

1.2 Obnovljivi i neobnovljivi izvori energije

Obnovljivi izvori energije predstavljaju primarne energetske izvore koji se koriste za dobijanje električne energije ili toplotne energije, a da se pri tom rezerve primarnog energenta konstantno ili ciklično obnavljaju. Sam naziv obnovljivi potiče od činjenice da se primarna energija transformiše u iznosu koji ne premašuje brzinu kojom se stvara u prirodi. U obnovljive izvore energije spadaju: energija sunčevog zračenja, hidroenergija, energija vetra, energija biogoriva, geotermalna energija i energija mora i okeana (talasa, morskih struja, plime i odseke i toplotna energija mora i okeana). U neobnovljive izvore energije spadaju izvori energije koji se zasnivaju na fosilnim gorivima (nafta, gas i ugalj) i nuklearni izvori energije. S obzirom da su ovi izvori energije predstavljali osnovne vidove energije koji su se tradicionalno koristili i za koje su razvijene tehnologije za eksploataciju, za njih se često koristi termin konvencionalni izvori. U konvencionalne izvore, pored fosilnih goriva, spadaju i velike hidroelektrane.

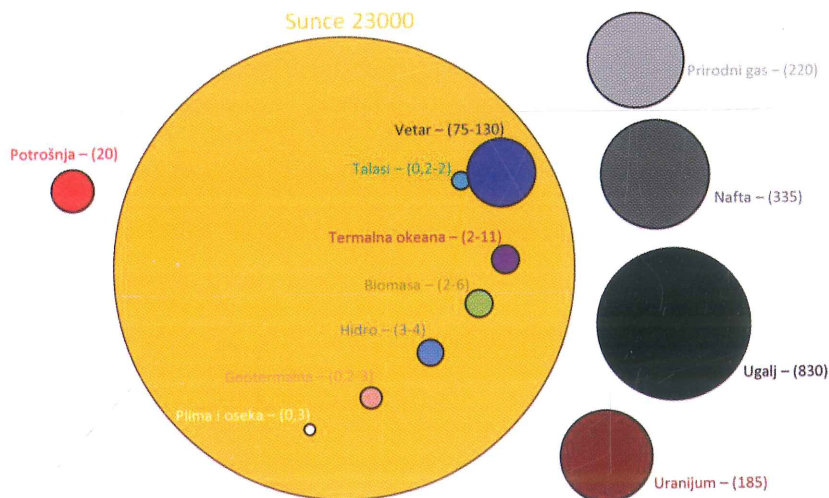
Fosilna goriva su proizvod procesa fotosinteze koji se odvijao milionima godina ranije. Oni se mogu smatrati skladištenom sunčevom energijom. Za dobijanje postojećih oblika fosilnih goriva bilo je potrebno više od 100 miliona godina i zato se njihovo formiranje može smatrati događajem koji se geološki desio samo jednom. Sa ljudskog stanovišta, fosilni izvori se moraju smatrati ograničenim. Postojeća dinamika potrošnje fosilnih goriva je neuporedivo brži proces od procesa njihovog stvaranje, tako da fosilna goriva predstavljaju neobnovljivi izvor energije.

1.3 Potencijali, resursi i rezerve obnovljivih izvora energije

Obnovljivi izvori energije dok se ne koriste ostaju samo potencijali, a sa korišćenjem postaju resursi ili rezerve, uz preciziranje stanja i uslova korišćenja. Drugim rečima, obnovljivi izvori predstavljaju teorijski potencijal koji u zavisnosti od lokalnih uslova može biti raspoloživ ili neraspoloživ. Od teorijski raspoloživog potencijala obnovljivih izvora, samo jedan deo je tehnički iskoristiv pri sadašnjim tehnologijama i on predstavlja resurs. Deo obnovljivog resursa koji je ekonomski opravdano konvertovati u korisnu energiju predstavlja rezervu. Samim tim, slično kao i kod fosilnih goriva, sa razvojem novih i ekonomičnijih tehnologija dolazi do prevođenja potencijala u resurse, odnosno resursa u rezerve. Ovaj proces prevođenja resursa u rezerve je naročito izražen u pogledu solarnog zračenja i energije vetra, gde se tehnologije za njihovu konverziju intenzivno razvijane u poslednjih nekoliko decenija, a njihova cena na tržištu je višestruko smanjena. Mnogi drugi obnovljivi izvori, kao što su energije morskih talasa, geotermalna energija, još uvek nemaju ekonomski opravdanost za konverziju u korisne oblike energije, pa je veoma teško realno proceniti resurse, odnosno rezerve, tako da njihovo razmatranje zahteva detaljnu analizu razvoja tehnologije i ekonomije njihovog korišćenja u zavisnosti od lokalnih uslova. U tom kontekstu, prethodno navedeno znači da nešto što je rezerva obnovljivog izvora energije na primer u Nemačkoj, nije rezerva i u Srbiji, makar se radilo o identičnom potencijalu i resursu. Ovo je iz razloga što lokalni uslovi (cena električne energije, cena prirodnog gasa, cena raspoložive toplotne energije, kupovna moć stanovništva,

podsticajne mere države, mogućnosti lokalne industrije i dr.) nisu identični u Nemačkoj i Srbiji.

Potencijal obnovljivih izvora višestruko prevazilazi trenutnu potrošnju energije na Zemlji. Na slici 1.3 ilustrovana je ukupna potrošnja energije u svetu (stanje 2018. godine), poznate rezerve neobnovljivih izvora energije i potencijal obnovljivih izvora.



Slika 1.3: Ukupna godišnja potrošnja energije u svetu (izražena u TWgod/god), poznate rezerve neobnovljivih izvora energije (izražene u TWgod) i potencijal obnovljivih izvora energije na Zemlji (izražen u TWgod/god) (izvor: Perez, R., Perez, M., A fundamental look at supply side energy reserves for the planet, IEA-SHCP-Newsletter Vol. 62, Nov. 2015)

Ukupna godišnja dozračena energije od Sunca na površini Zemlje iznosi oko 23000 TWgod (teravatgodina), dok je ukupna energija skladištena u svim poznatim rezervama fosilnih goriva (ugalj, nafta i gas) oko 1400 TWgod. To znači da Sunce dozrači do Zemlje godišnje energiju koja je oko 17 puta veća od energije koja bi se dobila sagorevanjem svih poznatih rezervi fosilnih goriva.

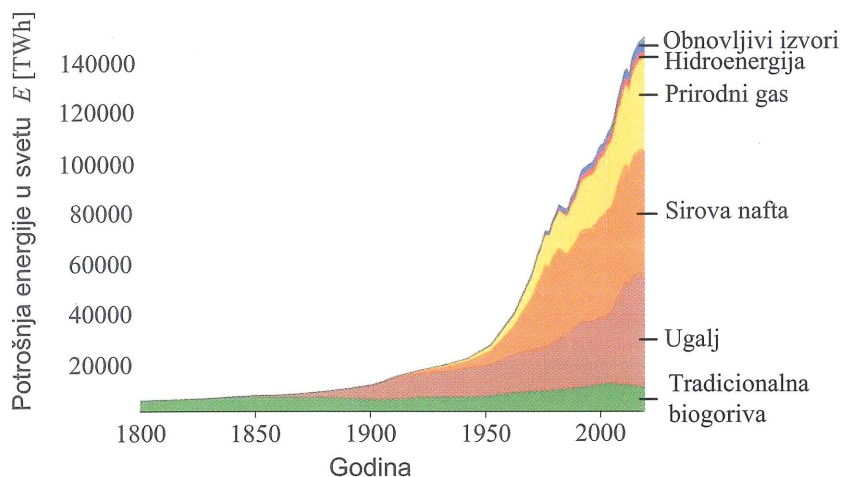
Imajući u vidu ogromni potencijal obnovljivih izvora energije koji višestruko prevazilazi potrebe za finalnom energijom ljudske populacije, logični su napor da se razviju tehnologije koje će omogućiti tehnički izvodljivu i ekonomski opravdanu konverziju ovog neiscrpnog energetskog potencijala u korisnu energiju. Ostvarenjem ovog zadatka bi se, na ekološki prihvatljiv način, rešile potrebe ljudi za energijom. Ipak, postoji mnogo fizičkih i tehničkih barijera koje ovaj zadatak čine možda najvećim izazovom za čovečanstvo.

1.4 Struktura i trendovi proizvodnje i potrošnje energije u svetu

Potrošnja energije je značajno porasla u zadnjih 200 godina zbog povećanja broja stanovnika na zemlji, zbog zahteva za komfornijim životom i zbog veće mobilnosti

svetske populacije. Tokom XX veka globalna populacija se povećala 3,7 puta, dok je tražnja za finalnom energijom porasla više od 30 puta. To znači da je, uz intenzivan eksponencijalni rast svetske populacije, došlo i do daleko izraženije potrošnje energije po stanovniku. Iako je eksponencijalni trend rasta populacije ublažen krajem prošlog veka, trend povećanja potrošnje energije po stanovniku i dalje raste. Ipak, zahvaljujući merama energetske efikasnosti i porastu svesti o potrebama racionalnog korišćenja energije, trend porasta potrošnje energije po glavi stanovnika je ublažen.

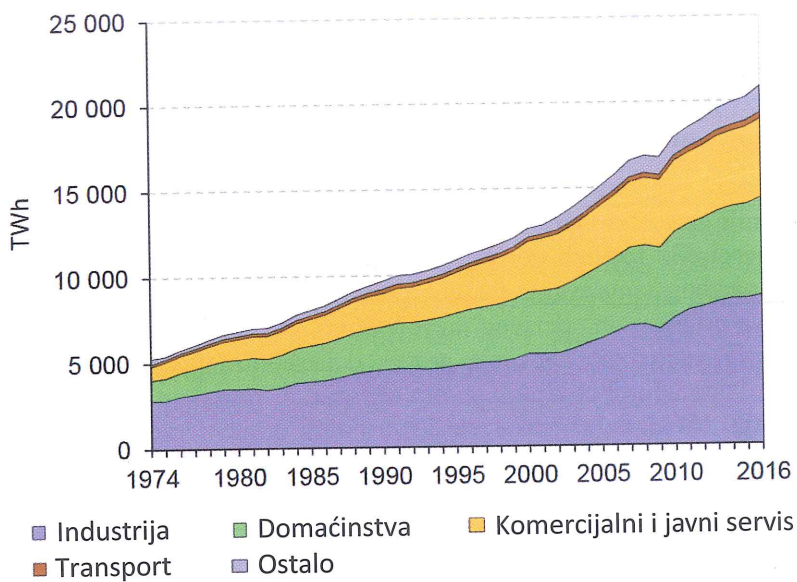
Na slici 1.4 je prikazana potrošnja primarne energije u svetu od 1800. godine do 2016. godine. Fosilna goriva su bila osnovni pokretač industrijske revolucije, kao i tehnološkog, socijalnog i ekonomskog razvoja koji je sledio. Fosilna goriva (ugalj, nafta i gas) i dalje imaju dominantnu ulogu u globalnom energetskom sistemu.



Slika 1.4: Potrošnja primarne energije u svetu od 1800. do 2016. godine
(izvor: Vaclav Smil: "Energy Transition: Global and National Perspectives", 2017)

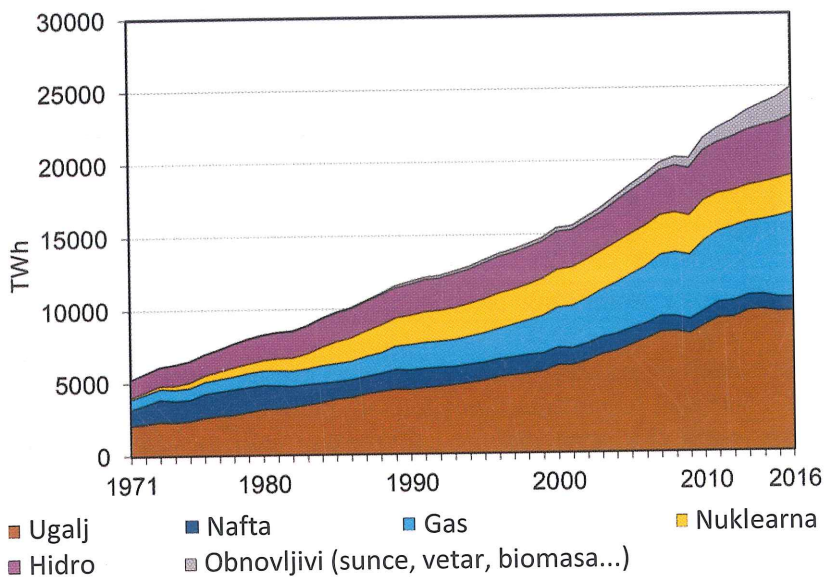
Električna energija predstavlja najpogodniji oblik sekundarne energije. U ovom obliku energija se može relativno jednostavno transportovati do krajnjih korisnika pomoću nadzemnih i kablovskih vodova. Električna energija se može vrlo efikasno i jednostavno transformisati u sve oblike korisne energije (mehaničku, toplotnu, svetlosnu). Iz tog razloga potražnja za električnom energijom permanentno raste u praktično svim privrednim i društvenim sferama ljudske delatnosti.

Na slici 1.5 prikazan je trend porasta i struktura potrošnje električne energije u svetu. Porast potrošnje električne energije je vrlo izražen. U proteklih 40 godina potrošnja električne energije se povećala 4 puta, i praktično se grubo može uzeti da se potrošnja električne energije u svetu duplirala na svakih 10 godina. Oko 40% električne energije se troši u industrijskom sektoru, oko 30% u domaćinstvima, a oko 25% u komercijalnom i javnom sektoru. Treba imati u vidu da je u toku intenzivan proces elektrifikacije drumskog saobraćaja, što će u budućnosti usloviti značajno povećanje potrošnje električne energije.

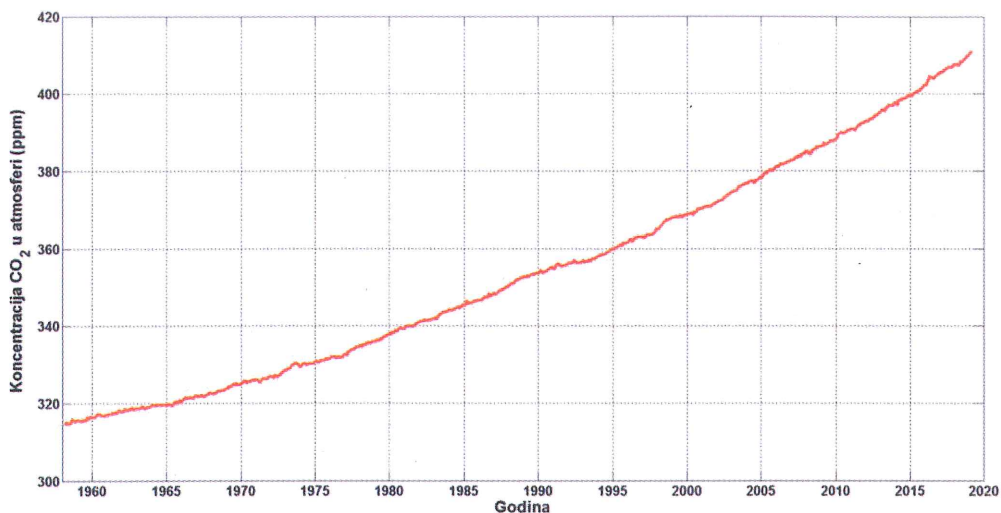


Slika 1.5 Struktura i trend porasta potrošnje električne energije u svetu
(izvor: IEA- International Energy Agency)

Potrošnu električne energije, uvećanu za gubitke u prenosu i distribuciji, mora pratiti proizvodnja. Struktura globalne proizvodnje električne energije je prikazana na slici 1.6.

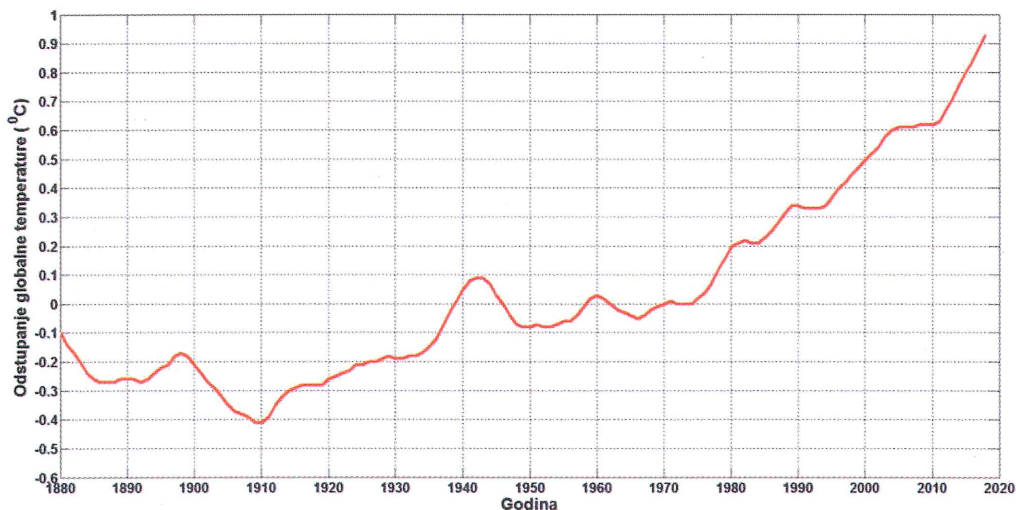


Slika 1.6: Struktura proizvodnje električne energije u svetu (izvor: IEA)



Slika 1.10: Porast koncentracije CO₂ u Zemljinoj atmosferi u poslednjih 50 godina (izvor: *North American Space Agency - NASA*)

Kao posledica povećanja koncentracije ugljen-dioksida u atmosferi intenziviran je efekat staklene bašte što rezultuje permanentnim porastom globalne srednje godišnje temperature na Zemlji. Na slici 1.11 prikazan je usrednjeni dijagram odstupanja globalne temperature na Zemlji u odnosu na prosečnu temperaturu za period 1950-1980. Može se zaključiti da je srednja godišnja temperatura na Zemlji za oko 1°C veća u odnosu na period od pre 40 godina.

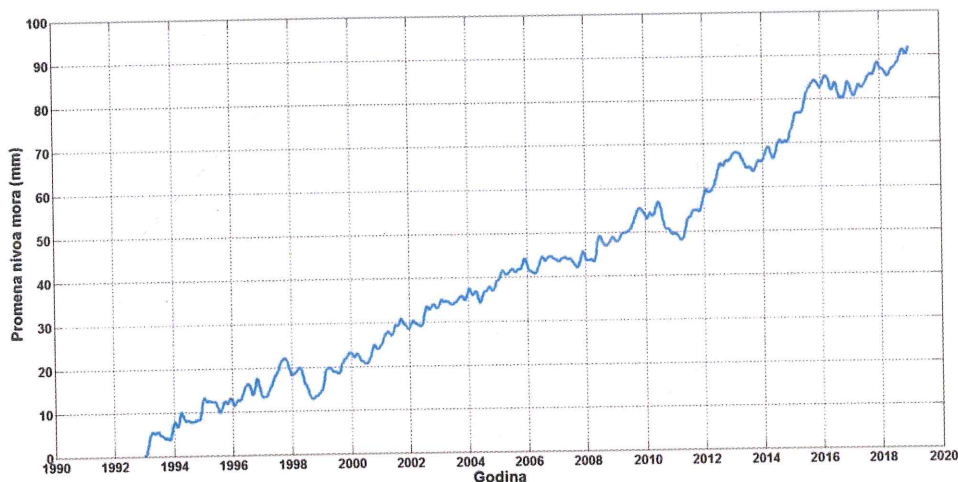


Slika 1.11: Odstupanje globalne temperature na Zemlji u odnosu na srednju višegodišnju temperaturu (1950-1980), (izvor: *NASA*)

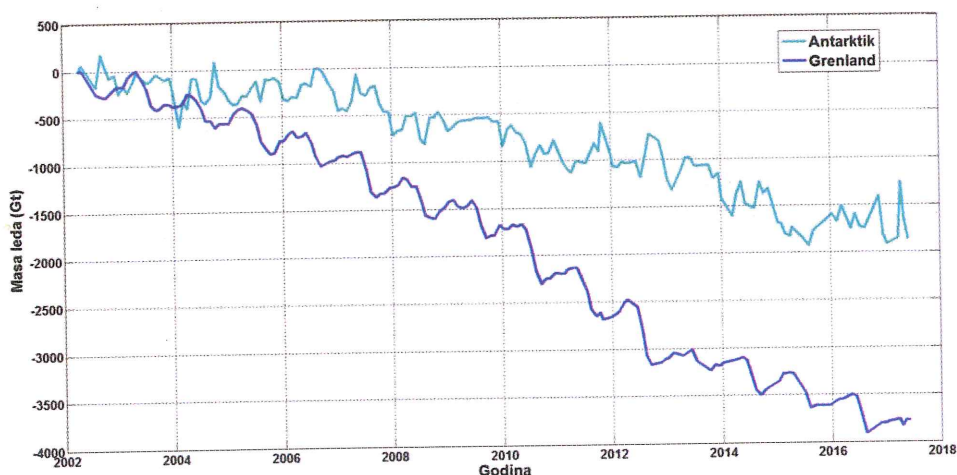
Povećanje globalne temperature na Zemlji izaziva klimatske promene koje se ogledaju u pojavi procesa koji ugrožavaju opstanak života na Zemlji, neke od glavnih su:

- topljenje lednika na severnom i južnom polu, kao i glečera na visokim planinama,
- povećanje nivoa svetskog mora,
- pojava ekstremnih oluja,
- pojava poplava.

Na slici 1.12 prikazan je trend povećanja nivoa svetskog mora, dok je na slici 1.13 prikazan trend smanjenja ledničke mase na severnom i južnom polu dobijen na osnovu satelitskih osmatranja. Globalno povećanje temperature dovodi do topljenja preko 400 Gt lednika godišnje. Kao posledica topljenja lednika i povećanja temperature vode u morima, nivo svetskog mora se povećava za oko 3,3 mm godišnje.

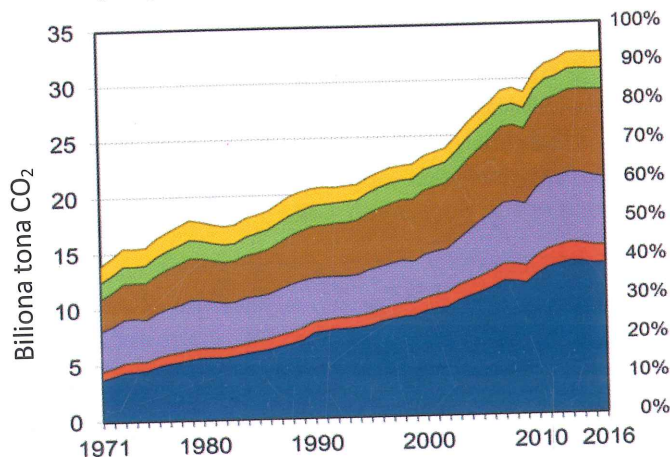


Slika 1.12: Povećanje nivoa svetskog mora (izvor: NASA)



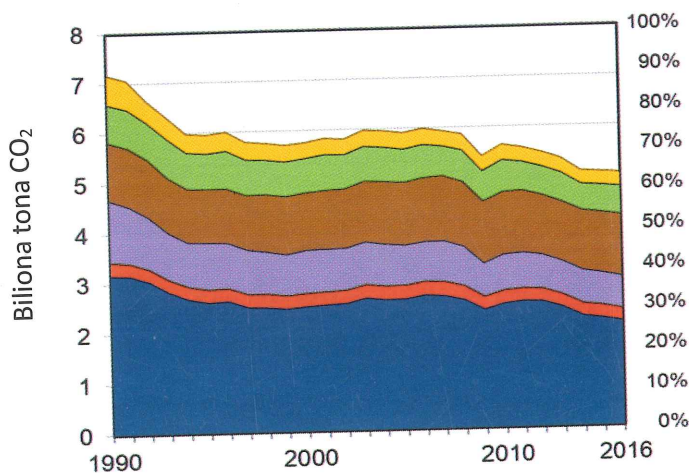
Slika 1.13: Smanjenje ledničke mase na severnom i južnom polu (izvor: NASA)

Smatra se da je sagorevanje fosilnih goriva na Zemlji jedan od glavnih uzroka povećanja koncentracije CO₂ i posledičnih klimatskih promena. Na slici 1.14 prikazan je trend i struktura izvora emisije ugljen-dioksida u svetu, a na slici 1.15 trend i struktura izvora emisije ugljen-dioksida u Evropi.



■ Proizvodnja električne i toplotne energije ■ Proizvodna i građevinska industrija
 ■ Druge grane industrije ■ Transport ■ Domaćinstva ■ Ostalo

Slika 1.14: Trend i struktura izvora emisije ugljen-dioksida u svetu (izvor: IEA)



■ Proizvodnja električne i toplotne energije ■ Proizvodna i građevinska industrija
 ■ Druge grane industrije ■ Transport ■ Domaćinstva ■ Ostalo

Slika 1.15: Trend i struktura izvora emisije ugljen-dioksida u Evropi (izvor: IEA)

2. Energija Sunca

Sunce je najznačajniji i praktično neiscrpan izvor energije na Zemlji. Energija vetra, hidroenergija i biomasa u suštini predstavljaju transformisanu Sunčevu energiju. Energije iz drugih obnovljivih izvora, kao što su geotermalna energija i gravitaciona energija Meseca, su neuporedivo manje u odnosu na solarnu energiju koja je dostupna na Zemlji.

Kada se govori o korišćenju energije zračenja Sunca kao obnovljivog izvora energije, razlikuju se dva osnovna načina na koja se ova energija može koristiti, a to su:

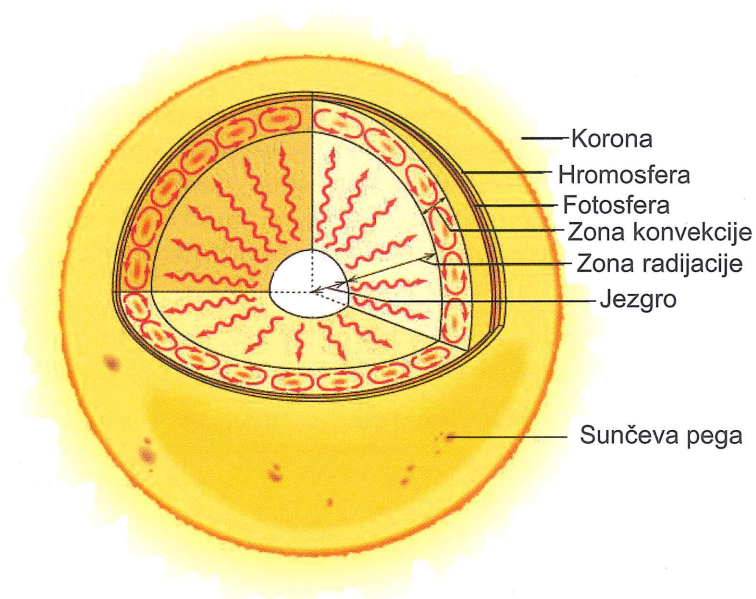
- fotonaponska konverzija solarne energije,
- toplotna konverzija solarne energije.

Konverzija solarne energije u električnu ili toplotnu energiju vrši se u uređajima koji se jednim imenom nazivaju solarni kolektori. Fotonaponska konverzija solarne energije predstavlja direktno pretvaranje solarne energije u električnu energiju posredstvom fotonaponskog efekta u solarnim (fotonaponskim) ćelijama. Toplotna konverzija solarne energije podrazumeva njeno pretvaranje u korisnu toplotu, korišćenjem solarnih termalnih kolektora. U okviru toplotne konverzije solarne energije razmatra se pasivno korišćenje solarne energije za zagrevanje prostorija primenom posebno izvedenih građevinskih elementa i materijala koji treba da omoguće optimalno korišćenje solarne energije. U širem smislu, koristi se i svetlosna energija Sunca koja omogućava obdanicu na Zemlji, odnosno smenu dana i noći.

2.1 Sunce kao izvor energije

Sunce je zvezda na polovini svog životnog veka koji se procenjuje na 10 milijardi godina. Sa prečnikom $1,39 \cdot 10^6$ km, masom od $2 \cdot 10^{30}$ kg i luminoznošću od $4 \cdot 10^{26}$ W Sunce je nešto veće i sjajnije od prosečne zvezde. Sastoji se pretežno od vodonika (74% mase) i helijuma (24% mase) i male količine drugih elemenata, uključujući gvožđe, nikl, kiseonik, silicijum, sumpor, magnezijum, ugljenik, neon, kalcijum i hrom. Odnos vodonika i helijuma se menja tokom vremena zbog toga što se u jezgru Sunca odvijaju termonuklearne reakcije u kojima se vodonik pretvara u helijum.

Sunce se sastoji od četiri oblasti: jezgra, zone zračenja, zone konvekcije i atmosfere. Sunčeva atmosfera se sastoji od fotosfere, hromosfere i korone. Granice između ovih oblasti nisu jasno definisane i postoje prelazna područja. Karakteristike pojedinih oblasti se jako razlikuju. Jezgro se prostire do četvrtine poluprečnika Sunca i sadrži polovinu mase Sunca. Temperatura i pritisak u jezgru su ekstremno visoki: $1,5 \cdot 10^6$ K i 10^{16} Pa. Gustina materije u jezgru je 150 g/cm^3 . Sastav Sunca je prikazan na slici 2.1, a podaci o Suncu su dati u tabeli 2.1.



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

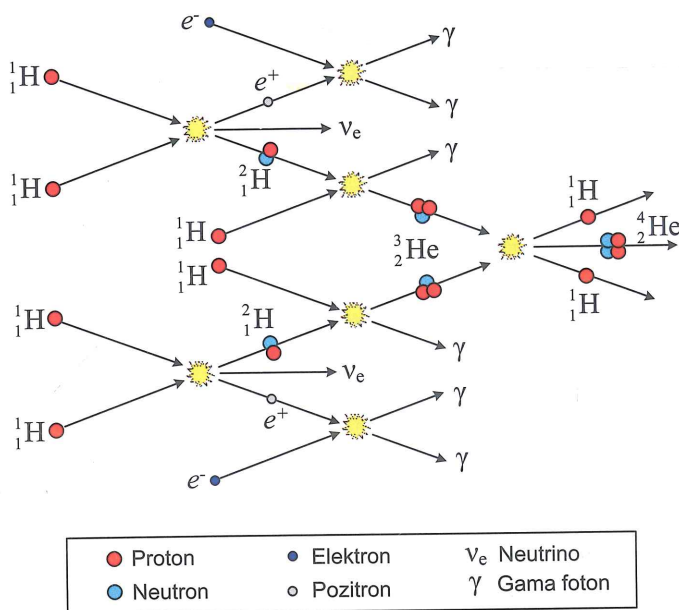
Slika 2.1. Struktura Sunca
(izvor John Willeys & Sons, 1999. godine)

Tabela 2.1: Osnovni podaci o Suncu

Masa	$m_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Prečnik	$D_S = 1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$
Površinska temperatura	$T = 5780 \text{ }^\circ\text{C}$
Snaga zračenja	$P_S = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$
Snaga zračenja po jedinici površine	$P_A = 63,2 \text{ MW/m}^2$
Rastojanje od Sunca do Zemlje	$r_{SZ} = (147 \div 152) \cdot 10^6 \text{ km}$

Zbog visoke temperature u jezgru Sunca materija se nalazi u stanju plazme. Plazma se može opisati kao visokotemperaturni gas sa elektronima i jonizovanim atomima. Visoka temperatura u jezgru Sunca obezbeđuje velike brzine čestica, a velika gustina materije obezbeđuje veću verovatnoću za njihovo sudaranje i odvijanje reakcije fuzije. Osnovne fuzione reakcije u jezgru Sunca se svode na spajanje 4 jezgra vodonika (4 protona) u jezgro helijuma, pri čemu se oslobađaju subatomske čestice i energija u obliku gama-zračenja. Ove reakcije se odvijaju na račun defekta (gubitka) mase, što znači da se smanjuje masa Sunca na račun energije koja se emituje. Defekt mase se objašnjava promenom energije veze jezgra atoma. Reakcije fuzije u jezgru Sunca se odvijaju po takozvanom proton-protonskom principu. U prvoj fazi ciklusa reaguju dva protona i stvaraju deuteron ^2H , pozitron i neutrino, uz oslobađanje energije. Deuteron sadrži jedan proton i jedan neutron i predstavlja jezgro atoma deuterijuma (teškog

vodonika). Deuteron zatim reaguje sa jednim protonom gradeći izotop helijuma ${}^3_2\text{He}$ (jezgro sa dva protona i jednim neutronom), pri čemu se oslobađa energija u vidu γ zračenja. U poslednjoj fazi ovog ciklusa reaguju dva izotopa helijuma ${}^3_2\text{He}$ i grade jezgro helijuma ${}^4_2\text{He}$ (koji se naziva α čestica), uz oslobađanje dva protona. Reakcija fuzije po proton-protonskom principu je prikazana na slici 2.2.



Slika 2.2. Reakcija fuzije po proton-protonskom principu

Tri opisane faze reakcije fuzije se mogu predstaviti sledećim jednačinama:

$$2 {}^1_1\text{H} = {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e \quad (2.1)$$

$${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} = {}^3_2\text{He} + \gamma \quad (2.2)$$

$${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} = {}^4_2\text{He} + 2 {}^1_1\text{H} \quad (2.3)$$

gde su ${}^1_1\text{H}$ jezgro vodonika (1 proton), ${}^2_1\text{H}$ deuterom, ${}^3_2\text{He}$ izotop helijuma, ${}^4_2\text{He}$ jezgro helijuma, e^+ pozitron, ν_e neutrino i γ gama foton.

U navedenim reakcijama se oslobađa energija. Međutim, na ukupan bilans energije utiču i elektroni. U toku procesa fuzije, dva od četiri vodonikova elektrona ulaze u strukturu atoma helijuma. Preostala dva elektrona reaguju sa pozitronima koji nastaju u prvoj fazi reakcije fuzije, tako da u procesu anihilacije (poništanja) nastaju dva γ fotona. Reakcija između elektrona i pozitrona u kojoj se oslobađa dodatna energija može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$e^{-} + e^{+} = 2\gamma \quad (2.4)$$

Sa stanovišta energetskog bilansa, ukupna reakcija fuzije po proton-protonskom principu se može prikazati sledećim izrazom:



U reakciji nisu uzeta u obzir dva protona koji reaguju sa deuteronom, s obzirom da se u konačnom rezultatu reakcije pored helijuma $\text{}^4_2\text{He}$ takođe dobijaju dva protona.

Na osnovu razlike masa atomskih čestica pre i nakon reakcije može se odrediti defekt mase pri reakciji fuzije po proton-protonskom principu:

$$\Delta m = 4m(\text{}^1_1\text{H}) + 2m(e^{-}) - m(\text{}^4_2\text{He}) \quad (2.6)$$

gde su $m(\text{}^1_1\text{H})$ masa protona, $m(e^{-})$ masa elektrona i $m(\text{}^4_2\text{He})$ masa jezgra helijuma.

U prethodnom izrazu za izračunavanje defekta mase zanemaruje se masa neutrina, pošto je energija koju oni odnose samo oko 2%. Ove čestice nesmetano prolaze kroz sve slojeve Sunca i odlaze u svemir, a mogu se detektovati i na Zemlji. U tabeli 2.2 su date mase čestica koje su potrebne za izračunavanje defekta mase. Sa u je označena unifikovana atomska masa koja se koristi za izražavanje masa atoma i molekula, a definiše se kao 1/12 mase atoma ugljenika.

Tabela 2.2. Mase čestica i nuklida ($1u = 1,660565 \cdot 10^{-27}$ kg)

Čestica ili nuklid	Masa
elektron	0,00054858u
proton	1,00727647u
neutron	1,008664923u
vodonik	1,007825032u
helijum	4,002603250u
jezgro helijuma	4,0015060833u

Defekt mase pri pretvaranju vodonika u helijum je:

$$\Delta m = 4 \cdot 1,00727647u + 2 \cdot 0,00054858u - 4,0015060833u = 0.0286969567u \quad (2.7)$$

odnosno:

$$\Delta m = 4,765 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \quad (2.8)$$

Energija koja se oslobađa pri fuziji određuje se korišćenjem poznate *Einstein*-ove relacije:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 4,283 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 26,73 \text{ MeV} \quad (2.9)$$

gde je brzina svetlosti $c = 299792458 \text{ m/s}$ i $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Naizgled, radi se o maloj količini energije, međutim, zbog enormno velikog broja atoma koji učestvuju u nuklearnoj fuziji, oslobađaju se ogromne količine energije.

Energija koja je oslobođena u jezgru Sunca prenosi se ka spoljašnjim slojevima. Sloj neposredno iznad jezgra je zona radijacije u kojoj se energija prenosi zračenjem (radijacijom). Ova zona se prostire do 70% poluprečnika Sunca. Zbog gustine materije u radijacionoj zoni γ -zranci (fotoni) se često sudaraju sa atomima ili česticama i dolazi do njihove apsorpcije, tako da prenos energije kroz ovu zonu traje hiljadama godina. Temperatura u zoni radijacije je oko $5 \cdot 10^6$ K. U zoni radijacije γ -zranci zbog interakcije sa materijom gube deo energije i emituju se sa manjom energijom (kao γ -zranci ili x -zranci) dalje u zonu konvekcije. U zoni konvekcije materija je dovoljno hladna za nastajanje molekulskih i jonskih veza. U ovoj zoni se javlja turbulentno kretanje gasova i prenošenje energije procesom konvekcije do fotosfere, vidljive površine Sunca.

Sunčeva atmosfera ili spoljašnje Sunce se sastoji od fotosfere, hromosfere i korone. Fotosfera predstavlja najniži i najgušći sloj atmosfere, gasovi u njoj postaju mnogo gušći čineći je neprozirnom. Sunce je kompletno sastavljeno od gasova u stanju plazme i nema čvrstu površinu, tako da se obično fotosfera navodi kao površina Sunca. Temperatura fotosfere je oko $5 \cdot 10^3$ K. Zbog vrelih gasova koji izbijaju iz unutrašnjosti na površinu, površina Sunca izgleda kao da je granulaste strukture. Granule su prečnika oko 1000 km i u stalnom su pokretu (poput ključanja vode). Iznad fotosfere se nalazi sloj gasa debljine oko $2 \cdot 10^3$ km koji se naziva hromosfera. Kroz ovaj sloj energija se prenosi putem radijacije, ali postoje i delovi u kojima se energija prenosi putem konvekcije. Sa povećanjem visine gustina atmosfere opada, ali se povećava temperatura. U hromosferi se javljaju izbijanja usijanih gasova koja su poznata kao prominencije i Sunčeve baklje. Najviši sloj Sunčeve atmosfere je korona. Oblik korone je uglavnom određen Sunčevim magnetskim poljem koje formira dinamičke petlje i lukove. Korona dalje emituje energiju koja dolazi iz unutrašnjosti u vidu zračenja različitih talasnih dužina, od radio talasa do x -zraka. Spoljašnja površina Sunca ne rotira kao čvrsto telo, brzina rotacije je veća na ekvatoru nego u blizini polova. Zbog toga dolazi do erupcije gasa sa površine (prominencije ili protuberance) i do iskrivljenja linija magnetskog polja, odnosno do stvaranja Sunčevih pega. Sunčeve pege su privremene pojave na površini Sunca u obliku tamnih tačaka u odnosu na okolna područja. Period pojavljivanja Sunčevih pega je oko 11 godina, a trajanje im je nekoliko nedelja. Zbog svoje povezanosti sa ostalim aktivnostima na Suncu, praćenje Sunčevih pega ima primenu u prognozi stanja Zemljine jonosfere, što je od značaja za prenos radio i satelitskih signala. Iz gornjih slojeva Sunčeva atmosfere izbacuje se velikom brzinom elektroni i protoni koji čine Sunčev vetar. Gustina sunčevog vetra je mala, ali ova pojava ima vidljiv efekat na Zemlji. Izbačeni elektroni i protoni se usmeravaju ka polovima Zemlje i u sudaru sa česticama u gornjim slojevima Zemljinoj atmosfere izazivaju jonizaciju i pojavu polarne svetlosti (aure).

Ukupni gubitak mase Sunca u procesu fuzije iznosi $dm_s/dt = 4,28 \cdot 10^9$ kg/s, što Suncu daje snagu zračenja koja iznosi:

$$P_s = \frac{dm_s}{dt} c^2 = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (2.10)$$

Sunce oslobodi godišnje u okolni prostor energiju u iznosu od:

$$E_s = 3,37 \cdot 10^{30} \text{ Wh/god} \quad (2.11)$$

Od ove količine energije samo jedan mali deo dospeva do Zemlje. Zemlja i njena atmosfera prihvataju od Sunca približno:

$$E_z = 10^{21} \text{ Wh/god} \quad (2.12)$$

Ipak, ova energije je više nego dovoljna da podmiri sve potrebe za energijom na Zemlji. Potrošnja primarne energije na Zemlji iznosi približno 10^{17} Wh/god, tako da je Sunčeva energija koja dospeva na Zemlju 10000 puta od energetske rezervi fosilnih i nuklearnih goriva na Zemlji.

2.2 Elektromagnetsko zračenje Sunca

Energija Sunca se prenosi kroz svemir u vidu elektromagnetskog zračenja. Između nebeskih tela u svemiru vlada vakuum, tako da se elektromagnetsko zračenje prostire brzinom svetlosti, bez slabljenja i rasejanja. Elektromagnetsko zračenje je kombinacija oscilujućeg električnog i magnetskog polja koja putuju kroz prostor u obliku međusobno normalnih talasa. Elektromagnetski talasi se karakterišu talasnom dužinom λ i frekvencijom ν . Ove dve veličine su povezane sa brzinom svetlosti c prema sledećoj relaciji:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.13)$$

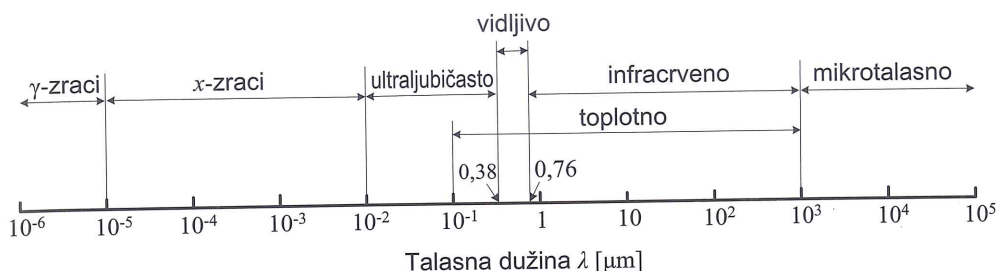
Korišćenje frekvencije je pogodnije jer se ona ne menja prilikom prolaska zračenja iz jedne u drugu sredinu.

Elektromagnetsko zračenje se može interpretirati kao talas ili čestica. Čestice koje kvantifikuju elektromagnetsko zračenje su fotoni. Snaga elektromagnetskog zračenja može biti samo celobrojni umnožak snage jednog kvanta, odnosno fotona. Prema kvantnoj teoriji, energija jednog fotona je jednaka:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.14)$$

gde su: E [J] energija fotona, $h=6.624 \cdot 10^{-34}$ Js Planck-ova konstanta, ν [Hz] frekvencija kvanta, $c=3 \cdot 10^8$ m/s brzina svetlosti, λ [m] talasna dužina zračenja.

Spektar elektromagnetskog zračenja obuhvata γ zrake, x zrake, ultraljubičasto zračenje, svetlost, infracrveno zračenje, radio talase i radarske talase. Spektar elektromagnetskog zračenja je prikazan na slici 2.3.



Slika 2.3. Spektar elektromagnetskog zračenja

Toplotno zračenje pripada opsegu talasnih dužina od 0,1 do 1000 μm , a obuhvata infracrveno, vidljivo i deo ultraljubičastog zračenja. Snaga toplotnog zračenja zavisi od talasne dužine zračenja. Toplotno zračenje ima veći intenzitet pri manjim talasnim dužinama. Opseg talasnih dužina toplotnog zračenja se poklapa sa opsegom talasnih dužina Sunčevog zračenja na površini Zemljine atmosfere.

2.2.1 Osnovne veličine koje karakterišu elektromagnetsko zračenje Sunca

Osnovna fizička veličina koja se definiše u oblasti zračenja i radiometrije je gustina snage zračenja. Ova veličina predstavlja snagu zračenja (ili radijacioni fluks) po jedinici površine uključujući sve talasne dužine zračenja:

$$P_A = \frac{dP}{dA} \quad (2.15)$$

gde je dP elementarna snaga zračenja, a dA elementarna površina.

Gustina snage zračenja se izražava u W/m^2 . U slučaju kada se radi o izvoru zračenja, za gustinu snage zračenja se koristi termin *emitansa*. Emitansa se definiše kao snaga koju zrači izvor sa jedinice svoje površine u svim pravcima uključujući sve talasne dužine zračenja. Uobičajena oznaka za emitansu je M .

U slučaju kada se radi o snazi upadnog zračenja po jedinici površine iz svih pravaca uključujući sve talasne dužine zračenja, koristi se termin *iradijansa*. Uobičajena oznaka za iradijansu je E . Za ovu veličinu se često koristi i naziv *iradijacija* i oznaka I na osnovu izraza *irradiation* koji se koristi američkog stručnoj literaturi.

S obzirom da snaga zračenja zavisi od talasne dužine zračenja, definiše se spektralna gustina snage zračenja. Ova veličina predstavlja snagu zračenja po jedinici površine pri određenoj talasnoj dužini λ :

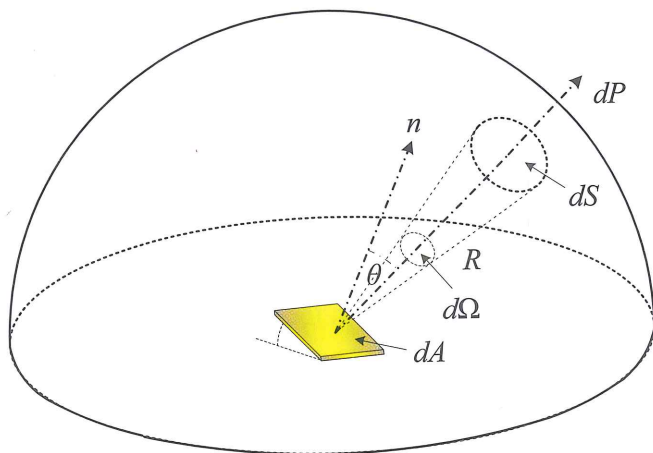
$$P_{A\lambda} = \frac{dP_A}{d\lambda} \quad (2.16)$$

Ako se spektralna gustina snage zračenja definiše za izvor zračenja, onda se radi o *spektralnoj emitansi*. U slučaju da se spektralna gustina snage zračenja definiše za telo ili površinu koja prihvata zračenje, onda se radi o *spektralnoj iradijansi*.

U mnogim praktičnim primenama potrebno je odrediti gustinu snage zračenja u određenom pravcu. Veličina koja se definiše u tu svrhu naziva se *radijansa*. Ova veličina se definiše preko elementarnog prostornog ugla $d\Omega$ koji predstavlja odnos elementarne površine dS na sferi i kvadrata poluprečnika sfere R :

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} \quad (2.17)$$

Prostorni ugao se izražava u steradianima (sr). Elementarni prostorni ugao $d\Omega$ je prikazan na slici 2.4. Jasno je da ukupnoj površini sfere odgovara vrednost prostornog ugla koja je jednaka 4π .



Slika 2.4. Izvor zračenja i elementarni prostorni ugao $d\Omega$

Po definiciji, radijansa L predstavlja snagu zračenja u određenom pravcu po jedinici prostornog ugla i po jedinici površine koja je normalna na osu prostornog ugla:

$$L = \frac{dP_A}{d\Omega \cos \theta} = \frac{\partial^2 P}{\partial \Omega \partial A \cos \theta} \quad (2.18)$$

gde je θ ugao između normale na površinu i ose prostornog ugla $d\Omega$. Radijansa se izražava u $W/(m^2 \text{ sr})$.

Radijansa se obično koristi za određivanje gustine snage zračenja izvora u određenom pravcu i u tom slučaju se ona naziva *sjajnost* izvora zračenja. Radijansa se može koristiti i kada telo ili površinu prihvata zračenje, na primer ako se radi o incidentnom sunčevom zračenju na neku površinu.

Ako izvor emituje zračenje ravnomerno u svim pravcima, ili ako zračenje dospeva na neku površinu ravnomerno iz svih pravaca, postoji sledeća veza između gustine snage zračenja (emitanse ili iradijanse) i radijanse:

Sunčevog zračenja po jedinici površine Sunca, odnosno emitansa. Na sličan način, ako se spektralna gustina snage zračenja $P_{A,\lambda}$ definiše za telo ili površinu koja prihvata zračenje, onda se integraljenjem spektralne gustine snage zračenja prema izrazu (2.25) dobija *iradijansa*, odnosno ukupna snaga zračenja po jedinici površine.

Koristeći izraz za spektralnu gustinu snage zračenja prema *Planck*-ovom zakonu, izraz za snagu zračenja crnog tela po jedinici površine postaje:

$$P_A = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 \quad (2.26)$$

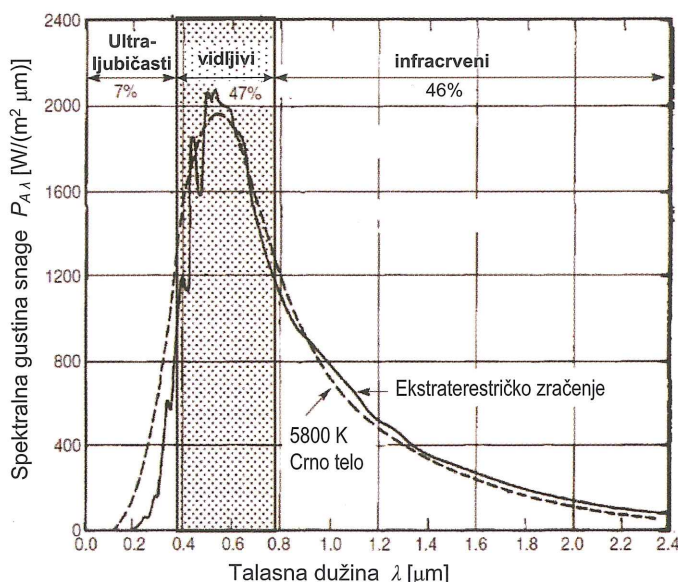
Prethodni izraz predstavlja *Stefan-Boltzmann*-ov zakon zračenja crnog tela prema kome je gustina snage zračenja crnog tela srazmerna četvrtom stepenu njegove temperature:

$$P_A = \sigma T^4 \quad (2.27)$$

gde je $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2\text{K}^4\text{)}$ i predstavlja *Stefan-Boltzmann*-ovu konstantu.

2.2.3 Zračenje Sunca na površini Zemljine atmosfere

Na slici 2.7 su prikazane spektralne gustine snage zračenja dobijene na osnovu merenja ekstraterestričkog zračenja i na osnovu proračuna korišćenjem *Planck*-ovog zakona zračenja koji važi za apsolutno crno telo.



Slika 2.7. Spektar ekstraterestričkog zračenja Sunca

Spektralna gustina snage zračenja Sunca po raspodeli je približno jednaka zračenju apsolutnog crnog tela, tako da se može usvojiti da Sunce zrači približno kao apsolutno crno telo. Na osnovu spektra ekstraterestričkog zračenja Sunca utvrđeno je da se maksimum zračenja Sunca javlja pri talasnoj dužini od oko $0,5015 \mu\text{m}$, odakle se primenom *Wein*-og zakona pomeranja (2.23) dobija da je temperatura površine Sunca (fotosfere) posmatranog kao apsolutno crno tela: $T=2898/0,5015 = 5778,7 \text{ K}$.

Spektar Sunčevog zračenja obuhvata opseg talasnih dužina od $0,1 \mu\text{m}$ do $10^3 \mu\text{m}$ i može se podeliti na ultraljubičasti deo spektra (7%), vidljivi deo spektra (47%) i infracrveni deo spektra (46%). Vidljivi deo spektra je u opsegu talasnih dužina od $0,38 \mu\text{m}$ do $0,78 \mu\text{m}$.

Prema izrazu (2.10) snaga zračenja Sunca zbog defekta mase iznosi $P=3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Snaga zračenja Sunca po jedinici površine (emitansa) na površini Sunca iznosi:

$$P_A(r_s) = \frac{P_s}{4\pi r_s^2} = \frac{P_s}{\pi D_s^2} = 63,2 \text{ MW/m}^2 \quad (2.28)$$

gde je r_s poluprečnik Sunca, a D_s prečnik Sunca, $D_s=2r_s=1392520 \text{ km}$.

Do iste vrednosti za snagu zračenja Sunca po jedinici površine se može doći i na osnovu *Stefan-Boltzmann*-ovog zakona zračenja crnog tela čija je temperatura 5779 K :

$$P_A(r_s) = \sigma T^4 = 63,2 \text{ MW/m}^2 \quad (2.29)$$

Zračenje Sunca se ravnomerno emituje u svim pravcima u svemiru. U prostoru između nebeskih tela vlada visoki vakuum, tako da se Sunčevo zračenje prostire bez slabljenja i resejanja. Zbog toga se snaga zračenja po jedinici površine (iradijansa) na površini Zemljine atmosfere može se odrediti na osnovu izraza za gustinu snage zračenja na Suncu $P_A(r_s)$ i na rastojanju od Sunca do Zemlje $P_A(r_{sz})$:

$$P_A(r_s) = \frac{P_s}{4\pi r_s^2} \quad (2.30)$$

$$P_A(r_{sz}) = \frac{P_s}{4\pi r_{sz}^2} \quad (2.31)$$

Znajući vrednost za prečnik Sunca ($D_s=2r_s=1392520 \text{ km}$) i srednje rastojanje između Zemlje i Sunca ($r_{sz} \approx 1,495 \cdot 10^8 \text{ km}$) može se lako na osnovu prethodnih izraza odrediti snaga zračenja Sunca na površini Zemljine atmosfere ili takozvana ekstraterestrička iradijansa:

$$P_A(r_{sz}) = P_A(r_s) \cdot \frac{r_s^2}{r_{sz}^2} = 1370,8 \text{ W/m}^2 \quad (2.32)$$

S obzirom da se Zemlja kreće oko Sunca po eliptičnoj putanji, rastojanje od Sunca do Zemlje se menja u toku godine, tako da se menja i vrednost ekstraterestričke iradijanse. Promene iradijanse u toku godine su relativno male (oko $\pm 6 \text{ W/m}^2$) i obično

se zanemaruju pri proračunima solarnog potencijala na Zemlji. Na osnovu merenja utvrđeno je da srednja vrednost iradijancije na površini Zemljine atmosfere iznosi 1367 W/m^2 . Ova vrednost predstavlja solarnu konstantu i biće označena sa I_{SC} .

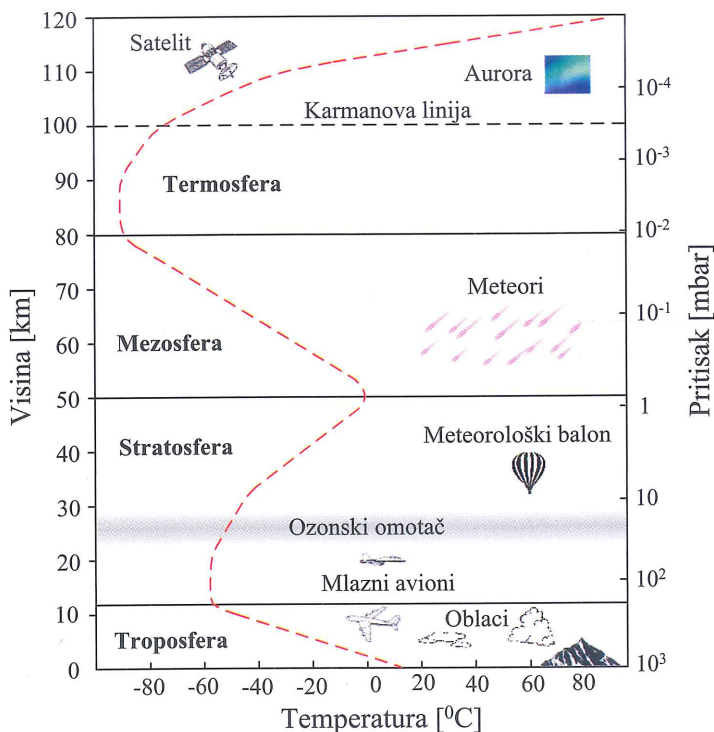
2.3 Elektromagnetsko zračenje Sunca na Zemlji

Elektromagnetsko zračenje Sunca pri prolasku kroz Zemljinu atmosferu slabi, a spektar elektromagnetskog zračenja se izobličuje zbog toga što Zemljina atmosfera različito propušta zračenje različitih talasnih dužina. U Zemljinoj atmosferi postoje gasovi i čestice koje vrše apsorpciju i rasejanje Sunčevog zračenja. Apsorpcija je proces transformacije elektromagnetskog zračenja u unutrašnju energiju atoma ili molekula na koje nailaze fotoni. Rasejanje Sunčevog zračenja predstavlja promenu smera elektromagnetskog zračenja pri nailasku na čestice u atmosferi.

2.3.1 Zemljina atmosfera

Zemljina atmosfera je gasoviti omotač oko Zemlje koji rotira zajedno sa Zemljom. Atmosfera nema tačno definisanu gornju granicu, već se njena gustina postepeno smanjuje prema svemiru. Često se kao granica atmosfere i svemira uzima Karmanova linija na visini od 100 km iznad površine Zemlje. Iznad ove granice vazduh je toliko razređen da je aerodinamičan let nemoguć. Atmosfera štiti Zemlju od kosmičkog zračenja i udara meteora. Zahvaljujući atmosferi i efektu staklene bašte, prosečna temperatura na Zemlji je oko 15° , što omogućava život na Zemlji.

Atmosfera se prema temperaturi i hemijskom sastavu deli na pet slojeva: troposfera ($0\div 12 \text{ km}$), stratosfera ($12\div 50 \text{ km}$), mezosfera ($50\div 80 \text{ km}$), termosfera ($80\div 700 \text{ km}$) i egzosfera ($700\div 3000 \text{ km}$). Troposfera je najniži sloj atmosfere i sadrži oko 80% njene mase. U troposferi se nalaze oblaci i u njoj nastaje većina meteoroloških pojava. Sunčevi zraci zagrevaju površinu zemlje, a toplota se prenosi na niže delove troposfere. Sa porastom visine temperatura u troposferi linearno opada sa gradijentom od približno $-0,6^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$, tako da u njenom gornjem delu iznosi oko -60°C . U stratosferi temperatura ponovo raste i dostiže vrednost oko -10°C . U stratosferi se nalazi ozonski sloj koji je važan za opstanak živog sveta na zemlji jer filtrira ultraljubičasto zračenje iz svemira. U mezosferi temperatura pada do -85°C i to je najhladnija oblast u atmosferi. U termosferi temperatura naglo raste sa visinom usled zagrevanja od strane Sunca, ali dosta varira u zavisnosti od doba dana, stepena solarne aktivnosti i geografske širine. Egzosfera predstavlja granicu sa međuplanetarnim prostorom. U egzosferi su glavni sastojci vodonik i helijum, a njihovi atomi i molekuli su retki i mogu lako da odu u kosmos. Pored navedenih slojeva, treba navesti i jonosferu kao sloj koji se prostire na visini od 50 km do 550 km i obuhvata mezosferu i veliki deo termosfere. U jonosferi dolazi do jonizacije atoma i molekula vazduha, uglavnom usled delovanja Sunčevog zračenja. Količina jona u jonosferi je dovoljno velika da utiče na prostiranje radio talasa. Na slici 2.8 su prikazani slojevi Zemljine atmosfere sa promenama temperature i pritiska u njima.



Slika 2.8. Struktura Zemljine atmosfere

Kada se govori o sastavu atmosfere misli se na stalne gasove koji se nalaze u određenom međusobnom odnosu. Zastupljenost ovih gasova u jedinici zapremine je: 78,08% azot, 20,95% kiseonik, 0,93% argona, 0,03% ugljen-dioksid i u malim količinama atmosfera sadrži: neon, helijum, metan, kripton, vodonik itd. U troposferi, stratosferi i mezosferi mehanizmi mešanja vazduha održavaju konstantan odnos dva najzastupljenija gasa u atmosferi, azota i kiseonika. Na visini od 100 km odnos azota i kiseonika se menja i postaje funkcija visine. Ugljen-dioksid je važan gas staklene bašte i uglavnom je zastupljen u gornjem sloju troposfere. Ozon se uglavnom nalazi u stratosferi, na visini od 20÷30 km. Pored navedenih gasova, u atmosferi se nalaze aerosoli i vodena para.

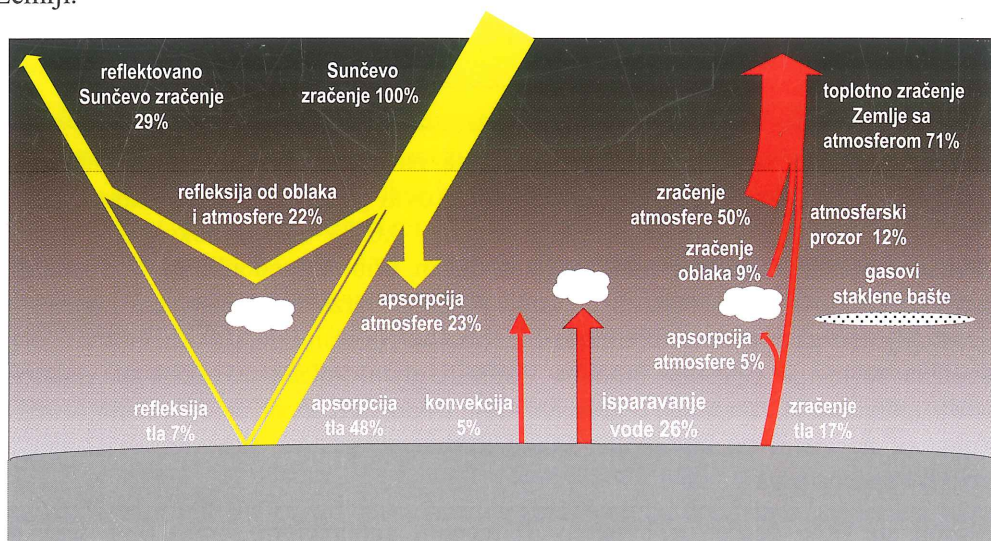
Aerosoli su sitne čestice u čvrstom ili tečnom agregatnom stanju koje čine da atmosfera bude zamućena i vlažna. Količinski i zapreminski udeo aerosoli u vazduhu je promenljiv. Aerosoli mogu biti prirodnog porekla, kao što su čestice prašine, vulkanski pepeo, čađ od šumskih i stepskih požara, čestice morske soli, cvetni polen, itd. Aerosoli mogu nastati i veštačkim putem sagorevanjem fosilnih goriva u termoelektranama i za potrebe grejanja, zatim u mnogobrojnim industrijskim procesima, iz izduvnih gasova automobila, itd. Aerosoli mogu nastati i kada određeni gasovi (sumpor-dioksid, azotovi oksidi ili nemetanski organski gasovi i pare) reaguju sa drugim jedinjenjima u vazduhu i formiraju isparljive čestice.

U Zemljinoj atmosferi uvek ima vodene pare, ali je njen zapreminski udeo najviše 4%. Najveći mogući udeo zavisi od temperature vazduha, a vazduh je zasićen vodenom parom ako je postignut ravnotežni pritisak vodene pare. Odnos stvarnog i ravnotežnog pritiska, izražen u procentima, naziva se relativna vlažnost (0 % – potpuno suv vazduh, 100 % – zasićen vazduh). Vodena para je važan sastojak u regulisanju toplotnog balansa atmosfere. Ona apsorbuje infracrveno zračenje Zemlje i atmosfere, a oslobađanje toplote pri kondenzaciji i vezivanje toplote pri isparavanju vode takođe utiču na vremenske procese i klimatske prilike.

2.3.2 Bilans energije Sunčevog zračenja na Zemlji

Određivanje tokova energije Sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu je važna oblast u istraživanju klimatskih promena. Postoje različiti načini procene tokova energije u atmosferi sa većom ili manjom nesigurnošću. Procene se vrše na osnovu satelitskih merenja, na osnovu osmatranja sa Zemlje i proračunom na osnovu odgovarajućih modela.

Zemlja prihvata energiju Sunčevog zračenja koja dolazi iz svemira, ali takođe i zrači u svemir toplotnu energiju sa površine i iz donjih slojeva atmosfere. Da bi temperatura na Zemlji bila stabilna, potrebno je da energija koju Zemlja prihvata bude jednaka energiji koju emituje. Na slici 2.9 je prikazan bilans energije Sunčevog zračenja na Zemlji.



Slika 2.9. Bilans energije Sunčevog zračenja na Zemlji

Na osnovu satelitskih merenja, oko 29 % Sunčevog zračenja koje dospeva na gornji sloj atmosfere se vraća nazad u svemir zbog refleksije od oblaka, atmosferskih čestica ili od ravnih površina na Zemlji kao što su površine pod ledom i snegom. Ovo zračenje nema uticaja na Zemljin klimatološki sistem. Oko 23 % dolaznog Sunčevog zračenja iz svemira apsorbuje vodena para u atmosferi, aerosoli i ozon, a 48 % prolazi

kroz atmosferu i apsorbuje se na površini Zemlje. Ukupno, Zemlja sa atmosferom apsorbuje oko 71 % dolazećeg Sunčevog zračenja.

Usled apsorpcije Sunčevog zračenja dolazi do zagrevanja Zemljine površine i emitovanja infracrvenog zračenja sa površine u atmosferu. Ovim prirodnim mehanizmom hlađenja Zemlje temperatura na Zemlji se održava u određenim granicama. Energija koja se emituje je srazmerna četvrtom stepenu temperature, tako da sa relativnim malim promenama temperature površine Zemlje dolazi do značajne promene toplote koja se emituje u svemir u cilju regulisanja temperature na površini Zemlje. Zemljina površina apsorbuje 48 % energije Sunčevog zračenja, ali se 17 % kao infracrveno zračenje vraća u atmosferu. U atmosferi se zadržava 5 % energije, a 12 % prolazi kroz atmosferu. Osim zračenja Zemljine površine, postoje još dva načina prenošenja toplote sa površine Zemlje u atmosferu: konvekcijom (strujanjem) se prenosi 5 % energije, a isparavanjem vode 26 %. Atmosfera prihvata ukupno 59 % energije Sunčevog zračenja: 23 % energije dolaznog zračenja i 36 % energije u vidu energije sa površine Zemlje (infracrveno zračenje, konvekcija i isparavanje vode). Ova energija, zajedno sa prolaskom energije infracrvenog zračenja sa površine Zemlje kroz atmosferu, predstavlja energiju koju Zemlja vraća u svemir i ona iznosi 71 % dolazne energije Sunčevog zračenja. Ako se doda još energija reflektovanog Sunčevog zračenja od atmosfere i ravnih površina na Zemlji, dobija se ukupno 100 %, što je jednako energiji Sunčevog zračenja koja dospeva na gornji sloj atmosfere.

2.3.3 Apsorpcija zračenja u atmosferi

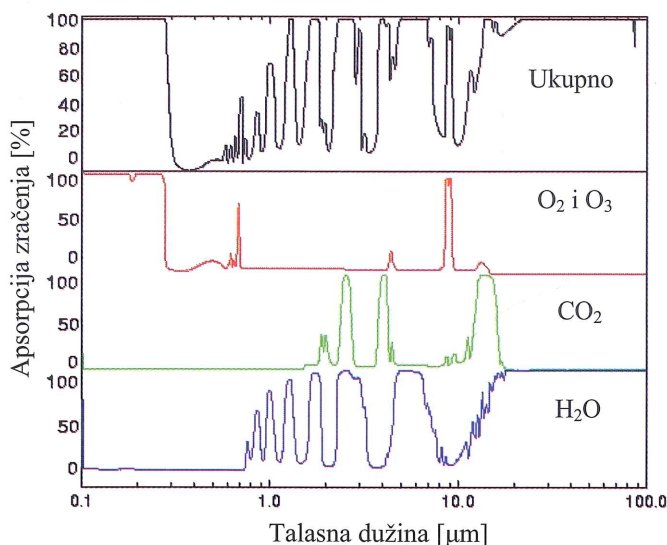
Sunčevo zračenje na površini Zemlje je manje od ekstraterestričkog zračenja zbog uticaja atmosfere na slabljenje zračenja. Jedan deo zračenja se reflektuje od oblaka i čestica u atmosferi. U atmosferi se takođe vrši apsorpcija i rasejanje Sunčevog zračenja.

Apsorpcija Sunčevog zračenja u atmosferi se najvećim delom vrši od strane vodene pare, ozona i ugljen-dioksida. Apsorpcija se vrši selektivno pri određenim talasnim dužinama svetlosti. Gasovi koji vrše apsorpciju Sunčevog zračenja u atmosferi ostavljaju prozore sa slabim prigušenjem kroz koje zračenje prolazi direktno do površine Zemlje. Postoji prozor u opsegu od 0,32 μm do 1,1 μm koji omogućava: prolaz jednog dela ultraljubičastog zračenja (od 0,32 μm do 0,4 μm), prolaz zračenja u vidljivom delu spektra (od 0,4 μm do 0,7 μm) i prolaz jednog dela infracrvenog zračenja (od 0,7 μm do 1,1 μm). Postoje još dva prozora, infracrveni prozor koji omogućava prolazak infracrvenog zračenja u opsegu talasnih dužina od 8 μm do 14 μm i radio prozor koji omogućava prolazak zračenja u oblasti radio talasa u opsegu talasnih dužina od 1 cm do 11 m.

U ultraljubičastom delu spektra u opsegu talasnih dužina do 0,29 μm praktično samo ozon učestvuje u apsorpciji Sunčevog zračenja. Vodena para i ugljen-dioksid apsorbuju Sunčevo zračenje u infracrvenom delu spektra, iznad 0,7 μm . Molekuli vode vrše jaku apsorpciju pri 1,0, 1,4, 1,8 μm i 2,75 μm . Ugljen-dioksid vrši intenzivnu apsorpciju Sunčevog zračenja pri talasnim dužinama 1,9, 2,7, 4,3 i 15 μm .

Kao posledica apsorpcije dolazi do povećanja unutrašnje energije sastojaka atmosfere i izgleda kao da se atmosfera zbog toga greje. Međutim, treba imati u vidu da isti molekuli i emituju zračenje u infracrvenom delu spektra, tako da se atmosfera i hladi. Upravo su gasovi staklene bašte atmosferski gasovi koji apsorbuju, a zatim i emituju zračenje, pri čemu se održava stalna temperatura na Zemlji, uz manje razlike između dana i noći.

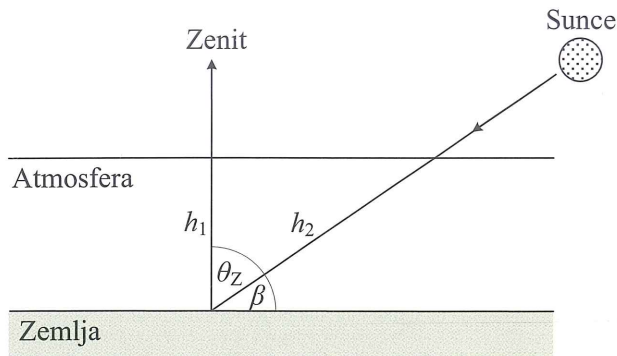
S obzirom da vodena para i ugljen-dioksid apsorbuju uglavnom infracrveno zračenje, oni relativno dobro propuštaju upadno Sunčevo zračenje u vidljivom delu spektra. Kada se količina vodene pare i ugljen-dioksida previše poveća u atmosferi otežava se hlađenje Zemlje, što dovodi do efekta staklene bašte. Na slici 2.10 je prikazan ukupan nivo apsorpcije Sunčevog zračenja u atmosferi, a takođe su prikazani i pojedinačni nivoi apsorpcije od strane kiseonika (O_2), ozona (O_3), ugljen-dioksida (CO_2) i vodene para (H_2O), pri različitim talasnim dužinama.



Slika 2.10. Ukupan nivo apsorpcije Sunčevog zračenja u atmosferi i pojedinačni nivoi apsorpcije od strane kiseonika (O_2), ozona (O_3), ugljen-dioksida (CO_2) i vodene pare (H_2O) pri različitim talasnim dužinama

2.3.4 Rasejanje zračenja u atmosferi

Do slabljenja Sunčevog zračenja pri prolasku kroz Zemljinu atmosferu dolazi i zbog rasejanja zračenja na česticama u atmosferi. Kada elektromagnetsko zračenje pogodi česticu u atmosferi menja se smer prostiranja zračenja zavisno od veličine čestica i talasne dužine zračenja. Čestica koja je pogođena zračenjem sama postaje izvor zračenja. U slučaju molekula upadno zračenje se rasejava difuzno u svim pravcima. U slučaju većih čestica postoji dominantan pravac rasejanja zračenja. Postoje tri vrste



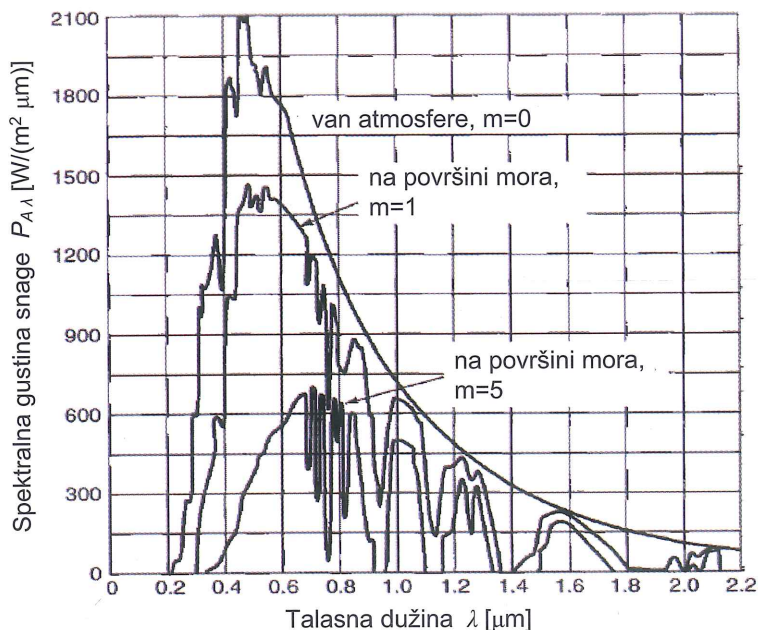
Slika 2.13. Aproksimativni model za određivanje koeficijenta vazdušne mase koji pretpostavlja ravnu površinu Zemlje i atmosfere

Po konvenciji je usvojeno da je koeficijent vazdušne mase van atmosfere 0, što podrazumeva da nema vazdušne mase. Maksimalna vrednost koeficijenta vazdušne mase iznosi 37,6 i dobija se iz izraza (2.40) za vrednost $\beta=0^\circ$. Od vrednosti koeficijenta m zavisi i spektralni sastav sunčevog zračenja na površini zemlje, što utiče i na efikasnost fotonaponske konverzije. Zbog toga je koeficijent vazdušne mase bitan parametar pri definisanju karakteristika komercijalnih fotonaponskih modula. Za standardnu vrednost koeficijenta vazdušne mase pri kojoj se deklariraju naznačene veličine fotonaponskih modula usvojena vrednost je 1,5. Ovoj vrednosti vazdušne mase odgovara altitudni ugao $\beta=41,8^\circ$.

2.3.6 Spektar Sunčevog zračenja na površini Zemlje

Na svom putu do površine Zemlje, sunčeve zrake delom apsorbiraju ozon, ugljen dioksid i vodena para, dok se jedan deo gubi rasejanjem, što dovodi do izobličenja terestričkog (zemaljskog) spektra zračenja i smanjuje snagu zračenja koje stiže do površine Zemlje. U uslovima čiste i suve atmosfere, sunčevo zračenje je oslabljeno stalnim atmosferskim činiocima, molekulima vazduha, gasova i ozona, čiji je sadržaj skoro nepromenljiv. U čistoj i suvoj atmosferi postoji *Rayleigh*-evo rasejanje zračenja na molekulima vazduha. U slučaju zagađenja i vlažne atmosfere, javlja se dodatno slabljenje sunčevog zračenja zbog apsorpcije od strane vodene pare i zbog rasejanja na česticama aerosoli koje postoje u atmosferi. Slabljenje sunčevog zračenja zbog ovih procesa poznato je kao mutnost atmosfere. Na kraju, ne treba zaboraviti da stepen apsorpcije i rasejanja sunčevog zračenja zavisi od debljine atmosfere kroz koju prolaze sunčevi zraci na putu do Zemlje, odnosno od koeficijenta vazdušne mase. Što je duži put sunčevih zraka kroz atmosferu, veće je njihovo slabljenje.

Uzimajući u obzir sve atmosferske uticaje na slabljenje sunčevog zračenja, dobija se spektar elektromagnetskog zračenja Sunca na površini Zemlje. Na slici 2.14 je prikazan spektar ekstraterestričkog zračenja ($m=0$) i terestričkog Sunčevog zračenja za $m=1$ i $m=5$. Uticaj vazdušne mase i sastojaka atmosfere na slabljenje i izobličenje spektra je očigledan.



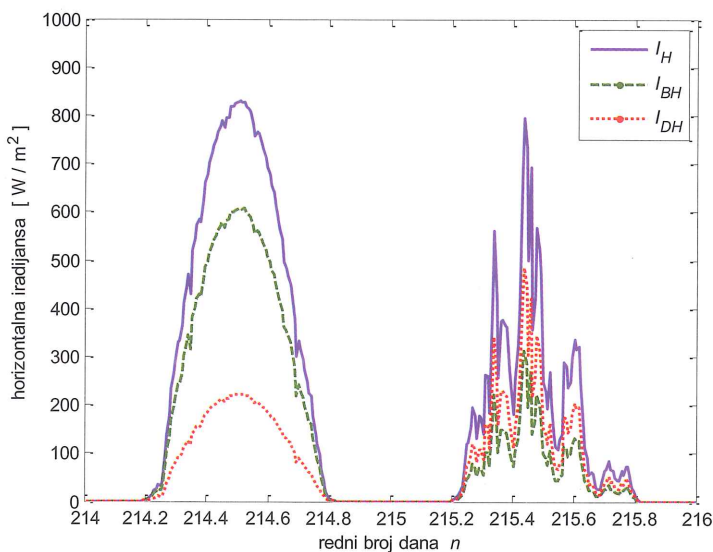
Slika 2.14. Spektri ekstraterestričkog i terestričkog zračenja Sunca (izvor G. Masters "Renewable and Efficient Electric Power Systems" 2004.)

Srednja vrednost ekstraterestričke iradijancije na površini Zemljine atmosfere iznosi $I_{SC}=1367 \text{ W/m}^2$. Treba imati u vidu da je ova vrednost određena u odnosu na površinu koja je normalna na upadno zračenje, tako da solarna konstanta predstavlja prosečnu vrednost maksimalne gustine zračenja na površini Zemljine atmosfere. Međutim, zbog loptastog oblika Zemlje i zbog činjenice da je u svakom trenutku samo polovina Zemljine površine okrenuta ka Suncu, prosečna vrednost iradijancije u gornjim slojevima atmosfere je oko 340 W/m^2 , što iznosi oko 25 % vrednosti solarne konstante. Maksimalna vrednost iradijancije na površini Zemlje se postiže pri čistoj atmosferi i vedrom danu i ona iznosi oko 1000 W/m^2 . Ova vrednosti iradijancije se označava kao "jedno sunce" i pri ovoj vrednosti se deklarišu naznačene veličine fotonaponskih modula.

Ukupno zračenje koje dođe do horizontalne površine Zemlje sastoji se od direktnog i difuznog zračenja. Zračenje koje dostiže zemljinu površinu direktno u liniji sa suncem, naziva se direktno zračenje ili radijacija snopa. Direktno zračenje ima najveću vrednost pri vedrom danu i čistoj atmosferi. Difuzno zračenje se javlja kao posledica rasejanja zračenja u atmosferi. Difuzno zračenje je najveće kada je mutnost atmosfere najveća. Jedan deo zračenja na nagnutu površinu ili solarni kolektor može da stigne usled refleksije od horizontalne površine zemlje i taj deo zračenja se označava kao reflektovano zračenje (ili albedo). Refleksija svetlosti se često povećava u zimskom periodu kada ima snega na tlu, a opada u toku letnjeg perioda kada je tlo

prekriveno zemljom ili travom. Ukupno zračenje na solarni kolektor koji je postavljen pod određenim uglom u odnosu na horizontalnu površinu predstavlja zbir direktnog, difuznog i reflektovanog zračenja.

Na slici 2.15 su prikazane ukupna, direktna i difuzna iradijansa na horizontalnu površinu Zemlje za 3. i 4. avgust 2009. godine u Beogradu. Prvi dan je bio sunčan, a drugi oblačan. Na slici 2.15 se jasno vidi da u toku sunčanog dana direktna iradijansa ima značajno veću vrednost od difuzne iradijansa. Pri oblačnom danu, difuzna iradijansa može da bude veće od direktne iradijansa.



Slika 2.15. Ukupna (I_H), direktna (I_{BH}) i difuzna (I_{DH}) iradijansa na horizontalnoj površini za 3. i 4. avgust 2009. godine u Beogradu

Količina solarne energije koja je apsorbovana na određenoj površini u toku određenog vremena naziva se insolacija i izražava se u kWh/m². Insolacija zavisi od lokacije, vremenskog intervala i prostorne orijentacije površine. Insolacija na horizontalnu površinu Zemlje u toku vremenskog intervala T može da se odredi na osnovu iradijanse na horizontalnu površinu (snage sunčevog zračenja po jedinici površine) na analiziranoj lokaciji:

$$\bar{I}_H = \int_0^T I_H dt \quad (2.42)$$

gde je $\bar{I}_H$ insolacija, a I_H iradijansa na horizontalnu površinu Zemlje (u ovom slučaju, umesto oznake P_A ili E za horizontalnu iradijansu će biti korišćena oznaka I_H).

Insolacija na proizvoljno orijentisani solarni kolektor se izračunava na osnovu iradijanse na kolektor:

$$\bar{I}_C = \int_0^T I_C dt \quad (2.43)$$

gde je $\bar{I}_C$ insolacija, a I_C iradijansa na solarni kolektor koji je orijentisan u prostoru, odnosno proizvoljno nagnut u odnosu horizontalnu površinu (u ovom slučaju, umesto oznake P_A ili E , za iradijansu na kolektor će biti korišćena oznaka I_C).

Insolacija se obično računa na satnom, dnevnom, mesečnom ili godišnjem nivou. Pogodan pokazatelj potencijala solarnog zračenja je srednja dnevna insolacija na mesečnom ili godišnjem nivou koja se dobija kao srednja vrednost dnevnih insolacija za posmatrani period. Obično se kao pokazatelj pri analizi solarnog potencijala koristi godišnja insolacija na horizontalnu površinu i na površinu koja je prostorno orijentisana tako da se dobije maksimum godišnje insolacije. Takva površ se naziva optimalno orijentisana površ sa stanovišta godišnje insolacije. U realnim uslovima promene insolacije, rešavanje integrala definisanih relacijama (2.42) i (2.43) nije analitički moguće, pa se proračun insolacije na karakterističnim površima vrši numeričkim metodama.

Energija Sunčevog zračenja na površini Zemlje zavisi pre svega od trajanja insolacije (broja sunčanih sati u toku dana). Trajanje insolacije u toku dana zavisi od geografske širine i od godišnjeg doba. Razlika između vremena izlaska i vremena zalaska sunca predstavlja vreme trajanja obdanice. Vreme trajanja obdanice za Srbiju iznosi oko 15h leti i oko 9h zimi. Prosečno vreme trajanje insolacije u toku dana može da bude znatno kraće od trajanja obdanice zbog pojave oblaka i magle, ali i zbog stanja atmosfere na posmatranom području (zagađenost). Trajanje insolacije za Beograd iznosi 2071 h godišnje, od toga 70,5% u periodu od aprila do septembra meseca i 29,5% u periodu od oktobra do marta. Vrednost insolacije na određenoj površini zavisi i od toga da li je ta površina postavljene horizontalno, vertikalno ili pod nekim uglom u odnosu na horizontalnu površinu Zemlje.

Prethodna razmatranja ukazuju na veliku promenljivost snage sunčevog zračenja (varijacije usled smene dana i noći i promenljive oblačnosti), što je glavni nedostatak solarne energije kao primarnog izvora. Ipak, ove promene se mogu sa izvesnom tačnošću predvideti jer je poznat ritam pojava (izlazak i zalazak sunca), a poznate su i prosečne oblačnosti u pojedinim mesecima u toku godine, tako da se može proceniti ukupna dozračena energije po jedinici analizirane površine.

Poželjno je poznavati i potencijalnu energiju zračenja, odnosno maksimalnu energiju zračenja pod pretpostavkom da je vreme vedro, a atmosfera suva i čista. Potencijalna energija zračenja zavisi od doba godine, geografske širine i nadmorske visine. Sa smanjenjem nadmorske visine i povećanjem geografske širine potencijalna energija zračenja se smanjuje. Na geografskoj širini od 43 stepena potencijalna energija iznosi oko 2500 kWh/m² godišnje, a na geografskoj širini od 46° oko 2400 kWh/m² godišnje. Stvarna energija zračenja na površini Zemlje je znatno manja od potencijalne energije zračenja zbog oblaka, vlage i zagađenosti atmosfere. U Srbiji ona u proseku iznosi oko 1330 kWh/m² godišnje na horizontalnu površinu i oko 1520 kWh/m² godišnje na površinu postavljena pod optimalnim uglom. Stvarna energija zračenja se smanjuje sa

povećanjem geografske širine, a često i sa povećanjem nadmorske visine zbog nepovoljnijih vremenskih prilika na planinama u toku godine. Na slici 2.16 je prikazana mapa prosečne insolacije na horizontalnu površinu na teritoriji Srbije prema *Solargis* bazi podataka.

Ukupna horizontalna insolacija



Slika 2.16. Mapa prosečne horizontalne insolacije na teritoriji Srbije
(izvor: *Solargis* baza podataka)

U pogledu solarnog potencijala Srbija spada u zemlje sa dobrim solarnim potencijalom. Zbog kontinentalne klime (jako topla i često suva leta, a vetrovite i često snežne zime) sezonske varijacije insolacije su izražene za teritoriju Srbije, gde su novembar, decembar i januar najslabiji, a jul i avgust meseci sa najboljim solarnim potencijalom (oko 3 puta su je veća insolacija tokom letnjeg perioda u odnosu na zimski period).

x'' , y'' i z'' u mesnom ekvatorskom koordinatnom sistemu data je preko matrice transformacije $R_{y''}(\varphi)$:

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = R_{y''}(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Imajući u vidu izraze za pravouglove koordinate, prethodni izraz je oblika:

$$\begin{bmatrix} \cos \beta \cos \phi \\ -\cos \beta \sin \phi \\ \sin \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - L) & 0 & -\sin(90^\circ - L) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90^\circ - L) & 0 & \cos(90^\circ - L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta \cos H \\ -\cos \delta \sin H \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Množenjem matrica dobija se veza između sfernih koordinata u ova dva sistema:

$$\cos \beta \cos \phi = \sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta \quad (3.17)$$

$$\cos \beta \sin \phi = \cos \delta \sin H \quad (3.18)$$

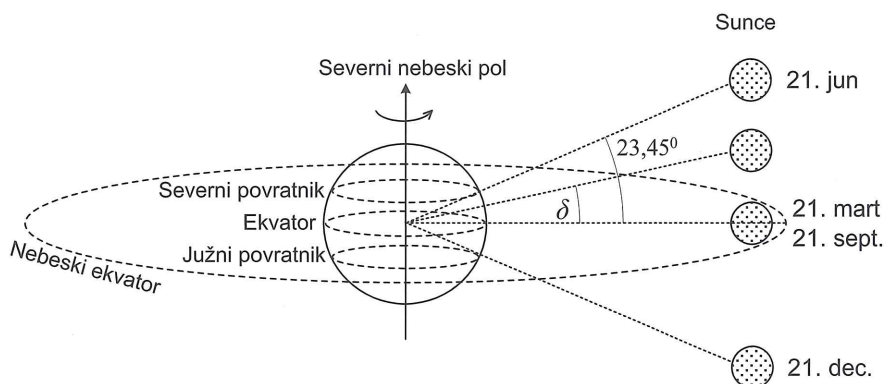
$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (3.19)$$

Za navedene slučajeve transformacija sfernih koordinata iz jednog u drugi sferni koordinatni sistem moguće je definisati i odgovarajuće inverzne transformacije.

3.2 Osnovne veličine koje opisuju položaj sunca na nebeskoj sferi

3.2.1 Ugao deklinacije sunca

Na osnovu mesnog ekvatorskog koordinatnog sistema, može se dati prikaz Zemlje koja rotira oko vertikalne ose i Sunca koje menja svoj ugao deklinacije u toku godine, kao što je prikazano na slici 3.7.



Slika 3.7. Položaj Sunca u odnosu na Zemlju

Sunce se nalazi u ravni ekvatora dva puta godišnje: za vreme prolećne i jesenje ravnodnevnice (ekvinokcijuma). Sunce tada prolazi kroz prolećnu γ tačku (oko 21. marta) i kroz jesenju ω tačku (oko 21. septembra). Takođe se mogu uočiti dve tačke kada je sunce ima najveću daljinu od ravni ekvatora: letnji solsticij (oko 21. juna) i zimski solsticij (oko 21. decembra). Za vreme letnjeg solsticija sunce dostiže zenit na geografskoj širini severnog povratnika, a za vreme zimskog solsticija dostiže zenit na geografskoj širini južnog povratnika. Severni i južni povratnik određuju tropski pojas u kome sunce u svojoj kulminaciji dostiže zenit na svim geografskim širinama. Za geografske širine izvan tropskog pojasa sunce nikada ne dostiže zenit. Solarni kolektori sa fiksiranim položajem na severnog hemisferi se orijentišu ka jugu, a na južnog hemisferi se orijentišu ka severu. U tropskom pojasu optimalni nagibni ugao kolektora u odnosu na horizontalnu površinu ima relativno malu vrednost, a na samom ekvatoru solarni kolektori treba da budu postavljeni horizontalno.

Pri određivanju ugla deklinacije sunca, treba koristiti izraz (3.14) koji je dobijen pri transformaciji ekliptičkog koordinatnog sistema u nebeski ekvatorski koordinatni sistem. Pošto je u ekliptičkom koordinatnom sistemu latituda sunca $\Lambda=0$, izraz za solarnu deklinaciju je:

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \lambda \quad (3.20)$$

Zbog relativno male vrednost za uglove δ i ε , u inženjerskim proračunima se može usvojiti da je $\sin \delta \approx \delta$ i $\sin \varepsilon \approx \varepsilon$. Približan izraz za izračunavanje solarne deklinacije je:

$$\delta \approx \varepsilon \sin \lambda \quad (3.21)$$

Ekliptička longituda sunca λ se precizno određuje na osnovu Keplerove jednačine, a u literaturi se često navode i aproksimativni izrazi. Za inženjerske proračune može se smatrati da se sunce kreće ravnomernom ugaonom brzinom po ekliptici, tako da je:

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{365} \cdot (n - 81) \quad (3.22)$$

gde n označava redni broj dana u godini.

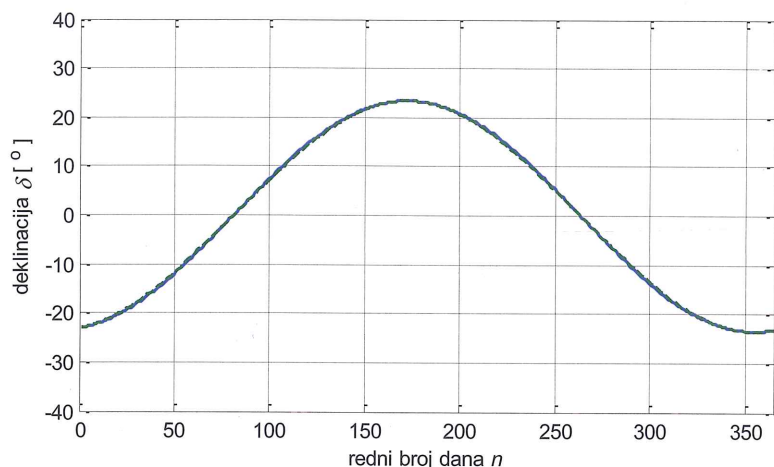
Ekliptička longituda λ se određuje u odnosu na pravac prema γ tački, odnosno prema prolećnoj ravnodnevnicu, a to je 81. dan u godini, tako da se za $n=81$, dobija $\lambda=0$.

Na osnovu (3.21) i (3.22) i imajući u vidu da je $\varepsilon=23,45^\circ$, dobija se približan izraz za izračunavanje solarne deklinacije u stepenima:

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} \cdot (n - 81) \right) \quad (3.23)$$

Promene ugla deklinacije u toku godine izračunate prema tačnom izrazu (3.20) i približnom izrazu (3.23) prikazane su na slici 3.8. Razlike su neznatne i praktično

neprimetne na slici 3.8. Vrednosti n za svaki prvi dan u mesecu su prikazane u tabeli 3.1.



Slika 3.8. Promena ugla deklinacije u funkciji rednog broja dana u toku godine

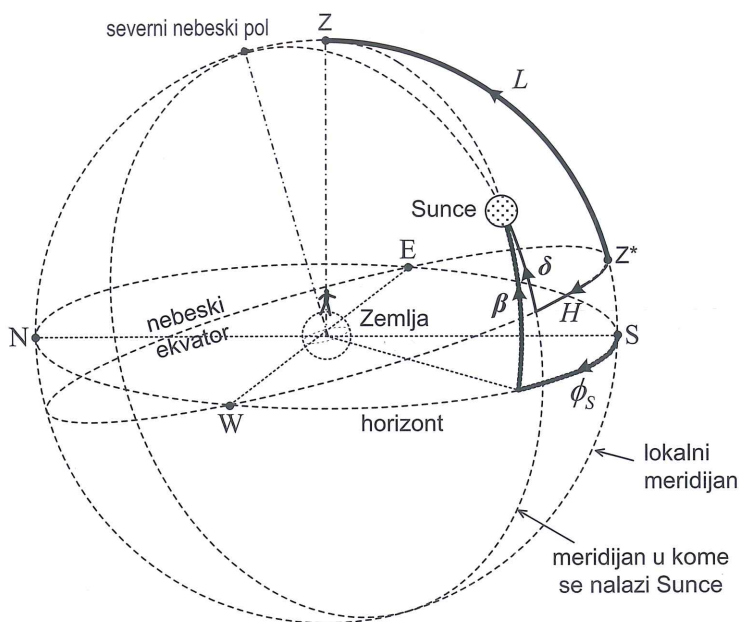
Tabela 3.1. Redni broj dana u godini za svaki prvi dan u mesecu

datum	n	datum	n
1. januar	1	1. jul	182
1. februar	32	1. avgust	213
1. mart	60	1. septembar	244
1. april	91	1. oktobar	274
1. maj	121	1. novembar	305
1. jun	152	1. decembar	335

3.2.2 Altitudni i azimutni ugao sunca

Položaj sunca na nebeskoj sferi u horizontskom koordinatnom sistemu se određuje na osnovu azimutnog ugla ϕ_s i altitudnog ugla β (ugao elevacije). Na slici 3.9 je prikazana putanja sunca na nebeskoj sferi u horizontskom koordinatnom sistemu za geografsku širinu na severnoj Zemljinoj polulopti.

Altitudni ugao sunca β pokazuje visinu sunca u odnosu na horizont. Ako se razmatra putanja sunca samo za vreme trajanja obdanice, altitudni ugao sunca uzima vrednosti od 0^0 (kada je sunce u horizontskoj ravni) do 90^0 (kada je sunce u zenitu). Azimutni ugao sunca ϕ_s se meri u horizontskoj ravni u odnosu na pravac prema jugu i uzima pozitivne vrednosti u pravcu od juga prema istoku i negativne vrednosti u pravcu od juga prema zapadu.



Slika 3.9. Putanja sunca na nebeskoj sferi u horizontskom koordinatnom sistemu

Izrazi za izračunavanje altitudnog i azimutnog ugla sunca se mogu dobiti na osnovu transformacije sfernih koordinata iz mesnog ekvatorskog u horizontski koordinatni sistem:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (3.24)$$

$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \quad (3.25)$$

$$\cos \phi_s = \frac{\sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta}{\cos \beta} \quad (3.26)$$

Jednačina (3.26) se obično izostavlja, ali na osnovu nje se izvodi uslov za određivanje znaka azimutnog ugla, s obzirom da jednačina (3.25) ne govori o tome u kom kvadrantu se nalazi vrednost azimutnog ugla. Naime, u prolećnom i letnjem periodu, u ranim jutarnjim i kasnim večernjim satima, azimutni ugao sunca po apsolutnoj vrednosti može biti veći od 90° , odnosno $\cos \phi_s < 0$. Po definiciji ugla β važi da je $0^\circ \leq |\beta| \leq 90^\circ$, odnosno $\cos \beta \geq 0$, tako da se iz jednačine (3.26) dobija:

$$\cos \phi_s < 0 \Leftrightarrow \sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta < 0 \quad (3.27)$$

odnosno

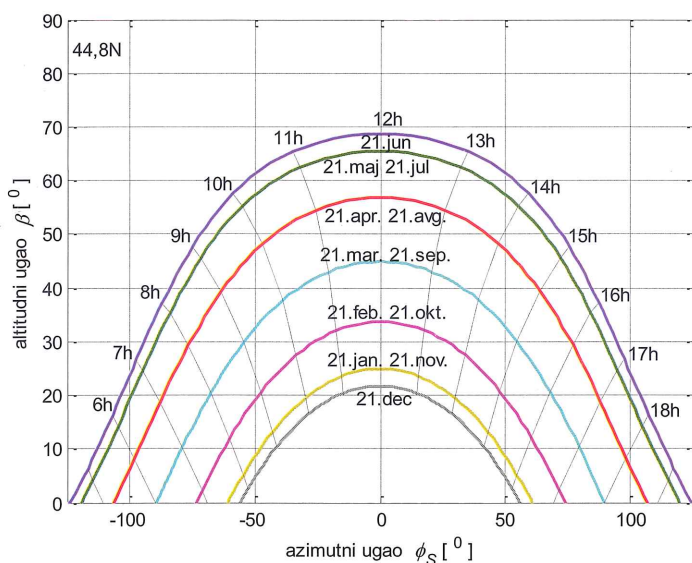
$$\cos \phi_s > 0 \Leftrightarrow \sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta > 0 \quad (3.28)$$

Iz prethodnih jednačina se dobija kriterijum za proveru da li je azimutni ugao sunca veći ili manji od 90° :

$$|\phi_s| > 90^\circ \Leftrightarrow \cos H < \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} L} \quad (3.29)$$

$$|\phi_s| < 90^\circ \Leftrightarrow \cos H > \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} L} \quad (3.30)$$

Na osnovu prethodnih izraza, mogu se nacrtati dijagrami putanje sunca na nebu za određeni latitudni ugao. Na slici 3.10 su nacrtani takvi dijagrami za Beograd, čiji je latitudni ugao $44,8^\circ$, za svaki 21. dan u mesecu u toku godine.



Slika 3.10. Dijagrami putanje sunca za geografsku širinu Beograda za svaki 21. dan u mesecu u toku godine

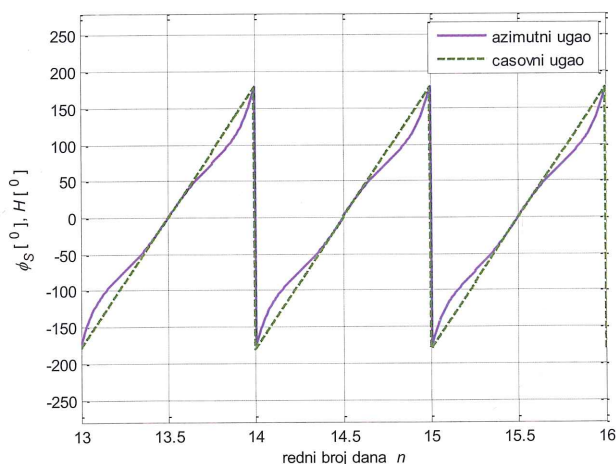
3.2.3 Časovni ugao sunca

Časovni ugao sunca H izražava se u ugaonoj meri u matematički negativnom smeru u odnosu na pravac projekcije zenita lokacije posmatrača na ekvator i uzima vrednosti $-180^\circ \leq H \leq 0^\circ$ do osnovnog pravca i vrednosti $0^\circ \leq H \leq 180^\circ$ od osnovnog pravca. Časovni ugao sunca H može da se izrazi i u satima od -12 h do 12 h i u tom slučaju predstavlja vreme od prolaska sunca kroz lokalni meridian. Pri tome jednom satu u časovnoj meri odgovara 15° stepeni u ugaonoj meri. Časovni ugao sunca je predstavljen na slikama 3.6 i 3.9. Znajući da Zemlja rotira 15° u toku svakog sata, časovni ugao sunca H se može izračunati na osnovu lokalnog solarnog vremena ST :

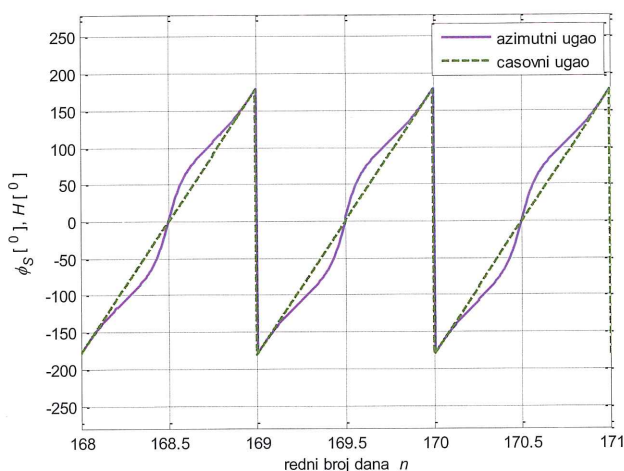
$$H = 15^\circ \cdot (ST - 12) \quad (3.31)$$

Solarno vreme se menja slično kao i časovno vreme (po solarnom vremenu u ponoć je 0 h, a u solarno podne je 12 h), ali neravnomerno teče i odstupa od časovnog vremena. Prema tome, problem određivanja časovnog ugla se svodi na problem određivanja solarnog vremena.

Časovni ugao i azimutni ugao sunca se razlikuju u toku godine. Razlika između ova dva ugla potiče iz razloga što se ovi uglovi određuju u različitim ravnima. Azimutni ugao sunca se određuje u horizontskoj ravni, a časovni ugao sunca se određuje u ravni ekvatora, što se može videti na slikama 3.6 i 3.9. Takođe, na slikama se može uočiti da je razlika između azimutnog i časovnog ugla sunca veća za lokacije na Zemlji koje se nalaze na manjim geografskim širinama L . Na slikama 3.11 i 3.12 prikazane su promene časovnog i azimutnog ugla sunca za tri zimska i tri letnja dana za geografsku širinu Beograda ($L=44,8^\circ$).



Slika 3.11. Časovni i azimutni ugao sunca u januaru



Slika 3.12. Časovni i azimutni ugao sunca u junu

Azimutni ugao ϕ_s uzima pozitivne i negativne vrednosti u isto vreme kada i časovni ugao H . S obzirom da se meri u ravni ekvatora, časovni ugao H se menja približno ravnomerno u toku dana, za razliku od azimutnog ugla ϕ_s . Takođe se može primetiti da je u toku januarskog dana $|\phi_s| \leq |H|$ i da je u toku junskog dana $|\phi_s| \geq |H|$. Ovo je u skladu sa time da je pri izlasku i zalasku sunca u zimskoj sezoni $|\phi_s| \leq 90^\circ$, a u letnjoj sezoni $|\phi_s| \geq 90^\circ$.

3.2.4 Solarno vreme i jednačina vremena

Solarno vreme se razlikuje od časovnog vremena iz nekoliko razloga. Prvi razlog je taj što je Zemljina površina diskretno podeljena na 24 vremenske zone koje se razlikuju za po jedan sat. Da bi se solarno i časovno podne poklapali, mora postojati kontinualno podešavanje vremena po geografskim dužinama. To bi značilo da svake dve tačke koje se ne nalaze na istom pravcu sever-jug ne bi imale isto vreme na časovniku. Pošto Zemlja rotira 15° na sat (jedan stepen za 4 minuta), časovnici na svakom stepenu geografske dužine bi se razlikovali za 4 min, ako bi podešavanje vremena bilo na svakom meridijanu. Da bi se to izbeglo, uvedene su vremenske zone tako da svaka vremenska zona obuhvata približno 15° (15 meridijana), a samo se u središnjem meridijanu časovne zone očekuje poklapanje solarnog i časovnog vremena. Središnji meridijan na osnovu koga se definiše vremenska zona se naziva standardni vremenski meridijan (H_{st}). Na primer, u Beogradu koji se nalazi na istočnoj geografskoj dužini od $20,5^\circ$, očekuje se da solarno podne bude 22 minuta ranije od trenutka kada sunce dođe iznad standardnog vremenskog meridijana (na geografskoj dužini $E15^\circ$) prema kome je definisana srednjeevropska časovna zona.

Međutim, potrebno je i dodatno podešavanje solarnog vremena u odnosu na časovno vreme zbog dva dodatna uzroka. Prvi uzrok leži u činjenici što se Zemlja kreće po eliptičnoj putanji, tako da i prividno kretanje sunca po ekliptici neće biti ravnomerno. Zbog toga dužina solarnog dana (vremena između dva uzastopna solarna podneva) varira tokom godine. Drugi uzrok je u tome da što je osa Zemljine rotacije nagnuta u odnosu na ravan ekliptike za ugao ε . Imajući u vidu da se sunce kreće po ekliptici, u ekliptičkom koordinatnom sistemu biće $\Lambda=0$. Iz jednačina (3.12) i (3.13) se dobija:

$$\cos \alpha = \frac{\cos \lambda}{\cos \delta} \quad (3.32)$$

$$\sin \alpha = \cos \varepsilon \frac{\sin \lambda}{\cos \delta} \quad (3.33)$$

odnosno:

$$\operatorname{tg} \alpha = \cos \varepsilon \operatorname{tg} \lambda \quad (3.34)$$

Na osnovu prethodne jednačine može se zaključiti da Zemlja neće ravnomerno opisivati ugao rektascenzije α pri svom obrtanju čak i kada bi se ekliptička longituda λ

menjala ravnomerno, odnosno ako bi prividno kretanje sunca po ekliptici bilo ravnomerno.

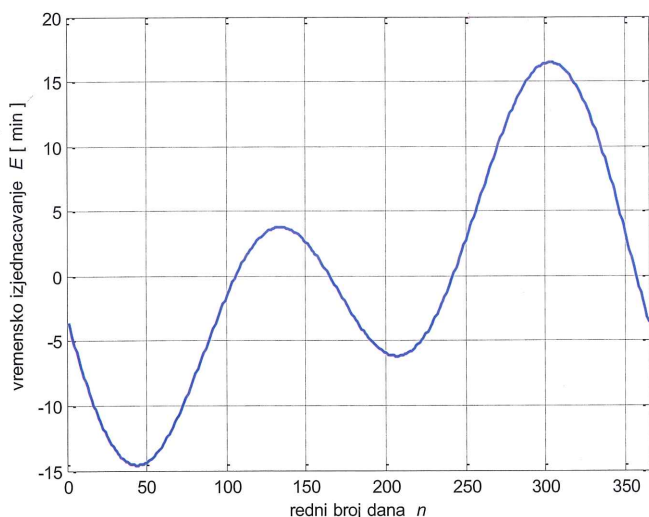
Tokom kretanja Zemlje po svojoj orbiti, razlika između dvadeset-četvoročasovnog dana i solarnog dana se menja prema sledećem izrazu, koji je poznat kao jednačina vremena:

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \quad [\text{min}] \quad (3.35)$$

gde je:

$$B = \frac{360}{364}(n-81) \quad [^\circ] \quad (3.36)$$

Na slici 3.13 je dat prikaz promene vremenskog izjednačavanja u toku godine prema jednačini vremena (3.35).



Slika 3.13. Prikaz promene vremenskog izjednačavanja u toku godine prema jednačini vremena

Na kraju, potrebno je vršiti i korekciju zbog letnjeg računanja vremena. Ova korekcija ima vrednost $DS=0$ za zimsku sezonu i vrednost $DS=-60$ min za letnju sezonu (*DS-daylight saving*). Letnje računanje vremena kod nas traje od poslednjeg vikenda u martu do poslednjeg vikenda u oktobru.

Uzimajući u obzir korekciju usled odstupanja lokalnog meridijana u odnosu na meridijan prema kome je definisana vremenska zona, korekciju prema vremenskoj jednačini, kao i korekciju usled letnjeg računanja vremena, izraz za izračunavanje solarnog vremena ST (*Solar Time*) na osnovu časovnog vremena CT (*Clock Time*) je:

$$ST = CT \pm \frac{4 \text{ min}}{1^0} \cdot (H_{st} - H_{loc}) + E[\text{min}] + DS[\text{min}] \quad (3.37)$$

gde je sa H_{st} označena geografska dužina standardnog vremenskog meridijana i sa H_{loc} je označena geografska dužina lokalnog meridijana, pri čemu se znak „+“ koristi za zapadnu hemisferu, a znak „-“ za istočnu hemisferu.

Uvažavajući sve navedene korekcije, solarno podne u Beogradu u odnosu na časovno podne nastupa ranije do 36,6 minuta ili kasnije do 54,45 minuta, zavisno od doba godine.

3.2.5 Časovni i azimutni ugao izlaska i zalaska sunca

Časovni ugao u trenutku izlaska i zalaska sunca se dobija iz uslova da sunce bude na horizontu, odnosno da altitudni ugao sunca bude jednak nuli. Na osnovu izraza (3.24) uslov za određivanje časovnog ugla u trenutku izlaska i zalaska sunca je:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta = 0 \quad (3.38)$$

odakle se dobija:

$$\cos H = -\text{tg} L \text{tg} \delta \quad (3.39)$$

Prethodna jednačina ima dva rešenja:

$$H_{SR} = -\arccos(-\text{tg} L \text{tg} \delta) \quad (3.40)$$

$$H_{SS} = \arccos(-\text{tg} L \text{tg} \delta) \quad (3.41)$$

Prvo rešenje H_{SR} se odnosi na izlazak sunca (*sunrise*), a drugo rešenje H_{SS} na zalazak sunca (*sunset*). Prethodni izrazi daju časovne uglove izlaska i zalaska sunca kada se centar sunca nalazi tačno na liniji horizonta. Gornja ivica sunčevog diska će se pojaviti nešto ranije u odnosu na definisani časovni ugao izlaska sunca H_{SR} i nestaće nešto kasnije u odnosu na definisani časovni ugao zalaska sunca H_{SS} . Osim toga, usled atmosfarske refrakcije sunce se prividno uzdiže iznad horizonta, tako da je stvarno vreme izlaska sunca nekoliko minuta ranije, a stvarno vreme zalaska sunca nekoliko minuta kasnije. Zato se sunce može videti čak i kada je geometrijski ispod horizonta (pri tome sunčev disk se izobličuje i poprima crvenu boju). Nadmorska visina takođe utiče da se definisani časovni uglovi izlaska i zalaska sunca razlikuju od stvarnih. Ipak, sa stanovišta solarne energetike ove razlike nisu od velikog značaja.

Vreme trajanja insolacije, odnosno vreme između izlaska i zalaska sunca, je:

$$t_{dl} = \frac{H_{SS} - H_{SR}}{15^0} = -\frac{2H_{SR}}{15^0} = \frac{2H_{SS}}{15^0} \quad (3.42)$$

s obzirom da Zemlja rotira ugaonom brzinom od $15^0/\text{h}$. Ovo vreme se odnosi na ravan otvoren prostor. U realnim topografskim uslovima vreme izlaska i zalaska sunca ne moraju biti simetrična ako postoje brda koja zaklanjaju sunce.

Azimutni ugao izlaska sunca se može dobiti na osnovu transformacije sfernih koordinata iz mesnog ekvatorskog i horizontski koordinatni sistem. Za $\beta=0$, na osnovu jednačine (3.17) je:

$$\cos \phi = \sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta \quad (3.43)$$

Nakon zamene izraza za $\cos H$ i nakon sređivanja, dobija se:

$$\cos \phi = -\frac{\sin \delta}{\cos L} \quad (3.44)$$

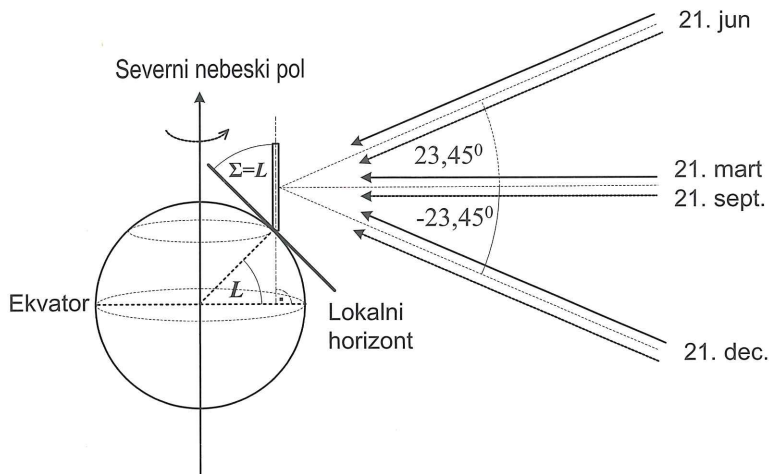
Prethodna jednačina ima rešenja pod uslovom $|L| \leq 90^\circ - |\delta|$, jer u protivnom dolazi do pojave polarnih dana i noći.

3.2.6 Orijentacija solarnog kolektora u odnosu na položaj sunca

Na osnovu slike 3.7 se može jednostavno proceniti koji je pogodan nagibni ugao solarnog kolektora (panela) na određenim geografskim širinama, prema modelu koji pretpostavlja vedre dane u toku godine. Na slici 3.14 prikazan je solarni kolektor na severnoj geografskoj širini koji je okrenut prema jugu i postavljen pod nagibnim uglom Σ koji je jednak latitudnom uglu L (uglu geografske širine) mesta na kome se nalazi taj kolektor, tako da je direktno sunčevo zračenje normalno na kolektor u podne u danima ravnodnevnic (21. marta i 21. septembra):

$$\Sigma = L \quad (3.45)$$

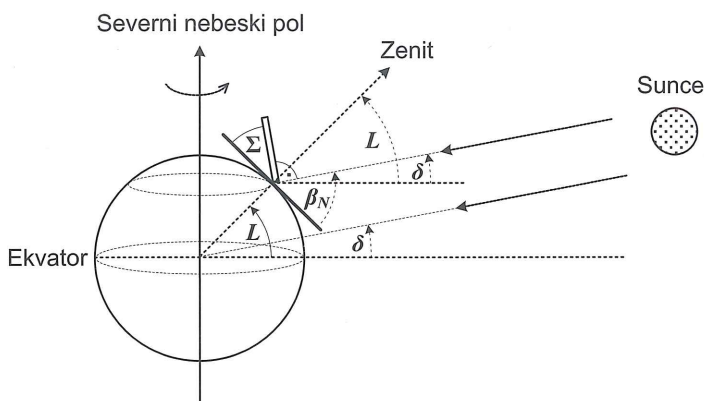
Na slici 3.14 je prikazano i zračenje koje pada na kolektor u danima letnjeg i zimskog solsticija (21. jun i 21. decembar), s obzirom na položaj sunca u odnosu na ravan ekvatora, prema slici 3.7. Zračenje koje 21. juna u solarno podne pada na kolektor zaklapa sa normalom na kolektor (koja je paralelna ravni ekvatora) ugao od $23,45^\circ$, a 21. decembra ugao od $-23,45^\circ$.



Slika 3.14. Južno okrenut solarni kolektor postavljen pod nagibnim uglom koji je jednak latitudnom uglu (uglu geografske širine)

Solarni kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom $\Sigma=L$ ipak neće imati maksimalnu insolaciju u toku godina, čak i pod pretpostavkom da su svi dani vedri u toku godine. Naime, prema dijagramima putanja sunca na nebu, dužina obdanice i broj sunčanih sati je značajno veći u letnjem nego u zimskog periodu. Sa stanovišta maksimalne godišnje insolacije na solarni kolektor, nagibni ugao kolektora treba da bude manji od ugla geografske širine kako bi se bolje iskoristile velike količine direktnog sunčevog zračenja u toku leta. Pri oblačnom vremenu pogodnije je da nagibni ugao fotonaponskih kolektora bude manji da bi se bolje iskoristilo difuzno zračenje. Oblačnost je više izražena u zimskom nego u letnjem periodu. Međutim, da bi se bolje iskoristilo direktno zračenje pri vedrim zimskim danima, zimi je pogodnije da nagibni ugao kolektora bude veći od latitudnog ugla mesta na kome se nalazi kolektor. Zbog toga, ako postoji mogućnost podešavanja nagibnog ugla kolektora, solarne kolektore zimi treba postavljati pod većim, a ljeti pod manjim nagibnim uglom u odnosu na optimalni ugao za godišnji period. Optimalna orijentacija solarnih kolektora podrazumeva da kolektori na severnoj hemisferi Zemlje budu okrenuti prema jugu. Na južnoj hemisferi kolektore treba okrenuti prema severu (prema ekvatoru).

Na slici 3.15 je u mesnom ekvatorskom koordinatnom sistemu dat prikaz altitudnog ugla β_N sunca u solarno podne (kada sunce u toku dana ima najveću visinu na nebu od odnosu na ravan horizonta).



Slika 3.15. Uz objašnjenje altitudnog ugla sunca u solarno podne

Na osnovu slike 3.15, altitudni ugao sunca u solarno podne se može odrediti u zavisnosti od latitudnog ugla i ugla deklinacije:

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (3.46)$$

gde su β_N altitudni ugao u solarno podne (*N-noon*), L latitudni ugao (geografska širina), δ ugao deklinacije.

Nagibni ugao kolektora pri kome je direktno sunčevo zračenje normalno na kolektor u solarno podne je:

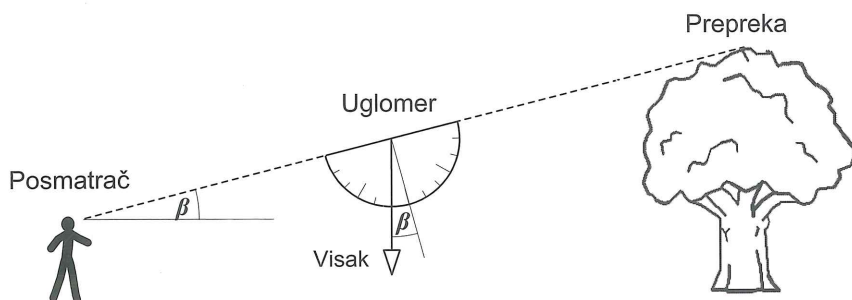
$$\Sigma = 90^\circ - \beta_N = L - \delta \quad (3.47)$$

Solarno podne je trenutak kada se sunce nalazi u lokalnom meridijanu i tada dostiže najveću visinu iznad horizonta (gornju kulminaciju). Za posmatrača u lokalnom meridijanu sunce se tada nalazi tačno prema jugu (na delu severne hemisfere sa geografskom širinom preko $L=23,45^\circ$), tačno prema severu (na delu južne hemisfere sa geografskom širinom ispod $L=-23,45^\circ$), a može biti ili na severu, jugu ili tačno iznad posmatrača (u tropskom pojasu sa geografskom širinom između $\pm 23,45^\circ$).

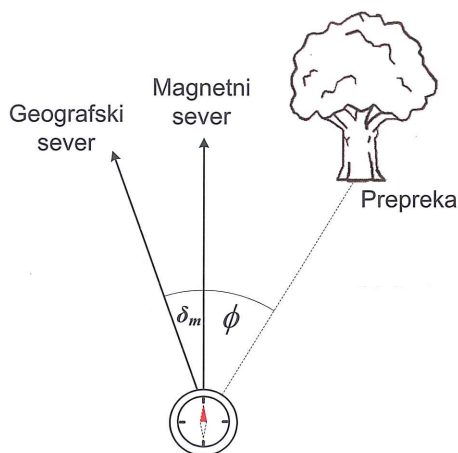
3.3 Proračun neiskorišćene insolacije usled senki okolnih objekata

3.3.1 Uticaj senki koje stvaraju okolni objekti

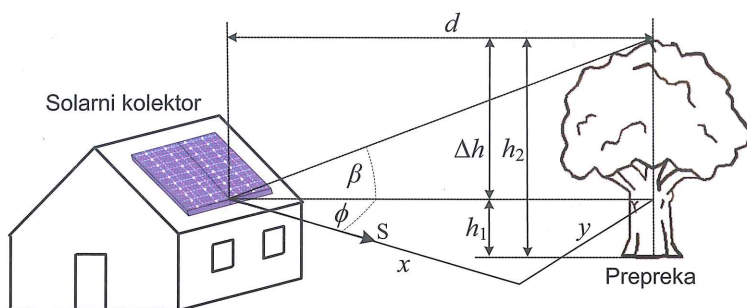
Dijagrami putanje sunca imaju veliki praktični značaj za analizu uticaja senki okolnih objekata na dnevnu insolaciju na solarnim kolektorima. Da bi se proračunao taj uticaj potrebno je da se okolni objekti nacrtaju preko dijagrama putanje sunca. Ako je u nekom trenutku putanja sunca pokrivena tim objektima, tada će ti objekti bacati senku na posmatrani solarni kolektor. Da bi se razmotrio uticaj senki koje stvaraju okolni objekti, neophodno je usvojiti referentnu tačku i u odnosu na nju treba odrediti altitudne i azimutne uglove okolnih objekata. Za referentnu tačku najbolje je izabrati tačku na solarnom kolektoru koja će sa najvećom verovatnoćom biti u senci. Altitudni ugao prepreke se može izmeriti pomoću uglomera sa viskom, kao što je prikazano na slici 3.16. Za određivanje azimutnog ugla prepreke može se koristiti kompas (busola), ali treba imati u vidu da se pravci prema magnetnom i geografskom jugu razlikuju za ugao koji se naziva magnetna deklinacija, δ_m . Magnetna deklinacija zavisi od položaja na zemlji na kojem se nalazi mesto merenja. Za Srbiju, magnetna deklinacija je istočna (pozitivna) i kreće se u opsegu $E3^\circ 34' \div E4^\circ 16'$. Načini na koji se određuje azimutni ugao prepreke je prikazan na slici 3.17. Altitudni i azimutni uglovi prepreka se mogu odrediti i na osnovu merenja određenih geometrijskih rastojanja, kao što je prikazano na slici 3.18.



Slika 3.16. Merenje altitudnog ugla prepreke pomoću uglomera sa viskom



Slika 3.17. Određivanje azimutnog ugla prepreke pomoću kompasa



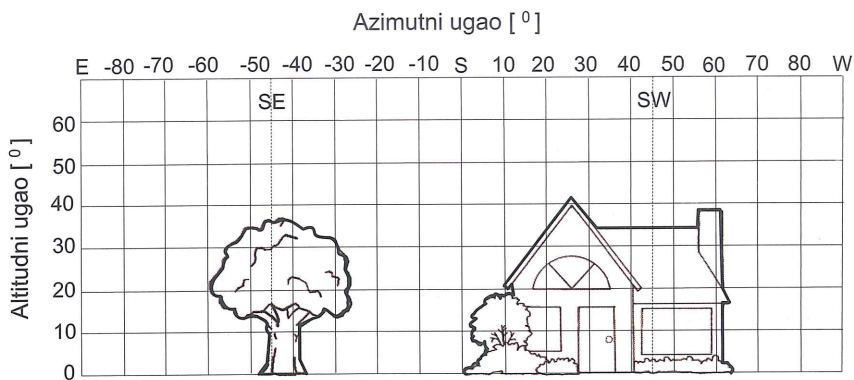
Slika 3.18. Određivanje altitudnog i azimutnog ugla okolnih objekata na osnovu merenja geometrijskih rastojanja

Na osnovu geometrijskih rastojanja na slici 3.18, altitudni i azimutni ugao prepreke su:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\Delta h}{d}\right) \quad (3.48)$$

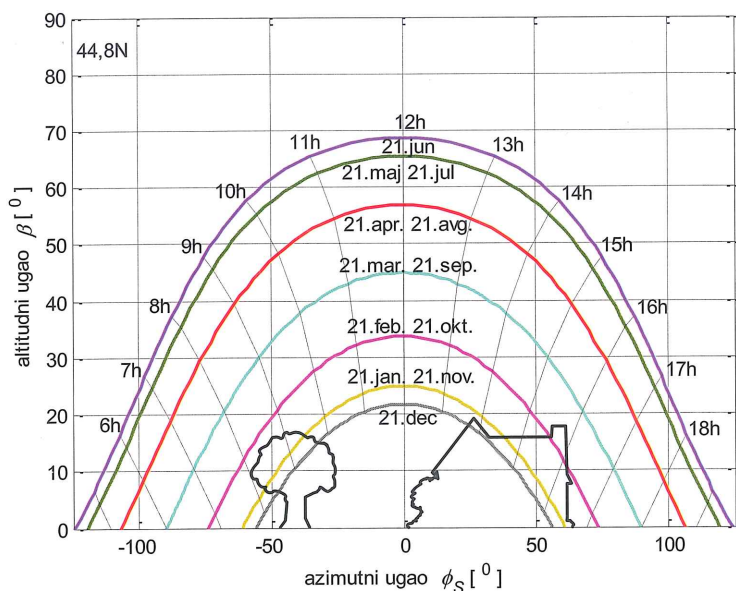
$$\phi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.49)$$

Specijalizovani instrumenti mogu se takođe koristiti za određivanje altitudnih i azimutnih uglova okolnih objekata. Takvi instrumenti u vidnom polju imaju iscrtan dijagram na kome se na jednoj osi očitava altitudni, a na drugoj osi azimutni ugao okolnog objekta (slika 3.19). Takođe je moguće napraviti digitalne fotografije okoline i koristiti profesionalni softver za analiziranje. Ovaj softver automatski procenjuje azimutni i altitudni ugao objekta.



Slika 3.19. Korišćenje specijalizovanog instrumenta za određivanje altitudnih i azimutnih uglova okolnih objekata

Izgled dijagrama putanje sunca iz posmatračevog horizontskog koordinatnog sistema za geografsku širinu Beograda sa ucrtanim okolnim objektima sa slike 3.19 koji prave senku, prikazan je na slici 3.20.



Slika 3.20 Dijagram putanje sunca sa objektima koji prave senku

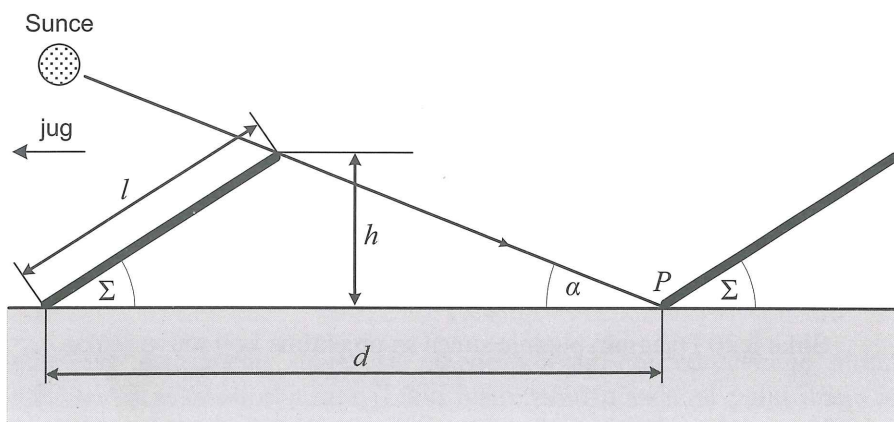
Na slici 3.20 se može videti da će drvo praviti senku u novembru, decembru i januaru u periodu od 8:00 h do 9:30 h, a da će kuća praviti senku u februaru i oktobru u periodu od 15:30 h do 16 h, u januaru i novembru u periodu od 14:30 h pa do zalaska sunca i u decembru od 13:30 h do zalaska sunca. Smanjenje insolacije na solarni

kolektor prouzrokovano zasenčenjem može se odrediti ako se od ukupne insolacije oduzmu insolacije koje bi postojale u navedenim satima kada ne bi bilo zasenčenja. Ovakav postupak proračuna uticaja senki okolnih objekata na insolaciju na solarni kolektor je zadovoljavajući i pored toga što se zanemaruje difuzno zračenje koje dolazi do kolektora koji je zasenčen. Tačniji postupak zahteva zasebno razmatranje uticaja senki okolnih objekata na direktno i difuzno zračenje na solarni kolektor.

Ipak, ne zaklanjaju svi objekti u potpunosti direktno zračenje, tako da kroz takve objekte (na primer, kroz drveće) prolazi deo direktnog sunčevog zračenja. Zbog toga treba uzeti u obzir i prozirnost okolnih objekata. Propustljivost τ opisuje koji deo direktnog sunčevog zračenja prolazi kroz objekat. Ispitivanjem propustljivosti listopadnih stabala dobijeno je da je srednja vrednost ovog koeficijenta u slučaju kada je lišće opalo (zimi) $\tau=0,64$, dok je u slučaju kada je stablo potpuno u listu (leti) $\tau=0,23$.

3.3.2 Uticaj senki koje stvaraju moduli unutar fotonaponskog sistema

Fotonaponski moduli se često postavljaju na horizontalnim površinama (horizontalnoj površini zemlje ili na horizontalnim krovovima) pod optimalnim nagibnim uglom u odnosu na horizontalnu površinu kako bi se dobilo najveće zračenje na module tokom godine. Horizontalno postavljanje fotonaponskih modula (u ravni sa horizontalnom površinom) nije praktično jer je manja insolacija na module, a veći su gubici nastali taloženjem prljavštine na površini modula. Što je manji nagibni ugao modula, manji je i efekat samočišćenja kišom i duže zadržavanje snega. Međutim, nedostatak fotonaponskih modula koji se postavljaju u više redova pod optimalnim nagibnim uglovima je u činjenici da se kod njih javlja efekat međusobnog zasenčenja modula u susednim redovima. Optimizacijom rastojanja između redova modula mogu se smanjiti gubici izazvani pomenutim efektom. Na slici 3.21 su prikazani fotonaponski moduli iz dva susedna reda sa odgovarajućim rastojanjima. Efekat međusobnog zasenčenja se može umanjiti podešavanjem ugla senke α .



Slika 3.21. Određivanje ugla senke kod redova fotonaponskih modula

Na osnovu poznatog rastojanja između redova d i dužine fotonaponskih modula l , kao što je prikazano na slici 3.21, definiše se stepen iskorišćenja terena:

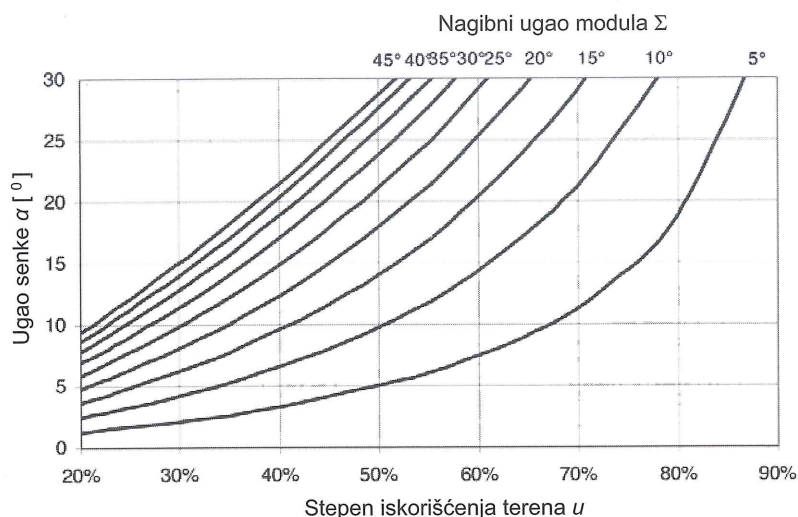
$$u = \frac{l}{d} \quad (3.50)$$

Zasenčenje ima različit uticaj na površine nagnute pod različitim uglovima. Uticaj zasenčenja je najveći u tački koja odgovara donjoj ivici modula (tačka P na slici 3.21). Ako se stepen iskorišćenosti terena u povećava, gubici usled zasenčenja će takođe rasti usled veće izloženosti modula zasenčenju.

Ugao senke je funkcija stepena iskorišćenja terena i nagibnog ugla modula Σ :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{d - l \cdot \cos \Sigma}\right) = \arctan\left(\frac{u \cdot \sin \Sigma}{1 - u \cdot \cos \Sigma}\right) \quad (3.51)$$

Zavisnost ugla senke od stepena iskorišćenja terena i nagibnog ugla modula Σ prikazana je na slici 3.22. Ugao senke ima veće vrednosti pri većim vrednostima stepena iskorišćenja terena i takođe pri većim vrednostima nagibnog ugla fotonaponskih modula.



Slika 3.22. Zavisnost ugla senke od stepena iskorišćenja terena u i nagibnog ugla modula Σ

Ako sunčevi zraci padaju direktno na solarne module i ako je pri tome altitudni ugao sunca manji od ugla senke α , doći će do zasenčenja modula u susednom redu. Kao kriterijum za određivanje minimalnog rastojanja između redova fotonaponskih modula može se usvojiti kriterijum da u najnepovoljnijem danu u toku godine, odnosno danu

kada sunce dostiže najmanju visinu iznad horizontale (21. decembar), ugao senke bude manji od altitudnog ugla sunca u solarno podne:

$$\alpha < \beta_N \quad (3.52)$$

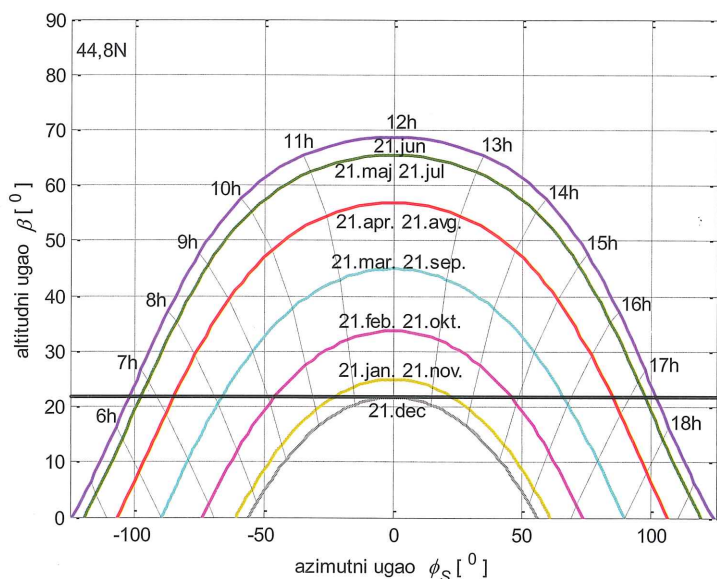
Prema prethodnom uslovu, fotonaponski moduli će 21. decembra biti potpuno osunčani samo u solarno podne. U ostalim danima u toku godine, zbog značajnog povećanja altitudnog ugla sunca, efekat međusobnog zasenčenja je znatno manji.

Prema prethodnom kriterijumu, ugao senke za horizontalno postavljene module na lokaciji Beograda (sa severnom geografskom dužinom $N 44,82^\circ$ i istočnom geografskom širinom $E 20,46^\circ$) treba da ima vrednost:

$$\alpha < \beta_N = 90^\circ - L + \delta = 90^\circ - 44,82^\circ - 23,45^\circ = 21,73^\circ \quad (3.53)$$

jer ugao deklinacije 21. decembra ima vrednost $\delta = -23,45^\circ$.

Na slici 3.23 su prikazani dijagrami putanje sunca za svaki 21. dan u mesecu za geografsku širinu Beograda. Horizontalna linija na slici odgovara altitudnom uglu sunca β_N u solarno podne 21. decembra. Ako se u cilju boljeg iskorišćenja terena ugao senke podesi na maksimalnu vrednost $\alpha_{\max} = \beta_N$ u solarno podne 21. decembra, onda se zbog efekta međusobnog zasenčenja redova neće koristiti zračenje sunca za sve altitudne uglove sunca $\beta < \alpha_{\max}$ u toku godine (osim kod prvog reda modula u odnosu na pravac prema jugu). Ovaj zaključak uvažava pretpostavku da su dužine redova mnogo veće od međusobnih rastojanja. Kod kratkih redova potrebno je voditi računa i o azimutnom uglu sunca.



Slika 3.23. Dijagrami putanje sunca u toku godine i delovi putanje kada dolazi do međusobnog zasenčenja modula u susednim redovima

Imajući u vidu da se ekstraterestrička iradijansa I_0 zanemarljivo menja u toku dana i da je $H_{SR} = -H_{SS}$, dobija se:

$$\bar{I}_{0H} = \frac{24}{\pi} I_0 (\cos L \cos \delta \sin H_{SS} + H_{SS} \sin L \sin \delta) \quad (4.24)$$

Zamenom izraza (4.15) za ekstraterestričku iradijansu, dobija se:

$$\bar{I}_{0H} = \frac{24}{\pi} I_{SC} \left(1 + 0,034 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) (\cos L \cos \delta \sin H_{SS} + H_{SS} \sin L \sin \delta) \quad (4.25)$$

Dnevna horizontalna insolacija ekstraterestričkog zračenja ima značajnu primenu u određivanju komponenti solarnog zračenja kada se koriste dugoročni merni podaci o horizontalnoj iradijansi.

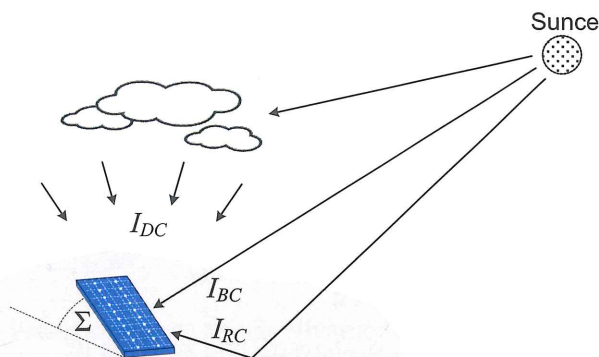
4.2 Proračun iradijanse i insolacije na solarni kolektor pri vedrom danu

Solarno zračenje stiže do solarnog kolektora u vidu direktnog, difuznog i reflektovanog zračenja. Direktno zračenje predstavlja zračenje koje od sunca do solarnog kolektora dospeva pravolinijski. Difuzno zračenje na kolektor dolazi iz raznih pravaca kao posledica rasejanja sunčevog zračenja zbog prisustva oblaka, molekula vazduha i aerosoli u atmosferi. Reflektovano zračenje na kolektor se javlja kao posledica odbijanja direktnog i difuznog zračenja od površine zemlje.

Ukupna solarna iradijansa I_C na solarni kolektor može se predstaviti kao zbir direktne komponente iradijanse I_{BC} , difuzne komponente iradijanse I_{DC} i reflektovane komponente iradijanse I_{RC} :

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (4.26)$$

Komponente iradijanse na solarni kolektor su prikazane na slici 4.4.



Slika 4.4. Prikaz komponenti iradijanse na solarni kolektor