

Tablica 8
UVOZ SUMPORA U JUGOSLAVIJU U 1986. GODINI

Zemlja izvoznica	Uvezeno (tona)	
	Sirovi sumpor	Pročišćeni sumpor
Poljska	133957	3029
Kanada	17845	
Saudijska Arabija	9670	
Italija	1984	1203
Savezna Republika Njemačka	982	1417
SSSR		1502
SAD	94	
Francuska		60

Tablica 9
PROIZVODNJA SULFATNE KISELINE U JUGOSLAVIJI

Godina	1955.	1965.	1975.	1985.	1989.
Proizvedeno (tona) ¹	73000	435000	935000	1489000	1634000

¹ Masa sulfatne kiseline i oleuma.

donekle usporen (tabl. 6). Računa se da je 1988. u svijetu proizvedeno oko 38 500 000 tona sumpora, od toga približno 28 700 000 tona u obliku sporednih proizvoda prilikom preradbe ugljena, plina i nafte, te od sulfidnih ruda bakra, olova i cinka, a 9 800 000 tona sumpora je sadržano u pirinitnim koncentratima. U tabl. 7 navedeni su najveći svjetski proizvođači sumpora i sulfatne kiseline.

SFRJ je uvozila sirovi i pročišćeni sumpor iz različitih zemalja (tabl. 8), a proizvodila sulfatnu kiselinu (tabl. 9).

LIT.: Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, Systemnummer 9, S. 1. Verlag Chemie, Weinheim *1953. – K. W. C. Burton, P. Machmer, u djelu: G. Nickless (Ed.), Inorganic Sulphur Chemistry. Elsevier, New York 1968. – S. Oae (Ed.), Organic Chemistry of Sulfur. Plenum Press, New York 1977. – H. Fischer, Schwefel, u djelu: Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Band 21. Verlag Chemie, Weinheim *1982. – S. H. Pine, J. B. Hendrickson, D. J. Cram, G. S. Hammond, Organska kemija. Školska knjiga, Zagreb 1984. – I. Filipović, S. Lipanović, Opća i anorganska kemija. Školska knjiga, Zagreb *1987.

M. Pribanić

SUNČANA ENERGIJA, Sunčevo zračenje koje se može energetski iskoristiti kad dopre do Zemljine površine.

Većina oblika energije, međutim, na našem planetu nastala je ili nastaje djelovanjem Sunčeva zračenja. Tako fosilna goriva (ugljen, nafta, prirodni plin) sadrže zapravo akumuliranu energiju Sunčeva zračenja koje je dopiralo do Zemlje u toku milijuna godina. Vjetar i vodene snage također su posljedica Sunčeva zračenja. To vrijedi i za energiju valova, koji nastaju djelovanjem vjetra. Sunčevo zračenje omogućuje fotosintezu, koja je preduvjet za razvoj i rast biljaka, pa tako nastaje drvo i ostala biomasa koji se mogu upotrijebiti i kao energetski izvori.

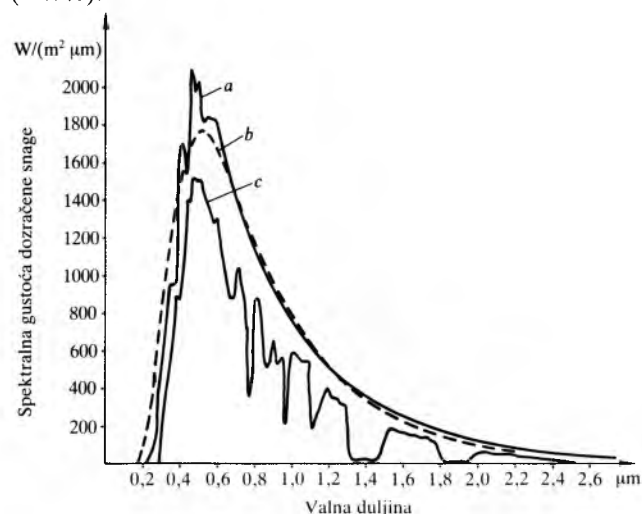
Sunce je jedna od mnogobrojnih zvijezda u našoj galaksiji (v. *Astronomija*, TE 1, str. 447). Svemirom se giba brzinom od 20 km/s, a rotira oko svoje osi s periodom od 27 dana na ekvatoru i 31 dan na polovima. Polumjer mu je $6,96 \cdot 10^5$ km, masa $1,99 \cdot 10^{27}$ t, a srednja udaljenost od Zemlje $1,49 \cdot 10^8$ km. Procjenjuje se da je temperatura u unutrašnjosti Sunca reda veličine 10^7 K, tlak 10^9 MPa, a gustoća 10^5 kg/m³. U takvim prilikama nastaje termonuklearna fuzija vodikova i helij uz oslobađanje ogromne energije. Spajanjem četiri atoma vodikova jezgri u helij oslobađa se energija od 26,21 MeV, odnosno $1,17 \cdot 10^{-18}$ kWh po svakoj tako stvorenoj jezgri helija.

Energija koja nastaje u unutrašnjosti Sunca prenosi se prema njegovoj površini, a odatle zrači u svemir. Sunčevo zračenje sastoji od fotosfere, kromosfere i korone. *Fotosfera* se sastoji od nehomogenih ioniziranih plinova male gustoće i

iz nje zrači svjetlost u svemir. Temperatura je u sloju fotosfere 4000–6000 K. Iznad nje je *kromosfera*, sloj deo $\sim 10^4$ km, uglavnom smjesa vodikova i helija. Tu je temperatura nekoliko puta veća nego u fotosferi. Najviši je sloj *korona*, gdje su ionizirani plinovi male gustoće, ali temperature nekoliko puta veće nego u fotosferi. Taj se sloj postepeno gubi u svemir.

Snaga Sunčeva zračenja iznosi $\sim 3,8 \cdot 10^{23}$ kW, što odgovara godišnjoj energiji zračenja od $\sim 3,3 \cdot 10^{27}$ kWh. Međutim do Zemlje dopire tek milijarditi dio tog zračenja, snage $\sim 1,7 \cdot 10^{14}$ kW, što odgovara godišnjoj energiji od $\sim 1,5 \cdot 10^{18}$ kWh.

Spektar Sunčeva zračenja odgovara približno spektru crnog tijela užarena na temperaturu od 5760 K (sl. 1). On se prije ulaska u Zemljinu atmosferu proteže od $\sim 0,12$ do više od $10 \mu\text{m}$, s maksimalnom vrijednošću na valnim duljinama od $\sim 0,48 \mu\text{m}$. Taj se spektar sastoji od ultraljubičastog ($\sim 8\%$ od ukupne energije), vidljivog ($\sim 45\%$) i infracrvenog dijela ($\sim 47\%$).



Sl. 1. Spektar Sunčeva zračenja. a ekstraterestričko zračenje, b zračenje crnog tijela na temperaturi 5760 K (normirano na 1353 W/m²), c zračenje na Zemljinoj površini

Ekstraterestričko zračenje. To je zračenje na vrhu Zemljine atmosfere. Srednja gustoća dozračenosti snage (ozračenje, iradijancija), koja se naziva *solarom konstantom*, iznosi $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ i jednaka je omjeru snage Sunčeva zračenja i ploštine plove okomite na smjer toga zračenja pri srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca.

Ekstraterestričko zračenje mijenja se u toku godine zbog mijenjanja udaljenosti Zemlje od Sunca. Gustoća dozračenosti snage na okomitu plohu na bilo kojem položaju Zemlje iznosi

$$E_0 = \bar{E}_0 \left(\frac{r}{r_s} \right)^2, \quad (1)$$

gdje je r stvarna, a r_s srednja udaljenost Zemlje od Sunca. Ta se udaljenost mijenja iz dana u dan, ali te promjene nisu brze, pa se može računati da je ta snaga u toku dana konstantna. Najmanja udaljenost Zemlje od Sunca iznosi $0,983 r_s$ (perihel, 3. siječnja), a najveća $1,017 r_s$ (afel, 4. srpnja). Zemlja se nalazi na srednjoj udaljenosti od Sunca 4. travnja i 5. listopada. Gustoća se ekstraterestričke dozračenosti snage može približno izračunati pomoću izraza

$$E_0 = \bar{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right), \quad (2)$$

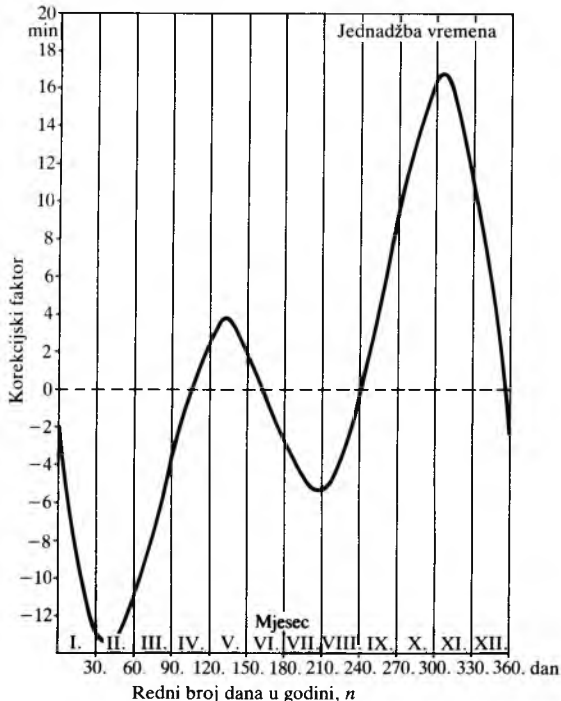
gdje je n redni broj dana u godini (1. siječnja je prvi dan).

Pri prolazu kroz atmosferu Sunčevo zračenje slabi, jer se djelomično raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine, a djelomično ga apsorbiraju plinovi (ozon, ugljik-dioksid, vodena para i dr.). Zbog toga se spektar Sunčeva zračenja koje dopire do Zemljine površine razlikuje od ekstraterestričkoga (sl. 1). U ukupnoj energiji zračenja udio ultraljubičastoga na Zemljinoj površini iznosi $\sim 3\%$, vidljivoga

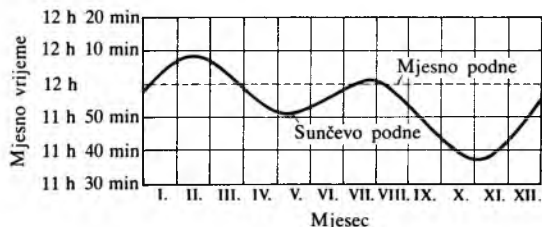
~42%, a infracrvenoga ~55%. Skoro sve Sunčevo zračenje koje dopire do Zemljine površine nalazi se u području valnih duljina od 0,35...2,5 μm .

Prividno gibanje Sunca. Iako se Zemlja giba oko Sunca, za razmatranje je mogućnosti energetskog iskorištavanja Sunčeva zračenja pogodnije promatrati prividno gibanje Sunca s obzirom na nepomičnu površinu Zemlje.

Sunčevo se zračenje mjeri i izračunava prema *pravom sunčanom vremenu*. Da bi se iz mjesnoga odredilo sunčano vrijeme, potrebno je poznavati zemljopisnu duljinu, vremensku zonu promatranog područja i korekcijski faktor (tzv. *jednadžba vremena*) kojim se uzimaju u obzir nepravilnosti Zemljine putanje i rotacije. Za mjesta na meridijanu 15° E (prema kojemu se računa srednjoevropsko vrijeme) pravo se sunčano vrijeme dobiva ako se mjesnom vremenu doda korekcijski faktor prema sl. 2. Ako promatrano mjesto nije na tom meridijanu, treba za svaki stupanj odstupanja prema zapadu dodati 4 minute, a za svaki stupanj odstupanja prema istoku odbiti također 4 minute. Razliku između mjesnoga i sunčanog podneva u Splitu prikazuje sl. 3.



Sl. 2. Korekcijski faktor za preračunavanje mjesnog vremena u Sunčevo vrijeme za pojedine mjesece, odnosno dane u godini



Sl. 3. Razlika između Sunčeva i mjesnog podneva u Splitu (nije uzeto u obzir ljetno pomicanje sata za jedan sat naprijed) u toku godine

Ako se poznaje mjesno vrijeme izlaska i zalaska Sunca, sunčano se podne određuje tako da se vremenu izlaska Sunca doda polovica trajanja sučanog dana. Ako, npr. Sunce izlazi u 7 sati i 4 minute, a zalazi u 17 sati i 20 minuta, onda sunčani dan traje 10 sati i 16 minuta, pa je polovica Sunčanog dana 5 sati i 8 minuta. Sunčano je podne dakle u 12 sati i 12 minuta mjesnog vremena.

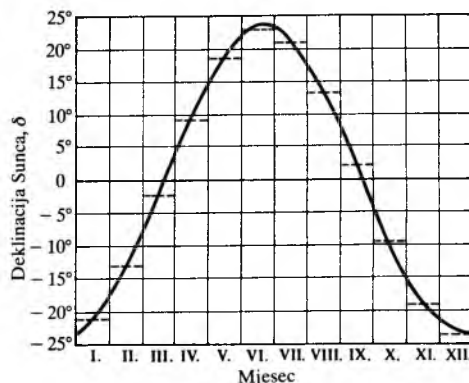
Deklinacija Sunca (δ) kut je što ga zatvara spojnica središta Zemlje i središta Sunca s ravninom u kojoj leži ekvator. Ravnina ekvatora zatvara kut od 23,45° s ravninom

Zemljine putanje. Deklinacija Sunca ovisi o danu u godini i mijena se od -23,45° (21. prosinca) do +23,45° (21. lipnja). Vrijednosti deklinacije mogu se izračunati pomoću aproksimativnog izraza

$$\delta = 23,45 \sin \frac{284 + n}{365} \cdot 360^\circ, \quad (3)$$

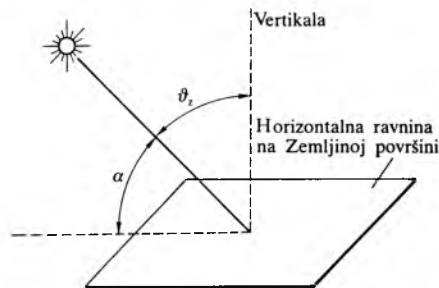
gdje je n redni broj dana u godini.

Godišnji hod deklinacije Sunca δ vidi se na sl. 4.



Sl. 4. Godišnji hod deklinacije Sunca i srednje vrijednosti deklinacije za pojedine mjesece

Satni kut Sunca (ω) vrijeme je izraženo kutom, a računa se počevši od sunčanog podneva. Sunčano je podne doba dana kad je Sunce u najvišem položaju i taj trenutak odgovara kutu $\omega = 0^\circ$. Satni se kut Sunca određuje tako da se vremenski interval od sunčanog podneva u satima pomnoži sa 15°. Prijepodnevi satni kut ima negativan, a poslijepodnevni pozitivan predznak. Tako npr. 9 sati sunčanog vremena odgovara satnom kutu $\omega = -3 \cdot 15^\circ = -45^\circ$, a 13 h 30 min satnom kutu $\omega = 1,5 \cdot 15^\circ = 22,5^\circ$.



Sl. 5. Visina Sunca α i zenitna udaljenost θ_z

Visina Sunca (α) kut je između sunčanih zraka i horizontalne plohe (sl. 5), a može se odrediti iz izraza

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega, \quad (4)$$

gdje je φ zemljopisna širina. Visina Sunca u pravo sunčano podne (α_p), kad je $\omega = 0^\circ$ i $\cos \omega = 1$, dobiva se iz izraza

$$\sin \alpha_p = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta = \cos(\varphi - \delta) = \sin(90^\circ - \varphi + \delta), \quad (5)$$

pa je

$$\alpha_p = 90^\circ - \varphi + \delta. \quad (6)$$

Kutovi visine Sunca u sunčano podne u Zagrebu (zemljopisna širina 45,82°) i Splitu (43,68°) navedeni su u tabl. 1.

Kut Sunčeva izlaska i zalaska određuje se pomoću izraza (4) ako je $\alpha = 0^\circ$ ili $\alpha = 180^\circ$. Tada se dobiva da je

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta, \quad (7)$$

odnosno

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta). \quad (8)$$

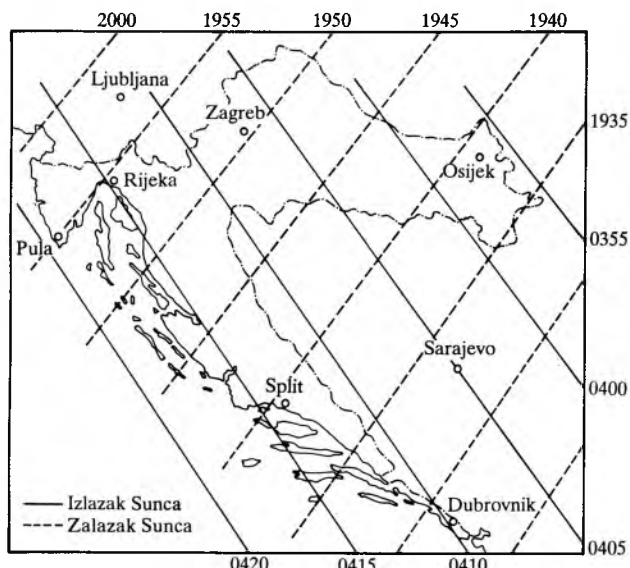
Ti izrazi vrijede za gornju granicu atmosfere. Na donjoj granici atmosfere Sunce izlazi ~8 minuta prije, a zalazi ~8 minuta kasnije nego na vrhu atmosfere zbog refrakcije

Tablica 1
KUTNE VISINE SUNCA U SUNČANO
PODNE 15. DANA U MJESECU

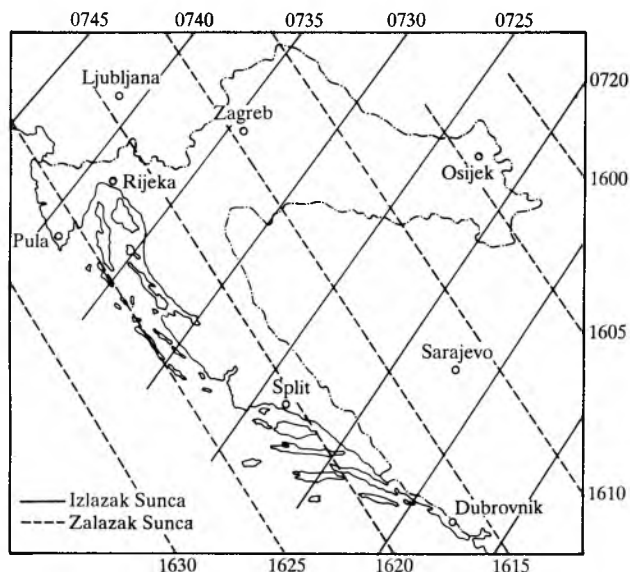
Mjesec	Kutna visina Sunca	
	Zagreb	Split
I.	22,9°	25,1°
II.	30,9°	33,0°
III.	41,4°	43,5°
IV.	53,6°	55,7°
V.	63,0°	65,1°
VI.	67,5°	69,6°
VII.	65,7°	67,8°
VIII.	58,0°	60,1°
IX.	46,5°	48,5°
X.	34,6°	36,7°
XI.	25,0°	27,1°
XII.	21,1°	23,2°

svjetlosti pri prolazu kroz atmosferu. Kut Sunčeva izlaska ima negativnu, a zalaska pozitivnu vrijednost.

Vrijeme Sunčeva izlaska i zalaska određuje se pomoću kuta Sunčeva izlaska i zalaska (ω_s) izračunatog pomoću izraza (8). Ako se taj kut podijeli sa 15, dobiva se vrijeme Sunčeva izlaska prije podne, odnosno zalaska poslije podne. Ako se,

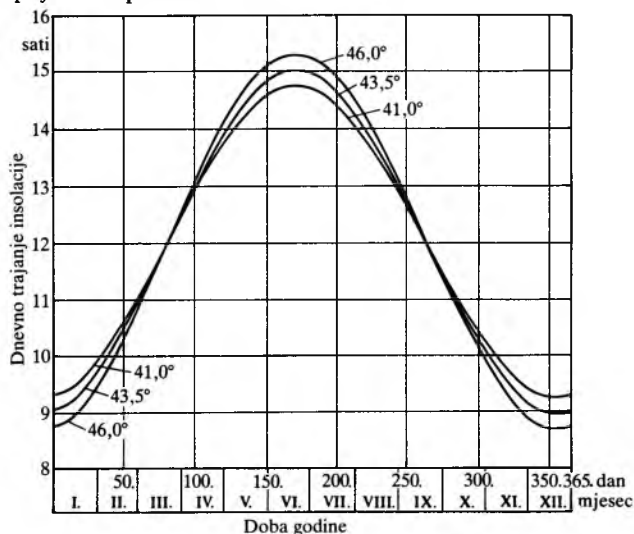


Sl. 6. Ljetne izokrone izlaska i zalaska Sunca na području Hrvatske (23. lipnja). Brojke označuju mjesta vremena (npr. 19:35 označuju 19 h 35 min)



Sl. 7. Zimske izokrone izlaska i zalaska Sunca na području Hrvatske (20. prosinca)

npr., dijeljenjem kuta ω_s sa 15 dobije 5,20 sati, to znači da Sunce izlazi u $12 - 5,20 = 6,80$ sati (6 h 48 min), a zalazi u $12 + 5,20 = 17,20$ sati (17 h 12 min). Na sl. 6 i 7 vide se vremena Sunčeva izlaska i zalaska na području Hrvatske 23. lipnja i 20. prosinca.



Sl. 8. Moguće trajanje insolacije na trima sjevernim zemljopisnim širinama

Trajanje sunčanog dana (trajanje potencijalne insolacije) jednako je dvostrukom kutu izlaska, odnosno zalaska Sunca izraženom satima, tj. kutom podijeljenim sa 15, pa je trajanje sunčanog dana

$$t_s = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta). \quad (9)$$

Na sl. 8 prikazano je trajanje sunčanog dana u područjima na sjevernim zemljopisnim širinama od 41,0°, 43,5° i 46,0°. Pokazuje se da je zimi u južnijim područjima trajanje sunčanog dana duže nego u sjevernijima, ali je ljeti to trajanje duže u sjevernijim nego u južnijim područjima.

Ekstraterestričko zračenje na horizontalnu plohu iznad mjesta promatranja na Zemljinoj površini ovisi o solarnoj konstanti, deklinaciji, satnom kutu Sunca, visini Sunca, zemljopisnoj širini i rednom broju dana u godini.

Gustoća ekstraterestričke dozačene snage (W/m^2) na horizontalnu plohu određuje se izrazom

$$E_0(n) = \bar{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \sin \alpha, \quad (10)$$

gdje je α kut visine Sunca. Integriranjem toga izraza po vremenu od izlaska do zalaska Sunca dobiva se dnevna gustoća ekstraterestričke dozačene energije (ozračenost, ekspozicija) na horizontalnu plohu H_0 (Ws/m^2) za n -ti dan u godini:

Tablica 2
PROSJEČNA DNEVNA GUSTOĆA EKSTRATERESTRIČKE DOZRAČENE ENERGIJE NA HORIZONTALNU PLOHU U OVISNOSTI O GEOGRAFSKOJ ŠIRINI

Mjesec	Gustoća ekstraterestričke dozačene energije $\bar{H}_0$, kWh/m ²							
	41°	42°	43°	44°	45°	46°	47°	48°
I.	4,11	3,92	3,75	3,58	3,42	3,22	3,06	2,89
II.	5,56	5,39	5,22	5,06	4,92	4,75	4,58	4,39
III.	7,58	7,44	7,31	7,17	7,06	6,92	6,81	6,67
IV.	9,5	9,58	9,53	9,39	9,25	9,14	9,03	8,92
V.	11,0	10,97	10,92	10,89	10,88	10,78	10,75	10,72
VI.	11,58	11,58	11,58	11,57	11,56	11,56	11,56	11,55
VII.	11,25	11,25	11,25	11,22	11,22	11,19	11,19	11,17
VIII.	10,1	10,03	9,97	9,92	9,86	9,81	9,72	9,64
IX.	8,33	8,19	8,08	7,97	7,86	7,75	7,64	7,50
X.	6,25	6,11	5,94	5,81	5,67	5,50	5,36	5,19
XI.	4,47	4,31	4,14	3,97	3,81	3,64	3,47	3,31
XII.	3,67	3,47	3,31	3,14	2,97	2,81	2,64	2,44

$$H_0 = \frac{86400}{\pi} \bar{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \cdot \left(\frac{2\pi}{360} \omega_s \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_s \cos \varphi \cos \delta \right), \quad (11)$$

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

Mjesečni prosjeci dnevne gustoće ekstraterestričke dozračene energije na horizontalnu plohu (kWh/m^2) za svaki mjesec u godini na zemljopisnim širinama od 41° do 48° N nalaze se u tabl. 2.

Prizemno Sunčevo zračenje. Kao što je već spomenuto, na putu kroz atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se apsorbira zbog interakcije s plinovima i vodenom parom i jer se raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine. Zato Sunčevo zračenje dopijeva do Zemljine površine kao izravno i kao raspršeno zračenje. Izravno (direktno) zračenje dolazi izravno sa Sunca, a raspršeno (difuzno) zračenje, koje je nastalo raspršenjem izravnog zračenja u atmosferi, dolazi iz svih smjerova neba. Prema tome, ukupna (globalna) dozračena snaga E_G na Zemljinoj površini sastoji se od izravne (E_I) i raspršene (E_R) dozračene snage, pa je

$$E_G = E_I + E_R. \quad (12)$$

Podaci o Sunčevu zračenju dobivaju se mjerenjem. Time se bavi posebna grana meteorologije, *aktinometrija*. Za praktično iskorištavanje Sunčane energije važni su podaci o trajanju insolacije, ukupnoj dozračenoj snazi na horizontalnu plohu i difuznoj dozračenoj snazi na horizontalnu plohu.

Trajanje insolacije, tj. vrijeme kad izravno Sunčevo zračenje dopire do Zemljine površine, odnosno do horizontalne plohe mjernog uređaja, mjeri se *heliografom*. Takvi se

podaci bilježe na brojnim mjestima u Hrvatskoj. Iako heliograf daje samo podatke o tome ima li ili nema izravnog zračenja, a ne daje podatke o dozračenoj energiji, ipak se, ako nema drugih podataka, iz podataka o trajanju insolacije može procijeniti dozračena energija.

Postoje različite vrste heliografa, a najpoznatiji je *Campbell-Stokesov heliograf* koji iskorišćuje toplinsko djelovanje Sunčeva zračenja. Sastoji se od prozirne staklene kugle koja fokusira Sunčevo zračenje na papirnu vrpču. Kad Sunce sja, na papirnoj vrpči ostaje trag od spaljivanja papira. Naprotiv, kad Sunce zađe za oblake ili je intenzivnost izravnog zračenja premalena, na papiru ne ostaje trag.

Piranometri su instrumenti koji mjere Sunčevo zračenje koje upada iz prostornog kuta 2π na njihovu ravnu plohu za primanje zračenja. Oni se, dakle, upotrebljavaju za mjerenje ukupnog Sunčeva zračenja. Obično se postavljaju tako da im ploha primanja bude horizontalna.

Piranometara ima dvije vrste. Jedni su toplinski detektori koji se djelovanjem Sunčeva zračenja zagrijavaju, pa se pojavljuje termoelektrični efekt (v. *Termoelektrične pojave*), odnosno toplinska ekspanzija, te se mjerenjem tih pojava može posredno mjeriti intenzivnost Sunčeva zračenja. Druga su vrsta poluvodički piranometri u kojima upadno zračenje uzrokuje fotonaponski efekt.

Ako se Sunčev disk zasjeni tako da do plohe piranometra za primanje zračenja ne može doprijeti izravno Sunčevo zračenje, piranometar će registrirati raspršeno zračenje neba.

Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu mjeri se u svim stanicama, dok se raspršeno zračenje mjeri samo u nekim. Podaci o tim mjerenjima objavljuju se u stručnim publikacijama.

Tablica 3
PROSJEČNA SATNA GUSTOĆA DOZRAČENE ENERGIJE U SPLITU (1964–1977)

Doba dana h	Gustoća dozračene energije H prema mjesecima, Wh/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	–	–
18...19	–	–	2	26	81	111	100	50	5	–	–	–
19...20	–	–	–	–	7	17	13	2	–	–	–	–
<i>Ukupno</i>	1794	2717	3984	5165	6462	7198	7059	6214	4821	3517	2066	1592

Tablica 4
PROSJEČNA SATNA GUSTOĆA DOZRAČENE ENERGIJE U ZAGREBU (1958–1967)

Doba dana h	Gustoća dozračene energije H prema mjesecima, Wh/m^2											
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
4...5	–	–	–	1	11	19	14	3	–	–	–	–
5...6	–	–	2	22	67	87	77	38	8	–	–	–
6...7	–	4	27	92	167	186	185	128	61	13	–	–
7...8	9	35	96	197	288	310	310	257	162	68	1	–
8...9	43	101	188	317	417	437	445	383	289	150	14	4
9...10	98	183	290	419	528	542	564	518	403	240	52	30
10...11	147	252	366	499	599	633	654	608	496	320	101	72
11...12	184	290	389	534	643	665	695	661	539	358	147	112
12...13	194	303	396	529	644	664	698	651	532	359	177	139
13...14	168	266	347	493	589	628	651	600	486	322	185	143
14...15	117	201	275	420	501	544	561	512	402	248	153	121
15...16	54	117	195	301	398	425	443	397	289	152	140	79
16...17	11	42	100	191	280	310	326	268	163	62	50	33
17...18	–	4	28	83	155	191	192	136	54	8	11	5
18...19	–	–	2	18	55	83	79	36	6	–	–	–
19...20	–	–	–	–	7	17	14	2	–	–	–	–
<i>Ukupno</i>	1025	1810	2700	4109	5354	5726	5905	5200	3890	2303	996	738

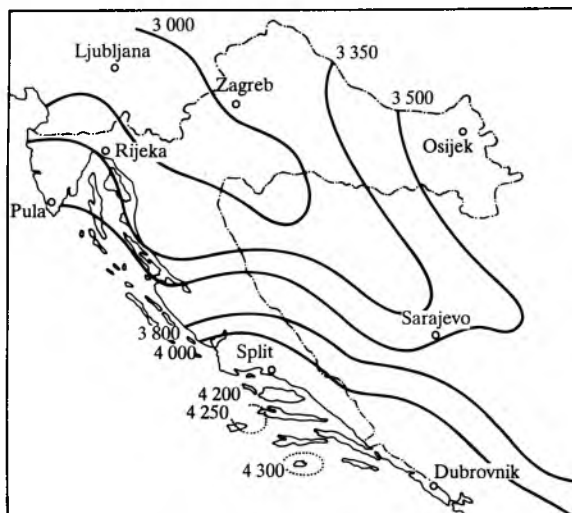
Registracijom ukupnog zračenja pomoću piranometra dobivaju se podaci o dozačenoj energiji za svaki sat u danu. Taj se podatak može smatrati i snagom zračenja za taj sat ako se pretpostavi da je intenzivnost zračenja u toku toga sata bila konstantna. Ako se zbroje energije dozačene u svim satima dana, dobivaju se dnevne dozačene energije. U tabl. 3 i 4 nalaze se podaci o prosječnim gustoćama dozačene energije u satu za svaki mjesec u godini u Splitu (prosjeak za razdoblje 1964–1977) i u Zagrebu (1958–1967). U tim se tablicama nalaze i podaci o prosječnim dnevnim gustoćama dozačene energije.

Tablica 5
PROSJEČNA MJESEČNA GUSTOĆA DOZRAČENE ENERGIJE NA HORIZONTALNU PLOHU

Mjesec	Gustoća dozačene energije H prema mjestima, kWh/m ²		
	Split	Zagreb	Ljubljana
I.	55,73	31,78	23,25
II.	76,76	51,13	43,17
III.	123,50	83,70	79,25
IV.	154,95	123,27	109,17
V.	200,32	165,97	151,56
VI.	215,94	171,78	151,68
VII.	218,83	183,06	164,49
VIII.	192,63	161,20	134,33
IX.	144,63	116,70	98,34
X.	109,03	71,39	62,00
XI.	64,05	30,88	29,26
XII.	49,35	22,88	18,94
Godišnje	1605,72	1213,74	1065,49

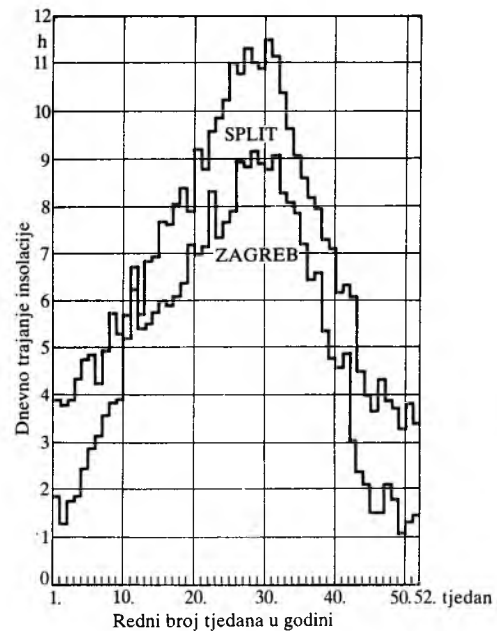
Na temelju tih podataka može se izračunati mjesečna i godišnja gustoća dozačene energije na horizontalnu plohu (tabl. 5). Ako se poznaju podaci za niz mjernih stanica, mogu se nacrtati krivulje koje povezuju mjesta jednake godišnje gustoće dozačene energije (sl. 9). Slika sadrži podatke o prosječnoj dnevnoj gustoći dozačene energije (Wh/m²), pa ih treba pomnožiti brojem dana u godini da bi se dobila prosječna godišnja gustoća dozačene energije. Prema tome, u našoj zemlji godišnja gustoća dozačene energije iznosi 1060–1600 kWh/m². Najmanja je gustoća dozačene energije u sjeverozapadnom, a najveća u jugoistočnom dijelu zemlje.

Prosječno mjesečno i godišnje trajanje insolacije za niz mjesta sadrži tabl. 5, a prosječno trajanje insolacije po tjednima u Zagrebu i Splitu sl. 10.



Sl. 9. Godišnje izoenerygiske krivulje na tlu Hrvatske (navedene su brojčane vrijednosti prosječne dnevne gustoće dozačene energije u Wh/m²)

Izravno i raspršeno zračenje na horizontalnu plohu. U meteorološkim stanicama najčešće se registrira gustoća ukupne dozačene energije na horizontalnu plohu (H). Da bi se detaljnije analiziralo iskorištavanje Sunčeva zračenja, potrebno je ukupno zračenje rastaviti na izravnu (H_1) i raspršenu (H_R) gustoću dozačene energije. Za rastavljanje



Sl. 10. Prosječno stvarno dnevno trajanje insolacije u Zagrebu (1931–1960) i Splitu (1946–1975)

ukupnog zračenja upotrebljava se Liu-Jordanov postupak, prilagođen našim prilikama.

Postoji nekoliko empirijskih izraza za proračun omjera raspršene komponente (H_R) i ukupne dnevne gustoće dozačene energije (H) na horizontalnu plohu od kojih je najjednostavnija

$$K_R = \frac{H_R}{H} = a + b K_T, \quad (13)$$

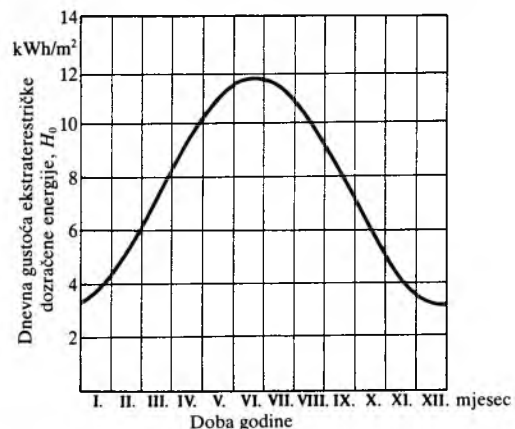
gdje je $K_T = H/H_0$ omjer prozračnosti određen omjerom gustoća prizemne (H) i ekstraterestričke (H_0) dozačene energije na horizontalnu plohu. Koeficijenti u izrazu (13), prilagođeni prilikama na našem području, iznose $a = 1,02$ i $b = 1,121$. Kad se računaju trenutne, odnosno satne vrijednosti, korelacije su nešto drugačije.

Vrijednosti H_0 za Split prikazane su na sl. 11. To se zračenje mijenja u toku godine, pa kad se određuju mjesečne vrijednosti, dovoljno je točno ako se računa sa zračenjem u 15. danu promatranog mjeseca. Kad se, međutim, određuje dnevna gustoća dozačene energije, potrebno je uzeti u obzir dnevne promjene gustoće ekstraterestričke dozačene snage.

Gustoća će izravno dozačene energije biti jednaka razlici između gustoća ukupne i raspršene dozačene energije, pa je

$$H_1 = H - H_R. \quad (14)$$

Sve to, dakako, vrijedi za zračenje na horizontalnu plohu, ali to su također polazni podaci i za određivanje dozačene



Sl. 11. Dnevna gustoća ekstraterestričke dozačene energije H_0 na horizontalnu plohu iznad Splita u toku godine

energije na plohu koja prati Sunčevo gibanje i na plohu okrenutu prema jugu koja s horizontalnom zatvara oštri kut.

Zračenje na plohu koja prati Sunčevo gibanje. Ako ploha prati Sunčevo gibanje tako da u svakom trenutku Sunčeve zrake padaju na nju okomito, gustoća će izravno dozračene snage na takvu pomičnu plohu iznositi

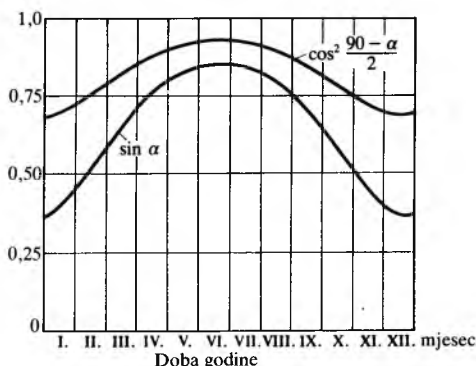
$$E_{IN} = \frac{E_I}{\sin \alpha}, \quad (15)$$

gdje je α visina Sunca određena izrazom (4), a gustoća se raspršene dozračene snage na takvu plohu određuje pomoću izraza

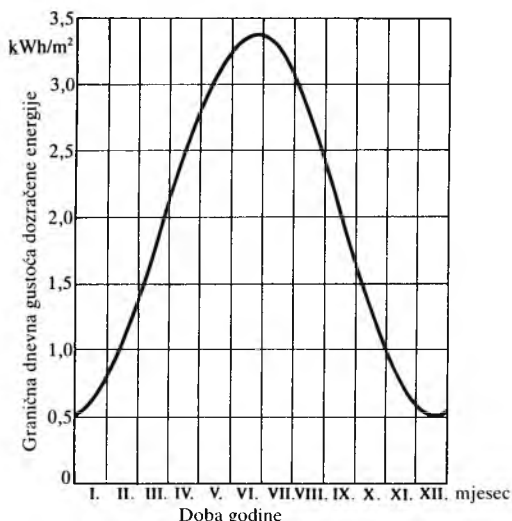
$$E_{RN} = E_R \cos^2 \frac{90^\circ - \alpha}{2}, \quad (16)$$

pa je ukupna gustoća dozračene snage na plohu koja prati Sunčevo gibanje zbroj gustoća dozračenih snaga E_{IN} (15) i E_{RN} (16). Pri tome je zanemareno odbijeno zračenje koje ploha prima od tla i okolnih predmeta.

Upotrebom plohe koja prati Sunčevo gibanje, kao što se vidi prema sl. 12, mnogo se više povećava izravna komponenta zračenja u zimskim nego u ljetnim mjesecima, jer je u zimskim mjesecima Sunce nisko, pa je upadni kut na horizontalnu plohu malen. Upotrebom takve plohe koja prati Sunčevo gibanje u svim se mjesecima smanjuje raspršeno zračenje koje dopire na pomičnu plohu, jer na takvu plohu dopire raspršeno zračenje samo s dijela neba. Taj je dio neba to manji što je ploha okomitija na horizontalu, a ona je to okomitija što je Sunce niže. Zbog toga je i smanjenje raspršenog zračenja najveće u zimskim mjesecima.



Sl. 12. Vrijednosti funkcija kuta α potrebnih za određivanje izravne i raspršene komponente zračenja na plohu koja prati Sunčevo gibanje. Krivulje vrijede za Split



Sl. 13. Granična vrijednost ukupne dnevne gustoće dozračene energije na horizontalnu plohu kad je ta energija jednaka dozračenoj energiji na plohu koja prati Sunčevo gibanje

Zbog svega toga, kad je ukupna dozračena snaga malena, a to je obično kad izravno dozračena snaga ima malu, a raspršena relativno veliku vrijednost, može prevladati smanjenje raspršene nad povećanjem izravne dozračene snage. Prema tome, postoji neka ukupna dozračena snaga, koja se može nazvati graničnom ukupnom dozračenom snagom, uz koju je ukupna dozračena snaga na plohu koja prati gibanje Sunca jednaka ukupnoj dozračenoj snazi na horizontalnu plohu.

Na sl. 13 prikazana je ovisnost graničnoga ukupnog ozračenja o godišnjem doba. Ta granična dozračena energija ima male vrijednosti u zimskim, a velike u ljetnim mjesecima.

Ako je, dakle, stvarno ukupna dozračena energija manja od granične, dozračena će energija na plohu koja prati Sunčevo gibanje biti manja od dozračene energije na horizontalnu plohu. Tako se usmjeravanjem plohe prema Suncu još više smanjuje ionako mala dozračena energija u zimskim mjesecima.

Zračenje na kosu nepomičnu plohu. Ako nema mjernih podataka o zračenju na kosu nepomičnu plohu, potrebno je intenzivnost zračenja izračunati iz podataka aktinometrijskih mjerenja za to područje.

Prema metodi koju su razvili B. Y. H. Liu, R. C. Jordan i S. A. Klein može se iz podataka o Sunčevu zračenju na horizontalnu plohu izračunati srednja dnevna gustoća dozračene energije na kosu nepomičnu plohu.

Ukupna energija Sunčeva zračenja koja dopire do kose plohe E_K sastoji se od tri komponente: od izravnoga Sunčeva zračenja koje upada na plohu, od raspršenoga zračenja dijela neba koji se nalazi iznad plohe i od zračenja odbijenog od tla i okolnih predmeta.

Omjer između gustoća izravno dozračene snage na kosu plohu E_{IK} i na horizontalnu plohu E_{IH} može se prikazati izrazom

$$\frac{E_{IK}}{E_{IH}} = \frac{\cos \delta_K}{\cos \delta_H} = \frac{\cos \delta_K}{\sin \alpha} = R_1, \quad (17)$$

gdje je δ_K kut upada Sunčevih zraka na kosu plohu (između zrake i okomice na plohu), α visina Sunca, δ_H kut upada Sunčevih zraka na horizontalnu plohu. Ako je kosa ploha okrenuta prema jugu, faktor R_1 može se izračunati pomoću izraza

$$R_1 = \frac{\cos \delta_K}{\sin \alpha} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}, \quad (18)$$

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

Nakon integracije i proračuna presjeka dobiva se srednja vrijednost dnevne gustoće izravno dozračene energije na kosu plohu $\bar{H}_{IK}$ koja se može prikazati izrazom

$$\bar{H}_{IK} = \bar{R}_1 \bar{H}_I, \quad (19)$$

gdje je $\bar{R}_1$ omjer između $\bar{H}_{IK}$ i srednje vrijednosti dnevne gustoće izravno dozračene energije na horizontalnu plohu $\bar{H}_I$ u pojedinim mjesecima.

Gustoća raspršene dozračene energije na kosu plohu H_{RK} razlikuje se od one na horizontalnu plohu H_R , jer kosa ploha ne dobiva zračenje iz hemisfere iznad tla nego samo iz jednog njezina dijela. Ako se pretpostavi da je difuzno zračenje neba izotropno, dio toga zračenja koji dopire do kose plohe razmjeran je prostornom kutu pod kojim se nebo vidi s kose plohe, pa je

$$\bar{H}_{RK} = \bar{H}_R \frac{1 + \cos \beta}{2}. \quad (20)$$

Na kosu plohu djeluje i zračenje odbijeno od tla i okolnih predmeta. Ako je ρ refleksijski faktor, gustoća dozračene energije na kosu plohu od reflektiranog zračenja iznosi

$$\bar{H}_{OK} = \rho \bar{H} \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (21)$$

gdje je $\bar{H}$ ukupna gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu, koja je jednaka zbroju izravne i raspršene dozračene energije. Obično se računa da je $\rho = 0,2$.

Ukupna gustoća dozračene energije na kosu plohu jednaka je zbroju zračenja određenih izrazima (19), (20) i (21). Ako se u (19) uvrsti $\bar{H}_1 = \bar{H} - \bar{H}_R$, ukupno se zračenje na kosu plohu može odrediti iz izraza

$$\bar{H}_K = \bar{H} \left[\left(1 - \frac{\bar{H}_R}{\bar{H}} \right) \bar{R}_1 + \frac{\bar{H}_R}{\bar{H}} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] = \bar{H} \bar{R}. \quad (22)$$

Tabl. 6 sadrži podatke za gustoću dozračene energije na kosu plohu u Splitu i Zagrebu. Kutovi nagiba kosih ploha jednaki su zemljopisnim širinama. Takvi se nagibi izabiru kad se želi iskoristavati sunčano zračenje u toku cijele godine.

Tablica 6
DNEVNA GUSTOĆA DOZRAČENE ENERGIJE NA
KOSU PLOHU POD KUTOM $\beta = \varphi$

Mjesec	Gustoća dozračene energije H_K , kWh/m ²	
	Split	Zagreb
I.	3,2	1,6
II.	4,0	2,4
III.	4,8	3,4
IV.	5,3	4,3
V.	5,9	4,6
VI.	6,1	4,8
VII.	6,1	5,0
VIII.	6,1	4,9
IX.	5,7	4,4
X.	5,2	2,9
XI.	3,6	1,6
XII.	3,0	1,4

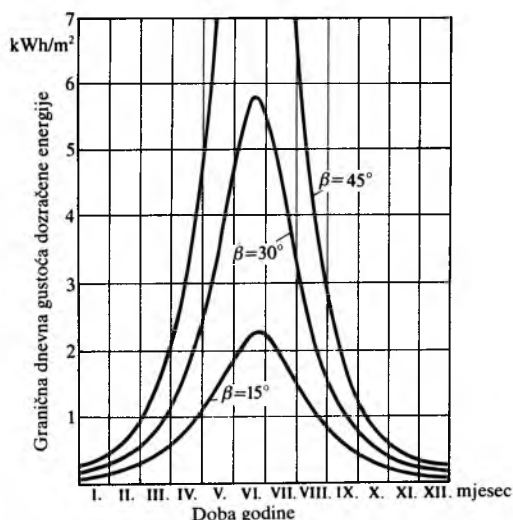
I kad se upotrebljava kosa nepomična ploha, postoji neka granična ukupna dozračena snaga na horizontalnu plohu H_G pri kojoj je ta dozračena snaga jednaka dozračevoj snazi na kosu nepomičnu plohu. Kad je ukupna dozračena snaga na horizontalnu plohu manja od granične, ukupna će dozračena snaga na nagnutu plohu biti manja od one na horizontalnu plohu.

Da bi se odredila prosječna granična vrijednost gustoće ukupne dozračene energije, postavlja se da je $R = 1$, pa se pomoću izraza (13) i (22) dobiva granična energija

$$\bar{H} = H_0 \frac{1 + (a - 1) \bar{R}_1 - 0,5a(1 + \cos \beta) - 0,5\rho(1 - \cos \beta)}{b[0,5(1 + \cos \beta) - \bar{R}_1]} \quad (23)$$

Na sl. 14 prikazane su granične vrijednosti ukupno dozračene energije za kutove nagiba kose plohe od 15°, 30° i 45°. Vidi se da granične vrijednosti u ljetnim mjesecima naglo rastu s povećanjem kuta nagiba, pa je u oblačnim danima praktički cijele godine dozračena energija na kosu plohu manja nego na horizontalnu, i to je manja što ploha zatvara veći kut s horizontalom.

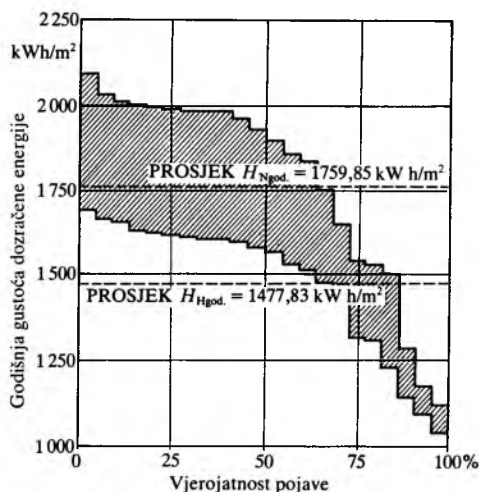
Primjer karakteristika zračenja. Za ilustraciju karakteristika zračenja poslužili su podaci o ukupnoj dozračevoj



Sl. 14. Granična vrijednost ukupne dnevne gustoće dozračene energije na horizontalnu plohu kad je ta energija jednaka dozračevoj energiji na kosu plohu pod kutom β

sunčanoj energiji registrirani u meteorološkoj stanici na Marjanu u Splitu, dakle na području gdje je, u usporedbi s većinom drugih područja, trajanje insolacije vrlo povoljno (tabl. 7).

Na sl. 15 prikazane su, za razdoblje od 1958. do 1979. godine, godišnje gustoće dozračene energije na plohu koja prati Sunčevo gibanje (gornja krivulja) i na horizontalnu plohu (donja krivulja). Maksimalna godišnja gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu u najpovoljnijoj godini iznosila je 1690,27 kWh/m², odnosno 114,4% od prosjeka, a



Sl. 15. Godišnja gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu (donja krivulja) i na plohu koja prati Sunčevo gibanje (gornja krivulja) na Marjanu u Splitu od 1958. do 1979. godine

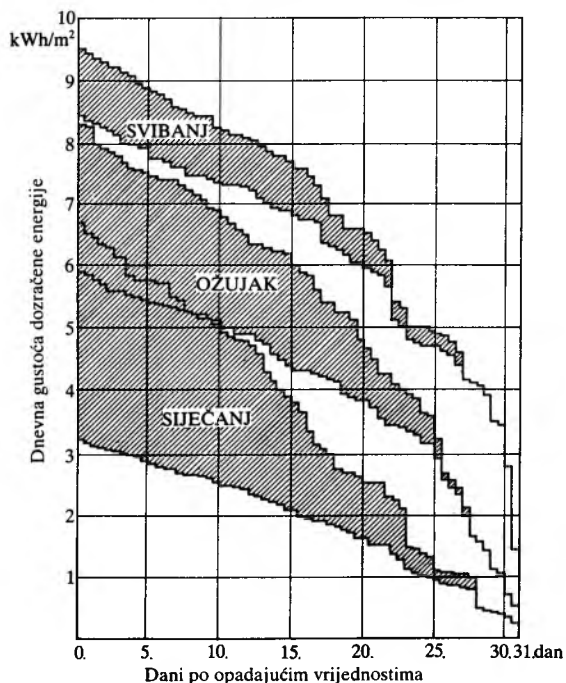
Tablica 7
STVARNO TRAJANJE INSOLACIJE (1950–1971)

Mjesto	Nadmorska visina m	Dnevno trajanje insolacije po mjesecima, sati/dan												Ukupno trajanje insolacije, sati		
		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	zimsko (X...III)	ljetno (IV...IX)	godišnje
Hvar	20	4,1	5,0	6,2	7,9	9,3	10,8	12,0	11,0	8,7	6,7	4,1	3,3	892	1821	2713
Split	22	4,0	4,8	5,8	7,4	8,7	10,3	11,4	10,6	8,3	6,5	4,1	3,2	862	1729	2591
Sarajevo	630	1,7	2,9	4,1	5,4	6,1	7,3	8,5	8,7	6,6	4,7	2,5	1,3	522	1299	1821
Zagreb	157	1,6	2,7	3,9	5,7	6,7	7,7	8,8	8,2	6,4	4,4	2,0	1,2	479	1327	1806
Kredarica	2514	3,7	4,0	4,6	4,7	5,4	5,5	6,6	5,7	5,4	4,8	3,1	3,1	707	1016	1723
Ljubljana	299	1,4	2,6	2,9	5,4	6,6	7,3	8,3	7,3	5,2	3,6	1,5	0,9	422	1223	1645
Bjelašnica	2067	2,6	2,6	3,3	4,0	4,6	5,5	7,5	7,1	6,0	4,8	2,5	2,1	543	1058	1601
Zenica	344	1,3	2,5	3,7	5,0	5,6	6,4	7,8	7,5	5,5	3,5	1,8	0,8	413	1152	1565

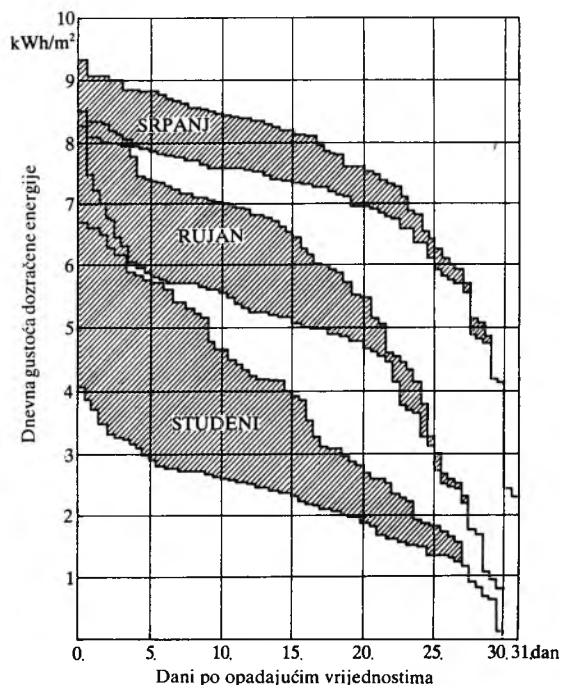
u najnepovoljnijoj godini 1038,83 kWh/m², odnosno 70,3% od prosjeka. Još su veća odstupanja od prosječne godišnje gustoće dozračene energije na plohu koja prati Sunčevo gibanje. Tada je u najpovoljnijoj godini gustoća dozračene energije iznosila 2095,80 kWh/m², odnosno 119,1% od prosjeka, a u najnepovoljnijoj godini 1118,20 kWh/m², odnosno 63,5% od prosjeka. To znači da se upotrebom ploha koje prate Sunčevo gibanje povećava ovisnost dozračene energije o vremenskim prilikama, pogotovo u godinama s mnogo

oblačnih dana, jer je tada udio raspršenog zračenja velik, a samo dio toga zračenja dopire do plohe koja prati Sunčevo gibanje. Iz navedenih se podataka vidi da se dozračena energija na plohu koja prati Sunčevo gibanje mnogo više povećava u godinama s dosta sunčanih dana nego u godinama s dosta oblačnih dana. Tako u najpovoljnijoj godini povećanje dozračene energije iznosi 24,0%, a u najnepovoljnijoj godini samo 7,6%.

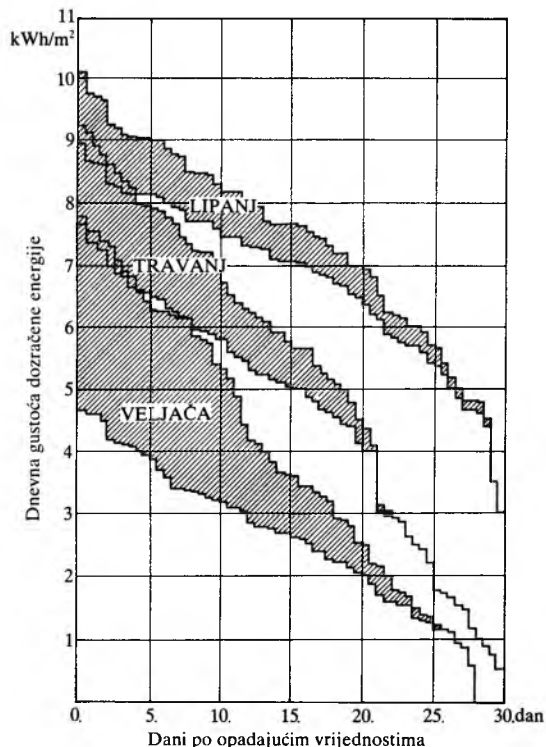
Za prilike u promatranom razdoblju u Splitu prosječna se godišnja dozračena energija upotrebom plohe koja prati Sunčevo gibanje povećavala za 19,1%, a upotrebom kose



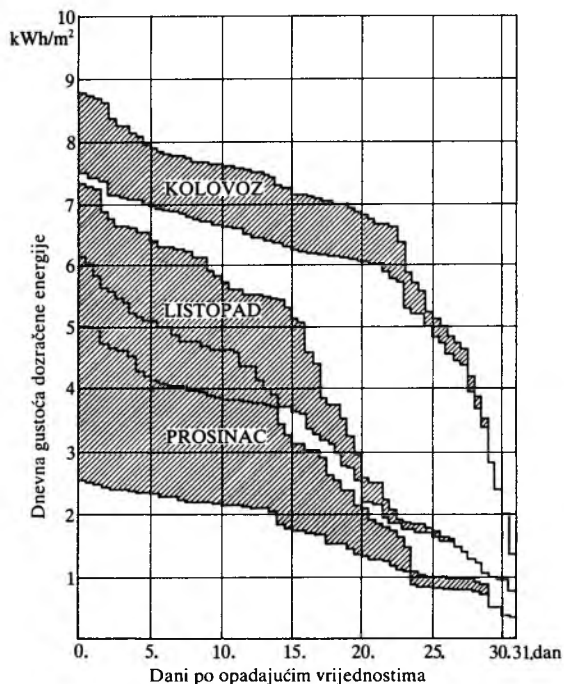
Sl. 16. Dnevna gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu (donja krivulja) i na plohu koja prati Sunčevo gibanje (gornja krivulja) na Marjanu u Splitu u siječnju, ožujku i svibnju 1973. i 1974. godine



Sl. 18. Dnevna gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu (donja krivulja) i na plohu koja prati Sunčevo gibanje (gornja krivulja) na Marjanu u Splitu u srpnju, rujnu i studenom 1973. i 1974. godine



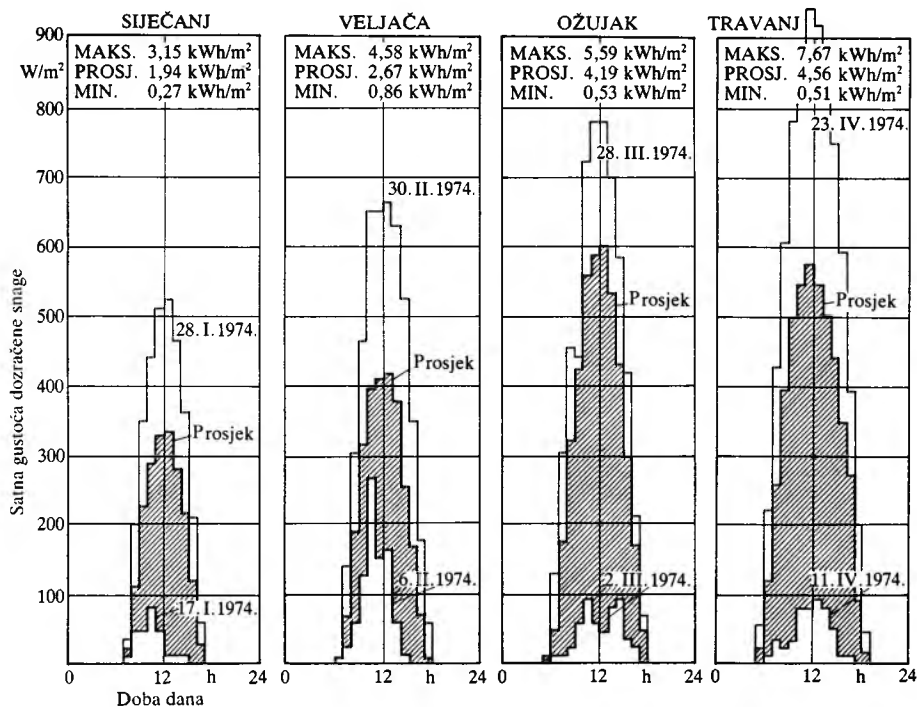
Sl. 17. Dnevna gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu (donja krivulja) i na plohu koja prati Sunčevo gibanje (gornja krivulja) na Marjanu u Splitu u veljači, travnju i lipnju 1973. i 1974. godine



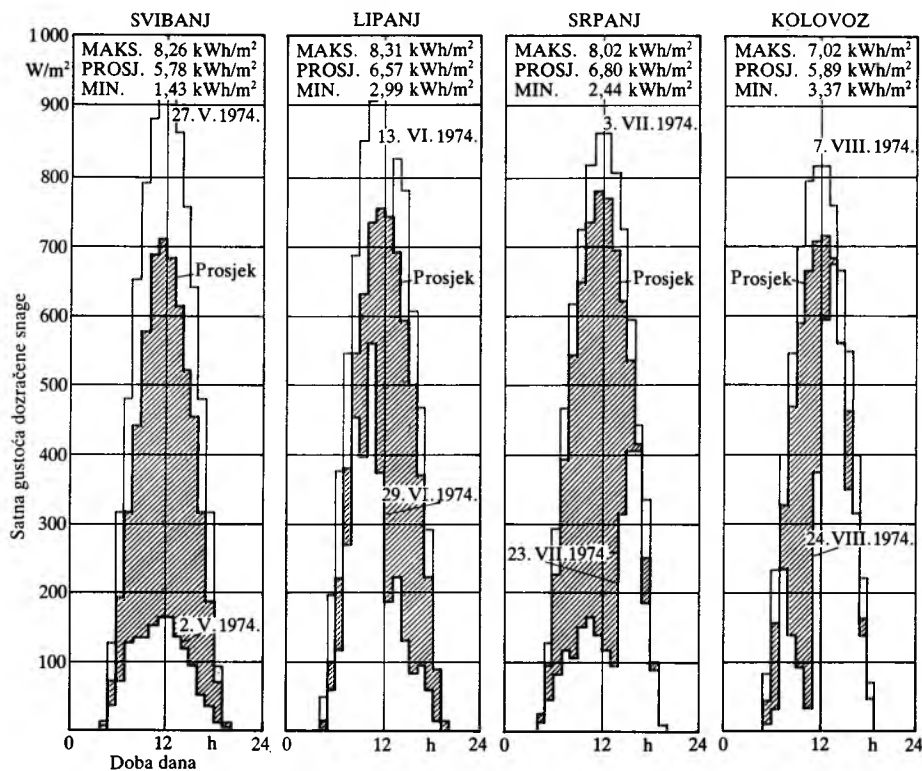
Sl. 19. Dnevna gustoća dozračene energije na horizontalnu plohu (donja krivulja) i na plohu koja prati Sunčevo gibanje (gornja krivulja) na Marjanu u Splitu u kolovožu, listopadu i prosincu 1973. i 1974. godine

nepokretne plohe za 14,7% u usporedbi s dozračenom energijom na horizontalnu plohu. Iz toga se može zaključiti da upotreba plohe koja prati Sunčevo gibanje nema tolikih prednosti kako bi se moglo pomisliti, pogotovo kad se uzmu u obzir troškovi uređaja za usmjeravanje tih ploha. Čini se, zbog toga, da je povoljnije upotrijebiti nepomičnu kosu plohu nego plohu koja prati Sunčevo gibanje, iako se na nepomičnu kosu plohu dozračuje 96,3% od energije što se dozračuje na plohu koja prati Sunčevo gibanje.

Promjene su dnevne dozračenosti energije u Splitu u 1973. i 1974. godini za pojedine mjesece (podaci su za obje godine poredani po opadajućim vrijednostima) prikazane na sl. 16-19. Opaža se da minimalna dozračenost energije može postati vrlo malena i u ljetnim mjesecima. Omjer je minimalne i prosječne dnevne dozračenosti energije obično manji u zimskim nego u ljetnim mjesecima, jer je u zimskim mjesecima mnogo vjerojatnija pojava potpuno oblačnih dana. Nasuprot tome, omjer je maksimalne i prosječne dnevne



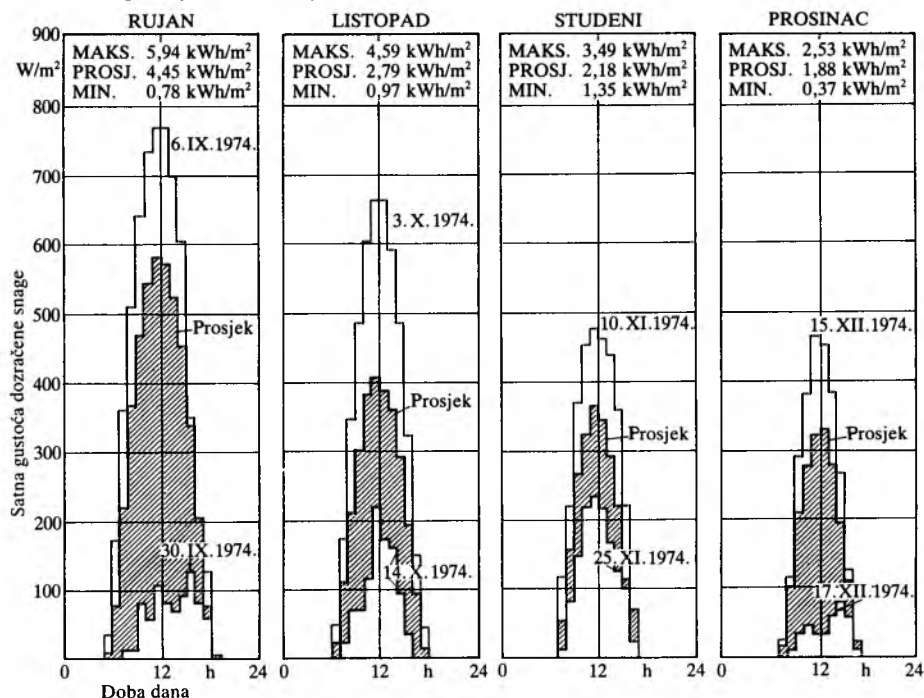
Sl. 20. Srednja satna gustoća dozračenosti na horizontalnu plohu na Marjanu u Splitu u siječnju, veljači, ožujku i travnju 1974. godine; prosječne mjesečne vrijednosti u danu najveće i u danu najmanje dozračenosti energije



Sl. 21. Srednja satna gustoća dozračenosti na horizontalnu plohu na Marjanu u Splitu u svibnju, lipnju, srpnju i kolovozu 1974. godine; prosječne mjesečne vrijednosti u danu najveće i u danu najmanje gustoće dozračenosti energije

dozračene energije u zimskim mjesecima veći nego u ljetnima, jer se zimi rjeđe pojavljuju sunčani dani.

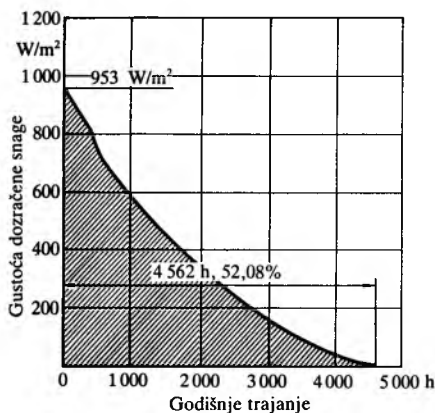
Prema podacima o dnevnim dozračenim energijama vrlo je velik raspon između maksimalne i minimalne dnevne dozračene energije, pa to pokazuje da je neopravdano energetske analize zasnivati na prosječnim dnevnim vrijednostima, čak i kad se zanemare promjene ozračenja u toku dana.



Sl. 22. Srednja satna gustoća dozračene snage na horizontalnu plohu na Marjanu u Splitu u rujnu, listopadu, studenom i prosincu 1974. godine; prosječne mjesečne vrijednosti u danu najveće i u danu najmanje gustoće dozračene energije

Za ilustraciju dnevne promjene intenzivnosti zračenja prikazani su dnevni dijagrami dozračene snage u Splitu za prosječni dan u mjesecu, te za dane s najvećom i najmanjom dozračenom energijom (sl. 20-22). Na dijagramima se vide vrlo velike oscilacije, te dnevno dozračena energija i raspored dozračene snage u toku dana.

Na temelju podataka o prosječnim satnim gustoćama dozračene snage može se odrediti godišnja krivulja trajanja dozračene snage (sl. 23). Ta je krivulja određena na temelju satnih podataka o gustoćama dozračene snage u 1973. i 1974. godini. Maksimalna gustoća dozračene snage iznosi 953 W/m^2 i ona se pojavljuje samo u toku dva sata u godini. Trajanje razdoblja zračenja, pa i najmanje intenzivnosti, iznosi 4562 sata godišnje, odnosno 52,08% od godine. Dozračena snaga koja je jednaka polovici maksimalne, ili je veća od nje, može se ostvariti u toku 1395 sati godišnje, odnosno u toku 15,9% trajanja godine.



Sl. 23. Godišnja krivulja trajanja ozračenja ukupnog zračenja na horizontalnu plohu na Marjanu u Splitu 1973. i 1974. godine

ENERGETSKO ISKORIŠTAVANJE SUNČEVA ZRAČENJA

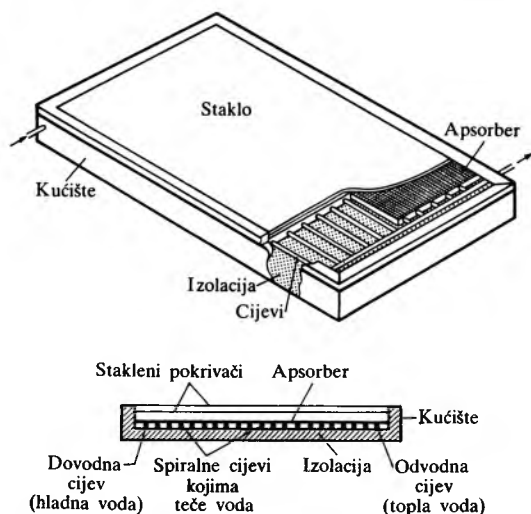
Sunčevo se zračenje može energetske iskoristiti za dobivanje niskotemperaturne i visokotemperaturne topline, te za neposrednu konverziju u električnu energiju. Niskotemperaturna toplota upotrebljava se za pripremu tople vode, za

grijanje prostorija ili za njihovo hlađenje. Pomoću visokotemperaturne topline može se proizvoditi mehanička energija pa zatim i električna energija. Danas najveće značenje ima niskotemperaturno iskorištavanje Sunčeva zračenja.

Niskotemperaturno iskorištavanje Sunčeva zračenja

Ravni kolektor (sl. 24) najjednostavniji je uređaj za pretvaranje Sunčeva zračenja u toplinu. To je najvažniji dio uređaja za grijanje vode i prostorija.

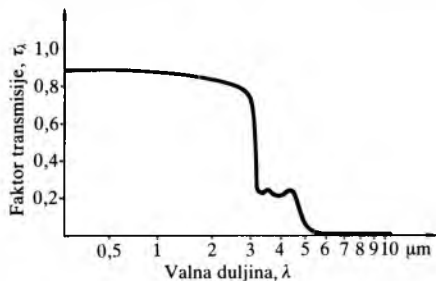
Sunčevo zračenje prodire u kolektor kroz jednu ili dvije prozirne, obično staklene ploče da bi bilo apsorbirano u apsorberu. Apsorber je metalna ploča na koju je nanesen crni sloj tvari velikog faktora apsorpcije za upadno Sunčevo zračenje. Apsorbirana energija zračenja pretvara se u unutra-



Sl. 24. Skica ravnog kolektora

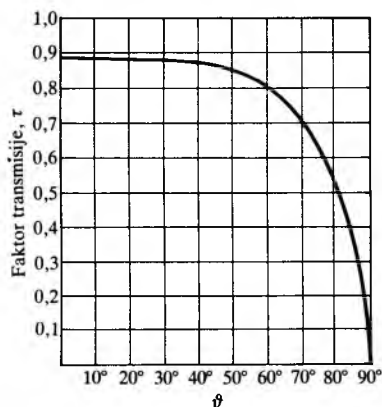
šnju toplinsku energiju, pa se ploča apsorbera zagrije na temperaturu od 50–100 °C. U apsorberu je sustav cijevi kojima protječe radni fluid (najčešće voda) na koji prelazi apsorbirana energija kao toplina. Dio se apsorbirane topline gubi u okoliš. Prozirne ploče (prozor kolektora) i apsorber sa sustavom cijevi nalaze se u metalnom kućištu koje je toplinski izolirano sa stražnje i s bočnih strana da bi se što više smanjili toplinski gubici. Kolektor treba da što bolje apsorbira dozačenu energiju, da ima što manje toplinske gubitke i da što bolje prenosi toplinu iz apsorbera u radni medij.

Staklo je najprikladniji materijal za prozore kolektora, a mogu se upotrijebiti i neki od polimernih materijala. Najčešće se upotrebljava staklo debljine 3–5 mm. Prozirni materijal za prozore kolektora treba da ima što veći transmisijski faktor (τ) za područje Sunčeva spektra (valne duljine 0,3–2 μm), a što manji za toplinsko zračenje koje emitira apsorber (valne duljine veće od 2 μm). Staklo ima upravo takva svojstva; ono je propusno (transmisijski faktor $\tau \approx 0,9$) za gotovo cijeli Sunčev spektar, a praktički nepropusno za infracrveno zračenje (sl. 25). Zbog toga Sunčevo zračenje na putu do apsorbera lako prolazi kroz stakleni prozor, a infracrveno zračenje što ga emitira ugrijani apsorber ne može izaći iz kolektora, nego se apsorbira i reflektira na staklenom prozoru.



Sl. 25. Ovisnost faktora transmisije stakla o valnoj duljini zračenja

Transmisijski je faktor stakla to veći što su manji refleksijski i apsorpcijski faktor stakla. Refleksijski faktor ovisi o indeksu loma i o kutu upada sunčanih zraka. Apsorpcija u staklu ovisi o sastavu stakla (u prvom redu o udjelu željezo-oksida u staklu) i o duljini puta sunčanih zraka kroz staklo. Ovisnost transmisijskog faktora o upadnom kutu zračenja za staklo debljine 4 mm prikazana je na sl. 26.

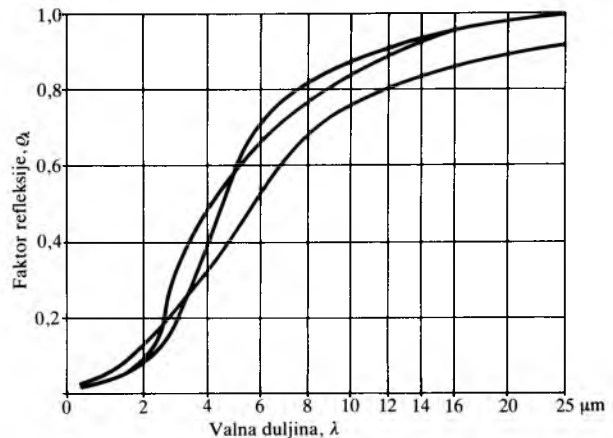


Sl. 26. Ovisnost faktora transmisije stakla o upadnom kutu snopa zračenja

Djelotvornost apsorbera ovisi o sposobnosti da apsorbira zračenje kraćih valnih duljina, koje prevladava u Sunčevu spektru, te o sposobnosti da slabo emitira zračenje duljih valnih duljina (infracrveno zračenje) što ga emitira ugrijani apsorber. Bilo bi, dakle, poželjno imati takve selektivne apsorbere koji bi dobro apsorbirali Sunčevo zračenje, a slabo emitirali infracrveno zračenje. Upotrebom takvih apsorbera smanjili bi se toplinski gubici, povećala temperatura apsorbera i povećala djelotvornost energetske konverzije. Za postizanje

selektivnih svojstava apsorbera osobito su pogodni slojevi crnog kroma ili crnog nikla nanoseni na površinu metalnog apsorbera.

Kad se određuju selektivna svojstva apsorbera, obično se mjeri faktor refleksije u ovisnosti o valnoj duljini (ρ_λ), pa se pomoću relacija $\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$ i $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ određuje apsorpcijski α i emisijski faktor ε . Na sl. 27 prikazana je ovisnost faktora refleksije o valnoj duljini za tri selektivna apsorbera.



Sl. 27. Ovisnost faktora refleksije selektivnog apsorbera o valnoj duljini zračenja za tri selektivna apsorbera

Prijenos topline iz apsorbera na radni medij ovisi o konstrukciji kolektora te o vrsti i brzini strujanja radnog medija. Brzina strujanja kapljavine kroz kolektor iznosi 0,01–0,03 L/s.

Toplinska energija što je ravni kolektor predaje radnom mediju koji njime protječe jednaka je apsorbiranoj energiji zračenja umanjenoj za toplinske gubitke. Toplinska snaga dobivena iz kolektora iznosi

$$\frac{dQ}{dt} = F_R A_C [\tau \alpha E - k(T_u - T_z)], \quad (24)$$

gdje je A_C površina kolektora, τ transmisijski faktor prozora kolektora, α apsorpcijski faktor apsorbera, E gustoća dozačene snage na kolektoru (Wm^{-2}), k koeficijent ukupnih gubitaka ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), T_u temperatura radnog medija, a T_z temperatura okolnog zraka. Faktor prijenosa topline F_R iz apsorbera na radni medij može se izračunati pomoću izraza

$$F_R = \frac{mc}{kA} \left[1 - \exp\left(-\frac{kFA}{mc}\right) \right], \quad (25)$$

gdje je m protok radnog medija (kg/s), c specifični toplinski kapacitet ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), A površina kolektora (m^2), a F geometrijski faktor ovisan o izvedbi kolektora. Faktor F uvijek je manji od jedan. Tipične su vrijednosti toga faktora 0,8–0,9 za kolektor s vodom kao radnim medijem, a ~0,7 za kolektor sa zrakom kao radnim medijem.

Trenutna djelotvornost kolektora definira se omjerom između korisne toplinske snage (24) i dozačene snage zračenja E , pa je

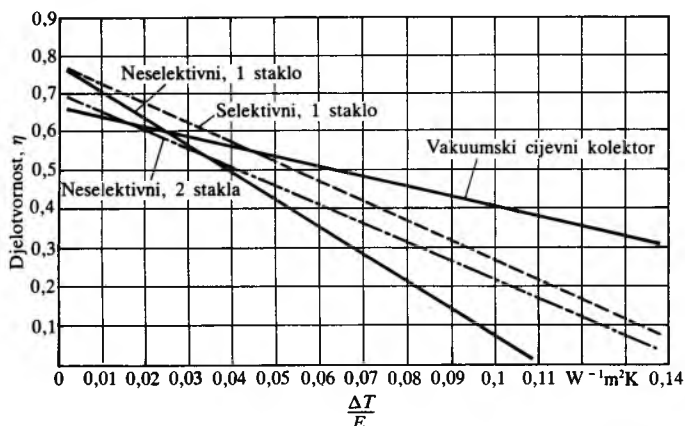
$$\eta = F_R \left(\tau \alpha - k \frac{T_u - T_z}{E} \right). \quad (26)$$

Ako se, međutim, želi izračunati efikasnost kolektora za neko razdoblje (dan, mjesec), upotrebljava se izraz

$$\eta = F_R \left(\tau \alpha - k \frac{T_u - T_z}{H} \right), \quad (27)$$

gdje je H dozačena energija Sunčeva zračenja na plohu kolektora za promatrano razdoblje. U izraz (27) uvrštavaju se srednje vrijednosti veličina za promatrano razdoblje. Prema tome, djelotvornost je kolektora to veća što je veći umnožak transmisijskog i apsorpcijskog faktora, što je manja razlika temperatura T_u i T_z , te što je intenzivnije Sunčevo zračenje. Najjednostavnije je prikazati djelotvornost kolek-

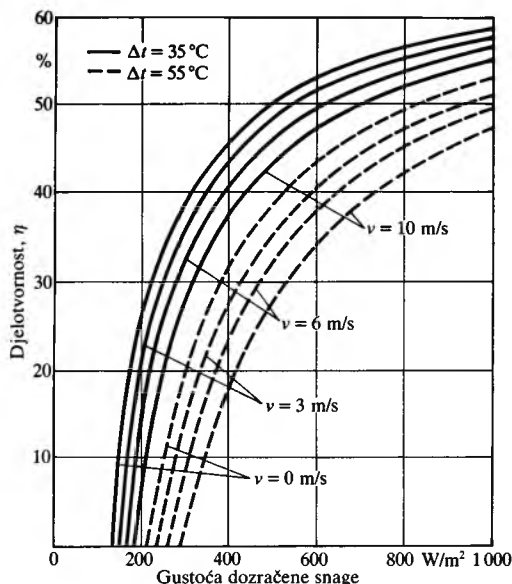
tora omjerom $(T_u - T_z)/E$ (sl. 28), jer se tada može aproksimirati pravcem.



Sl. 28. Tipične krivulje djelotvornosti za različite vrste kolektora

Djelotvornost kolektora ovisi i o brzini vjetrova na mjestu gdje je kolektor postavljen. Za ilustraciju te ovisnosti može poslužiti dijagram na sl. 29.

Ravni se kolektori uglavnom upotrebljavaju u sustavima za grijanje vode u kućanstvu, za grijanje prostorija i za klimatizaciju. Obično se postavljaju na krovove zgrada, okrenuti prema jugu i nagnuti prema horizontali. Kolektori apsorbiraju izravno i raspršeno zračenje. Kut nagiba kolektora prema horizontali treba tako odabrati da kolektor bude najdjelotvorniji kad je energija koju daje kolektor najpotrebnija. Obično se na našim zemljopisnim širinama odabire nagib od 40°–45°. Strmiji je kolektor djelotvorniji zimi nego ljeti, a položitiji je djelotvorniji ljeti.



Sl. 29. Djelotvornost ravnog kolektora s dvostrukim staklom u ovisnosti o gustoći dozačene snage i brzini vjetrova

Solarni se sustavi proračunavaju simulacijom pomoću računala tako da se određuje rad sustava od sata do sata kroz dan, mjesec i godinu. Budući da su takve simulacije skupe i nepraktične, razvijene su jednostavnije metode za takve proračune. One se osnivaju na mjesečnim prosjecima dnevno dozačene energije na plohu kolektora. Pritom se mora uzeti u obzir da kolektor ne daje korisne topline kad je snaga zračenja manja od neke kritične snage. Ta se kritična snaga određuje iz uvjeta da je djelotvornost kolektora, prema izrazu (26), jednaka nuli, pa kritična snaga zračenja iznosi

$$E_K = \frac{k(T_u - T_z)}{\tau\alpha} \quad (28)$$

Energija koju daje solarni sustav ne ovisi samo o prosječnoj dnevnoj dozačenoj energiji, već i o oscilacijama Sunčeva zračenja u toku dana i mjeseca. Te se oscilacije određuju samo za onaj dio zračenja koje ima snagu veću od kritične snage E_K . Ukupna energija dobivena iz kolektora određuje se pomoću izraza

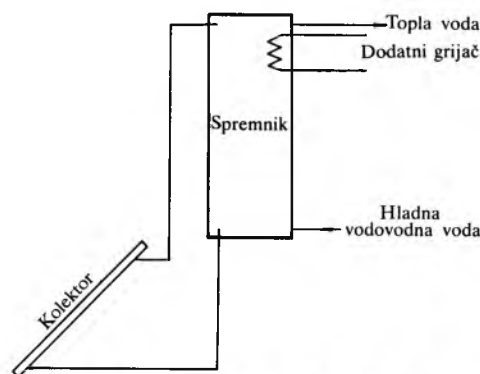
$$Q = A_C F_R \tau \alpha H_K \Phi, \quad (29)$$

gdje je Φ funkcija korisnosti kojom se uzimaju u obzir oscilacije zračenja u toku dana i mjeseca. Ona se određuje na temelju meteoroloških podataka ili pomoću relacija izvedenih simulacijom pomoću računala.

Zagrijavanje vode Sunčevim zračenjem. Priprema tople vode za kućanstva, hotele, kampove i sl. najjednostavniji je i najrašireniji način iskorištavanja Sunčeva zračenja, jer je sustav za takvo iskorištavanje uspješan, jer su ulaganja relativno malena, a topla je voda potrebna u toku cijele godine.

Takvi su se sustavi počeli upotrebljavati prije pedesetak godina, ali se njihova upotreba nije proširila jer su drugi oblici energije (električna energija, prirodni plin, loživo ulje) bili jeftiniji i udobniji. Nakon prvog poskupljenja sirove nafte (1973), a pogotovo nakon drugoga (1979), takvi se uređaji sve više upotrebljavaju, pa ih danas ima mnogo u više zemalja.

Najjednostavniji uređaj za pripremu tople vode energijom Sunčeva zračenja radi na tzv. termosifonskom principu. Ravni je kolektor tada spojen sa spremnikom koji se nalazi iznad njega (sl. 30). Voda se zagrijava prolazeći kroz kolektor i cirkulira zbog razlike gustoće toplije vode na vrhu i hladnije vode na dnu sustava. Zbog toga je voda na vrhu spremnika toplija, pa se odatle odvodi do trošila. Voda se u spremniku može zagrijavati i pomoćnim uređajem za zagrijavanje koji se stavlja u rad kad je intenzivnost zračenja premalena ili kad je potrošak vode veći od trenutnog kapaciteta uređaja za grijanje vode pomoću Sunčeva zračenja.



Sl. 30. Termosifonski sustav za grijanje vode

Prednost je toga sustava jednostavnost i cirkulacija vode bez upotrebe pumpe. Spremnik, međutim, mora biti postavljen iznad kolektora, i to najmanje 20 cm iznad njegova ruba. Protok je kroz kolektor malen (30–40 L/h po kvadratnom metru kolektora), i to, dakako, samo za vrijeme insolacije. Postoji, osim toga, opasnost od smrzavanja, koja se, međutim, može spriječiti upotrebom otopine antifrizu ili ispuštanjem vode iz uređaja kad se očekuju niske temperature. Pri upotrebi antifrizu potreban je poseban izmjenjivač topline, što komplicira izvedbu.

Proizvode se termosifonski sustavi u kompaktnoj izvedbi sa spremnikom postavljenim neposredno iznad kolektora. Oni se jednostavno postavljaju na ravne krovove ili terase. Paralelnim spajanjem više takvih jedinica povećava se kapacitet uređaja.

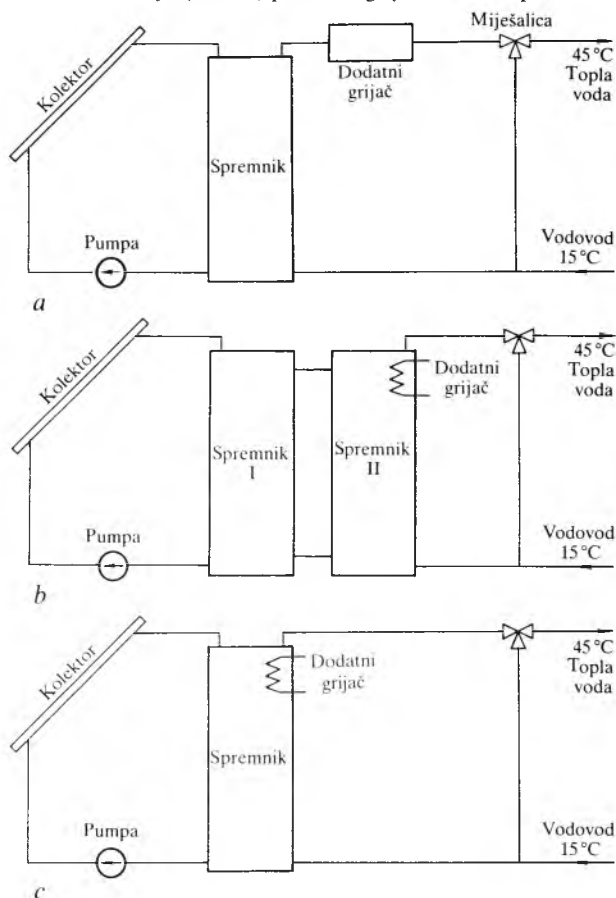
Sve se više, međutim, upotrebljavaju uređaji s pumpom i prisilnom cirkulacijom vode. Tada spremnik ne mora biti iznad kolektora (može biti npr. smješten u podrumu), a protjecanje vode može biti brže.

Postoje dva osnovna tipa takvih uređaja: s izmjenjivačem topline i bez njega. Izmjenjivač topline postavlja se u

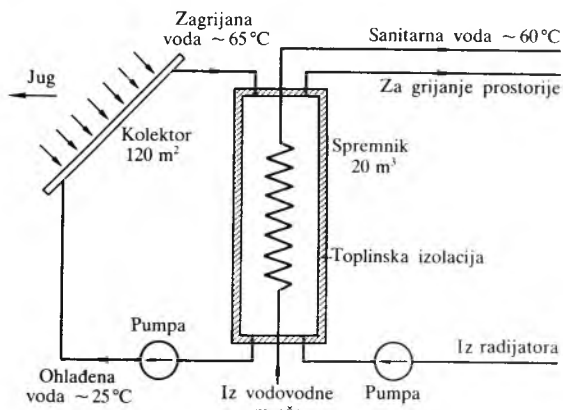
Na sl. 31 vidi se nekoliko uređaja za grijanje vode. U svima se tim sustavima voda dobavlja u kolektor pomoću pumpe s dna spremnika gdje je najniža temperatura vode, jer se tako postiže najveća djelotvornost uređaja. Uređaj na sl. 31a ima protočni pomoćni grijač velike snage, što je nedostatak takva uređaja. Drugi uređaj (sl. 31b) ima spremnik podijeljen na dva dijela, od kojih je drugi konvencionalni električni bojler gdje se voda, ako je potrebno, dogrijava. U trećem se uređaju (sl. 31c) pomoćni grijač nalazi u spremniku.

Ekonomska opravdanost postavljanja uređaja za pripremu tople vode ovisi o intenzivnosti Sunčeva zračenja, o investicijama za ugrađivanje cjelokupnog sustava, uključujući i uređaj za dodatno zagrijavanje vode, te o cijeni konvencionalnih oblika energije koji služe kao pomoćni izvori energije za grijanje vode. Posebno je povoljno postavljanje takvih uređaja u hotelima koji uglavnom rade za vrijeme ljetnog razdoblja, jer se tada veliki potrošak tople vode vremenski poklapa s intenzivnim Sunčevim zračenjem. To vrijedi i za kampove.

Kad se ugrađuje sustav za grijanje prostorija toplom vodom, on se obično kombinira s uređajem za grijanje vode (sl. 32). Za bilo kakav sustav solarnog grijanja prostorija potreban je dodatni grijač koji je tako dimenzioniran kao da nema solarnog uređaja za grijanje, kako bi se osiguralo grijanje i u najhladnijim danima kad obično nema insolacije. Potrošnja konvencionalnih oblika energije može se smanjiti akumuliranjem topline u spremniku, što, međutim, povećava investicije za ugrađivanje takva sustava za grijanje prostorija.



Uređaj za grijanje vode za kućanstvo obično se sastoji od 4...6 m² kolektorske površine i spremnika od 200...400 litara (50...70 litara po kvadratnom metru kolektora). Potrebna je temperatura vode između 45 i 60 °C. Obično se računa s dnevnim potroškom tople vode od 50...60 litara po osobi, odnosno od 250...300 litara po kućanstvu, što odgovara godišnjem potrošku energije od ~4500 kWh. Solarni sustav u sjevernim kontinentalnim dijelovima Jugoslavije mogao bi



Sl. 32. Jednostavni sustav za grijanje prostorija i pripremu tople vode pomoću Sunčeva zračenja za stan površine 140 m²

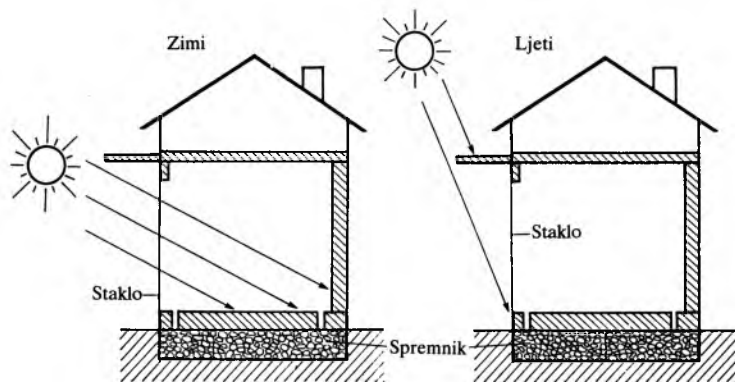
Toplina potrebna za grijanje prostorija ovisi o klimatskim prilikama, termičkoizolacijskim svojstvima zgrade i željenoj temperaturi u grijanim prostorijama (v. *Grijanje*, TE 6, str. 276).

Udio solarnog grijanja u ukupno potrebnoj energiji za grijanje prostorija mnogo je manji nego sustava za grijanje vode, jer je grijanje prostorija najviše potrebno u razdobljima kad je intenzivnost Sunčeva zračenja malena.

Može se zbog toga zaključiti da upotreba solarnog grijanja nema nade za širu primjenu.

Pasivni solarni sustavi. Prostorije se mogu zagrijavati i pasivnim solarnim sustavom. U pasivnim se sustavima iskorišćuju dijelovi zgrade za akumuliranje topline od Sunčeva zračenja, pa nema posebnih kolektora, a toplina se prenosi konvekcijom, vođenjem ili zračenjem. Katkada se mogu upotrijebiti i ventilatori da bi cirkulacija zraka bila brža i

bolja, ali je njihova funkcija nešto drukčija nego u aktivnim sustavima gdje je prisilna cirkulacija prijeko potrebna. U pasivnim sustavima solarnog grijanja elementi su zgrade dijelovi tog sustava. Kolektori su dijelovi zgrade, a oni mogu poslužiti i kao spremnici. Mana je pasivnog solarnog grijanja prostorija da se često ne mogu primijeniti na već sagrađene zgrade, jer njihov položaj, konstrukcija i orijentacija ne odgovaraju zahtjevima pasivnog načina grijanja.

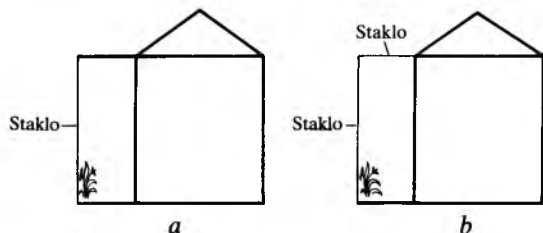


Sl. 33. Izravno pasivno zagrijavanje prostorija Sunčevim zračenjem

Jedan od najjednostavnijih načina pasivnog grijanja prostorija prikazan je na sl. 33. Sunčevo zračenje upada kroz velik stakleni prozor ili stakleni zid i izravno zagrijava prostoriju. Toplina se, osim toga, akumulira u zidovima i podu ili u posebnom spremniku sa šljunkom. Oni se zagrijevaju danju, a odaju toplinu noću. Nadstrešnica sprečava da Sunčevo zračenje prodire u prostoriju za ljetnih mjeseci kad je Sunce visoko. Teško je, međutim, spriječiti pregrijavanje prostorije danju i gubitke topline noću ili danju kad nema insolacije.

Ostakljeni južni zid zgrade i crno obojeni zid iza stakla (sl. 34) istodobno su kolektor i spremnik topline. Sunčevo zračenje prodire kroz staklo i apsorbira se u crno obojenom zidu. Između poda i toga zida, te između stropa i zida nalaze se otvori za cirkulaciju zraka. Hladni zrak iz prostorije ulazi u donji otvor i prolazi između zida i stakla te se grije i podiže zbog povišenja temperature, pa kao topli zrak struji kroz gornji otvor u prostoriju. Noću je potrebno prekriti staklo da bi se smanjili gubici topline. Takav se zid može ugraditi i u već izgrađene zgrade ako imaju masivan zid na južnoj strani.

Veliki ostakljeni i pokriveni balkoni okrenuti prema jugu, odnosno ostakljene verande ispred kuće s običnim ili ostakljenim krovom (sl. 35) mogu zimi djelotvorno skupljati energiju Sunčeva zračenja. Vrući zrak iz ostakljenog prostora dovodi se u zgradu ili spremnik topline. Ljeti se ukloni staklo, a da bi se osigurala cirkulacija zraka i hlađenje, stakleni se krov prekrije da se spriječi zagrijavanje.

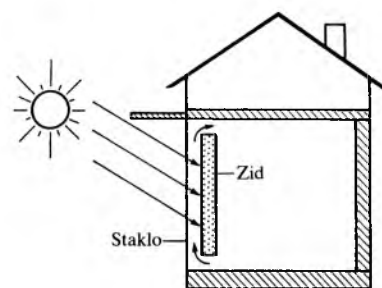


Sl. 35. Staklenik ispred kuće kao element pasivnog sustava. a s običnim krovom, b sa staklenim krovom

Energija se može akumulirati i u posebno izrađenom krovu (sl. 36). Metalni krov pokriven vrećama od polimernog materijala napunjenim vodom ili krov u obliku plitkog bazena napunjen vodom zagrijava se Sunčevim zračenjem. Akumulirana toplina služi za zagrijavanje zgrade. Noću se krov prekriva izolacijskim pločama da se spriječi gubitak topline.

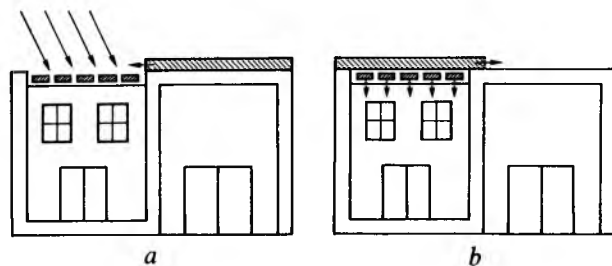
Ljeti takav krov može služiti za rashlađivanje. Tada je zgrada noću otkrivena, a danju pokrivena.

Da bi se što bolje iskoristilo Sunčevo zračenje, potrebno je što više smanjiti toplinske gubitke. Koeficijent toplinskih gubitaka zidova i krova ne bi trebao biti veći od $0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, prozori bi trebali biti s dvostrukim, a sa sjeverne strane i s trostrukim staklima. Pri projektiranju kuće s pasivnim solarnim grijanjem valja pažljivo odrediti položaj zgrade, njezinu orijentaciju, položaj i veličinu prozora,



Sl. 34. Pasivni sustav sa zidom kao akumulatorom topline

položaj i boju zidova i sl. Pasivni sustavi imaju niz prednosti: minimalni su troškovi održavanja, jednostavno je upravljanje, relativno su niski investicijski troškovi i dug vijek trajanja. Mana je u tome da se može samo vrlo ograničeno primijeniti na zgrade u gradovima gdje je položaj zgrada zadan urbanističkim planovima.



Sl. 36. Krov kao solarni kolektor u pasivnom sustavu. a danju, b noću

Solarno hlađenje. Energija Sunčeva zračenja može se iskoristiti u apsorpcijskim uređajima za hlađenje, za koje je potrebna toplina koja se može dobiti upotrebom kolektora. Da bi se, međutim, upotrijebio kompresijski uređaj za hlađenje, potrebno je energiju Sunčeva zračenja transformirati u električnu energiju za pogon kompresora (v. *Rashladna tehnika*, TE 11, str. 430).

Upotreba Sunčeva zračenja za hlađenje može postati vrlo zanimljiva, jer je hlađenje najviše potrebno onda kad je intenzivnost Sunčeva zračenja najveća, pa postoji sinkronost između potreba i mogućnosti. Takva sinkronost, međutim, ne postoji kad se Sunčevim zračenjem žele zagrijavati prostorije.

Upotreba je solarnih uređaja za hlađenje ipak još znatno ograničena, jer su oni dva do tri puta skuplji od konvencionalnih rashladnih uređaja.

Uskladištenje energije. Zbog promjenljive intenzivnosti Sunčeva zračenja (oblačnost, dan-noć, godišnje doba) iskorištavanje toga zračenja u većem opsegu ovisi o mogućnosti uskladištenja energije. Kad se upotrebljavaju niskotemperaturni solarni uređaji, uvijek se radi o uskladištenju topline. Toplinska se energija može uskladištiti u toplinski izoliranim spremnicima zagrijavanjem čvrstih materijala ili kapljevina, tj. povećavanjem njihove unutrašnje toplinske energije, i taljenjem čvrstih materijala, tj. iskorištavanjem topline taljenja za uskladištenje topline.

Pri izboru materijala u kojem se zagrijavanjem akumulira toplina treba uzeti u obzir njegovu gustoću i specifični

toplinski kapacitet. Umnožak tih dviju veličina daje podatak o mogućnosti akumuliranja energije uz povišenje temperature za 1°C . Mogućnost akumuliranja iznosi za vodu 4,19, za usitnjeni kamen 1,8, a za usitnjeni beton $2,26 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$.

Najčešće se kao materijal za akumulaciju topline upotrebljava voda. Temperatura vode u spremniku može biti svuda jednaka ako su brzine protoka vode velike. Ako su brzine malene, slojevi su vode pri vrhu spremnika najtopliji, a oni pri dnu najhladniji. Topla voda iz kolektora dolazi na vrh spremnika, a hladna voda s dna odlazi u kolektor, pa se tako postiže povoljna uspješnost kolektora. Slojevi vode se ne miješaju, ali se topli sloj sa zagrijavanjem sve više spušta prema dnu, pa se tako postupno cijeli spremnik puni sve toplijom vodom. Za potrošače topla se voda uzima s vrha spremnika, a istodobno na dno pritječe hladna voda iz vodovodne mreže. Obični električni bojler takav je slojeviti spremnik tople vode.

Komercijalni sustavi za pripremu tople vode za kućanstvo obično imaju obujam spremnika za vodu od 300–400 litara za kolektor površine $4\text{--}6 \text{ m}^2$.

Od čvrstih materijala najčešće se u spremnicima upotrebljavaju usitnjeni kamen ili riječni šljunak. Kamenje (šljunak) mora biti približno jednako veliko (srednji promjer $2\text{--}5 \text{ cm}$), bez sitnih čestica, da bi zrak mogao lagano strujati kroz spremnik. Premalo kamenje ili pijesak trebaju veću snagu ventilatora, a preveliko usporava izmjenu topline. Pad tlaka zraka pri strujanju kroz spremnik treba da iznosi $\sim 50 \text{ Pa}$, a brzine strujanja zraka $\sim 0,1 \text{ m/s}$.

Topli zrak iz kolektora ulazi pri vrhu spremnika, struji oko kamenja, predaje im toplinu, hladi se i izlazi na dnu te odlazi u kolektor. Pojedini slojevi imaju različite temperature, pri vrhu su najviše, a na dnu najniže. Budući da se s temperaturnim gradijentom u spremniku povećava djelotvornost kolektora, potrebno je osigurati tu razliku temperatura, pa visina spremnika mora biti veća od 1 m, najbolje između 1,5 i 2 m. Da bi se omogućila akumulacija topline taljenjem čvrstih tvari, potrebno je upotrijebiti materijal koji se tali na niskoj temperaturi, što odgovara temperaturi koja se može ostvariti u kolektoru. U te svrhe upotrebljava se Glauberova sol ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kojoj je talište 32°C , ili parafin, kojemu je talište 40°C . Takvi spremnici rade u temperaturnom intervalu oko temperature tališta. S takvom akumulacijom topline potrebni su mnogo manji volumeni spremnika. Tako se, npr., u spremnik jednaka volumena s Glauberovom soli može uskladištiti 4–6 puta više topline nego u spremnik s vodom. Takva je akumulacija ipak skuplja od akumulacije koja se ostvaruje zagrijavanjem vode.

Visokotemperaturno iskorištavanje Sunčeva zračenja

Pomoću ravnih kolektora ne mogu se postići više temperature od 100°C . Više temperature pri iskorištavanju Sunčeva zračenja mogu se ostvariti koncentracijom zračenja na manju površinu. To se postiže cilindričnim zrcalima (koncentracija zračenja u pravac) i paraboličnim zrcalima (koncentracija zračenja u točku). Za razliku od ravnih kolektora koji mogu iskoristiti i izravno i raspršeno zračenje, kolektori kojima se zračenje koncentrirano mogu iskoristivati samo izravno zračenje. Zbog toga koncentracijski kolektori moraju imati uređaj za praćenje Sunčeva gibanja.

Stupanj koncentracije definira se omjerom ozračenja na mjestu koncentracije i prirodnog ozračenja. S povećanjem koncentracije raste i temperatura na mjestu koncentracije. Ako je prirodno ozračenje $800 \text{ W}/\text{m}^2$, te ako stupanj koncentracije iznosi 10, zračenjem na potpuno crno tijelo postiže se temperatura od 340°C . Ta je temperatura 817°C za stupanj koncentracije 100, 1665°C za stupanj koncentracije 1000, a 3260°C za stupanj koncentracije 10000. Dakako, temperatura se smanjuje sa smanjenjem prirodnog ozračenja.

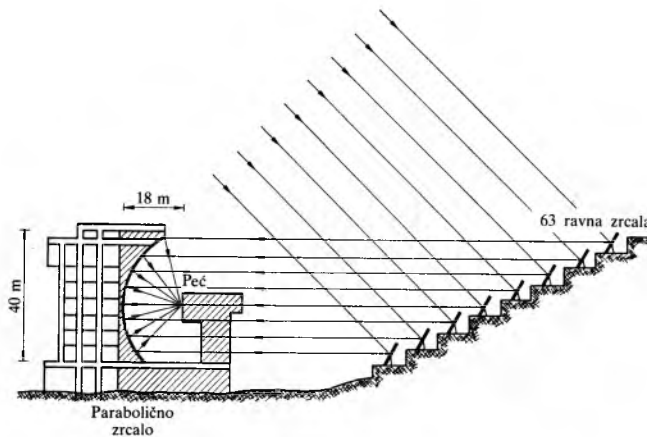
Najjednostavnija je primjena koncentriranog Sunčeva zračenja u tzv. sunčanu kuhalo. Tada se Sunčevo zračenje paraboličnim zrcalom koncentrirano na posudu za kuhanje. Dakako, takvo se kuhalo može upotrijebiti samo za sunčanih dana i na otvorenom. Nakon drugoga svjetskog rata pokušala

se u Indiji proširiti upotreba kuhala s aluminijskim zrcalom širine 1 m, da bi se smanjila upotreba životinjskih izmetina kao energetskog goriva i omogućila njihova upotreba za gnojdbu zemljišta. To se, međutim, nije ostvarilo, jer je cijena takva kuhala ($10\text{--}15$ dolara 1975. godine) bila previsoka za siromašno stanovništvo u indijskim selima.

Između 1880. i 1920. izgrađeno je više postrojenja za proizvodnju vodene pare pomoću koncentriranog Sunčeva zračenja. Najveće među njima bilo je u Meadi (Egipat) snage 45 kW .

Između dva svjetska rata koncentracijom zračenja ostvarene su temperature do 4000°C . Pokazalo se da su takva postrojenja pogodna za proizvodnju metala vrlo velike čistoće. U metalurgiji se, naime, upotrebljavaju električne lučne peći (v. *Metalurgija*, TE 8, str. 433) u kojima se električna struja dovodi elektrodama koje postepeno izgaraju. Te elektrode dovode u peć nečistoće koje negativno utječu na sastav proizvedenog metala. U sunčanim pećima nisu potrebne elektrode, pa nema ni njihova negativnog utjecaja na sastav proizvoda. U takvim se pećima mogu proizvoditi i vrlo čisti kemijski spojevi, monokristali i poluvodiči. U spomenutom razdoblju izgrađeno je najveće takvo postrojenje u Pirinejima (Fort Mont-Louis, Francuska) sa zrcalima površine 90 i 120 m^2 , od kojih veće slijedi gibanje Sunca i reflektirane zrake usmjeruje na manje zrcalo koje ih koncentrirano u metaluršku peć gdje se postiže temperatura od $\sim 3000^{\circ}\text{C}$ i snaga od $\sim 100 \text{ kW}$.

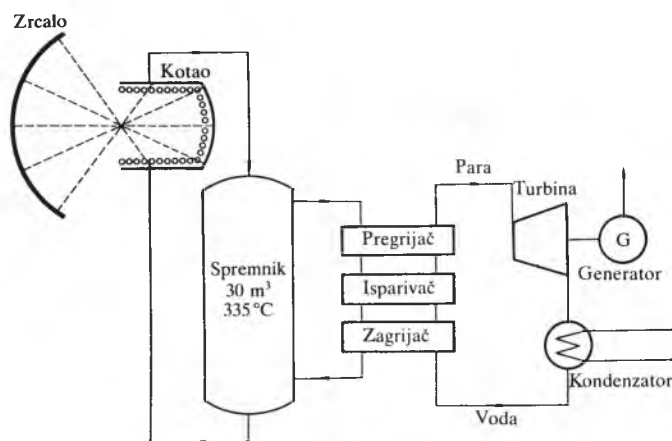
Nakon drugoga svjetskog rata izgrađeno je više takvih metalurških peći, najviše u SAD i SSSR, gdje su bile potrebne za proizvodnju čistih metala potrebnih za svemirske letjelice. Metalurška peć Odeillo u Francuskoj jedna je od najvećih takvih peći (sl. 37). Ta je peć izgrađena 1970. godine, a ima snagu 1000 kW . Sunčevo zračenje pada na 63 ravna zrcala površine po 45 m^2 (ukupna površina $\sim 2800 \text{ m}^2$). Tim se zrcalima prati Sunčevo gibanje kako bi reflektirano zračenje palo na parabolično zrcalo površine 2000 m^2 , koje ga koncentrirano u metaluršku peć. U žarištu se postiže ozračenje od $16000 \text{ kW}/\text{m}^2$.



Sl. 37. Shema sunčane peći Odeillo (Francuska)

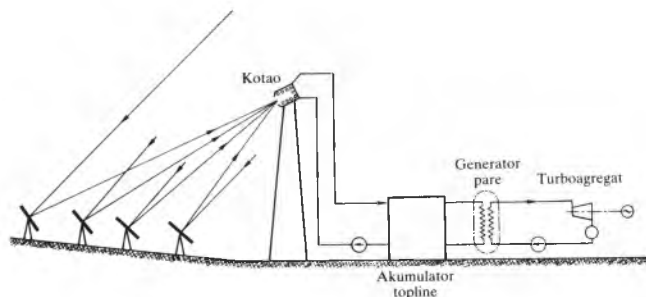
U svijetu je izgrađeno ili se gradi više solarnih elektrana s koncentracijom Sunčeva zračenja. To su sve eksperimentalna postrojenja.

U Francuskoj je stavljena u pogon 19. studenoga 1976. godine priključkom na mrežu elektroenergetskog sustava prva eksperimentalna solarna elektrana Odeillo (sl. 38). Ona iskorišćuje koncentrirano Sunčevo zračenje u spomenutoj metalurškoj peći. Za odvođenje topline iz sunčane peći služi terfenil (organska kapljevina) koji se prolazom kroz cijevi ugrije na temperaturu od 335°C . Terfenil na toj temperaturi ostaje u kapljevito stanju, jer isparuje pri tlaku od $0,1 \text{ MPa}$ i temperaturi od 360°C . Tako se postiže dovoljno visoka temperatura uz niski tlak. Zagrijani terfenil odvodi se u spremnik koji služi kao akumulator topline, a odatle u pregrijač, isparivač i zagrijač kroz koje struji voda koja se tamo zagrijava, isparuje i pregrijava. Proizvedenom vodenom



Sl. 38. Shema solarne elektrane Odeillo

parom pokreće se parna turbina koja je neposredno spojena s električnim generatorom. Snaga je elektrane 64 kW. U spremniku se može akumulirati toplina za proizvodnju električne energije od 2000 kWh. Ta eksperimentalna elektrana trebala je poslužiti za proučavanje ponašanja takva postrojenja u različitim vremenskim prilikama, te kao osnova za gradnju solarne elektrane s tornjem (sl. 39) u kojem je smješten sustav cijevi za isparivanje vode, koja je u to doba projektirana. Predviđeno je da se postavi 500 ravnih zrcala ukupne površine 20000 m² smještenih na površini od 6 ha sjeverno od tornja visoka 100 m. Snaga zračenja koja dopire do zrcala u ljetno podne iznosi ~17 MW (~850 W/m²). Zrcala su pomična i slijede Sunčevo gibanje tako da zrake reflektirane od svih zrcala padaju u otvor peći na tornju. Predviđa se da je potrebno postići točnost od $\pm 0,23^\circ$ položaja zrcala da bi se ostvarila potrebna koncentracija zračenja u peći s otvorom od ~50 m². U cijevima peći isparuje se voda i dobiva zasićena para tlaka 18 MPa i temperature 357 °C. Prolazeći kroz sustav cijevi u spremniku para zagrijava smjesu kalij-nitrata i natrij-nitrata koja služi kao akumulator topline. Rastaljena smjesa nitrata predaje toplinu vodi i pari u generatoru pare, koji je zapravo parni kotao za proizvodnju pare za pogon parne turbine. Električni generator može dati snagu od 3,1 MW u ljetno podne, pa stupanj djelovanja u tom trenutku iznosi ~18%, što znači da se toliki postotak dozačene energije pretvara u električnu energiju. Stupanj djelovanja još je niži kad se promatra cijela godina, jer uz manju snagu zračenja postrojenje radi s lošijim stupnjem djelovanja.



Sl. 39. Shema solarne elektrane s tornjem

U SAD je izgrađena solarne elektrane snage ~1 MW u Novom Meksiku i elektrane snage ~10 MW u Kaliforniji. Projektirana je solarne elektrane snage 100 MW. Ta bi elektrana imala 12500 zrcala, svako površine od 40 m² i ukupne površine od 500000 m², od kojih bi se zrake reflektirale i koncentrirale u tornju visokom 250 m. Razmatrane su dvije mogućnosti osiguranja ravnomjernijeg iskorištavanja postrojenja: hibridni pogon elektrane s uređajem za proizvodnju pare izgaranjem goriva (konvencionalni parni kotao) ili akumulator topline s rastaljenim solima ili organskim kapljevinama.

Solarne elektrana u Aldranu (Sicilija) ima toplinsku snagu od 4,8 MW, a električnu snagu od 1 MW. Sastoji se od 182 zrcala i prijamnika zračenja na vrhu tornja visokog 55 m.

Procjenjuje se da su investicije za istu snagu solarne elektrane s tornjem i koncentracijom zračenja tri do četiri puta veće nego konvencionalnih termoelektrana. Prilikom usporedbe, međutim, ne smije se zaboraviti da je za pogon termoelektrane potrebno gorivo, ali da je iskorištenje solarne elektrane mnogo manje od iskorištenja konvencionalne termoelektrane. Iskorištenje solarne elektrane, naime, ovisi o intenzivnosti zračenja i iznosi manje od 20%, dok iskorištenje konvencionalne elektrane ovisi o potrebama, pa može iznositi i više od 80%. To znači da se u konvencionalnoj termoelektrani može proizvesti četiri puta više električne energije nego u solarnoj elektrani jednake snage. Ako se računa da gorivo iznosi polovicu ukupnih troškova u konvencionalnoj termoelektrani, troškovi za proizvodnju 1 kWh u solarnoj elektrani bit će šest do osam puta veći nego u konvencionalnoj termoelektrani.

Neposredna konverzija u električnu energiju

Energija Sunčeva zračenja može se neposredno transformirati u električnu energiju (istosmjerna struja) pomoću solarnih ćelija kojima je osnovni dio tanki sloj posebnog pripremljenog silicija ili kojih drugih poluvodiča (v. *Poluvodiči*, TE 10, str. 638). Prva je silicijeva solarne ćelija načinjena 1955. u laboratorijima poduzeća Bell (SAD). Takve su ćelije već dugo osnovni dio uređaja za opskrbu električnom energijom svemirskih letjelica (v. *Sateliti, umjetni zemljini*). Takva se energetska transformacija naziva fotonaponskom energetskom transformacijom.

Takva energetska transformacija ima velike prednosti u iskorištavanju Sunčeva zračenja: solarne ćelije nemaju pokretnih dijelova, njihovo je održavanje jednostavno, moguće je postupno povećanje snage postrojenja, nije potrebna koncentracija zračenja, iskorišćuje se i izravno i raspršeno zračenje (koncentracijom zračenja iskorišćuje se samo izravno zračenje).

Solarne se ćelije izrađuju od monokristalnog silicija (v. *Poluvodiči*, TE 10, str. 643). Njihova površina ovisi o površini presjeka monokristala od kojeg se proizvode i iznosi 5...10 cm², a debljina im je 0,2...0,3 mm. Elektromotorna sila takve ćelije iznosi 0,55...0,70 V, a uspješnost transformacije 10...14%, dok je teorijska uspješnost 21%.

Kad je solarne ćelija spojena s vanjskim otpornikom i osvijetljena, ona će proizvoditi fotostruju I_s , a kroz vanjski će otpornik teći struja I koja je jednaka razlici normalne struje diode I_d i fotostruje I_s , pa je

$$I = I_d - I_s = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) - I_s, \quad (30)$$

gdje je I_0 struja zasićenja (zaporna struja) koja ovisi o vrsti PN-spoja, e elementarni naboj, U napon na stezaljkama, k Boltzmannova konstanta, a T termodinamička temperatura. Osvijetljena solarne ćelija izvor je istosmjerne struje.

Jedan je od najvažnijih parametara solarne ćelije njezina elektromotorna sila, koja je jednaka naponu na stezaljkama kad je strujni krug otvoren, tj. kad je $I = 0$. Tada je napon na stezaljkama određen izrazom

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_s}{I_0} + 1 \right). \quad (31)$$

Elektromotorna sila solarne ćelije ovisi o fotostruji I_s , koja raste s povećanjem gustoće dozačene snage, i o zapornoj struji diode I_0 , koja bi trebala biti što manja. Zaporna struja diode raste s povećanjem temperature, pa će elektromotorna sila solarne ćelije biti to manja što je temperatura viša.

Struja kratkog spoja također je važna karakteristika solarne ćelije. To je jakost struje kad su stezaljke solarne ćelije kratko spojene, odnosno kad je napon na stezaljkama $U = 0$. Uz taj se uvjet iz (30) dobiva da je struja kratkog spoja jednaka fotostruji.

Snaga koju daje solarna ćelija iznosi

$$P = UI = U \left(I_s - I_0 \exp \frac{eU}{kT} + I_0 \right). \quad (32)$$

Maksimalna snaga koju može dati solarna ćelija,

$$P_m = U_m I_m, \quad (33)$$

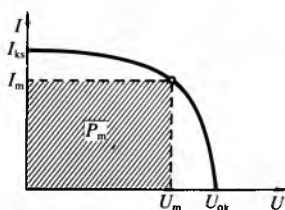
proporcionalna je iscrtkanom pravokutniku ispod krivulje strujno-naponske karakteristike solarne ćelije (sl. 40). Ona se može odrediti kao ekstrem funkcije (32) ili tako da se pokušavanjem odredi pravokutnik maksimalne površine ispod krivulje strujno-naponske karakteristike. Maksimalna se snaga može prikazati i pomoću elektromotorne sile U_{ok} i struje kratkog spoja I_{ks} :

$$P_m = F U_{ok} I_{ks}, \quad (34)$$

gdje je

$$F = \frac{U_m I_m}{U_{ok} I_{ks}}. \quad (35)$$

Faktor F naziva se faktorom kvalitete i on je jednak omjeru površine pravokutnika sa stranicama U_m i I_m te površine pravokutnika sa stranicama U_{ok} i I_{ks} , što odgovara idealnoj karakteristici solarne ćelije. Faktor F pokazuje odstupanje realne od idealne solarne ćelije, odnosno kolik je utjecaj unutrašnjeg serijskog otpora ćelije. Obično je $0,7 < F < 0,9$.



Sl. 40. Strujno-naponska karakteristika osvijetljene solarne ćelije

Djelotvornost je ćelije jednaka omjeru njezine maksimalne i ukupne dozačene snage:

$$\eta = \frac{P_m}{EA} = \frac{U_m I_m}{EA} = \frac{F U_{ok} I_{ks}}{EA}, \quad (36)$$

gdje je E gustoća dozačene snage, a A površina solarne ćelije. Da bi efikasnost bila veća, potrebno je da fotostruja bude što veća, a faktor F što bliži jedinici. Tipične su vrijednosti za silicijske ćelije: $F = 0,82$, $U_{ok} = 0,57$ V i $\eta = 0,10$. Unutrašnji serijski otpor obično iznosi $0,56 \Omega$.

Visoka proizvodna cijena solarnih ćelija od monokristalnog silicija jedina je njihova mana. Tehnologija je te proizvodnje, međutim, znatno napredovala, pa je i proizvodna cijena veoma snižena. Kad su se pojavile takve solarne ćelije, cijena im je bila ~ 10000 USD po vatu vršne snage, tj. snage pri maksimalnoj snazi zračenja. Godine 1965. stajale su 1000, 1973. godine 300, 1975. godine 100, a 1977. godine ~ 15 USD/W. Današnja je cijena ~ 10 USD/W. Kad se govori o cijenama, valja točno označiti da li je to cijena samo solarne ćelije, solarnog modula ili kompletnog sustava koji se sastoji od modula sa solarnim ćelijama, ožičenja, pretvarača istosmjerne u izmjeničnu struju i priključaka na mrežu. Očekuje se da će devedesetih godina cijena solarnih ćelija pasti na $0,7$ USD/W, što bi odgovaralo cijeni kompletnog sustava od 2 USD po vatu vršne snage.

Za proizvodnju solarnih ćelija od monokristalnog silicija treba mnogo energije, pa se računa da je za njihovu proizvodnju potrebno utrošiti toliko energije koliko bi se proizvelo za 14 godina njihove upotrebe u solarnoj elektrani.

S obzirom na cijenu, mnogo su povoljnije solarne ćelije od polikristalnog, odnosno amorfno silicija, jer se one izrađuju od tankog silicijskog filma na jeftinoj podlozi, pa se tako štedi materijal i izbjegava skupa proizvodnja monokristala i izradba pločica od monokristalnog silicija. Prva ćelija od amorfno silicija proizvedena je 1974. Njezina je djelotvornost bila $5,5\%$, a nakon intenzivnih istraživanja povećana je na 7% . Očekuje se da će biti moguće postići djelotvornost od 10% .

Računa se da današnja cijena solarne elektrane s ćelijama od amorfno silicija iznosi ~ 2 USD po vatu vršne snage, dok optimistične prognoze govore da će krajem našeg stoljeća biti moguće izgraditi solarne elektrane po cijeni od 1 USD/W. Treba spomenuti da je i za proizvodnju ćelija od amorfno silicija potrebno relativno mnogo energije s obzirom na energiju koju će proizvoditi takve ćelije. Istina je da je za proizvodnju ćelija od amorfno silicija potrebno samo $1/3$ energije potrebne za proizvodnju ćelija od monokristalnog silicija, ali je djelotvornost amorfno silicija skoro upola manja, pa se konačno dobiva da je potrebno da ćelija od amorfno silicija radi $8 \dots 10$ godina da bi proizvela energiju koja je utrošena za njezinu proizvodnju.

Poseban je problem životni vijek solarnih ćelija izloženih atmosferskim utjecajima (kiša, snijeg, tuča). Radi se, naime, o ćelijama s vrlo tankim aktivnim slojem ($\sim 0,9 \mu\text{m}$). Prema nekim istraživanjima aktivne se plohe ćelija od amorfno silicija degradiraju $\sim 5\%$ godišnje, pa će njihova snaga za 10 godina pasti na manje od 50% početne snage. Osim toga, bit će potrebno osigurati vrlo često čišćenje aktivnih ploha solarnih ćelija, jer će i mikroskopski sitne čestice prašine, bilo kakva porijekla, smanjiti djelotvornost konverzije Sunčeva zračenja u električnu energiju.

Uz silicijske ćelije najviše su istražene solarne ćelije od kadmij-sulfida. Takva se ćelija sastoji od tankog sloja kadmij-sulfida (CdS) debljine $20 \mu\text{m}$, na koji je nanijet sloj bakar-sulfida (Cu_2S) debljine $\sim 0,2 \mu\text{m}$. Djelotvornost je takvih ćelija $7 \dots 9\%$, a vijek im je trajanja kraći nego silicijskih ćelija. Očekuje se da će im cijena iznositi ~ 5 USD/kW.

Ćelije od galij-arsenida prave se u obliku tankog lima od jedne (GaAs) ili od dviju komponenata ($\text{GaAs} + \text{Cu}_2\text{S}$). Takve bi ćelije, prema teorijskim predviđanjima, trebale biti vrlo djelotvorne. Elektronička svojstva upućuju na teorijsku uspješnost od 24% , a ostvarena uspješnost iznosi $11 \dots 13\%$.

Doprinos je solarnih ćelija energetskoj opskrbi zanemarljiv, a ne treba očekivati da će i u neposrednoj budućnosti njihov udio biti veći ako se ne pronađe ekonomski prihvatljivija akumulacija velikih količina energije.

Ipak su solarne ćelije vrlo važne u nekim primjenama. Njihova je upotreba nezamjenjiva u satelitima i svemirskim brodovima. Njihove terestričke primjene zasad su ograničene na mjesta gdje nema drugih energetskih izvora: telekomunikacijski uređaji u planinama i na otocima, signalizacija na cestovnim prijelazima preko željezničkih pruga, svjetionici i sl. U malim izvedbama upotrebljavaju se za napajanje nekih kalkulatora, satova i radio-prijemnika.

Proizvodnja vodika energijom Sunčeva zračenja

Da bi se energijom Sunčeva zračenja mogao opskrbiti znatan dio energetskih potrošača, potrebno je pronaći pogodan transformirani oblik energije koji se može proizvesti energijom Sunčeva zračenja i koji se može akumulirati u velikim količinama, kako bi tom energijom raspolagali potrošači i onda kad je intenzivnost zračenja malena ili kad insolacije uopće nema. Poznato je, naime, da je potreba energije veća u doba kad je insolacija slaba i kad Sunce nije iznad horizonta. Kao što je pokazano, neposredna je transformacija Sunčeva zračenja u električnu energiju relativno jednostavna, ali je akumulacija električne energije u većim količinama neekonomična.

To bi se moglo ostvariti proizvodnjom vodika. Vodik bi se, naime, mogao proizvoditi elektrolizom vode u posebnim solarnim elektranama s neposrednom transformacijom u električnu energiju (za elektrolizu je potrebna istosmjerna električna struja), postavljenima u područjima s intenzivnom insolacijom (npr. u tropskim i subtropskim područjima) u kojima nije moguća nikakva ljudska aktivnost. Radi se, naime, o velikim površinama potrebnim za takve elektrane. Tako proizvedeni vodik spremao bi se u prvom redu u podzemna spremišta da bi se omogućilo usklađivanje proizvodnje i potrošnje. Iz tih spremišta transportirao bi se vodik

u potrošačka područja plinovodima pod tlakom, a mogao bi se u kapljevitoj stanju prevoziti i specijalnim brodovima, kao što se danas prevozi ukapljeni prirodni plin (v. *Prirodni plin*, TE 11, str. 171). Uskladištenje vodika moguće je u plinovitoj stanju u podzemlju (npr. u iscrpljenim nalazištima prirodnog plina), u kapljevitoj stanju u posebnim spremnicima ili u obliku metalnih hidrida. Proizvodnja vodika moguća je i električnom energijom iz drugih tipova elektrana radi povećanja njihova iskorištenja. Za to dolaze u obzir elektrane s niskim specifičnim troškovima za gorivo, npr. nuklearne elektrane u elektroenergetskim sustavima gdje je njihov udio visok, pa će se pojavljivati razdoblja u danu i godini kad njihova snaga neće biti potpuno iskorištena. Osim toga, vodik se može proizvoditi i termokemijskim postupcima. Sve bi to omogućilo kombiniranu proizvodnju vodika, što bi cijeli sustav opskrbe vodikom učinilo elastičnijim.

Danas se vodik upotrebljava kao jedna od sirovina u sintezi kemijskih proizvoda i u petrokemijskoj industriji (v. *Hidrogenacija*, TE 6, str. 386). U Sjevernoj Americi i Zapadnoj Evropi troši se nekoliko stotina milijarda kubičnih metara vodika, od toga polovica za proizvodnju amonijaka, a četvrtina u petrokemijskoj industriji.

Potrošnja vodika mogla bi se znatno povećati kad bi se njegova cijena snizila toliko da postane konkurentan drugim oblicima energije. Postoje, naime, vrlo velike mogućnosti upotrebe vodika kao energetskog goriva.

Vodik je idealno gorivo za grijanje prostorija, jer se njegovim izgaranjem proizvodi samo vodena para, pa može izgarati u prostorijama bez dimnjaka. Vodik se može upotrijebiti kao gorivo za gorive elemente kojima se proizvodi električna energija tzv. hladnim izgaranjem (v. *Gorivni elementi*, TE 6, str. 142). To vjerojatno predstavlja mogućnost decentralizirane proizvodnje električne energije, jer je u svaki blok kuća, pa i u pojedine kuće, moguće bez posebnih teškoća postaviti gorivi element koji nema pokretnih dijelova i ne treba nadzora u pogonu. U industriji preradbe minerala vodik se može upotrijebiti kao redukcijsko sredstvo, a u metalurgiji kao gorivo zbog visoke temperature izgaranja. Predviđa se upotreba vodika, čistog ili u smjesi s benzinom, kao goriva za pogon motora s unutrašnjim izgaranjem. U budućnosti će biti moguća upotreba vodika kao goriva za nadzvučne avione.

Dakako, vodik se može upotrijebiti i kao gorivo u parnim kotlovima u termoelektranama za proizvodnju električne energije, i to bez negativnog utjecaja na okoliš.

Ogrjevna moć vodika tek je trećina ogrjevne moći prirodnog plina, što znači da je za jednaku količinu energije potrebna trostruka količina vodika. Zbog toga će biti potrebno transportirati vodik pod većim tlakom nego što se transportira prirodni plin, da se ne bi suviše povećale dimenzije plinovoda. Inače, struktura instalacija ne bi se bitno razlikovala od onih koje se upotrebljavaju za transport prirodnog plina. Bit će potrebna veća potrošnja energije za pogon kompresora, pa se procjenjuje da će troškovi transporta vodika biti za 40...50% veći od troškova za transport prirodnog plina. Potrebno je spomenuti da već danas postoje plinovodi za transport vodika (u SR Njemačkoj u području Düsseldorf-Essen i u SAD u Texasu).

Uskladištenje vodika moguće je, kako je već spomenuto, i u kapljevitoj stanju. Da bi vodik prešao u kapljevito stanje, treba ga ohladiti na temperaturu od -253°C (prirodni plin na temperaturu od -160°C). Osim toga, za uskladištenje ukapljenog vodika potreban je za jednaku količinu energije tri puta veći volumen spremnika nego za ukapljeni prirodni plin. Spremnik za ukapljeni vodik volumena 3400 m^3 izgrađen je u SAD.

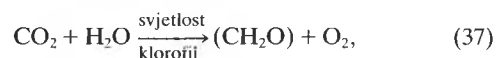
Predviđa se također akumulacija vodika u obliku metalnih hidrida, jer se tako smanjuje volumen spremnika na 6%. Za ponovno dobivanje vodika potrebno je metalni hidrid ugrijati ili ga dovesti u područje nižeg tlaka. Takav način uskladištenja vodika vjerojatno dolazi u obzir pri upotrebi vodika kao pogonskog sredstva za vozila u kojima će se vodik oslobađati za vrijeme upotrebe.

Vodik se može distribuirati do malih potrošača isto tako kao i prirodni plin, pa se može upotrijebiti ista distribucijska mreža. Treba spomenuti da se već godinama distribuira plin proizveden rasplinjavanjem ugljena (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 387) koji sadrži 50...60% vodika. Danas se, npr., potrošači u Baselu (Švicarska) opskrbljuju plinom koji sadrži 80% vodika. Ako se usporede troškovi distribucije vodika i distribucije električne energije, distribucija je vodika ekonomičnija. Osim toga, moguće je akumulirati veće ili manje količine vodika u pojedinim točkama distribucijske mreže, što je nemoguće s električnom energijom.

FOTOSINTEZA

Fotosinteza u biljkama oblik je konverzije dozačene sunčane energije. Ona omogućuje proizvodnju hrane i goriva. Taj je proces na našem planetu započeo prije oko tri milijarde godina i on je omogućio stvaranje kisika u atmosferi i fosilnih goriva koji su sačuvani u tlu.

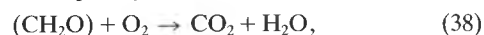
Djelovanjem vidljivog Sunčeva zračenja nastaje proces fotosinteze u kojemu se od ugljik-dioksida i vode dobivaju organski spojevi uz oslobađanje kisika. To je vrlo složen proces koji još nije potpuno razjašnjen. Može se pojednostavnjeno prikazati izrazom



gdje je (CH_2O) simbolično označena organska tvar. U tom procesu zeleni klorofil apsorbira svjetlosnu energiju i djeluje kao katalizator u stvaranju organskih spojeva u biljkama (npr. glukoze $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). U fotosintezi sudjeluje samo vidljivo zračenje ($0,4\cdots0,7\text{ }\mu\text{m}$), a to znači da samo ~43% dozačene energije utječe na stvaranje biomase.

Za redukciju svake molekule ugljik-dioksida potrebno je 8...9 fotona, bez obzira na valnu duljinu svjetlosti. Za redukciju mola ugljik-dioksida potrebna je energija od ~470 kJ i ona se akumulira u proizvedenim organskim spojevima. Energija je fotona koji sudjeluju u fotosintezi, međutim, veća. Tako npr. energija fotona crvene svjetlosti, potrebnih za redukciju mola ugljik-dioksida, iznosi 1540 kJ, pa djelotvornost fotosinteze za crvenu svjetlost iznosi ~30%. Budući da samo ~43% od dozačene energije sudjeluje u sintezi, maksimalna teorijska djelotvornost fotosinteze Sunčevim zračenjem iznosi ~13%. Osim toga, u biljkama se ne apsorbira svo vidljivo zračenje, nego samo ~80%, pa maksimalna teorijska djelotvornost iznosi ~10%.

Osim fotosinteze, u biljkama se događa i suprotna reakcija koja se naziva fotorespiracijom, a odvija se prema relaciji



uz oslobađanje energije od 470 kJ. Ta se reakcija odvija kad nema insolacije. Dio energije oslobođene fotorespiracijom upotrebljava se za održavanje fizioloških procesa u biljci kad nema insolacije, ali i onda kad je biljci potrebno više energije od dozačene. Dio te energije potreban je i za sintezu složenijih organskih spojeva. Ako se pretpostavi da se tako utroši ~30% proizvoda nastalih fotosintezom, gornja je granica djelotvornosti fotosinteze ~7%.

U stvarnosti srednja je djelotvornost fotosinteze mnogo manja i iznosi od 0,1...0,2%. U uzgajanim poljoprivrednim kulturama postiže se djelotvornost od 1...3%, u posebnim optimalnim uvjetima do 5%, a u laboratorijima i do 6%.

Osim biljaka s jednostavnijim ciklusom asimilacije ugljik-dioksida (tzv. C3 biljke), postoje biljke sa složenijim ciklusom asimilacije ugljik-dioksida i smanjenom fotorespiracijom (tzv. C4 biljke), koje daju veće prinose od C3 biljaka. Biljke s većim prinosima uglavnom uspijevaju u tropskim i suptropskim područjima, a među njima su najvažnije šećerna trska i kukuruz s dnevnim prinosima biomase od 40...50 g/m², uz djelotvornost iskorištenja dozačene energije od ~3%. Među biljkama s manjim prinosima najveće prinose, od 20...30 g/m², imaju šećerna repa, alfalfa, eukaliptus i *Chlorella* uz djelotvornost od 1...2%.

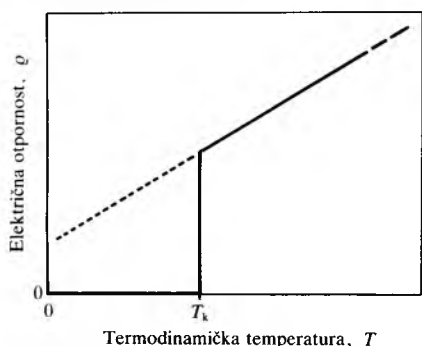
Uzgojem jednostavnijih organizama (zelene i modrozelenke) dobiva se relativno velik prinos biomase, oko 50 t suhe mase po hektaru, uz djelotvornost od 3...5%. Proučava se razvoj i rast mikroskopskih i makroskopskih alga (npr. *Scedesmus*, *Spirulina*, *Chlorella* i dr.) radi dobivanja biomase. Takve se alge mogu upotrijebiti kao životinjska hrana, mogu se fermentirati u metan i osušene upotrijebiti kao gorivo.

LIT.: J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*. John Wiley, New York 1974. – S. V. Szokolay, *Solar Energy and Building*. Architectural Press, London 1975. – C. E. Backus, *Solar Cells*. IEEE Press, New York 1976. – B. Anderson, *Solar Energy*. McGraw-Hill, New York 1977. – W. A. Beckman, *Solar Heating Design*. John Wiley, New York 1977. – F. Kreith, J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*. McGraw-Hill, New York 1978. – A. E. Dixon, J. D. Leslie, *Solar Energy Conversion*. Pergamon Press, New York 1979. – P. J. Lunde, *Solar Thermal Engineering, Space Heating and Hot Water System*. John Wiley, New York 1980. – J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley, New York 1980. – J. F. Kreider, F. Kreith, *Solar Energy Handbook*. McGraw-Hill, New York 1981. – B. Lalović, *Nasušno Sunce*. Nolit, Beograd 1982. – V. Knapp, P. Kulišić, *Novi izvori energije*. Školska knjiga, Zagreb 1985. – J. S. Hsieh, *Solar Energy Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1986. – H. Požar, *Neke energetske karakteristike eolskih i solarnih elektrana*. Makedonska akademija nauka i umetnosti, Skopje 1988. – P. Kulišić, *Novi izvori energije*. Školska knjiga, Zagreb 1991.

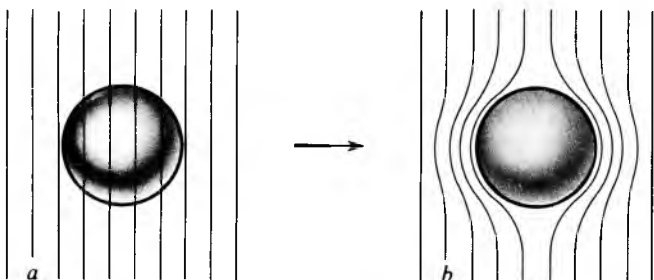
P. Kulišić

SUPRAVODLJIVOST, svojstvo nekih vodljivih tvari da na dovoljno niskim temperaturama gube električni otpor i pritom iz svoje unutrašnjosti istiskuju dovoljno mala magnetska polja (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 62).

Supravodljivost je otkrio (1911) nizozemski fizičar H. Kamerlingh Onnes (Nobelova nagrada za fiziku 1913) nakon što je ukapljivanjem helija uspio postići temperature od samo nekoliko kelvina. Mjereći električni otpor žive opazio je da on naglo nestaje ispod kritične temperature $T_k = 4,16$ K. Usljedilo je otkrivanje i drugih supravodljivih tvari, tzv. supravodiča s različitim kritičnim temperaturama (sl. 1). Do 1933. se vjerovalo da je idealna vodljivost jedino bitno svojstvo sve većeg broja novootkrivenih supravodiča. Međutim W. Meissner i R. Ochsenfeld su 1933. pokazali da se ponašanje supravodiča u magnetskom polju razlikuje od očekivanog ponašanja idealnog vodiča. Dovoljno malo magnetsko polje bit će izbačeno iz unutrašnjosti supravodiča ohlađenog ispod kritične temperature, dok bi ga vodič idealne vodljivosti trebao zadržati. Ta se pojava naziva Meissnerov efekt (sl. 2). Braća F. i H. London predlažu 1935. opis supravodljivosti elektromagnetskim jednadžbama koje osim



Sl. 1. Ovisnost električne otpornosti supravodiča o termodinamičkoj temperaturi (T_k je kritična temperatura)



Sl. 2. Meissnerov efekt. Kugla od supravodljivog materijala nalazi se u magnetskom polju, a na temperaturi višoj od kritične, b na temperaturi nižoj od kritične, pri čemu je magnetsko polje izbačeno iz kugle

idealne vodljivosti uključuju i Meissnerov efekt. Te su jednadžbe pokazivale da je supravodljivost složena pojava koja osim idealne vodljivosti podrazumijeva i termodinamički novo stanje materijala. F. London te V. L. Ginzburg i L. D. Landau su 1950. utvrdili da je priroda tog stanja kolektivna kvantnomehanička. Dva potonja fizičara opisuju sve elektrone u supravodljivom stanju (čestična gustoća 10^{22} cm^{-3}) samo jednim zajedničkim valom određene amplitude i faze (Landau je 1962. dobio Nobelovu nagradu, među ostalim i za to). Služeći se Ginzburg-Landauovom teorijom A. A. Abrikosov je 1957. pokazao da osim supravodiča I. vrste, koji pokazuju potpuni Meissnerov efekt, postoje i supravodiči II. vrste u koje magnetska polja mogu prodirati lokalno. Takve tvari ostaju supravodljive u vrlo jakim magnetskim poljima, što je temelj mnogih primjena supravodljivosti. Iste su godine J. Bardeen, L. N. Cooper i J. R. Schrieffer postavili mikroskopsku tzv. BCS teoriju supravodljivosti (Nobelova nagrada 1972). U toj je teoriji Cooperova ideja da se supravodljivi elektroni vežu u parove udružena s idejom H. Fröhlicha iz 1954. da vibracije rešetke uzrokuju međusobno privlačenje dvaju elektrona. Kolektivno stanje svih elektrona, opisano jednim valom određene amplitude i faze, dobiveno je stalnom izmjenom partnera u elektronskim parovima. L. P. Gor'kov je 1959. pokazao da se za temperature blizu kritičnoj BCS teorija svodi na Ginzburg-Landauovu teoriju uz pripadnu identifikaciju mikroskopskih i fenomenoloških veličina. Jedinstvena se faza zajedničkog vala svih elektrona izravno manifestira u spoju u kojem su dva supravodiča odvojena vrlo tankim izolatorskim slojem (B. D. Josephson, dio Nobelove nagrade 1973). Time nastaje interferencija faza između dvaju supravodiča, koja je osjetljiva na vrlo mala magnetska polja. Na toj se osjetljivosti temelje mnoge primjene supravodljivosti. Usporedo s opisanim istraživanjima tekli su napor za postizanje supravodljivosti na što višim temperaturama. Optimiziraju se uvjeti za supravodljivost uz vibracijski mehanizam privlačenja elektrona u parove ili pak traže novi mehanizmi njihova privlačenja. U oba slučaja pažnja je usmjerena na anizotropne (lančaste, slojaste) strukture anorganskog i organskog sastava. Supravodljivi polimeri otkriveni su 1975, a organski supravodiči 1979. godine. J. G. Bednorz i K. A. Müller (Nobelova nagrada 1987) otkrili su 1986. da slojasti keramički materijali, sastava $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, postaju supravodljivi na temperaturama ~ 40 K. Do danas su pronađeni slični materijali koji su supravodljivi već na 125 K. Ta otkrića otvaraju nove perspektive primjenama supravodljivosti, jer se na temperaturama ~ 80 K hlađenje helijem zamjenjuje mnogo jeftinijim hlađenjem dušikom.

Ponašanje supravodiča u magnetskom polju. Pretpostavi li se da je vodič idealan, električno polje jakosti $\vec{E}$ ubrzava elektron naboja e , mase m i brzine $\vec{v}$ po Newtonovu zakonu $d(m\vec{v})/dt = e\vec{E}$. Ako se uzme u obzir i refleksija elektrona na površini uzorka, gustoća se struje može opisati izrazom $\vec{J} = n_s e \vec{v}$, gdje je n_s gustoća supravodljivih elektrona. Tada iz Newtonovog zakona proizlazi

$$\vec{E} = \mu_0 \lambda_L^2 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \quad (1)$$

gdje je μ_0 magnetska permeabilnost vakuuma, a λ_L će se pokazati kao dubina prodiranja magnetskog polja u supravodič. Oni su s ostalim parametrima supravodiča povezani relacijom

$$\mu_0 \lambda_L^2 = \frac{m}{n_s e^2} \quad (2)$$

prema Newtonovom zakonu i jednadžbi (1).

U idealnom vodiču jednadžba (1) nadomješta Ohmov zakon za vodič s otporom. Iz Maxwellove jednadžbe koja povezuje jakost električnog polja $\vec{E}$ s jakosti magnetskog polja $\vec{H}$

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

i jednadžbe (1) slijedi

$$\lambda_L^2 \text{rot } \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (4)$$

Za poluprostor ($x > 0$) ispunjen idealnim vodičem ta jednadžba uz Maxwellovu jednadžbu $\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$ daje

$$\frac{\partial \vec{H}(x)}{\partial t} = \frac{\partial \vec{H}(0)}{\partial t} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_L}\right). \quad (5)$$

Iz toga slijedi da se magnetsko polje ne može mijenjati u vremenu unutar ($x \gg \lambda_L$) idealnog vodiča. Na površini idealnog vodiča induciraju se struje koje tu promjenu ne dopuštaju (Lenzov zakon). Stoga, ako se vodič na visokoj temperaturi stavi u magnetsko polje, pa se hladi ispod kritične temperature gdje postaje idealno vodljiv, polje u njemu ostaje zamrznuto. Empirijski se, međutim, pokazalo (Meissner-Ochsenfeldov