnju biomase bude što veći. Često je, naime, pri proizvodnji hrane, osobito u razvijenim zemljama, taj omjer manji od jedan, tj. više se energije (u obliku umjetnih gnojiva, pesticida, mehanizacije) potroši nego što se dobije. Pri proizvodnji hrane takvu energetske bilancu teško je i napraviti jer se dobiveni proizvodi upotrebljavaju za prehranu, a ne kao gorivo. Pri proizvodnji biomase bit će potrebno potrošiti što manje energije odnosno povećati energetske efikasnost proizvodnje i konverzije. Međutim, zbog nedostatka i sve veće cijene fosilnih goriva (nafte) postat će ubrzo takva pitanja aktualnima i u poljoprivredi. I u njoj će trebati⁷ štedljivijom upotrebom kemijskih proizvoda, većom upotrebom prirodnih načina gnojenja i sl. nastojati dobiti što pozitivniju energetske bilancu, te naći optimum između potrošene energije i dobivenog prinosa.

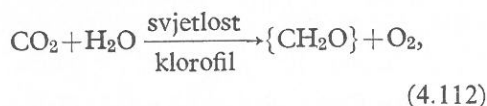
Opseg ove knjige ne dopušta da fotosintezu i dobijanje biomase obradimo detaljno. Samo ukratko prikazat ćemo proces fotosinteze u biljkama, ne govoreći detaljnije o kemijskim procesima koji se pri tome zbivaju. Zatim ćemo opisati neke načine proizvodnje i pretvaranja biomase u energiju. O biokonverziji je objavljeno mnogo članaka u raznim znanstvenim časopisima i mnogo izvrsnih knjiga; neke su navedene u popisu literature.

4.6.2. Fotosinteza

Fotosinteza u biljkama važan je oblik konverzije Sunčeve energije. Ona omogućuje da se osim hrane dobije i gorivo. Taj je proces počeo na našoj planeti prije oko tri milijarde godina [Br 81] i u njemu su nastali i kisik koji postoji u našoj atmosferi i fosilna goriva koja nalazimo u Zemlji.

U biljkama utjecajem Sunčeva svjetla nastaje proces fotosinteze u kojem se od ugljik-dioksida iz atmosfere i vode dobivaju organski spojevi, a oslobađa se kisik. To je vrlo složen proces; svi njegovi detalji još nisu potpuno objašnjeni. Za objašnjavanje fotosinteze osobito su zaslužni M. Calvin i J. A. Bassham. Melvin Calvin razvio je osnovnu teoriju fotosinteze organskih tvari iz CO_2 i prema njemu se niz reakcija koje se pri fotosintezi događaju u biljkama naziva Calvinov ciklus. Za svoje radove o fotosintezi Calvin je dobio Nobelovu nagradu 1952. godine.

Proces fotosinteze, iako vrlo složen, možemo s bioenergetskog gledišta prikazati jednostavnim izrazom

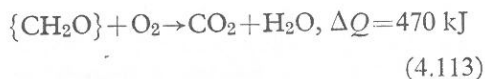


gdje smo s $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ simbolično označili organsku tvar nastalu fotosintezom. U lišću biljaka nalazi se, naime, zeleni klorofil koji apsorbira svjetlosnu energiju i djeluje kao fotokatalizator, stvarajući od ugljik-dioksida i vode organske spojeve u biljci (npr. glukozu $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Fotosintezu može uzrokovati samo vidljivi dio Sunčeva spektra ($0,4 \mu\text{m}$ do $0,7 \mu\text{m}$), dakle, samo oko 43% upadne sunčane energije.

Istraživanja su pokazala da je za redukciju svake molekule CO_2 potrebno 8 do 9 kvantata vidljive svjetlosti (fotona) neovisno o frekvenciji. Za redukciju jednog mola CO_2 potrebna je energija oko 470 kJ [Ba 81, Br 81] i ona je uskladištena u dobivenim organskim spojevima. Energija fotona koji sudjeluju u fotosintezi veća je

i npr. za crvenu svjetlost iznosi $9N_A h\nu \approx 1540 \text{ kJ}$; dakle za crvenu je svjetlost maksimalna teoretska efikasnost oko $470 \text{ kJ} / 1540 \text{ kJ} \approx 30\%$. Budući da samo dio Sunčeva spektra ($400 \mu\text{m} < \lambda < 700 \mu\text{m}$), tj. 43% od ukupne Sunčane energije može uzrokovati fotosintezu, maksimalna je teoretski moguća efikasnost fotosinteze Sunčevim svjetlom $43\% \cdot 0,3 \approx 13\%$. Budući da se Sunčevo svjetlo u biljkama ne apsorbira potpuno (100%), nego samo djelomično (oko 80%), maksimalna teoretska efikasnost fotosinteze ne može biti veća od 10% [Ba 81].

Osim fotosinteze u biljkama se zbiva i suprotna reakcija (fotorespiracija)

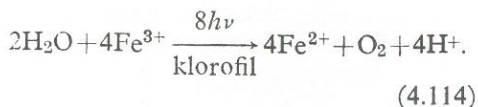


Energija dobivena takvim „disanjem” koristi se za održavanje fizioloških procesa u biljci kad nema Sunčeva svjetla (noću), a i danju ako biljki treba mnogo energije. Jedan dio tako nastale energije potreban je i za sintezu složenijih spojeva. Ako se pretpostavi da se takvim izgaranjem potroši oko 30% proizvoda nastalih fotosintezom, gornja je granica efikasnosti fotosinteze oko 7% [Ba 81].

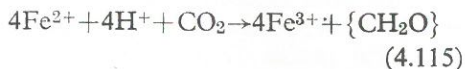
Stvarna srednja efikasnost fotosinteze u biljkama mnogo je manja — od 0,1% do 0,2%. U uzgajanim kulturama postignuta je efikasnost od 1% do 3%, u posebnim optimalnim uvjetima do 5%, a u laboratorijima i do 6%.

Osim običnih (tzv. C3) biljaka postoje neke biljke sa složenijim ciklusom asimilacije ugljik-dioksida i smanjenom fotorespiracijom, nazivamo ih C4 biljke. One mogu dati dosta veće prinose od C3 biljaka. Biljke C4 uglavnom uspijevaju u tropskim i suptropskim krajevima, a najvažnije su šećerna trska i kukuruz s najvećim dnevnim prinosima od 40 g/m^2 do 50 g/m^2 i najvećom efikasnošću oko 3%. Najefikasnije C3 biljke (šećerna repa, alfalfa, eukaliptus, chlorea) mogu dati dnevne prinose od 20 g/m^2 do 30 g/m^2 odnosno postignuti efikasnost od 1% do 2% [Ba 81]

Proces fotosinteze mnogo je složeniji nego što ga prikazuje izraz (4.112). Sastoji se od niza reakcija; za prvu je potrebno svjetlo, a ostale se događaju bez utjecaja svjetla i zovu reakcije u tami. Navest ćemo te procese u vrlo pojednostavnjenom obliku [Br 81]. Utjecajem svjetlosti i putem klorofila u biljkama iz dvije molekule vode prenesu se četiri elektrona na četiri molekule posebne bjelančevine — feredoksina (ova se redukcija odvija na ionima željeza u molekuli):



Kisik se oslobađa u atmosferu, a iz nastalog reduciranog feredoksina Fe^{2+} , H^+ i CO_2 iz atmosfere nastaje organska tvar $\{\text{CH}_2\text{O}\}$, npr. glukoza $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$. Reakcije u tami — u kojima se djelovanjem reduciranog feredoksina, ugljik-dioksid pretvara u biomasu — možemo shematski prikazati ovako



gdje je opet $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ simbolička oznaka za fotosintetizirane ugljikohidrate.

Navedene reakcije daju samo približnu predodžbu kako se zbivaju procesi u biljkama. Iz njih se npr. ne vidi da su za proizvodnju organske tvari biljkama potrebni i drugi elementi: dušik, fosfor, sumpor itd. Detaljnije su procesi fotosinteze opisani u navedenoj literaturi [npr. Ba 81, Sl 79, Wi 79].

4.6.3. Proizvodnja energije iz biomase

Godišnje se na Zemlji fotosintezom proizvede oko $2 \cdot 10^{11}$ tona organske tvari (oko 10^{11} tona ugljika), što bi energetski iznosilo $3 \cdot 10^{21}$ J. To je oko deset puta više nego svjetske energetske potrebe [Br 81]. Naravno, sva proizvedena organska tvar ne može se pretvoriti u energiju, međutim, očekuje se da će biokonverzija biti važna u podmirenju

energetskih potreba čovječanstva u budućnosti, čak važnija nego što je bila u prošlosti.

U novije vrijeme sve se više istražuje proizvodnja i upotreba biomase (posebno uzgojene ili razni organski ostaci) kao oblika energije. Zasad se samo mali dio (oko 1%) fotosintetizirane tvari na Zemlji upotrebljava za hranu; tako teoretski ostaje velik dio biomase neiskorišten i potencijalni je izvor energije. Osim toga proizvodnja biomase može se učiniti efikasnijom i prinosi se povećati. Navedimo prinose nekoliko biljaka pogodnih za proizvodnju biomase. Šećerna trska, poznata C4 biljka, daje godišnje oko 50 tona suhe tvari po hektaru, šećerna repa (C3 biljka) 6 t/ha, kukuruz 6 t/ha posebna vrsta algi (uzgajaju se u bazenima) od 20 do 60 t/ha i sl. Osobito su veliki prinosi biljaka u kojih nema fotorespiracije, takva je npr. šećerna trska. Efikasnost fotosinteze mogla bi se povećati smanjenjem respiracije biljaka; ako bi se u budućnosti u tome uspjelo, mogla bi se tako mnogim C3 biljkama poboljšati efikasnost odnosno povećati prinos. Postoji više načina poboljšanja produktivnosti biljaka. Gajenjem dviju ili više biljaka zajedno može se bolje iskoristiti zemljište i tako povećati prinosi. Uzgajanjem u kontroliranim uvjetima u staklenicima također se može povećati proizvodnja. Očekuje se da će se pronaći načini kako bi se raznim genetskim promjenama u biljkama moglo bitno utjecati na buduću proizvodnju biomase. Ako bi biljke mogle koristiti dušik izravno iz atmosfere, uštedjele bi se ogromne količine dušičnih gnojiva. Zasad mogu asimilirati atmosferski dušik jedino bakterije i plavo-zelene alge. Leguminoze (npr. grašak) u čvorovima na korijenju sadrže bakterije (*Rizobium* sp.) koje svojim encimima anaerobično (bez prisutnosti kisika) vezuju atmosferski dušik pretvarajući ga u amonijak i organske dušične spojeve.

Leguminoze obogaćuju zemljište dušikom te se često plodoredom kultura (tako da se izmjenjuju leguminoza i druga kultura) mogu uštedjeti umjetna gnojiva, a tako i energija. Upotreba pri-

rodnih gnojiva (stajskog, komposta) može također poboljšati energetske bilancu. Ne smije se, naime, zaboraviti da se, osobito u razvijenim zemljama, mnogo energije u poljoprivredi troši na proizvodnju umjetnih gnojiva, pesticida i sl. pa uštede u tom području povećavaju omjer između dobivene i uložene energije koji pri korištenju bioloških energetskih izvora treba biti što manji. Poljoprivredni i drugi otpaci mogu se također koristiti na razne načine kao nekonvencionalni izvori energije; i ispravno gospodarenje s otpacima moglo bi također pridonijeti uštedama konvencionalnih izvora energije.

Omjer između energije dobivene iz biomase i energije uložene u proizvodnju biomase (tzv. energetski omjer) nizak je za uzgoj povrća (manji od 1), za žitarice i kukuruz nešto je veći od jedan, a za šume (i za biljke koje rastu „na divlje”) može biti čak od 30 do 50 [Br 81].

Upotreba umjetnih (dušičnih) gnojiva jako smanjuje energetski omjer i pri proizvodnji biomase za energiju treba upotrebljavati što manje umjetnih gnojiva ili ih čak uopće ne upotrebljavati.

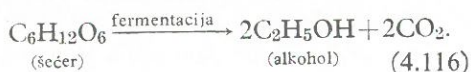
Uzgojem jednostavnih organizama — zelenih i modrozelenih algi — također se dobiva biomasa. Prinos je velik, a potrebne površine relativno malene. Efikasnost fotosinteze u algama jest 3% do 5%, a prinosi oko 50 tona suhe tvari po hektaru godišnje. Istražuje se rast mikroskopskih i makroskopskih algi (npr. *Scenedesmus*, *Spirulina*, *Chlorella* i dr.) radi dobivanja biomase koju bismo koristili za dobivanje energije ili kao hranu. Takve alge mogu se upotrebljavati kao (životinjska) hrana, fermentirati u metan ili osušene koristiti kao gorivo [Br 81]. Među najpoznatije sadašnje istraživače algi pripadaju W. Oswald iz Berkeleyja (Kalifornija) i G. Florenzano iz Firenze.

Neke biljke mogu izravno proizvoditi hidrougljike, npr. Hevea proizvodi mnogo hidrougljika u obliku gume. Destilacijom se npr. od biljke *Euphorbia* mogu dobiti hidrougljici, a fermentacijom ostatka alkohola. Neke druge biljke daju ulja koja se

mogu izravno upotrebljavati u dizelskim motorima.

Postoje razni načini da se iz biomase dobije energija. Biomasa se može izravno pretvoriti u energiju jednostavnim izgaranjem. To je zapravo i najstariji način energetske primjene biomase kojom se čovječanstvo uglavnom koristilo do početka upotrebe fosilnih goriva. Izgaranjem osušene organske tvari može se proizvesti pregrijana vodena para koja se može upotrijebiti za grijanje u industriji i za dobivanje električne energije, npr. u malim termoelektranama u poljoprivrednim kombinatima.

Fermentacija biomase u alkohol za sad je najrazvijenija metoda kemijske konverzije biomase. Takav se postupak najopsežnije razvija u Brazilu gdje se godišnje dobiva oko milijun tona etanola za pogon motora (vozila), a očekuje se da će se tako u budućnosti proizvesti mnogo više (u Brazilu oko $2 \cdot 10^7$ tona godišnje pri kraju stoljeća). Etanol se može dobiti fermentacijom šećernog soka (melase) iz šećerne trske, šećerne repe i drugih biljaka. Taj proces fermentacije možemo prikazati izrazom



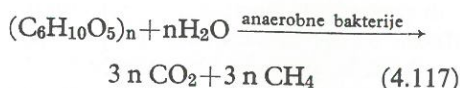
Tehnologija proizvodnje sastoji se od četiri faze: iscjeđivanja soka iz smljevene šećerne trske, fermentacije s pomoću kvasca, destilacije i dehidracije. Ostatak (bagasa) može se npr. upotrijebiti kao gorivo za pogon tvornice.

Etanol se može dobiti i tako da se celulozni materijal encimskom hidrolizom pretvara u glukozu iz koje se zatim fermentacijom dobiva alkohol.

Etanol pomiješan s benzinom u omjeru 1:5 do 1:10 može se jednostavno upotrebljavati u benzinskim motorima (bez ikakvih promjena na motoru). Pri tome se mogu ostvariti odgovarajuće uštede benzina, a ako bi primjena bila ekonomski opravdana, takva mješavina (poznata pod engleskim imenom „gasohol”) mogla bi se naveliko upotrebljavati za pogon auto-

mobila. Pri proizvodnji alkohola od C4 biljaka, energetski je omjer povoljan (5—10), pa bi to bila jedna od najperspektivnijih konverzija biomase ako istraživanja omogućuće ekonomski prihvatljivu značajnu primjenu.

Anaerobičnom fermentacijom (tj. fermentacijom bez prisutnosti kisika) može se iz biomase dobiti metan. Djelovanje posebnih bakterija na organske materijale može se prikazati pojednostavljenom jednadžbom



Tako nastali „bioplin” sadrži metan i ugljik-dioksid u volumnom omjeru 2:1 (i tragove NH_3 i H_2S) te se može upotrijebiti kao gorivo. Posebno je zanimljiva fermentacija stajskog gnojiva i poljoprivrednih otpadaka. Poznati su generatori bioplina iz stajskog gnojiva kojim se npr. u Indiji dobiva plin za kuhanje, rasvjetu,

grijanje i pogon motora [Gu 81]. Takav uređaj može proizvesti oko 0,15 m³ do 0,3 m³ bioplina od kilograma fermentiranog gnojiva. Nakon fermentacije dobiva se kvalitetno prirodno gnojivo s oko 2% dušika, kvalitetnije od gnojiva upotrebljenog za fermentaciju. Fermentacija se može ubrzati zagrijavanjem, npr. s pomoću sunčanih sustava pa se tako može uspješno povezati toplinska i biološka konverzija sunčane energije.

Grijanjem bez prisutnosti zraka, tzv. suhom destilacijom ili pirolizom može se od biomase dobiti metanol, aceton, drveni ugljen i drugi produkti. Zagrijavanjem u prisutnosti ograničenih količina kisika dobiva se iz biomase smjesa plinova CO i H_2 koja se može koristiti u industriji ili kao gorivo.

U ovom smo prikazu ukratko opisali najvažnije načine proizvodnje energije iz biomase. Više o biološkim energetskim izvorima može se naći u literaturi [npr. u Sl 79, Ma 81, Ba 81a].

5. Dodatak

5.1. Funkcije korisnosti i proračun solarnih sistema

Procjena rada termičkog i fotonaponskog sistema u toku dužeg razdoblja može se dobiti tako da se načini detaljna kompjutorska simulacija. Rad sistema simulira se od sata do sata tijekom cijeloga dana, mjeseca i godine. Za takve simulacije potrebno je poznavati satne meteorološke podatke (globalno i difuzno zračenje, temperaturu), što često nije dostupno. Osim toga, detaljne su kompjutorske simulacije složene i skupe te se primjenjuju samo u velikim projektima. Zbog toga su razvijene jednostavnije metode pomoću kojih se na osnovi mjesečnih prosjeka meteoroloških podataka izračunavaju mjesečni prosjeci energije koju može dati određeni termički odnosno fotonaponski sistem. Jedna takva jednostavna metoda bazirana na rezultatima kompjutorskih simulacija razvijena je na University of Wisconsin (Siegel, Klein i Beckman). Ona se koristi tzv. funkcijama korisnosti koje je uvelo nekoliko autora pri razmatranju rada solarnih sistema (Hottel i Whillier 1953, Liu i Jordan 1963, Klein i Beckman 1979). Te se funkcije mogu uspješno primijeniti pri proračunu rada termičkih i fotonaponskih solarnih sistema. U literaturi se mogu naći empirijske relacije za te funkcije dobivene iz meteoroloških podataka za neke lokacije i one se mogu aproksimativno primjenjivati i za druga područja. Međutim, ako su za promatrano područje poznati dugogodišnji satni meteorološki podaci za globalno i difuzno zračenje i temperaturu, bolje je proračunati satne i dnevne funkcije korisnosti i njih upotrebljavati umjesto onih iz literature. Definirat ćemo funkcije korisnosti i navest ćemo prosječne vrijednosti tih funkcija izračunatih za naše jadransko područje.

Korisna energija koja se može dobiti iz kolektora u toku određenoga vremenskog intervala (obično se uzima jedan

sat) prema Hottel-Whillierovoj jednadžbi iznosi

$$Q_k = AF_R [\tau \alpha H_\beta - k(T_u - T_z)] \quad (5.1)$$

gdje je F_R faktor prijenosa topline iz kolektora u fluid, $\tau \alpha$ efektivni produkt transmisijskog i apsorpcijskog faktora prozora odnosno apsorbera, A površina apsorbera kolektora, k koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka, T_u temperatura fluida na ulazu u kolektor i T_z temperatura okolnog zraka, H_β ozračenost kolektorske plohe Sunčevim zračenjem kroz promatrani vremenski interval (v. str. 60).

Iz te se jednadžbe vidi da postoji minimalan kritični nivo zračenja definiran kao zračenje pri kojem je temperatura kolektora jednaka temperaturi ulaznog fluida, tj. za koji je $Q_k = 0$. Da bi se iz kolektora dobila topline, Sunčevo zračenje mora biti veće od toga kritičnoga. Ako je zračenje manje od kritičnoga, protjecanje fluida kroz kolektor mora se zaustaviti, jer bi se inače fluid pri prolasku kroz kolektor hladio i sakupljena topline gubila.

Kritični nivo zračenja $H_{\beta,k}$ može se izračunati iz jednadžbe (5.1) uvrštavajući $Q_k = 0$:

$$H_{\beta,k} = \frac{k(T_u - T_z)}{\tau \alpha} \quad (5.2)$$

Uvrštavajući (5.2) u (5.1), dobivamo korisnu toplinsku energiju skupljenu u toku promatranog vremenskog intervala (obično sata):

$$Q_k = AF_R \tau \alpha (H_\beta - H_{\beta,k}) \quad (5.3)$$

Ako je ulazna temperatura fluida T_u konstantna cijeli sunčev dan, tada je i H_k konstantno kroz cijeli dan. Pri proračunu rada sistema mogu se uzeti u obzir razne pretpostavke, npr: T_u konstantno kroz cijeli sunčev dan, i to za svaki dan promatranog mjeseca, ili T_u nije konstantno u toku dana, već se mijenja od sata do sata, ali na isti način svakoga dana u mjesecu.

Promatrajmo interval od jednog sata (npr. između 8 h i 9 h). Korisna toplina skupljena u toku tog sata dana je relacijom (5.3).

Ako pretpostavimo da je temperatura T_u ista u tom satu u toku cijelog mjeseca, tada će ukupna toplina skupljena između 8 h i 9 h tijekom cijelog mjeseca (N dana) iznositi

$$N\bar{Q}_k = AF_R \tau \alpha \sum_{i=1}^N (H_{\beta} - H_{\beta,k})^+. \quad (5.4)$$

Predznak „+“ označava da treba uzeti u obzir samo pozitivne vrijednosti $H_{\beta} - H_{\beta,k}$. (Toplina $\bar{Q}_k$ je mjesečni prosjek energije skupljene od 8 h do 9 h.)

Definirajući satnu funkciju korisnosti ϕ izrazom

$$\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(H_{\beta} - H_{\beta,k})^+}{\bar{H}_{\beta}} \quad (5.5)$$

gdje je $\bar{H}_{\beta}$ mjesečni prosjek satnog zračenja za dani sat dana, a N broj dana u mjesecu, mjesečni prosjek korisne energije skupljene u promatranom satu dana možemo računati ovako:

$$\bar{Q}_k = AF_R \tau \alpha \bar{H}_{\beta} \phi. \quad (5.6)$$

Satna funkcija korisnosti ovisi o satu za koji smo je računali, mjesecu, nagibu kolektora i lokaciji.

Ako je ulazna temperatura fluida stalna za vrijeme cijelog sunčevog dana i u toku cijelog mjeseca, tada se umjesto sa satnom može računati s dnevnom funkcijom korisnosti $\bar{\phi}$ tako da osim po dani-ma u mjesecu sumiramo i po satima od izlaska do zalaska sunca i izračunamo izraz za pojedini mjesec:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{\text{sati dani}} \sum \frac{(H_{\beta} - H_{\beta,k})^+}{\bar{H}_{\beta}} \quad (5.7)$$

gdje je $\bar{H}_{\beta}$ srednja vrijednost satne ozračenosti kolektora usrednjena po svim satima u mjesecu.

Koncepciju funkcije korisnosti uvedenu pri proučavanju rada termičkih ko-

lektora možemo primijeniti i za fotonaponske sisteme.

Jednadžba fotonaponskog panela analogna Hottel-Whillierovoj jednadžbi za ravni kolektor glasi:

$$E = AH_{\beta} \left(\tau \alpha - \frac{k(T_c - T_z)}{H_{\beta}} \right) \quad (5.8)$$

gdje je E električna energija koju daje panel u promatranom vremenskom intervalu, H_{β} sunčeva ozračenost panela, k koeficijent toplinskih gubitaka, A površina panela, $\tau \alpha$ produkt transmisijskog faktora zaštitnog prekrivača ćelije i apsorpcijskog faktora ćelije.

Ako je η efikasnost panela, a na ćelije upada ozračenost H_{β} , dobivena električna energija jest

$$E = A \tau H_{\beta} \eta. \quad (5.9)$$

Dobivena električna energija iz panela odlazi potrošaču preko kontrolnog pod-sistema efikasnosti η_c , te je energija dostupna potrošaču $\eta_c E$. Ako je ona veća od energije E_p potrebne potrošaču, višak $E_d = \eta_c E - E_p$ treba uskladištiti ili odbaciti. Ako je sistem bez akumulatora, tada je disipirana energija E_d za vrijeme promatranog vremenskog intervala (npr. jednog sata) jednaka

$$E_d = \eta_c E - E_p = (\eta_c \eta \tau A H_{\beta} - E_p)^+. \quad (5.10)$$

I ovdje ćemo definirati kritični nivo zračenja kao zračenje pri kojem je iznos proizvedene električne energije jednak potrošnji, tj. za koji je disipirana energija jednaka nuli:

$$H_{\beta,k} = \frac{E_p}{A \eta_c \eta \tau}. \quad (5.11)$$

Slično kao i za ravne kolektore defini-
ra se satna korisnost ϕ (5.5) i mjesečni prosjek dnevne funkcije korisnosti $\bar{\phi}$ (5.7).

Funkcije korisnosti obično se prikazuju u ovisnosti o kritičnom omjeru ozračenosti [K1 78, Mi 81]:

$$X_k = \frac{H_{\beta,k}}{H_{\beta}}. \quad (5.12)$$

Mjesečni srednjak kritičnog omjera ozračenosti $\bar{X}_k$ jednak je omjeru kritičnog nivoa $H_{\beta,k}$ i zračenja u podne „srednjega“ dana u mjesecu. (Srednji dan u mjesecu ovdje je dan u kojem je ukupno zračenje jednako mjesečnom prosjeku dnevnog zračenja.) Taj se omjer može izračunati pomoću izraza

$$\bar{X}_k = \frac{H_{t,k}}{r_p R_p H} \quad (5.13)$$

gdje je R_p omjer ozračenosti u podne na nagnutu i horizontalnu plohu za prosječni dan u mjesecu:

$$R = \left(1 - \frac{r_{d,p}}{r_p} \frac{\bar{H}_d}{H}\right) R_{b,p} + \frac{r_{d,p}}{r_p} \frac{\bar{H}_d}{H} \quad (5.14)$$

$$\frac{1 + \cos \beta}{2} + \varrho \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

a $\bar{H}$ je mjesečni prosjek dnevne globalne ozračenosti i $\bar{H}_d$ difuzne dnevne ozračenosti horizontalne plohe.

Vrijednost $r_{d,n}$ jednaka je omjeru difuzne ozračenosti u podne prema dnevnoj totalnoj ozračenosti:

$$r_{d,p} = \frac{\pi}{24} \frac{1 - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \quad (5.15)$$

a r_p je omjer totalne ozračenosti u podne prema dnevnoj totalnoj ozračenosti, koji se može izračunati empiričkom relacijom [Co 79]:

$$r_p = r_{d,p} [1,07 + 0,025 \sin (\omega_s - 60)] \quad (5.16)$$

gdje je ω_s kut izlaska (zalaska) Sunca na horizontalnu plohu.

Faktor $R_{b,p}$ je omjer izravne ozračenosti na nagnutu i horizontalnu plohu u podne (v. relaciju 4.33 za $\omega = 0$):

$$R_{b,p} = \frac{\cos (\varphi - \beta) \cos \delta + \sin (\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta} \quad (5.17)$$

U literaturi se mogu naći empiričke relacije za mjesečni prosjek dnevne funkcije korisnosti [K1 78, Mi 81]:

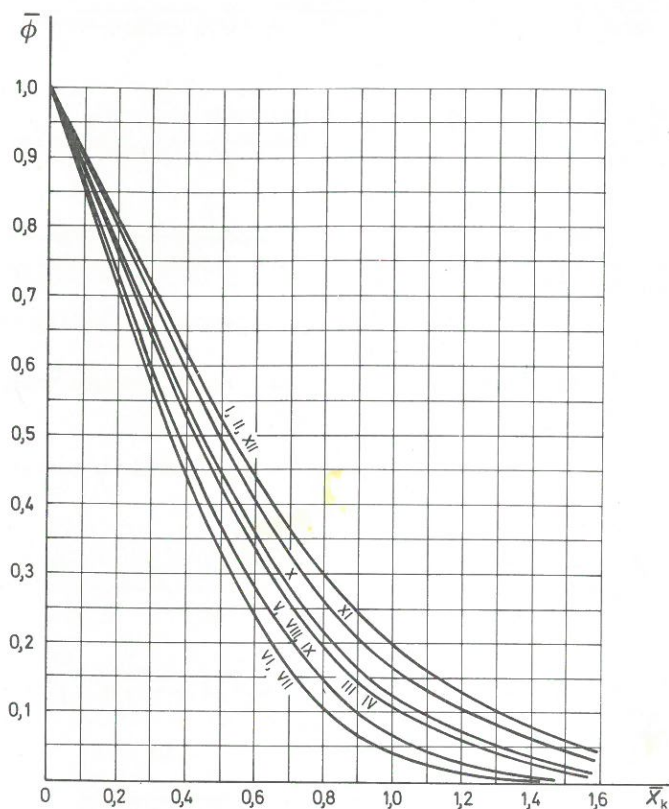
$$\bar{\phi} = f(K_T, R_p, R, X_k) \quad (5.18)$$

izvedene za američko klimatsko područje. One se u nedostatku regionalnih mogu koristiti i za druga područja, naravno uz određen pogrešku. Na sl. 5.1. prikazane su dnevne funkcije korisnosti izračunate iz meteoroloških podataka za područje Bara. Proračun je načinjen na temelju osmogodišnjih satnih podataka za globalno i difuzno zračenje. Te krivulje zbog toga bolje odgovaraju našem klimatskom području nego one iz literature koje su izračunate iz podataka za druga geografska područja.

U tablici 5.1. navedeni su faktori r_p , R_p , $R_{b,p}$ omjer mjesečnog prosjeka dnevne prizemne i ekstraterestričke ozračenosti horizontalne ravnine $K_T = \bar{H}/H_0$ i omjer ukupne ozračenosti nagnute i horizontalne plohe $R = \bar{H}_\beta/\bar{H}$ za Bar ($\varphi = 42^\circ \text{N}$, $\beta = 55^\circ$).

Tablica 5.1. Podaci za izračunavanje funkcija korisnosti za područje Bar

Mjesec	$\frac{\bar{H}}{\text{MJ m}^{-2}}$	K_T	K_D	$\frac{H_{55^\circ}}{\text{MJ m}^{-2}}$	$R_{b,p}$	$r_{d,p}$	r_p	R_p	R
I.	6,5	0,47	0,52	10,9	2,09	0,17	0,178	1,52	1,67
II.	8,8	0,46	0,52	12,4	1,77	0,15	0,162	1,20	1,41
III.	13,6	0,52	0,47	15,9	1,38	0,13	0,145	1,11	1,17
IV.	17,4	0,51	0,47	16,3	1,10	0,12	0,131	0,98	0,94
V.	22,6	0,57	0,41	18,3	0,93	0,11	0,122	0,91	0,81
VI.	25,1	0,6	0,37	18,9	0,86	0,11	0,118	0,87	0,75
VII.	25,9	0,64	0,33	20,1	0,88	0,11	0,119	0,90	0,78
VIII.	22,5	0,62	0,35	20,7	1,07	0,12	0,127	0,99	0,89
IX.	17,1	0,59	0,39	18,8	1,26	0,126	0,139	1,15	1,1
X.	12,5	0,59	0,39	17,9	1,61	0,14	0,155	1,33	1,43
XI.	7,3	0,48	0,5	12,1	2,05	0,16	0,173	1,35	1,66
XII.	5,6	0,45	0,54	10,1	2,34	0,17	0,184	1,38	1,81



Slika 5.1. Dnevne funkcije korisnosti za područje Bara

Primjer 5.1. U tablici 5.2. je prikazano globalno zračenje na horizontalnu plohu u Baru u siječnju 1976. god. između 9 h i 10 h.

a) Izračunajte koliku bi električnu energiju u tom periodu dao horizontalni fotonaponski panel površine 1 m^2 ako je $\tau\eta=0,1$, a potrošač snage 5 W, 10 W, 15 W, 20 W, 25 W i 30 W. Kolike su satne funkcije korisnosti?

b) Koliku bi toplinsku energiju dao horizontalni ravni kolektor ($F_{R0}=0,75$, $kF_R=4,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) ako je temperatura ulazne vode stalno 35°C i temperatura okolnog zraka 10°C ?

Tablica 5.2.

Dan	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
$\frac{H}{\text{Wh m}^{-2}}$	210	12	35	268	292	35	268	257	280	268	117	280	245	268	47	303
Dan	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	
$\frac{H}{\text{Wh m}^{-2}}$	327	292	303	233	70	315	175	35	23	70	47	47	222	128	82	

a) Električna energija koju bi dao horizontalni fotonaponski sistem površine A i efikasnosti η na koji upada zračenje H jest

$$E = \eta \tau A H$$

gdje je η ukupna efikasnost a τ faktor transmisije pokrova čelija.

Ako je dobivena energija E veća od energije potrebne potrošaču E_p , višak energije koji treba ili uskladištiti ili disipirati iznosi

$$E_d = \eta \tau A H - E_p = (0,1 H - E_p).$$

Ako je $E < E_p$, razliku je E_{pi} potrebno osigurati iz pomoćnog izvora ili akumulatora.

Uzmimo npr. da je snaga potrošača 15 W, tj. da je $E_p = 15 \text{ Wh}$. U one dane kada je zračenje veće od kritičnog H_k

$$H_k = \frac{E_p}{\tau \eta A} = 10 E_p = 150 \text{ Wh}$$

dio energije trebat će disipirati, dok će u danima kada je $H < H_k$, disipirana energija biti nula.

Dakle,

$$E_d = A \eta \tau (H - H_k)^+.$$

U tablici 5.3. su rezultati računa disipirane energije i energije iz pomoćnog izvora za $E_p = 15 \text{ Wh}$.

Tablica 5.3.

Dan	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
$\frac{E_d}{\text{Wh}}$	7	—	—	12	14	—	12	11	13	12	—	13	10	12	—	15
$\frac{E_{pi}}{\text{Wh}}$		14	11			11,5					3,3				10,3	

Dan	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	Ukupno (Wh)
$\frac{E_d}{\text{Wh}}$	18	14	18	8	—	17	3	—	—	—	—	—	7	—	—	210
$\frac{E_{pi}}{\text{Wh}}$					8			11,5	13	8	10,3	10,3		2,2	7	120

Sistem će u toku mjeseca od 9 h do 10 h proizvesti 555 Wh električne energije. Potrošač će od toga iskoristiti 345 Wh, dok će se 210 Wh pohraniti u akumulatoru ili odbaciti. Iz pomoćnog izvora bit će potrebno osigurati 120 Wh.

Isti rezultat možemo dobiti i pomoću satne funkcije korisnosti, koju ćemo izračunati pomoću izraza

$$\phi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(H - H_k)^+}{\bar{H}}.$$

Ukupno zračenje je 5554 Wh/m^2 , a mjesečni je prosjek $\bar{H} = 5554/31 \text{ Wh m}^{-2} = 179 \text{ Wh m}^{-2}$.

Ako zbrojimo izraze $(H - H_k)^+ = 60 + 0 + 0 + 118 + 142 + \dots + 0$ za cijeli mjesec, dobivamo 2100 Wh/m^2 . Funkcija korisnosti iznosi dakle

$$\phi = \frac{1}{31} \cdot \frac{2100 \text{ Wh m}^{-2}}{179 \text{ Wh m}^{-2}} = 0,378.$$

Disipirana energija je

$$E_d = A \tau \eta \phi N = 210 \text{ Wh}$$

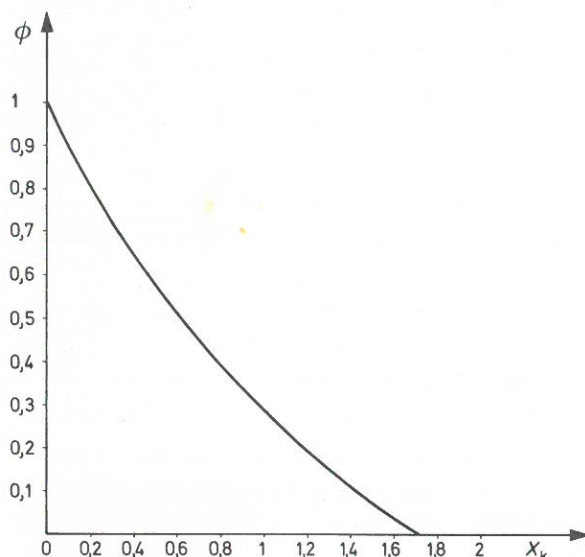
odnosno mjesečni prosjek dnevne disipirane energije je $E_d/N = 6,8 \text{ Wh}$.

Proračunamo li slično za druge potrošače, dobit ćemo rezultate u tablici 5.4.

Tablica 5.4.

P/W	E_d/Wh	X_k	ϕ
5	402	0,28	0,73
10	304	0,56	0,55
15	210	0,84	0,38
20	123	1,12	0,22
30	5	1,68	0,01

Satna funkcija korisnosti u ovisnosti o $X_k = H_k/\bar{H}$ prikazana je na sl. 5.2.



Slika 5.2. Satna funkcija korisnosti

b) Jednadžba kolektora je

$$Q_k = AF_R (\eta_0 H - k(T_u - T_z)).$$

Kritični nivo zračenja je

$$H_k = \frac{F_R k (T_u - T_z)}{F_R \eta_0} = 150 \text{ W m}^{-2}.$$

Kolektor će davati korisnu toplinu samo u onim danima kada je $H > H_k$, a to je prema tablici 5.3. u dane 1. I, 4. I, 5. I, ... 29. I, a neće dati energiju 2. I, 3. I, 6. I, ... 31. I.

Energija koju će dati kolektor iznosi dakle

$$Q_k = \sum_{i=1}^N AF_R \eta_0 (H - H_k)^+.$$

Računajući po danima od početka do kraja mjeseca, dobivamo:

$$Q_k = 1 \text{ m}^2 \cdot 0,75 \cdot (60 + 0 + 0 + 118 + \dots + 72 + 0 + 0) \text{ Wh m}^{-2}$$

$$Q_k = 1575 \text{ Wh}.$$

Isti rezultat dobivamo primjenom funkcije korisnosti, koja u ovom primjeru iznosi 0,378, tj.

$$Q_k = NAF_R H \phi = 31 \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 0,75 \cdot 179,2 \text{ Wh m}^{-2} \cdot 0,378$$

$$Q_k = 1575 \text{ Wh}.$$

Primjer 5.2. Simulirajte rad solarnog sistema za grijanje vode u Splitu u toku jednoga dana u siječnju za koji su satne vrijednosti globalne ozračenosti horizontalne plohe dane u tablici 5.1. Pretpostavite da je difuzno zračenje 48% od globalnog i albedo okoline 0,2. Kolektor je okrenut prema jugu i nagnut pod kutom 60° prema horizontali. Površina kolektora je 6 m^2 , $F_R k = 5\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$. Temperatura okolnog zraka je 8°C u toku cijelog Sunčeva dana. Potrošnja vode je od 8 h do 18 h kontinuirano po 20 L/h . Temperatura potrošne vode je 50°C , a vodovodne 15°C . Volumen spremnika je 200 L , a početna temperatura vode u spremniku 20°C . Zanimajte gubitke u spremniku.

Iz ozračenosti horizontalne plohe izračunamo ozračenost kolektora nagnutog pod kutom 60° . Rezultati računa su u tablici 5.5.

Tablica 5.5.

Sat	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17
$\frac{H}{\text{Wh/m}}$	98	192	263	306	312	276	200	106	16
R_b	3,9	2,8	2,45	2,33	2,33	2,45	2,8	3,9	7,5
R	2,44	1,86	1,68	1,62	1,62	1,68	1,86	2,44	4,3
H_{60°	0,85	1,22	1,59	1,78	1,82	1,67	1,34	1,25	0,25

Rezultati simulacije navedeni su u tablici 5.6. Korisna toplina koju daje kolektor računa se izrazom

$$Q_k = A_k F_R [\eta_0 H_p - k(T_{s1} - Z_p)^+].$$

Toplina koju potrošna voda odnosi iz spremnika jest

$$Q_p = \dot{m}_p (T_{s1} - 15^\circ\text{C}).$$

Toplinska energija koja ostaje u spremniku jest

$$Q_s = Q_k - Q_p.$$

Termička energija potrebna za zagrijavanje potrošne vode jest

$$Q_z = \dot{m}_p (50^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 2,93\text{ MJ}.$$

Toplina koju daje pomoćni grijač jest

$$Q_{\text{pom}} = Q_z - Q_p.$$

Konačna temperatura vode u spremniku na kraju promatranog sata

$$T_{s2} = T_{s1} + \frac{Q_s}{m_s c_p}.$$

Tablica 5.6.

Sat	$\frac{H_k}{\text{MJ m}^{-2}\text{ h}^{-1}}$	$\frac{T_{s1}}{^\circ\text{C}}$	$\frac{T_{s2}}{^\circ\text{C}}$	$\frac{Q_k}{\text{MJ h}^{-1}}$	$\frac{Q_p}{\text{MJ h}^{-1}}$	Q_s	$\frac{T}{\text{K}}$	$\frac{Q_{\text{pom}}}{\text{MJ h}^{-1}}$
8–9	0,85	20	22,2	2,27	0,42	1,85	2,2	2,51
9–10	1,22	22,2	25,8	3,6	0,6	3,0	3,57	2,33
10–11	1,59	25,8	30,4	4,76	0,9	3,86	4,6	2,01
11–12	1,78	30,4	34,9	5,06	1,29	3,77	4,5	1,64
12–13	1,82	34,9	38,5	4,74	1,68	3,06	3,6	1,25
13–14	1,68	38,5	40,6	3,76	1,97	1,79	2,1	0,96
14–15	1,34	40,6	40,5	2,1	2,15	–0,05	0,1	0,78
15–16	1,25	40,5	40	1,74	2,14	–0,4	0,5	0,79
16–17	0,25	40	37,5	–	2,1	–2,1	2,5	0,83
17–18	–	37,5	35,3	–	1,89	–1,9	2,2	1,04
Ukupno	11,78 MJ			28,03 MJ	15,14 MJ	12,88 MJ		14,16 MJ

Iz kolektora se dobije energija 28,03 MJ, od toga 15,14 MJ u potrošnoj toploj vodi a 12,9 MJ se uskladišti u spremniku.

5.2. Tablice

5.2.1. Položaj Sunca i faktori R_b za srednji dan u mjesecu

Položaj Sunca može se odrediti pomoću visine Sunca α i solarnog azimuta ψ . Visina Sunca je kut između Sunčevih zraka i horizontalne plohe (v. str. 45):

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega. \quad (5.19)$$

Solarni azimut ψ je kut između projekcije Sunčeve zrake na horizontalnu plohu i smjera sjever-jug u horizontalnoj ravnini. Obično se uzima da je pozitivan prema istoku a negativan prema zapadu. Kada je Sunce na jugu, $\psi = 0$. Računa se pomoću formula

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi}$$

ili

$$\cos \psi = \frac{\sin \varphi \cos \delta \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta}{\cos \alpha} \quad (5.20)$$

ili

$$\sin \psi = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}.$$

Napomenimo da je zadnja formula ispravna samo za azimute manje od 90° .

U tablici 5.7. su navedeni uz visine Sunca i solarni azimuti za svaki mjesec u godini, i to za dan kad je deklinacija δ jednaka srednjoj mjesečnoj deklinaciji. Osim toga naznačeno je i trajanje sunčeva dana Z .

Omjer direktnog zračenja na južnu plohu nagnutu pod kutom β prema horizontali $H_{\beta b}$ i direktnog zračenja na horizontalnu plohu H_b zove se R'_b faktor, a ovisi o položaju Sunca i kutu nagiba plohe (v. str. 60):

$$R'_b = \frac{\cos \vartheta_\beta}{\sin \alpha} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (5.21)$$

gdje je ϑ_β kut upada zrake direktnog Sunčeva zračenja na nagnutu plohu, a α visina Sunca.

Obično se faktori R'_b računaju za razdoblje jednoga sata od izlaska do zalaska Sunca i nazivaju se satni, za razliku od dnevnih faktora R_b koji se dobiju integriranjem po cijelom sunčevu danu.

U tablici su prikazani faktori R'_b i R_b za „srednji dan“ u svakom mjesecu za $\varphi = 42^\circ \text{ N}$ i 46° N i $\beta = \varphi$.

Za satne kutove ω veće od 90° Sunčeve zrake ne upadaju na tako nagnutu plohu. Zato je u ljetnim mjesecima za $\omega > 90^\circ$, $R'_b = 0$ premda Sunce još obasjava horizontalnu plohu.

5.2.2. Broj stupanj-dana

Pojam stupanj-dana koristi se za procjenu izgubljene toplinske energije za vrijeme određenog mjeseca iz stana u okolinu. Ako se u prostoriji želi održati neka stalna temperatura, potrebno je dovesti količinu topline jednaku izgubljenoj toplini u tom vremenskom razdoblju.

Toplina Q_m potrebna da bi se unutrašnjost zgrade (stan) održala na referentnoj temperaturi T_r (npr. 18°C) u toku jednog mjeseca, tj. energija potrebna za zagrijavanje prostorija, može se izračunati pomoću izraza

$$Q_m = k A N_{sd} \tau \quad (5.22)$$

gdje je kA produkt ukupnog koeficijenta gubitaka topline k i površine A , tj. ukupni gubitak topline po stupnju temperaturne razlike (izražen u WK^{-1}), a on ovisi o konstrukciji zgrade.

Broj stupanj-dana N_{sd} u tom mjesecu jest zbroj razlika između referentne temperature T_r u unutrašnjosti prostorije i srednje dnevne temperature okolnog zraka T_z :

$$N_{sd} = \sum_{n=1}^N (T_r - T_z)^+ \quad (5.23)$$

gdje je N broj dana u mjesecu. Znak „+“ označava da uzimamo u obzir samo pozitivne vrijednosti u toj sumi. Ako je $T_z < T_r$, uzimamo da je $T_r - T_z = 0$. U izrazu (5.22) pojavljuje se i vrijeme τ jer je kA u vatima po kelvinu WK^{-1} , N_{sd} u kelvini danu (K dan), a da bismo dobili

Tablica 5.7. Položaj sunca. Faktori R_b za $\beta = \varphi$

$\varphi = 42^\circ \text{N}$					$\varphi = 46^\circ \text{N}$			
Dan	Sat	$\alpha/^\circ$	$\psi/^\circ$	R'_b	Sat	$\alpha/^\circ$	$\psi/^\circ$	R'_b
17. I. $n=17$	12	27,05	0,00	2,05	12	23,05	0,00	2,39
	11	25,53	15,54	2,09	11	21,68	15,08	2,44
	10	21,21	30,06	2,24	10	17,73	29,36	2,66
	9	14,56	43,02	2,63	9	11,62	42,39	3,28
	8	6,18	54,44	4,34	8	3,85	54,15	6,96
$Z=9,31 \text{ h}$				$R_b=2,44$	$Z=8,89 \text{ h}$			$R_b=2,89$
15. III. $n=46$	12	34,64	0,00	1,71	12	30,64	0,00	1,91
	11	32,94	17,46	1,73	11	29,11	16,75	1,93
	10	28,13	33,48	1,79	10	24,77	32,40	2,01
	9	20,89	47,42	1,93	9	18,16	46,39	2,21
	8	11,94	59,45	2,35	8	9,88	58,79	2,83
$Z=10,35 \text{ h}$				$R_b=1,91$	$Z=10,1 \text{ h}$			$R_b=2,17$
16. III. $n=75$	12	45,48	0,00	1,40	12	41,48	0,00	1,51
	11	43,45	20,87	1,40	11	39,70	19,64	1,51
	10	37,85	39,24	1,41	10	34,71	37,42	1,52
	9	29,71	54,42	1,43	9	27,33	52,67	1,54
	8	19,99	67,02	1,46	8	18,39	65,75	1,58
$Z=11,7 \text{ h}$				$R_b=1,43$	$Z=11,65 \text{ h}$			$R_b=1,55$
15. IV. $n=105$	12	57,32	0,00	1,17	12	53,32	0,00	1,23
	11	54,75	26,27	1,17	11	51,13	24,02	1,22
	10	48,02	47,54	1,15	10	45,24	44,49	1,20
	9	38,82	63,59	1,11	9	36,95	60,83	1,16
	8	28,36	76,20	1,04	8	27,34	74,16	1,07
	7	17,35	86,96	0,86	7	17,09	85,72	0,87
$Z=13,13 \text{ h}$				$R_b=1,08$	$Z=13,3 \text{ h}$			$R_b=1,12$
15. V. $n=135$	12	66,72	0,00	1,0	12	62,72	0,00	1,07
	11	63,46	33,27	1,0	11	60,04	29,40	1,06
	10	55,52	56,77	1,00	10	53,19	52,22	1,02
	9	45,44	72,62	0,94	9	44,12	68,87	0,96
	8	34,52	84,55	0,84	8	34,05	81,84	0,85
	7	23,39	85,34	0,62	7	23,65	87,08	0,61
	6	12,40	104,14	0,0	6	13,35	106,25	0,0
	5	1,87	113,75		5	3,48	113,58	
$Z=14,37$				$R_b=0,88$	$Z=14,74$			$R_b=0,89$
11. VI. $n=162$	12	71,06	0,00	0,97	12	67,06	0,00	1,00
	11	67,31	38,12	0,96	11	64,05	32,97	0,99
	10	58,68	62,25	0,93	10	56,65	56,80	0,95
	9	48,21	77,50	0,87	9	47,20	73,25	0,89
	8	37,16	88,80	0,76	8	36,97	85,78	0,76
	7	26,05	81,56	0,54	7	26,57	83,53	0,53
	6	15,20	107,16	0,0	6	16,37	106,48	0,0
	5	4,89	116,88		5	6,68	116,52	0,0
$Z=15,01 \text{ h}$				$R_b=0,80$	$Z=15,49 \text{ h}$			$R_b=0,8$

Nastavak tablice 5.7.

Dan	Sat	$\alpha/^\circ$	$\psi/^\circ$	R'_b	Sat	$\alpha/^\circ$	$\psi/^\circ$	R'_b	
17. VII. $n=198$	12	69,24	0,00	1,00	12	65,24	0,00	1,03	
	11	65,71	35,91	0,99	11	62,38	31,35	1,02	
	10	57,38	59,83	0,96	10	55,22	54,78	0,98	
	9	47,07	75,39	0,90	9	45,93	71,35	0,92	
	8	36,07	86,98	0,79	8	35,76	84,09	0,80	
	7	24,94	83,17	0,57	7	25,35	85,04	0,56	
	6	14,03	106,10		6	15,11	105,11	0,0	
	5	3,62	115,56		5	5,34	115,28		
$Z=14,73$				$R_b=0,84$	$Z=15,17\text{ h}$				$R_b=0,84$
16. VIII. $n=228$	12	61,57	0,00	1,11	12	57,57	0,00	1,15	
	11	58,74	29,00	1,10	11	55,19	26,15	1,14	
	10	51,50	51,33	1,08	10	48,90	47,68	1,12	
	9	41,90	67,44	1,03	9	40,26	64,26	1,06	
	8	31,21	79,84	0,94	8	30,43	77,50	0,96	
	7	20,12	89,63	0,73	7	20,09	88,90	0,73	
	6	9,03	100,17	0,0	6	9,72	99,52	0,00	
	$Z=13,67\text{ h}$				$R_b=0,99$	$Z=13,93\text{ h}$			
15. IX. $n=258$	12	50,37	0,00	1,30	12	46,37	0,00	1,38	
	11	48,14	22,80	1,30	11	44,44	21,23	1,38	
	10	42,12	42,34	1,29	10	39,11	40,08	1,37	
	9	33,55	57,97	1,28	9	31,36	55,83	1,36	
	8	23,51	70,67	1,25	8	22,13	69,08	1,33	
	7	12,70	81,61	1,18	7	12,08	80,74	1,24	
	6	1,58	88,24	0,0	6	1,70	88,36	0,0	
	$Z=12,28\text{ h}$				$R_b=1,27$	$Z=12,33\text{ h}$			
16. X. $n=289$	12	38,18	0,00	1,59	12	34,18	0,00	1,75	
	11	36,38	18,47	1,60	11	32,58	17,62	1,77	
	10	31,33	35,22	1,64	10	28,04	33,93	1,82	
	9	23,81	49,60	1,73	9	21,18	48,35	1,93	
	8	14,59	61,86	1,96	8	12,68	61,01	2,24	
	7	4,32	72,65	3,38	7	3,12	72,40	4,68	
	$Z=10,81\text{ h}$				$R_b=1,73$	$Z=10,62\text{ h}$			
14. XI. $n=319$	12	28,95	0,00	1,95	12	24,95	0,00	2,24	
	11	27,39	15,99	1,98	11	23,54	15,48	2,29	
	10	22,95	30,88	2,10	10	19,50	30,09	2,45	
	9	16,16	44,10	2,40	9	13,27	43,37	2,91	
	8	7,63	55,68	3,56	8	5,37	55,30	5,05	
$Z=9,59\text{ h}$				$R_b=2,28$	$Z=9,21\text{ h}$				$R_b=2,67$
11. XII. $n=345$	12	24,91	0,00	2,18	12	20,91	0,00	2,58	
	11	23,45	15,04	2,23	11	19,58	14,64	2,65	
	10	19,24	29,15	2,42	10	15,74	28,55	2,94	
	9	12,77	41,83	2,94	9	9,77	41,30	3,83	
	8	4,55	53,05	5,79	8	2,14	52,86	12,30	
$Z=8,99\text{ h}$				$R_b=2,64$	$Z=8,51\text{ h}$				$R_b=3,18$

Q_m u džulima, treba množiti sa $\tau = 24 \times 3600 \text{ s/dan} = 86400 \text{ s/dan}$.

Ako je npr. $kA = 221 \text{ W/K}$, $N_{sd} = 748 \text{ K}$ dan, tada je potrebna toplina u tom mjesecu

$$Q_m = 221 \text{ W/K} \cdot 748 \text{ K} \cdot \text{dan} \cdot 86400 \text{ s/dan} = 14,3 \text{ GJ}.$$

Broj stupanj-dana u hladnijem godišnjem razdoblju može poslužiti za određivanje godišnje potrošnje goriva za zagrijavanje prostorija. Na sličan način mogu se koristiti stupanj-dani hlađenja u toplom dijelu godine.

U tablici su navedeni srednji stupanj-dani pojedinih mjeseci u hladnom razdoblju godine [Cv 84] za Zagreb i Split izračunati na osnovi petogodišnjih podataka o temperaturama zraka. U literaturi [Cv 84] mogu se naći detaljniji podaci za ta i druga mjesta.

Tablica 5.8. Stupanj-dani

Mjesec	X	XI	XII	I	II	III	IV	Zbroj
Split	64	220	355	466	388	338	235	2066
Zagreb	238	485	654	748	614	496	327	3563

5.2.3. Optimalni kut nagiba kolektora

Proračunati optimalni kut nagiba kolektora za koji je mjesečno upadno Sunčevo zračenje najveće, kao i pripadna ozračenost kolektora ili fotonaponskog panela okrenutog prema jugu u Splitu prikazani su u tablici 5.9. za svaki mjesec, a u tablici 5.10. za zimsko i ljetno razdoblje.

Ako bi se panel svaki mjesec podešavao tako da kut nagiba bude optimalan, ukupno zračenje bilo bi 6964 MJ/m^2 , dakle 6% veće nego ako bi se upotrebljavao u toku cijele godine nagib od 37° . Za sisteme kod kojih je važniji doprinos u toku zimskih mjeseci, mjesečno optimiranje kuta umjesto fiksnog nagiba od 58°

Tablica 5.9. Optimalni kut nagiba i pripadna ozračenost za svaki mjesec

Mjesec	β_{opt}	$H_{\beta_{opt}} / (\text{MJ m}^{-2} \text{ mjesec}^{-1})$
I	65°	386
II	58°	438
III	42°	549
IV	24°	592
V	9°	728
VI	0°	772
VII	5°	789
VIII	19°	722
IX	37°	614
X	54°	597
XI	63°	409
XII	68°	368
Ukupno		$6964 \text{ MJ m}^{-2} = 580 \cdot 12 \text{ MJ m}^{-2}$

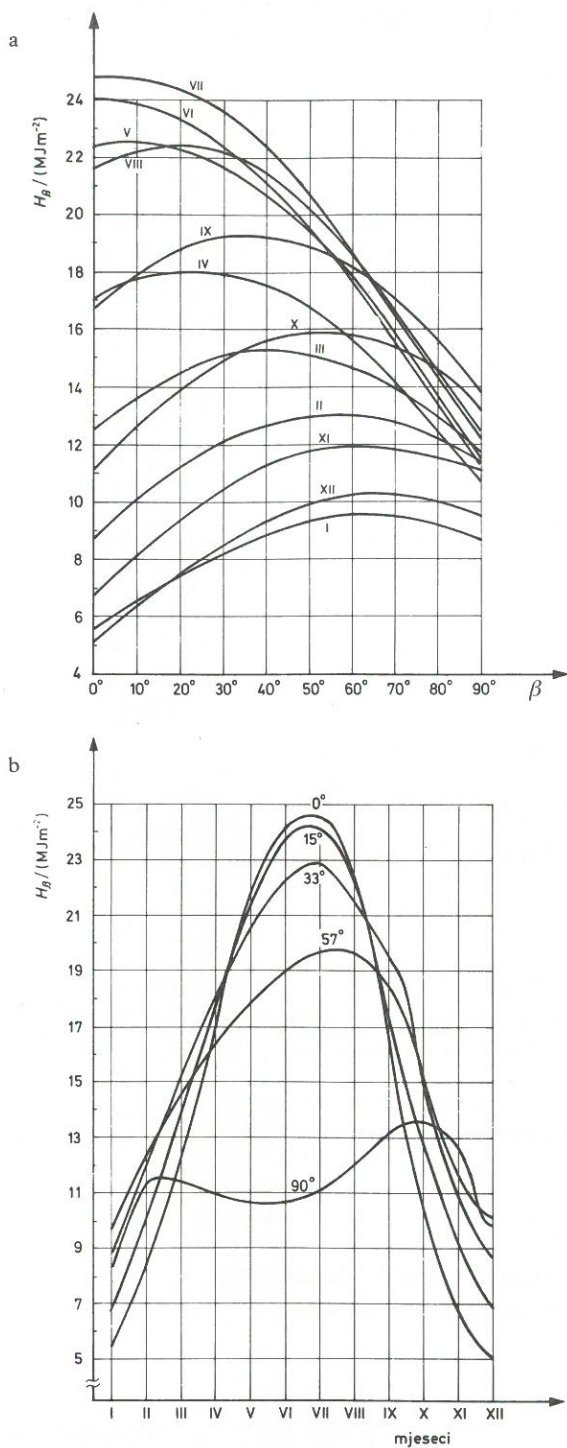
Tablica 5.10. Optimalni nagib i pripadna ozračenost u pojedinim vremenskim razdobljima

Razdoblje	β_{opt}	$H_{\beta_{opt}} / (\text{MJ m}^{-2} \text{ mjesec}^{-1})$
XI – I	65°	388
X – III	58°	454
IV – IX	16°	694
I – XII	37°	547

utjecalo bi manje od 1%. Ti su proračuni za kolektor okrenut prema ekvatoru (jugu), tj. za azimut nula. Međutim, azimut kolektora također utječe na primljeno zračenje.

Proračuni pokazuju da je smanjenje ozračenosti panela nagnutog pod kutom od 58° u XII. mjesecu i okrenutog za $\pm 10^\circ$ od juga samo za oko 1%. Ako je azimut $\pm 20^\circ$, smanjenje iznosi 4%. U ljetnim mjesecima promjena je još manja.

Ovisnost srednje dnevne ozračenosti kolektora o kutu nagiba za pojedini mjesec prikazana je na sl. 5.3a i 5.3b. Te su krivulje proračunate za područje Zadra.



Slika 5.3. a i b. Srednje dnevne ozračenosti nagnutih ploha za razne kutove nagiba

5.3. Fizikalne veličine i jedinice

Naziv fizikalne veličine	Znak fizikalne veličine	Znak mjerne jedinice
površina	A	m^2
površina kolektora	A_c	m^2
brzina svjetlosti	c	m/s
specifični toplinski kapacitet	c	$J/(kg\ K)$
konstanta u Rayleighovoj raspodjeli	c	m/s
koeficijent snage	c_p	
Betzov koeficijent	$c_{p\ max}$	
energija	E	J
disipirana energija	E_d	J, Wh
Fermijeva energija	E_f	J
širina zabranjenog pojasa	E_g	J, eV
ekstraterestričko sunčano ozračenje (solarna iradijancija) plohe okomite na zračenje	E_c	W/m^2
solarna konstanta (sunčana konstanta)	$\overline{E}_o$	W/m^2
faktor punjenja	F	
geometrijski faktor kolektora	F'	
faktor efikasnosti prijenosa topline iz kolektora u fluid	$F_R (F'_R)$	
solarni doprinos	f	
ukupno sunčano ozračenje (globalna solarna iradijancija) horizontalne plohe	G	W/m^2
izravno sunčano ozračenje (direktna solarna iradijancija) horizontalne plohe	G_b	W/m^2
izravno sunčano ozračenje (direktna solarna iradijancija) plohe okomite na zračenje	G_{bn}	W/m^2
raspršeno sunčano ozračenje (difuzna solarna iradijancija) horizontalne plohe	G_d	W/m^2
ekstraterestričko sunčano ozračenje (solarna iradijancija) horizontalne plohe	G_o	W/m^2
odbijeno sunčano ozračenje (reflektirana solarna iradijancija)	G_r	W/m^2
ukupno sunčano ozračenje (globalna solarna iradijancija) nagnute plohe pod kutom β	G_β	W/m^2
ukupna ozračenost (globalna iradijacija) horizontalne plohe	H	J/m^2
mjesečni prosjek dnevne ukupne ozračenosti (globalne iradijacije) horizontalne plohe	$\overline{H}$	J/m^2
dnevna ekstraterestrička ozračenost (iradijacija) horizontalne ravnine	H_o	J/m^2
mjesečni prosjek dnevne ekstraterestričke ozračenosti (iradijacije) horizontalne plohe	$\overline{H}_o$	J/m^2
dnevna ekstraterestrička ozračenost (iradijacija) nagnute plohe	$H_{o\beta}$	J/m^2
ukupna ozračenost (globalna iradijacija) nagnute plohe	H_β	J/m^2
kritična ozračenost	$H_{\beta, k}$	J/m^2
jakost struje	I	A
struja diode	I_d	A
struja kratkog spoja	I_{ks}	A
struja zasićenja (zaporna struja)	I_o	A
fotostruja solarne ćelije	I_s	A

Naziv fizikalne veličine	Znak fizikalne veličine	Znak mjerne jedinice
faktor atenuacije (ekstinkcijski koeficijent)	k	
koeficijent toplinskih gubitaka	k	W/(m ² K)
efektivni koeficijent toplinskih gubitaka	$k_{ef} = kF_R$	W/(m ² K)
indeks prozračnosti	K_T	
kut loma	l	°, rad
specifična toplota faznog prijelaza	L	J/kg
masa	m	kg
„optička masa“ zraka	m	
maseni protok fluida	$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$	kg/s
egzitancija	M	W/m ²
spektralna egzitancija	M_λ	W/m ²
redni broj dana u godini (brojen od 1. I)	n	
indeks loma	n	
tlak	p	Pa
snaga	P	W
gustoća toplinskog toka	q	W/m ²
toplina; energija zračenja	Q	J
toplinski tok iz apsorbera u fluid	$\dot{Q}_k = dQ_k/dt$	W
kut refleksije	r	°, rad
električni otpor	R	Ω
omjer koncentriranja	R	
toplinski (termički) otpor	R	K/(Wm ²)
paralelni otpor	R_p	Ω
serijski otpor	R_s	Ω
omjer srednje dnevne izravne ozračenosti nagnute i horizontalne plohe za pojedini mjesec	$\overline{R_b}$	Ω
omjer srednje dnevne ukupne ozračenosti nagnute i horizontalne plohe za pojedini mjesec	$\overline{R}$	
trajanje sijanja Sunca (insolacija)	s	h
relativno trajanje sijanja Sunca	$S = s/Z$	
vrijeme	t	s
temperatura	T	°C
temperatura apsorbera	T_a	°C
temperatura kolektora	T_c	°C
srednja temperatura fluida u kolektoru	T_f	°C
temperatura fluida na izlazu iz kolektora	T_{iz}	°C
temperatura prozora kolektora	T_p	°C
temperatura materijala u spremniku	T_s	°C
temperatura fluida na ulazu u kolektor	T_u	°C
temperatura okolnog zraka	T_z	°C
kut upada	u	°, rad
brzina	v	m/s
brzina vjetra	v_v	m/s
trajanje Sunčeva dana	Z	h
apsorpcijski faktor (apsorptancija)	α	
spektralni faktor apsorpcije	α_λ	m ⁻¹
kut između Sunčevih zraka i horizontalne plohe (visina Sunca)	α	°

Naziv fizikalne veličine	Znak fizikalne veličine	Znak mjerne jedinice
omjer selektivnosti	α/ε	
kut visine Sunca u Sunčevo podne	α_p	°
nagib prema horizontali	β	°
kut deklinacije Sunca	δ	°
elektromotorna sila	ε	V
emisijski faktor (emitancija)	ε	
spektralni faktor emisije	ε_λ	m^{-1}
orbitalni ekscentritet gibanja Zemlje oko Sunca	$\varepsilon(n)$	
efikasnost kolektora	η	
efikasnost kolektora za $T = T_z$	η_0	
kut upada Sunčevih zraka na nagnutu plohu	ϑ	°
zenitni kut Sunca (zenitna udaljenost)	θ_z	°
toplinska vodljivost	λ	W/m K
valna duljina	λ	m
omjer brzine lopatica i brzine vjetra	λ	
frekvencija	ν	Hz
gustoća	ρ	kg/m ³
refleksijski faktor (reflektancija)	ρ	
spektralni refleksijski faktor	ρ_λ	m^{-1}
transmisijski faktor (transmitancija)	τ	
Stefan-Boltzmannova konstanta	σ	W/(m ² K ⁴)
standardna devijacija brzinske raspodjele	σ	m s ⁻¹
zemljopisna širina	φ	°
satna funkcija korisnosti	ϕ	
dnevna funkcija korisnosti	$\bar{\phi}$	
tok (snaga) zračenja; toplinski tok	ϕ	W
spektralni tok zračenja	ϕ_λ	W/m
zemljopisna dužina (sjeverna, južna)	φ	°N, °S
umnožak transmisijskog i apsorpcijskog faktora pri okomitom upadu	$(\tau\alpha)_n$	
efektivni umnožak transmisijskog i apsorpcijskog faktora	$(\tau\alpha)$	

Literatura

- [Ab 78] Abhat, A.: *First Seminar on Solar Energy Storage*, Trieste, September 1978.
- [An 56] Angstrom, A.: *Computation of Global Radiation from the Records of Sunshine Hours*, Arkiv Geophysik 3 (1956) 556–557
- [An 77] Anderson, B.: *Solar Energy*, McGraw-Hill, New York, 1977.
- [As 77] ASHRAE Standard 93–77, *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors* ASHRAE, New York, 1977.
- [Ba 74] Baće, M. i V., Knapp, Zamašnjak – inercijalni spremnik energije, Elektrotehnika 6 (1974) 338
- [Ba 76] Backus, C. E.: *Solar Cells*, IEEE Press, New York, 1976.
- [Ba 77] Badahori, M. N.: *Thermal Energy Storage Fourth Course on Solar Energy Conversion*, Trieste 1977.
- [Ba 57] Bassham, J. A., M., Calvin: *The Path of Carbon in Photosynthesis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1957.
- [Ba 81] Backus, C. E.: *Principles of Photovoltaic Conversion and Photovoltaic Technology Assessment*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste 1981.
- [Ba 81] Bassham, J. A.: *Photosynthetic Plants as Renewable Sources of Energy*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste 1981.
- [Ba 81a] Bassham, J. A.: *Biachemical Transformations*, ibid.
- [Be 77] Beckman, W. A.: *Solar Heating Design*, John Wiley and Sons, New York, 1977.
- [Bi 77] Biswas, D. R.: *Thermal energy storage using sodium sulfate deca hydrate and water*, Solar Energy 19 (1977) 99
- [Bl 59] Bliss, R. W.: *The Derivation of Several Plate Efficiency Factors Useful in the Design of Flat Plate Solar Heat Collectors*, Solar Energy 3 (1959) 55
- [Bo 76] Bockris, I. O. M.: *Energy: The Solar Hydrogen Alternative*, The Architectural Press Ltd, London, 1976.
- [Bo 82] Bosanac, M.: *Testiranje kolektora za niskotemperaturnu konverziju sunčane energije*, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1982.
- [Br 78] Broda, E.: *The Evaluation of the Bioenergetic Processes*, Pergamon Press, Oxford, 1978.
- [Br 80] Bratanić, A.: *Mjerenje sunčevog zračenja*, Sunčeva energija 3 (1980) 13
- [Br 81] Bratanić, A.: *Republički hidrometeorološki zavod*, Zagreb, privatno saopćenje.
- [Br 81a] Broda, E.: *Photosynthesis and Bioconversion*, Second Inter. Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Br 81b] Broda, E.: *Solar Energy in the Nineteen Eighties*, 2nd Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste 1981.
- [Br 79] Brooks, H., J. M., Hollander.: *United States Energy Alternatives to 2010 and Beyond*, the Conaes Study, Ann. Rev. Energy 4 (1970) 1–70
- [Br 80a] Brown, N. L.: *Renewable Energy Resources for Developing Countries*, Ann. Rev. Energy 5 (1980) 389–413
- [Br 77] Bruno R., et al.: *Berechnung und Optimierung von Sonnenenergie Systemen zur Warmwasserversorgung*, Arbeitsgemeinschaft Solarenergie ASE, Essen, 1977.
- [Bs 78] *Usability of Solar Collectors*, Bundesverband Solarenergie (BSE), 1978.
- [Bu 78] Bujakowski, E.: *The Performance of Solar Water Heating Systems with Flat Plate Collectors*, Proceedings of the 2nd International Solar Forum, Hamburg, Vol. II, (1978) 65
- [Bu 77] Bureta, F.: *Solar Thermal Energy in Industrial Process*, 4th Course on Solar Energy Conversion, Trieste 1977.
- [Ca 76] Calvin, M.: *Photosynthesis as a Resource for Energy and Materials*, Amer. Scient. 64 (1976) 270
- [Ca 77] Caputo, R. S.: *Solar Power Plants: Dark Horse in a Energy Stable*, Bull. Atomic Scient. May (1977) 47
- [Cl 80] Clayton, R. K.: *Photosynthesis: Physical Methods in Chemical Patterns*, Cambridge University, 1980.
- [Co 69] Cooper, P. I.: *The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills*, Solar Energy 12 (1969) 3
- [Co 79] Collares-Pereira, M., A., Rabl: *The Average Distribution of Solar Radiation-Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values*, Solar Energy 22 (1979) 155
- [Cv 84] Cvitan, L., I. Penzar: *Analiza toplinskih uvjeta u Hrvatskoj pomoću stupanj-dana*, Sunčeva energija 5 (1984) 1–2, 21

- [Cv 75] Cvitaš, T., N., Kallay: *Fizičke veličine i jedinice Međunarodnog sustava*, Hrvatsko kemijsko društvo i IRO Školska knjiga, Zagreb, 1981.
- [De 81] Deb, S.: *The Status of Advanced Photovoltaic R&D at Solar Energy Research Institute*, Sec. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [De 80] Derrick A., W. B., Gillet: *Recommendations for European Solar Collector Test Methods*, CEC, Cardiff, 1980.
- [De 79] Desnica, U., N., Galešić: *Efikasnost rada solarnog uređaja za dobivanje tople vode na Jadranu*, Zbornik radova savjetovanja Primjena sunčeve energije u turističkim objektima, Trogir, 1979.
- [De 80a] Desnica, U., N., Urli: *Određivanje optimalnih odnosa među pojedinim komponentama solarnog sistema za dobivanje tople potrošne vode*, Sunčeva energija 2 (1980) 31
- [De 80b] Desnica, V., B., Pivac: *Mogućnosti zagrijavanja zgrade sunčevom energijom u Zagrebu*, Sunčeva energija 3 (1980) 25
- [De 83] Desnica, U., et al.: *Climatic Predispositions of Yugoslavia for Solar Energy Application*, Solar Energy 30 (1983) 401
- [Di 79] Dixon, A. E., J. D., Leslie: *Solar Energy Conversion*, Pergamon Press, New York, 1979.
- [Di 79a] Dixon, A. E.: *Basic of Solar Cells*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.
- [Di 80] Dickinson, W. C., P. N., Cheremisinoff: *Solar Energy Technology Handbook*, M. Dekker, Inc. New York, 1980.
- [Do 78] Dorf, R. C.: *Energy, Resources and Policy*, Addison-Wesley Publ. Comp. Reading, Mass., 1978.
- [Du 74] Duffie, J. A., W. A., Beckman: *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley and Sons, New York, 1974.
- [Du 80] Duffie, J. A., W. A., Beckman: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [Đo 77] Đorđević, N.: *Sunčeva energija — mjerenje količine i metodologija obrade u zavisnosti od namene i korištenja*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.
- [Fa 81] Faninger, G.: *Solar Thermal Conversion*, Sec. Int. Simp. on Non-Conv. Energy, Trieste, 1981.
- [Fi 78] Fittipaldi, F.: *Energy Storage by Solid — Solid Phase Changing Materials*, First Seminar on Solar Energy Storage, Trieste, 1978.
- [Fo 68] Fogg, G. E.: *Photosynthesis*, English University Press, London, 1968.
- [Ga 70] Gamser, F.: *Prilog metodici obrade globalnog zračenja*, 8. savetovanje klimatologa Jugoslavije, Zlatibor, 1970.
- [Ga 77] Gamser, F.: *Raspodela komponenata sunčevog zračenja u Jugoslaviji prema merenjima u mreži stanica*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.
- [Ga 78] Gamser, F.: *Merenje sunčanog zračenja u Jugoslaviji*, Klimatizacija, grejanje i hlađenje, 2 (1978) 43
- [Ga 81] Gardel, A.: *Energy, economy and prospective*, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [Ga 63] Gates, D. M., W. J., Harrop: *Infrared transmission of the atmospheric to solar radiation*, Appl. Opt. 2 (1963) 887
- [Gb 77] Gburčik, V.: *Sunčevo zračenje u meteorološkom informacionom sistemu*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.
- [Gb 80] Gburčik, V., Z., Krajinović: *Dnevne i godišnje varijacije globalnog sunčevog zračenja*, Zbornik radova Solar 80, Beograd, 1980.
- [Gi 79] Givoni, B.: *Passive Cooling of Buildings by Natural Energies*, Energy and Building, 2 (1979) 279
- [Gi 81] Givoni, B.: *Integrated Passive Systems of Heating and Cooling Buildings by Natural Energies*, Sec. Int. Symp. on Non-Conv. Energy, Trieste 1981.
- [Go 76] Golding, E. W., *The Generation of Electricity by Wind Power*, Spon, London, 1976.
- [Go 83] Golub, M.: *Raspoloživi vjetrovi potencijal na području Zagreba*, Sunčeva energija, 4 (1983) 1, 3—7
- [Gr 80] Grabovac, J., M., Rogošić: *Domaća proizvodnja solarnih uređaja*, Sunčeva energija, 4 (1980) 15
- [Gr 81] Grabovac, J., M., Živković: *Priprema tople vode stambenog naselja pomoću sunčane energije*, Sunčeva energija, 3 (1981) 225
- [Gr 82] Grabovac, J., et al.: *Possibilities for Yugoslav Manufacture of Solar Plants*, 4 Int. Solar Forum, Berlin, (1982) 287
- [Gu 81] Gupta, M. C.: *Solar Energy Use in Rural India*, Perspectives, Prospects and Challenges, Sec. Int. Symp. on Non-Conv. Energy, Trieste, 1981.
- [Ha 79] Hauska, G.: *Photosynthesis in Chloroplast*, First. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.

- [Ho 42] Hottel, H. C., B. B., Woertz: *The Performance of Flat Plate Solar Heat Collectors*, ASME Transactions, Vol. 64 (1942) 91
- [Ho 55] Hottel, H. C., A. Whillier: *Evaluation of Flat-Plate Solar Collector Performance*, Transaction of the Conference on the Use of Solar Energy: The Scientific Basis, II, Part I, Section A, pp. 74–104, (1955)
- [Hs 86] Jui Sheng Hsieh, *Solar Energy Engineering*. Prentice-Hall, London, 1986.
- [Hu 81] Hunt, V. D., *Wind Power*, Van Nostrand, New York 1981.
- [Iv 77] Ivanović, D.: *Raspodela trajanja sijanja Sunca u Jugoslaviji po godišnjim dobima i za godinu*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.
- [Ja 80] Jaras, L., L., Hoffmann, A., Jaras, G., Obermair: *Wind-energie*, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [Jo 75] Jurrison, J., R. E., Peterson, H. Y. B., Mar: *Principles and applications of selective solar coatings*, J. Vac. Sci. Technol., 12 (1975) 1010
- [Ju 75] Juzbašić, B.: *Elektronički elementi*, Školska knjiga, Zagreb, 1975.
- [Ju 78] Juzbašić, B.: *Solarna ćelija kao fotoelektrički pretvarač energije*, Elektrotehnika 21 (1978) 5
- [Ju 78a] Justus, C. G.: *Winds and Wind System Performances*, The Franklin Institute Press, Philadelphia, 1978.
- [Ka 78] Kadiroglu, O. K.: *Nuclear Energy and Alternatives*, Ballinger Publ., Cambridge, Mass., 1978.
- [Ka 76] Kauffman, K. W., H. G., Lerch: *Thermal Energy Storage with Saturated Aqueous Solution*, Sharing the Sun, Vol. 8. Winnipeg, (1976) 227
- [Ke 77] Ketani, M. A.: *Storage of Solar Energy*, in *Solar Energy Engineering*, ed. A. A. M. Sayigh, Academic Press, New York, 1977.
- [Kl 76] Klein, S. A., W. A., Beckman: TRNSYS, *A Transient System Simulation Program*, ASHRAE Trans. 82 (1976) 623
- [Kl 77] Klein, S. A.: *Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces*, Solar Energy 19 (1977) 325
- [Kl 78] Klein, S. A.: *Calculation of Flat-Plate Collector Utilizability*. Solar Energy, 21 (1978) 393
- [Ko 83] Kodrnja, M.: *Prikaz usporedivosti malih vjetrenjača*, V Savjetovanje o energiji, 1–09, Opatija 1983.
- [Kr 75] Kreider, J. F., F., Kreith: *Solar Heating and Cooling*, McGraw-Hill, New York, 1975.
- [Kr 81] Kreider, J. F., F., Kreith: *Solar Energy Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1981.
- [Kr 78] Kreith, F., J. F., Kreider: *Principles of Solar Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1978.
- [Ku 80] Kulišić, P., et al: *Thermal Energy Storage Using Heat of Solution*, Tagungsbericht des 3. Internationalen Sonnenforums, Hamburg, 1980.
- [Ku 81] Kulišić, P.: *Mogućnosti dobivanja tople vode pomoću solarne energije*, Energija, 7–8 (1981) 351
- [Ku 82] Kulišić, P.: *The Estimation of Diffuse Radiation in Yugoslavia*, Report on Non-Conventional Energy, Activities, ICTP 82/237, Trieste, 1982.
- [La 81] Lambić M., et al.: *Prilog analizi karakteristika ravnih pločastih kolektora*, Sunčeva energija 3 (1981) 205
- [La 82] Lalović, B.: *Solarne kuće*, specijalno izdanje „Galaksije“, BGZ, Beograd 1982.
- [La 82] Lalović, B.: *Nasušno Sunce*, Nolit, Beograd, 1982.
- [Li 60] Liu, B. Y. H., R. C., Jordan: *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation*, Solar Energy 4 (1960) 1
- [Li 62] Liu, B. Y. H., R. C., Jordan: *Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator*, ASHRAE Trans. (1962) 526
- [Lö 66] Löf, G., et al.: *World Distribution of Solar Radiation*, Report No 21, Solar Energy Lab., University of Wisconsin, July 1966.
- [Lö 81] Löf, G.: *Solar Collectors and Components of Air Systems*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Lu 80] Lunde, P. J.: *Solar Thermal Engineering, Space Heating and Hot Water System*, J. Wiley, New York, 1980.
- [Ma 81] Manchini, N. A.: *Methods of Thermal Storage*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Ma 77] Mastrorade, T. P.: *A Study of Solar Water Heating for Existing Homes in Southern New England*, Heat Transfer in Solar Energy System, ASME, New York, 1977.
- [Ma 81c] Mattar, H.: *Biomass Conversion to Fuel*, Sec. International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Ma 76] Mattax, D. M.: *Coatings and Surface Treatments in Solar Energy Applications*, Plating and Surface Finishing, Jan. (1976) 55

- [McD 79] McDaniels, D. K.: *The Sun, Our Future Energy Source*, John Wiley and Sons, New York, 1979.
- [McM 76] McMullan, J. T., R., Morgan, R. B., Murray: *Energy Resources and Supply*, John Wiley and Sons, New York, 1976.
- [McV 77] McVeigh, J. C.: *Sun Power*, Pergamon Press, Oxford, 1977.
- [Me 76] Meinel, A. B., M. P., Meinel: *Applied Solar Energy*, Addison-Wesley Pub. Comp., New York, 1976.
- [Me 75] Messel, H., S. T., Butler: *Solar Energy*, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- [Mi 77] Mitsui, A., et al.: *Biological Solar Energy Conversion*, Academic Press, New York, 1977.
- [Mi 81] Mitchell, C., J. C. Theilacker, S. A. Klein, *Calculation of Monthly Average Collector Operating Time and Parasitic Energy Requirements*, Solar Energy, 26 (1981) 555
- [Mu 80] Murr, L. E.: *Solar Material Science*, Academic Press, New York, 1980.
- [Mu 83] Musgrove, P.: *Wind Energy*, Conf. on Non-Conv. Energy Sources, ICTP, Trieste, 1983.
- [No 78] Novak, P.: *Metode ispitivanja niskotemperaturnih kolektora sunčane energije*, Međunarodni simpozijum o tehničkim, ekonomskim i organizacionim aspektima korišćenja Sunčeve energije, Beograd, 1978.
- [No 79] Novak, P.: *Sunčeva energija, zgrade i sistemi grijanja*, Sunčeva energija 2 (1979) 9
- [Pa 64] Page, J. K.: *The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Record for Latitudes 40° N–40° S*, Proc. U. N. Conf., New Sources of Energy, Vol. 4 (1964) 378
- [Pa 81] Parangtopo et al.: *Review and Analysis of the Global and Diffuse Solar Radiations in Jakarta*, Sec. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Pa 80] Pažanin, J.: *Kakvi su trenutni izgledi za popravak energetske balance uključivanjem u sistem sunčeve energije*, Sunčeva energija 3 (1980) 31
- [Pe 74] Penner, S. S., L., Icerman: *Energy*, Ad. Wesley Publ. Comp. Reading Mass. 1974.
- [Pe 59] Penzar, I.: *Globalna radijacija u Zagrebu na temelju 10-godišnjega mjerenja*, Radovi Geof. zavoda 2 (1959) 1–31
- [Pe 60] Penzar, B., I., Penzar: *Raspodjela globalne radijacije nad Jugoslavijom i Jadranskim morem*, Hidrografski Institut JRM, Split, 1960.
- [Pe 63] Penzar, I.: *Kakva je veza između globalnog zračenja i trajanja insolacije u Zagrebu*, Vjesnik HMS, Beograd. 3–4 (1963) 1–9
- [Pe 65] Penzar, I.: *Ovisnost direktna difuzna i globalna radijacije o ekstinkciji u atmosferi*, Zbornik meteoroloških i hidroloških radova 2 (1965) 2
- [Pe 70] Penzar, B.: *Klimatski podaci opservatorija Zagreb, Grič za razdoblje 1982–1967*, Geofizički zavod, Zagreb, 1970.
- [Pe 73] Penzar, I.: *Dnevne količine ekstrasolarnog i prizemne radijacije pri povoljnim uvjetima u pojasu od 41° do 47° N*, Rukopis, Zagreb, 1973.
- [Pe 73a] Penzar, I.: *Ekstrasolarni vrijednosti Sunčeve radijacije na geografskoj širini 45°49' N*, Zbornik meteoroloških i hidrometeoroloških radova, 4 (1973) 3
- [Pe 77] Penzar, I.: *Neki podaci o Sunčevoj iradijaciji u Jugoslaviji*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.
- [Pe 77a] Penzar, I.: *Aktinometrijski podaci potrebni za iskorištavanje sunčeve energije*, II konferencija SITH o tehnološkom razvoju SRH, Poreč, 1977.
- [Pe 79] Penzar, I., A., Bratanić: *Proračun dnevnog hoda sunčevog zračenja u Splitu na južnu kosu plohu*, Savjetovanje Primjena Sunčeve energije u turističkim objektima, Trogir, 1979.
- [Pe 75] Penner, S. S., L. Icerman, *Energy*, Vol. II, Addison-Wesley Publ. Comp. Reading, 1975.
- [Pe 76] Pettit, R. B., R. R., Sowell: *Solar absorptance and emittance properties*, J. Vac. Sci. Technol. 13 (1976) 599
- [Pi 80] Pivac, B., et al.: *Utjecaj koeficijentata apsorpcije i emisije premaza apsorbera na efikasnost rada kolektora sunčevog zračenja*, Sunčeva energija 4 (1980) 9
- [Pl 77] Pleško, N.: *Odnosi sunčeva zračenja, trajanja sijanja sunca i naoblake u Zagrebu*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd, 1977.
- [Po 78] Popović, M., et al.: *Raspodjela globalnog zračenja nad Jugoslavijom*, Klimatizacija, grejanje hlađenje, (KGH), Beograd 2 (1978) 31
- [Po 79] Popović, M.: *Optimalni nagib prijemnika sunčeve energije i rezultati mjerenja sunčevog zračenja*, KGH 3 (1979) 49
- [Po 77] Požar, H., V., Knapp: *Oscilacija intenzivnosti Sunčevog zračenja i ritam potrošnje energije*, Savetovanje Sunčeva energija u Jugoslaviji, Beograd 1977.

- [Pu 78] Pulfrey, D. L.: *Photovoltaic Power Generation*, Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 1978.
- [Qu 79] Quercia, I. F.: *Bioconversion of Solar Energy*, First Inter. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.
- [Ra 69] Rabinovitch, E., Govindjee: *Photosynthesis*, J. Wiley, New York, 1969.
- [Ru 75] Ruedisili, L. C., M. W., Firebaugh: *Perspectives of Energy*, Oxford University Press, London, 1975.
- [Sa 77] Sabbagh, J. A., et al.: *Estimation of the total radiation from meteorological data*, Solar Energy, 19 (1977) 307.
- [Sa 77] Sayigh, A. A. M.: *Solar Energy Engineering*, Academic Press, New York, 1977.
- [Sa 77] Sayigh, A. A. M.: *Estimation of Total Radiation Intensity*, Fourth Course on Solar Energy Conversion, Trieste, 1977.
- [Sa 78] Sayigh, A. A. M.: *The Technology of Solar Heat Flat Plate Collectors*, Journal of Eng. Scient., 4 (1978) 75.
- [Sa 81] Sayigh, A. A. M.: *Solar Radiation and its Measuring Equipment*, Sec. Int. Symp. on Non-Conv. Energy, Trieste, 1981.
- [ScA 71] *Scientific American* 134 (1971), broj posvećen energetske pitanjima.
- [Sch 78] Schröer, R., H. J., Stein, H. D., Talarek: *Use of Collector Efficiency Testing*, Proceedings of Australian-German Workshop on Solar Energy System Design, Düsseldorf, 1978.
- [Se 79] Selders, M., D., Bonnet: *Solarzellen*, Physik in unserer Zeit, 1 (1979)
- [Se 79] Selcuk, M. C.: *A Graphical Approach to the Efficiency of Flat Plate Collectors*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.
- [Se 81] Seraphin, B. O.: *Material Science Aspects of Photothermal Solar Energy Conversion*, Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Si 81] M. D. Siegel, M. D., S. A. Klein, W. A. Beckman: *A Simplified Method for Estimating the Monthly-Average Performance of Photovoltaic Systems*, Solar Energy, 26 (1981) 413.
- [Sl 79] Slessor, M., C., Lewin: *Biological Energy Resources*, Spon, London, 1979.
- [Sm 76] Smith, I. E.: *Energy Storage in I. M., Blair et al., Proceeding of Summer School Oxford*, 1975, Pergamon Press, 1976.
- [So 59] Sokić, S.: *Meteorološki instrumenti*, Hidrometeorološki zavod, Beograd, 1959.
- [So 79] Sorensen, B.: *Renewable Energy*, Academic Press, London, 1979.
- [Sz 75] Szokolay, S. V.: *Solar Energy and Building*, Architectural Press, London, 1975.
- [Ta 79] Tabor, H.: *Selective Surface*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.
- [Ta 79] Talarek, H. D.: *Testing of Liquid Heating Flat Plate Collectors Based on Standard Procedures*, First International Symposium on Non-Conventional Energy, ICTP, Trieste, 1979.
- [Ta 79] Tabor, H.: *Energy Storage in Solar Energy Exploitation*, First Inter. Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.
- [Ta 80] Tabor, H.: *Solar Ponds*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Ta 80a] Tabor, H., Z., Weinberger: *Non-Converting Solar Pond*, Solar Energy Handbook, ed. J. F. Kreider, McGraw-Hill, New York, 1981.
- [Ta 81] Talarek, H. D.: *Pyranometry in Solar Energy*, Sec. Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Te 74] Telkes, M.: *ASHRAE Transactions*, Vol. 80, 1974.
- [Te 82] *Tehnička enciklopedija*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1976.
- [Th 73] Thekaekara, M. P.: *Solar Energy Outside the Earth's Atmosphere*, Sol. Energy, 14 (1973) 109–127.
- [Tr 79] Trebst, A.: *Photosynthesis in Chloroplast*, First Int. Symp. on Non-Conventional Energy, Trieste, 1979.
- [Tw 86] Twidel, J. W., A. D. Weir: *Renewable Energy Resources*, University Press, Cambridge, 1986.
- [Ve 77] Veziroglu, T. N., S., Kakac: *Solar Production of Hydrogen in Solar Energy Engineering*, ed. A. A. M. Sayigh, Academic Press, New York, 1977.
- [Ve 81] Veziroglu, T. N.: *The Unifier of Non-Conventional Energy Sources: Hydrogen Energy System*, Second International Symposium on Non-Conventional Energy, Trieste, 1981.
- [Vl 81] Vlahović, B., et al.: *Globalno zračenje na južne nagnute plohe u Jugoslaviji*, Sunčeva energija 3 (1981) 199.
- [Vr 86] Vrsalović, I.: *Nove vjetroelektrane velike snage*, Sunčeva energija 7 (1986) 1–2, 15–18.

- [Vu 77] Vuletin, J., F., Marčelja, P., Kulišić, M., Bosanac: *Selektivni slojevi za konverziju sunčeve energije*, Energija, 11–12 (1977) 425
- [Vu 78] Vuletin J., et al.: *Fototehnička metoda konverzije sunčane energije* KGH 2 (1978) 53
- [Vu 81] Vuletin, J., P., Kulišić, M., Bosanac: *Selectively Absorbing Coatings*, Journal de Physique, 42 (1981) C 1–191
- [Vr 80] Vršnak, B.: *Sunce besprijeckorni termonuklearni reaktor*, Sunčeva energija, 2 (1980) 9–11
- [Wa 80] Walton, J. D.: *Introduction*, Proceedings of the First Seminar on Thermal Solar Energy Storage, Trieste, 1978.
- [We 73] Weast, R. C.: *Handbook of Chemistry and Physics*, The Chemical Rubber Co., Cleveland, 1973.
- [Wh 77] Whillier, A.: *Prediction of Performance of Solar Collectors*, ASHRAE GRP 170, New York, 1977.
- [Wi 79] Wilson, J. I. B.: *Solar Energy*, Wykeham, London, 1979.
- [WMO82] *Commission for Instruments and Methods of Observation*, Abridged Report of the Eighth Session, Mexico City 19–30. X 1981. – WMO No 520
- [Ya 73] Yass, K., H. B., Curtis: *Low Cost Air Mass 2 Solar Simulator* NASA TM X – 3059, 1973.
- [Wa 84] Warfield, G.: *Solar Electric Systems*, Hemisphere Publ. Comp., Washington, 1984.
- [WMO81] *Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Sources*, Technical Note No. 175, WMO, Geneva, 1981.

Kazalo pojmova

A

aerodinamički uzgon, 32
aerogenerator, 34
aktinometrija, 49
akumulator, 95
albedo, 41
alge, 128
AMO, 49
anaerobična fermentacija, 129
anemometar, 20
Angström-Pageova relacija, 53
apsorber, 63, 64
– omjer selektivnosti, 71
– selektivni, 67, 68
apsorpcija, 66
apsorpcijski faktor (apsorptancija), 9, 40, 66, 69
– integralni, 70
apsorpcijski sistem za hlađenje, 111
ASHRAE metoda, 80

B

barometarska formula, 30
Beaufortova skala, 20
Betzova formula, 30
– koeficijent, 29
bijelo tijelo, 10
bilanca snage ravnog kolektora, 74
biokonverzija, 134
biomasa, 134
bioplin, 129
bofor, 20
Bouguer-Lambertov zakon, 48
brzina vjetra, 20, 21
– najvjerojatnija, 22
– srednja, 22, 25
– srednja kubna, 22, 25

C

C3 i C4 biljke, 126
Collares, Pereirova i Rablova formula, 56
crno tijelo, 9, 41, 69
crni bakar, 71
crni krom, 71
crni nikal, 71

D

Darrieusova turbina, 32
deklinacija Sunca, 44
direktno pasivno zagrijavanje, 109
direktno Sunčevo zračenje, 39, 49

E

efikasnost sunčane ćelije, 118
– kolektora, 74, 76, 77, 82
egzitancija, 10, 41
ekonomičnost solarnog sustava, 106
ekstincijski koeficijent, 48
ekstraterestričko ozračenje (iradijancija), 43
ekstraterestrička ozračenost (iradijacija), 47
ekstraterestričko zračenje, 9, 42
električna energija iz sunčane, 39, 113
elektromagnetski valovi, 8
– energija, 8
– intenzitet, 8
– spektar, 8
emisijski faktor (emitancija), 11, 41, 69, 70
emisiona moć, 10
energetski dijagram za poluvodič, 115
energija
– iz biomase, 127, 128
– jedinice, 7
– unutrašnja, 7
– vjetra, 20, 29
– zračenja, 41
energetski tok, 10
etanol kao pogonsko gorivo, 128

F

faktor apsorpcije, 9, 40, 66, 69
– emisije, 11, 41, 69, 70
– prijenosa topline, 75
– refleksije, 10, 40, 66, 69
– upadnog kuta, 83
– transmisije, 41, 67
f-dijagrami, 103
feredoksin, 127
Fermijeva energija, 115
Fermijeva raspodjela, 115
foton, 12
fotonaponska konverzija, 113
fotonaponski sustavi, 121
fotorespiracija, 126
fotosfera, 41
fotosinteza, 5, 127
Fourierov zakon vođenja topline, 14
funkcija korisnosti, 130, 131

G

galij-arsenid, 122
generatori na vjetar, 6, 31, 35
Glauberova sol, 92
Grashofov broj, 15
gustoća energetskog toka, 41

H

heliograf, 49
 – Campbell-Stokesov, 50
 heliometar, 50
 heliostat, 85
 hidridi, 94
 hlađenje, 110
 Hottel-Whillerovala jednačba, 75, 81, 130

I

indeks prozračnosti, 57, 59
 infracrveno zračenje, 9
 insolacija, 49
 iradijacija, 40
 iradijancija, 40
 I-U karakteristika sunčane ćelije, 118
 izotermna šupljina, 10

K

kadmij-sulfid, 63
 karakteristika diode, 116
 kelvin, 7
 Kirchhoffov zakon, 11, 70
 klorofil, 126
 koeficijent atenuacije, 48
 – konvekcije, 15, 74
 – toplinske vodljivosti, 14
 – toplinskih gubitaka kolektora, 72
 – toplinskih gubitaka zgrade, 101
 kolektor, v. solarni kolektor
 kompresijski rashladni sustav, 111
 koncentrirajući kolektor, 84
 konvekcija, 14, 74
 korona, 41
 kristalna rešetka poluvodiča, 114
 kritični nivo zračenja, 130
 kritični omjer ozračenosti, 131
 kromosfera, 41
 krutost rotora, 31
 kut izlaska (zalaska) Sunca, 46

L

latentna toplina, 92
 latentno zagrijavanje, 93
 leguminoze, 127
 Liu-Jordan, Kleinova relacija, 57, 58

M

metan, 129
 metode uskladištenja energije, 87
 mjesno vrijeme, 44

N

nadstrešnica, 109
 Newtonov zakon hlađenja, 15
 n-tip poluvodiča, 115
 Nusseltov broj, 15

O

omjer koncentracije, 84
 – selektivnosti, 70
 optička efikasnost, 82
 – masa zraka, 48
 optimalni nagib kolektora, 140
 OTEC elektrane, 124
 ozračenost (iradijacija), 41
 – difuzna, 58, 60
 – dnevna, 56
 – satna, 56
 – ukupna, 58, 60
 ozračenost nagnute plohe, 60
 ozračenje (iradijancija), 41
 – difuzno, 49
 – direktno, 49
 – ukupno, 49

P

Pageova formula, 58
 parabolični kolektor, 84
 parafin, 93
 pasivni solarni sustavi, 108
 piranometar, 50
 – Moll-Gorczynski, 50
 pirheliometar, 50
 Pitotova cijev, 20
 p-n spoj, 114
 položaj Sunca, 138
 poluvodiči, 115
 Poyntingov vektor, 8
 prividno gibanje Sunca, 44
 prizemno Sunčevo zračenje, 47
 proračun solarnih sistema, 102
 proračun Sunčeva zračenja na nagnutu plohu, 59
 protonsko-protonski lanac, 41
 prozor kolektora, 65
 p-tip poluvodiča, 115

R

Rablova formula, 56
 ravni kolektor, v. solarni kolektor
 raspodjela vjerojatnosti brzine vjetra, 21
 – Rayleighova, 21
 – Weibullova, 25
 – standardna devijacija, 22, 25

raspršeno (difuzno) zračenje, mjerenje, 50
 – procjena, 57
 Rayleighov broj, 15
 Rayleighovo raspršenje, 48, 49
 Rayleighova raspodjela brzine vjetra, 21
 R_p faktor, 60
 refleksijski faktor (reflektancija), 10, 40, 41,
 66, 69, 85
 rezervoar za spremnik, 81
 Reynoldsov broj, 15

S

satni kut Sunca, 44, 46
 selektivni apsorberi, 68
 selektivnost, 70
 silicij, 113
 sivo tijelo, 10
 solarni apsorpcijski faktor, 70
 solarna konstanta, 42, 48
 solarne elektrane, 122
 solarni bazen, 94
 solarni doprinos, 103, 106
 solarni kolektori, koncentrirajući, 84
 solarni kolektori, ravni, 63
 – efikasnost, 74, 77
 – izvedba, 64
 – koeficijent toplinskih gubitaka, 81
 – pokrov, 65
 – spajanje, 68
 – s tekućinom, 23
 – testiranje, 80
 – teorija, 74
 – vremenska konstanta, 81
 – zračni, 64
 solarni sistemi za hlađenje, 111
 solarni sustav s crpkom, 97
 solarni sustavi za grijanje vode, 96, 99
 – za grijanje prostora, 99
 solarno grijanje, 96
 solarno hlađenje, 110
 spajanje kolektora, 68
 specifični toplinski kapacitet, 8
 spektar Sunčeva zračenja, 42
 spremnici, 89
 spremnik s vodom, 89
 – s kamenjem, 89
 srednje dnevne ozračenosti, 51, 52
 stupanj-dan, 137, 140
 Stefan Boltzmannov zakon, 12
 strujanje fluida, 16
 Sunce, 41
 sunčana peć, 86
 sunčane ćelije, 5, 118
 – efikasnost, 118
 – ekvivalentni sklop, 117
 – elektromotorna sila, 118
 – faktor punjenja, 118
 – $I-U$ karakteristika, 118
 – od amornog silicija, 122
 – od polikristaliničnog silicija, 122
 – primjene, 120
 – sadašnje stanje i perspektive razvoja, 120
 – snaga, 118
 – spektralna osjetljivost, 119
 – teoretska efikasnost, 119
 sunčana energija, 1, 2
 Sunčevo vrijeme, 44
 Sunčevo zračenje, 39
 – apsorpcija u atmosferi, 47
 – ekstrasolarno, 42, 43
 – izravno, 39, 49
 – mjerenje, 49
 – odbijeno, 39, 49
 – prizemno, 47, 48
 – proračun, 53
 – raspršenje u atmosferi, 47
 – raspršeno, 49, 59
 – tablice, 51
 sustavi s centralnim prijemnikom, 123
 sustavi s raspoređenim kolektorima, 123

T

temperatura, 7
 – Sunca, 42
 temperaturene skale, 7
 termička difuznost, 16
 – ravnoteža, 7
 termička shema ravnog kolektora, 73
 termosifonski sustav, 97
 testiranje kolektora, 80
 tok zračenja, 40
 toplina, 7
 – otapanja, 93
 toplinski gubici ravnog kolektora, 72
 – spremnika, 90
 – zgrade, 100
 toplinski kapacitet, 8
 toplinski otpor, 72
 toplinski spremnik, 89
 toplinski tok, 72
 trajanje Sunčeva dana, 46

U

uređaj za testiranje kolektora, 80
 uskladištenje energije
 – električne, 95

- metodom latentne topline, 92
 - zagrijavanjem materijala, 88
- uskladištenje Sunčeve energije, 86
uskladištenje vodika, 95

V

- vakuumski kolektor, 68
visina Sunca, 45
vjetar, 5, 20
- energija, 20, 29
 - brzina, 20
 - smjer, 20
 - snaga, 21, 29

- vodeni spremnik, 89
vodik, 94
vođenje topline, 14
vremenska konstanta kolektora, 82

W

- Weibullova brzinska raspodjela, 25
WMO 42, 50

Z

- zenitna udaljenost, 45
zračna turbina, 29



Petar Kulišić rođen je 28. ožujka 1940. u Dubrovniku. Diplomirao je 1962. eksperimentalnu fiziku na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu i doktorirao iz eksperimentalne nuklearne fizike 1965. na istom fakultetu. Desetak godina radio je u Institutu „R. Bošković“ u području nuklearne fizike. Dvogodišnju specijalizaciju proveo je na University of Manitoba u Kanadi proučavajući nuklearne reakcije na ciklotronu. Posljednjih petnaestak godina znanstveno radi u području energetike, posebno solarne energije. Sada je znanstveni savjetnik i redovni profesor pri Zavodu za fiziku Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu. Predaje predmet *fizika* za studente Elektrotehničkog i Tehnološkog fakulteta, a na postdiplomskom studiju predmet *novi izvori energije*.

Autor je brojnih znanstvenih radova iz područja nuklearne fizike, zatim iz fizike nekonvencionalnih izvora energije, posebno solarne energije. Autor je i koautor nekoliko knjiga, udžbenika i priručnika za fakultete i srednje škole: *Mehanika i toplina*, *Valovi i optika*, *Riješeni zadaci iz mehanike i topline*, *Elektromagnetske pojave i struktura tvari* (1991), *Zadaci iz fizike za srednje škole* i *Mehanika i termodinamika* za prirodoslovna usmjerenja gimnazija (1991). U knjizi *Novi izvori energije* (1985) napisao je dio o Sunčevoj energiji, koji sada, prerađen i proširen, izlazi kao posebna knjiga.