

4.2.1 Direktna komponenta iradijanse na solarni kolektor

Solarno zračenje koje u vidu direktnog zračenja dospeva na Zemljinu površinu je manje od ekstraterestričkog zračenja zbog apsorpcije i raspršivanja u atmosferi. Deo solarnog zračenja se rasejava i apsorbira zbog prisustva molekula vazduha, vodene pare, kapi vode ili prašine. Slabljenje solarnog zračenja je izraženije ukoliko je duži put koji direktno zračenje prolazi kroz Zemljinu atmosferu, odnosno ukoliko je veća vazдушna masa.

Za procenu direktnog solarnog zračenja koje dospeva do površine Zemlje mogu se koristiti parametarski modeli koji se zasnivaju na podacima o atmosferskim uslovima. U opštem slučaju, parametarski modeli za izračunavanje direktne iradijanse na površini Zemlje su oblika:

$$I_B = I_0 \tau_g \tau_o \tau_w \tau_r \tau_a \quad (4.27)$$

gde je I_0 ekstraterestrička iradijansa, a bezdimenzioni koeficijenti τ_g , τ_o , τ_w , τ_r i τ_a su koeficijenti transmisije (prozirnosti). Koeficijenti τ_g , τ_o i τ_w uvažavaju apsorpciju zračenja zbog prisustva stalnih gasova, ozona i vodene pare u atmosferi. Koeficijent τ_r uvažava *Rayleigh*-jevo rasejanje zračenja u atmosferi, a koeficijent τ_a uvažava slabljenje zračenja zbog prisustva aerosoli u atmosferi. Razlike između modela za procenu direktnog zračenja na površini Zemlje se javljaju zbog različitog načina izračunavanja koeficijenata transmisije koji uvažavaju pojedine fenomene slabljenja sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu.

Jedan od često korišćenih parametarskih modela se zasniva na *Linke*-ovom faktoru mutnosti atmosfere. Direktna komponenta zračenja na površini Zemlje je data sledećim izrazom:

$$I_B = I_0 e^{-0,8662 T_{LK} m \delta_r(m)} \quad (4.28)$$

gde je m koeficijent vazdušne mase, T_{LK} je *Linke*-ov faktor mutnosti pri vrednosti koeficijenta vazdušne mase $m=2$ i $\delta_r(m)$ je *Rayleigh*-jeva optička debljina pri koeficijentu vazdušne mase m .

Na osnovu ovog modela, slabljenje Sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu zavisi ne samo od vazdušne mase već i od koncentracije različitih sastojaka atmosfere. Njihov uticaj se može odrediti poređenjem aktuelne optičke debljine sa teorijskom optičkom debljinom savršeno čiste i suve atmosfere sa *Rayleigh*-jevim rasejanjem $\delta_r(m)$. Referentna optička debljina zavisi od vazdušne mase i izračunava se prema sledećim izrazima:

$$\delta_r = (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4)^{-1}, \text{ za } m \leq 20 \quad (4.29)$$

$$\delta_r = (10,4 + 0,718m)^{-1}, \text{ za } m > 20 \quad (4.30)$$

Linke-ov faktor mutnosti atmosfere opisuje optičku debljinu atmosfere zbog procesa rasejanja zračenja na aerosolima i molekulima vazduha, kao i zbog procesa apsorpcije prouzrokovano ozonom, vodenom parom, kiseonikom i ugljen dioksidom.

U tabeli 4.1 su prikazane okvirne vrednosti za *Linke*-ov faktor mutnosti za tipične atmosferske uslove.

Tabela 4.1. Vrednosti za *Linke*-ov faktor mutnosti za tipične atmosferske uslove

Atmosferski uslovi	<i>Linke</i> -ov faktor mutnosti
Čista i suva <i>Rayleigh</i> -eva atmosfera	1
Veoma čist i hladan vazduh	2
Čist i topao vazduh	3
Vlažan i topao vazduh	4÷6
Zagađen vazduh	8

Nešto jednostavniji model za procenu Sunčevog zračenja na površini Zemlje koji pretpostavlja eksponencijalno slabljenje zračenja kroz atmosferu usvojen je od strane američkog društva inženjera za grejanje, hlađenje i klimatizaciju ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*). Prema ovom modelu, procena direktne iradijanse koja dospeva do površine Zemlje je data *Beer-Lambert-Bouguer*-ovim zakonom:

$$I_B = Ae^{-km} \quad (4.31)$$

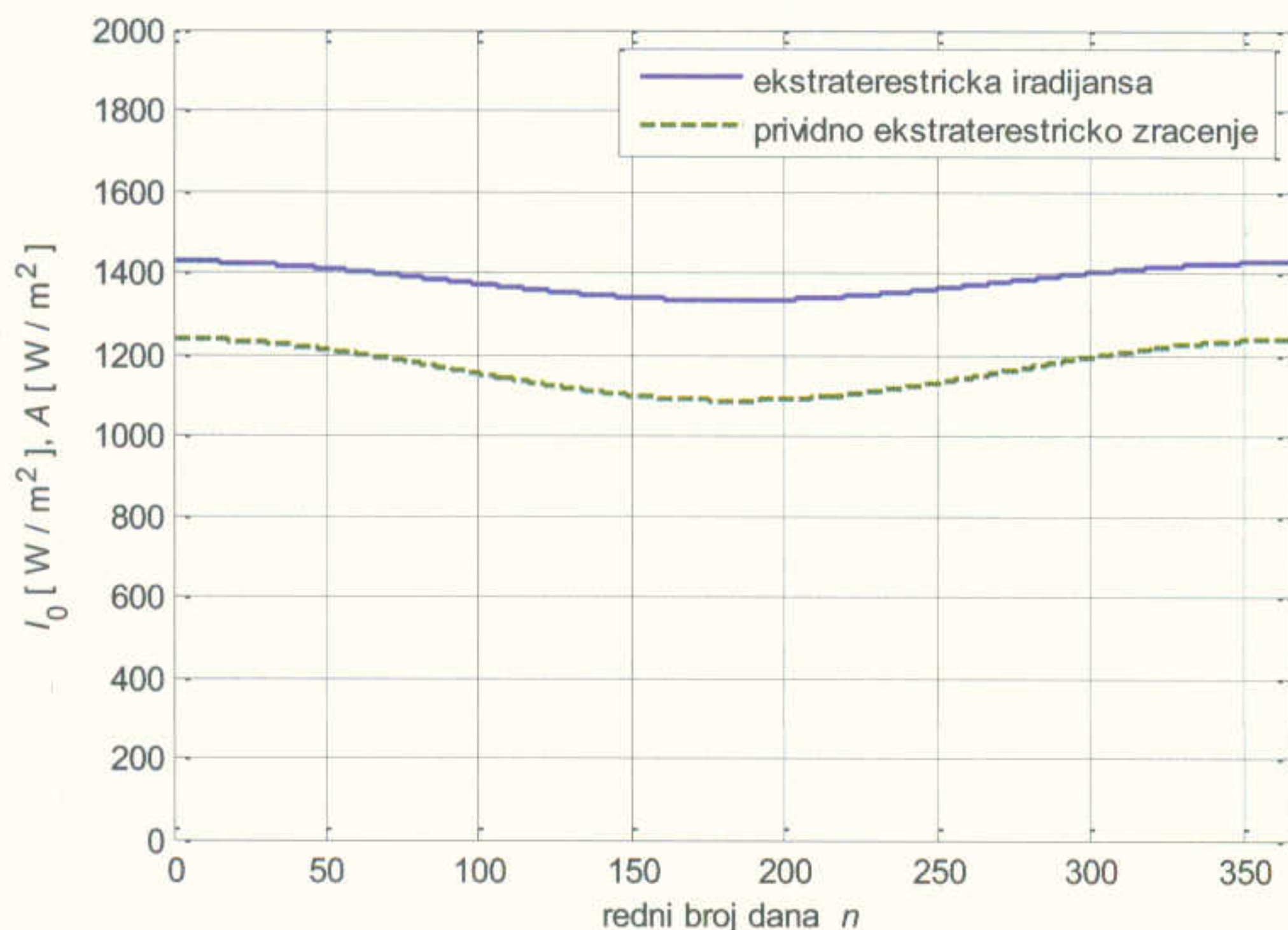
gde su I_B direktna iradijansa na površini Zemlje, A prividni fluks ekstraterestričnog zračenja, k koeficijent slabljenja Sunčevog zračenja u Zemljinoj atmosferi (optička debljina) i m optička vazдушna masa. Direktna iradijansa I_B predstavlja zračenje na površinu koja je normalna na pravac zračenja.

Prividni fluks ekstraterestričkog zračenja predstavlja ekstraterestričko zračenje koje je merodavno sa stanovišta određivanja iradijanse na površini Zemlje jer se deo ekstraterestričkog zračenja reflektuje od gornje površine Zemljine atmosfere. Prividni ekstraterestrički fluks i optička debljina se mogu proceniti na osnovu sledećih izraza:

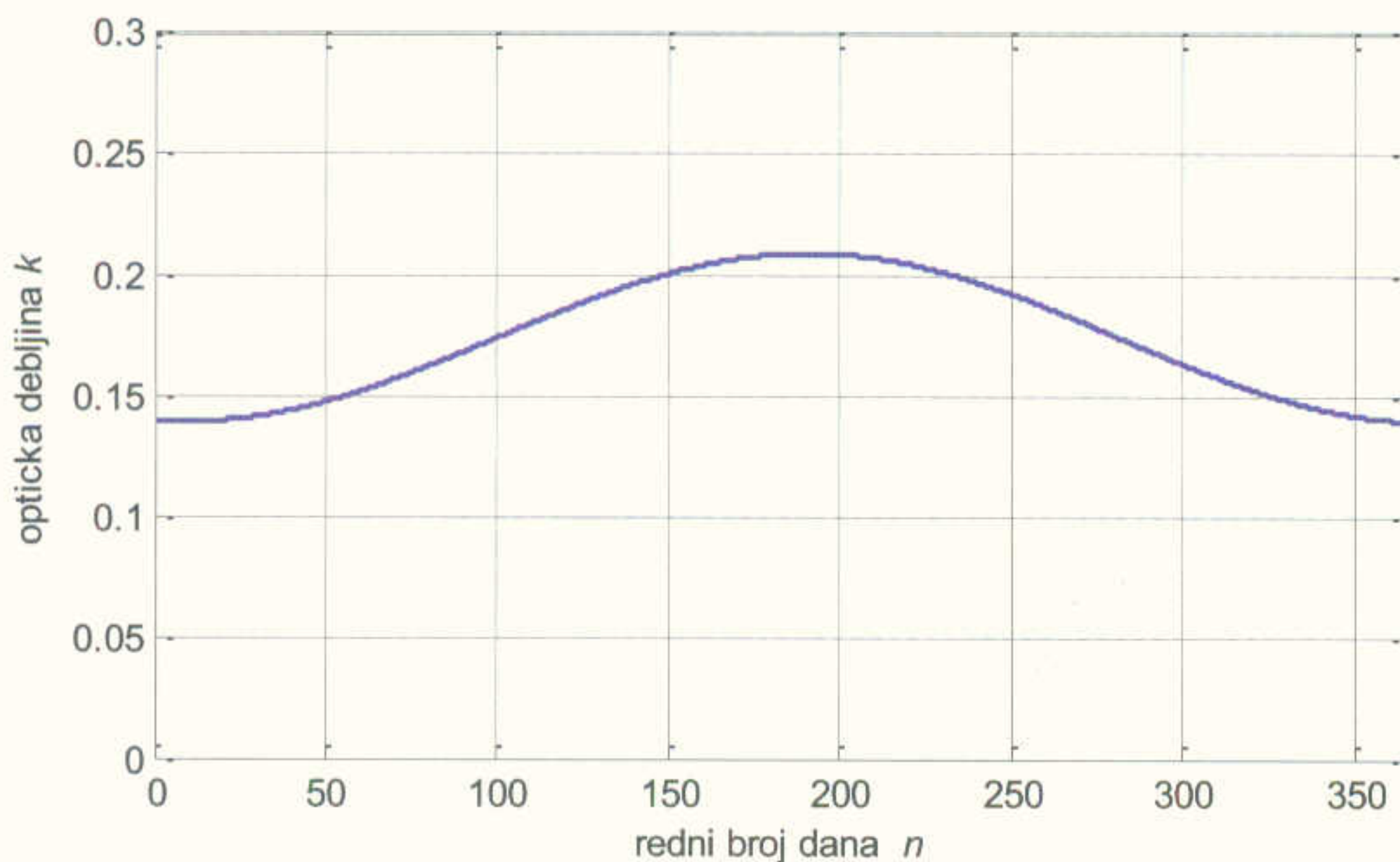
$$A = 1160 + 75 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(n - 275)\right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.32)$$

$$k = 0,174 + 0,035 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(n - 100)\right) \quad (4.33)$$

Promene ekstraterestričke iradijance I_0 i prividnog ekstraterestričkog zračenja A u toku godine su prikazane na slici 4.5. Promene optičke debljine u toku godine su prikazane na slici 4.6.



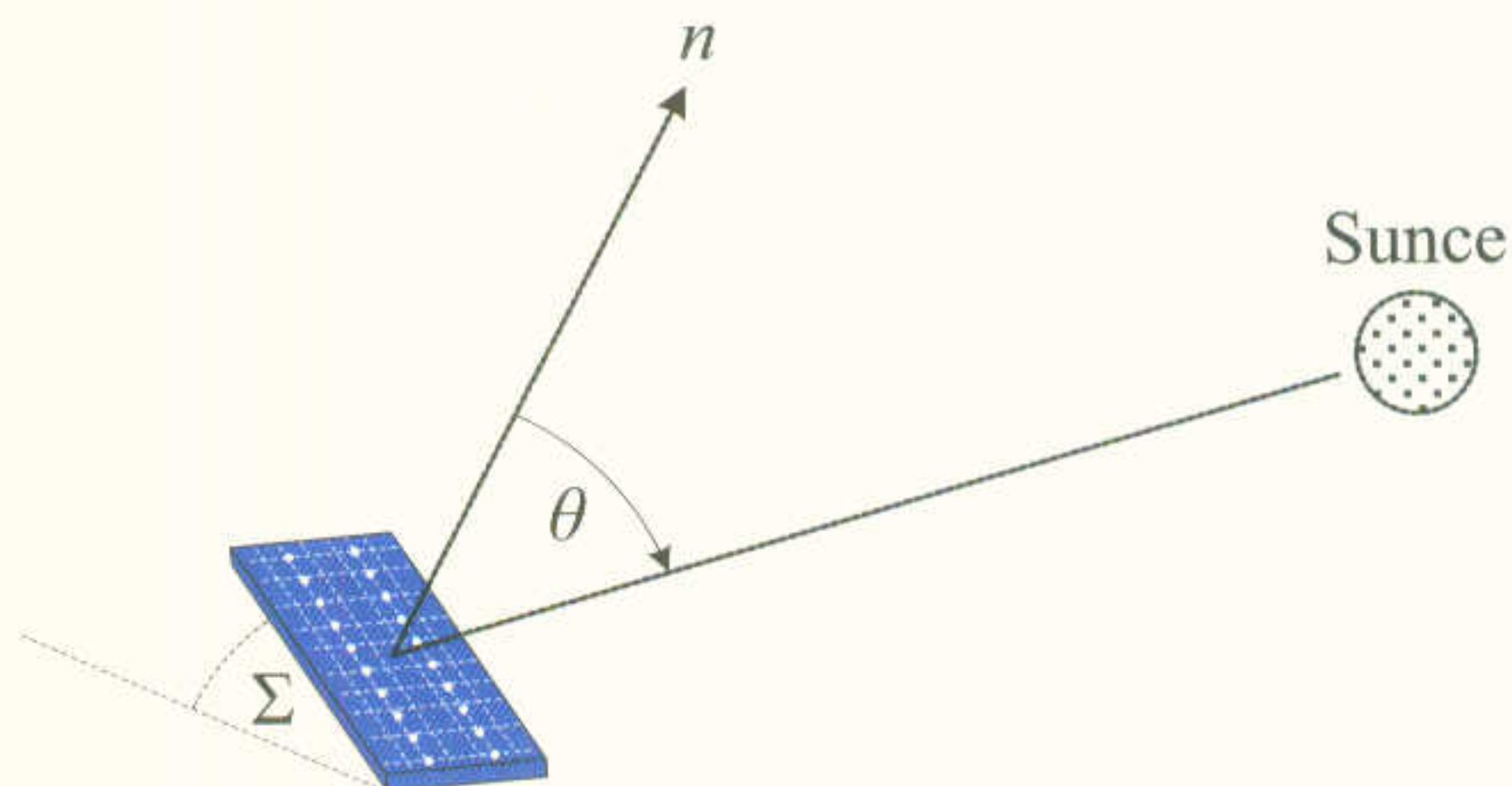
Slika 4.5. Ekstraterestrička iradijansa i prividno ekstraterestričko zračenje



Slika 4.6. Promena optičke debljine u toku godine

Direktno sunčevo zračenje koje se efektivno koristi na površinu solarnog kolektora zavisi od ugla pod kojim direktni sunčevi zraci padaju na kolektor. Zbog toga je za proračun direktne komponente iradijance na solarni kolektor neophodno odrediti

incidentni ugao θ direktnog sunčevog zračenja u odnosu na normalu na kolektor. Incidentni ugao direktnog sunčevog zračenja na kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ u odnosu na horizontsku ravan je prikazan na slici 4.7.



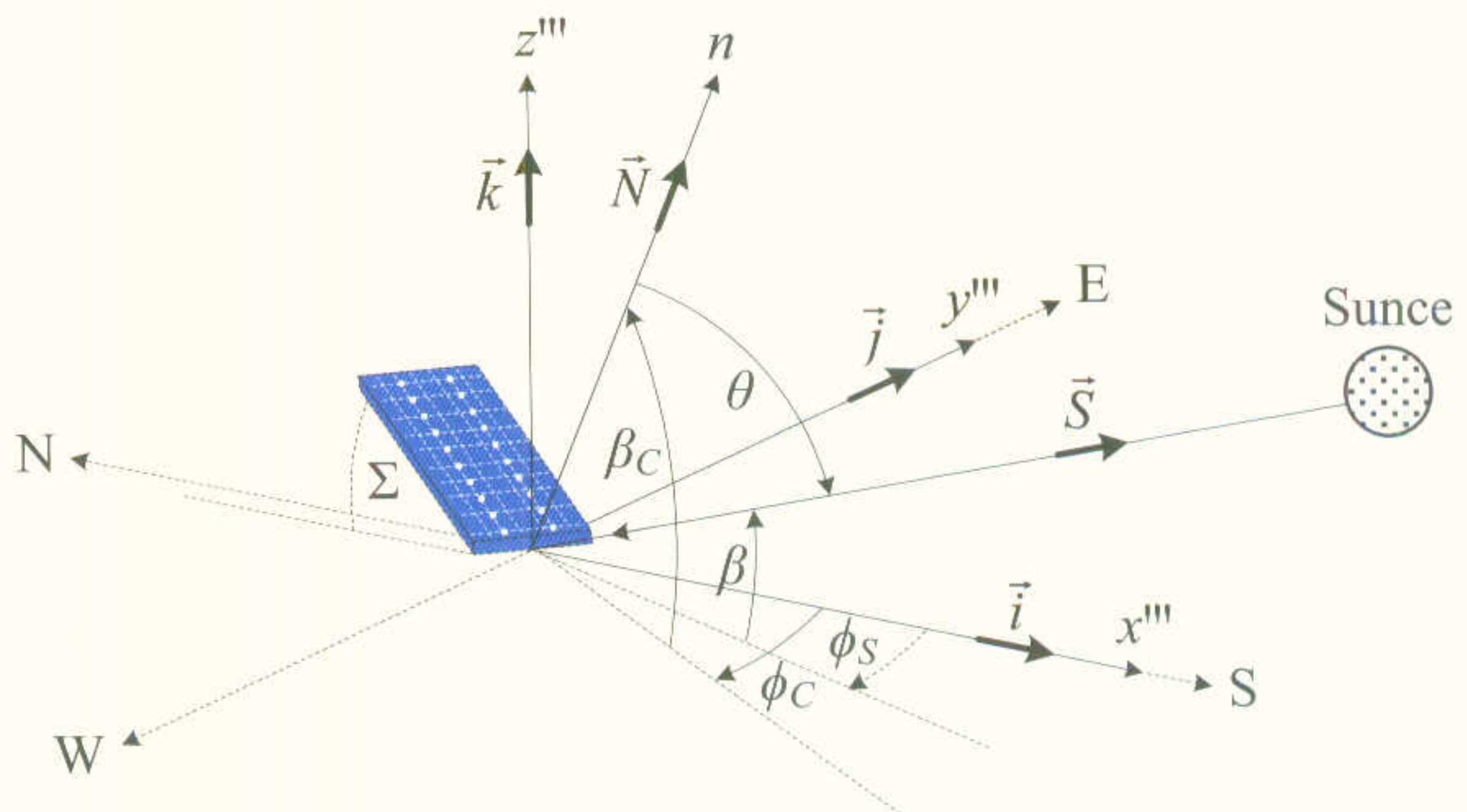
Slika 4.7. Incidentni ugao sunčevog zračenja na solarni kolektor

Direktna iradijansa na solarni kolektor je:

$$I_{BC} = I_B \cos \theta \quad (4.34)$$

gde je θ incidentni ugao direktnog zračenja na solarni kolektor.

U cilju određivanja incidentnog ugla direktnog zračenja na solarni kolektor može se definisati orijentacija solarnog kolektora u prostoru uvođenjem altitudnog i azimutnog ugla normale na solarni kolektor, β_C i ϕ_C . Uglovi na osnovu kojih se izračunava incidentni ugao θ direktnog zračenja na solarni kolektor su prikazani u horizontskom koordinatnom sistemu na slici 4.8.



Slika 4.8. Uglovi na osnovu kojih se izračunava incidentni ugao direktnog zračenja na proizvoljno orijentisan solarni kolektor

U pridruženom koordinatnom sistemu sa osama x''' , y''' i z''' na slici 4.8 može se definisati jedinični vektor pravca prema suncu $\vec{S}$ i jedinični vektor normale $\vec{N}$:

$$\vec{S} = S_x \vec{i} + S_y \vec{j} + S_z \vec{k} \quad (4.35)$$

$$\vec{N} = N_x \vec{i} + N_y \vec{j} + N_z \vec{k} \quad (4.36)$$

gde su sa $\vec{i}$, $\vec{j}$ i $\vec{k}$ označeni jedinični vektori osa x''' , y''' i z''' .

Komponente vektora $\vec{S}$ su:

$$S_x = \cos \beta \cos \phi_s \quad (4.37)$$

$$S_y = -\cos \beta \sin \phi_s \quad (4.38)$$

$$S_z = \sin \beta \quad (4.39)$$

gde je β altitudni ugao sunca, a ϕ_s je azimutni ugao sunca.

Komponente vektora $\vec{N}$ su:

$$N_x = \cos \beta_c \cos \phi_c \quad (4.40)$$

$$N_y = -\cos \beta_c \sin \phi_c \quad (4.41)$$

$$N_z = \sin \beta_c \quad (4.42)$$

gde je β_c altitudni ugao normale na solarni kolektor, a ϕ_c je azimutni ugao normale na solarni kolektor.

Incidentni ugao θ se može odrediti na osnovu skalarnog proizvoda jediničnog vektora pravca prema suncu $\vec{S}$ i jediničnog vektora normale $\vec{N}$:

$$\cos \theta = \vec{S} \cdot \vec{N} = S_x N_x + S_y N_y + S_z N_z \quad (4.43)$$

Zamenom vrednosti koordinata jediničnih vektora $\vec{S}$ i $\vec{N}$ dobija se:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \phi_s \cos \beta_c \cos \phi_c + \cos \beta \sin \phi_s \cos \beta_c \sin \phi_c + \sin \beta \sin \beta_c \quad (4.44)$$

odnosno nakon sređivanja izraza:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \beta_c \cos(\phi_s - \phi_c) + \sin \beta \sin \beta_c \quad (4.45)$$

Korišćenjem činjenice da je altitudni ugao β_c normale na kolektor komplementaran nagibnom uglu Σ kolektora, odnosno $\beta_c = 90^\circ - \Sigma$, dobija se:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_s - \phi_c) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (4.46)$$

Na osnovu prethodnog izraza mogu se izvesti vrednosti incidentnog ugla za karakteristične slučajeve postavljanja i orijentacije solarnog kolektora.

U specijalnom slučaju direktnog zračenja koje dospeva na horizontalnu površinu zemlje ili na solarni kolektor koji je postavljen horizontalno, nagibni ugao površine je $\Sigma=0$. Za incidentni ugao θ u odnosu na normalu na horizontalnu površinu tada važi:

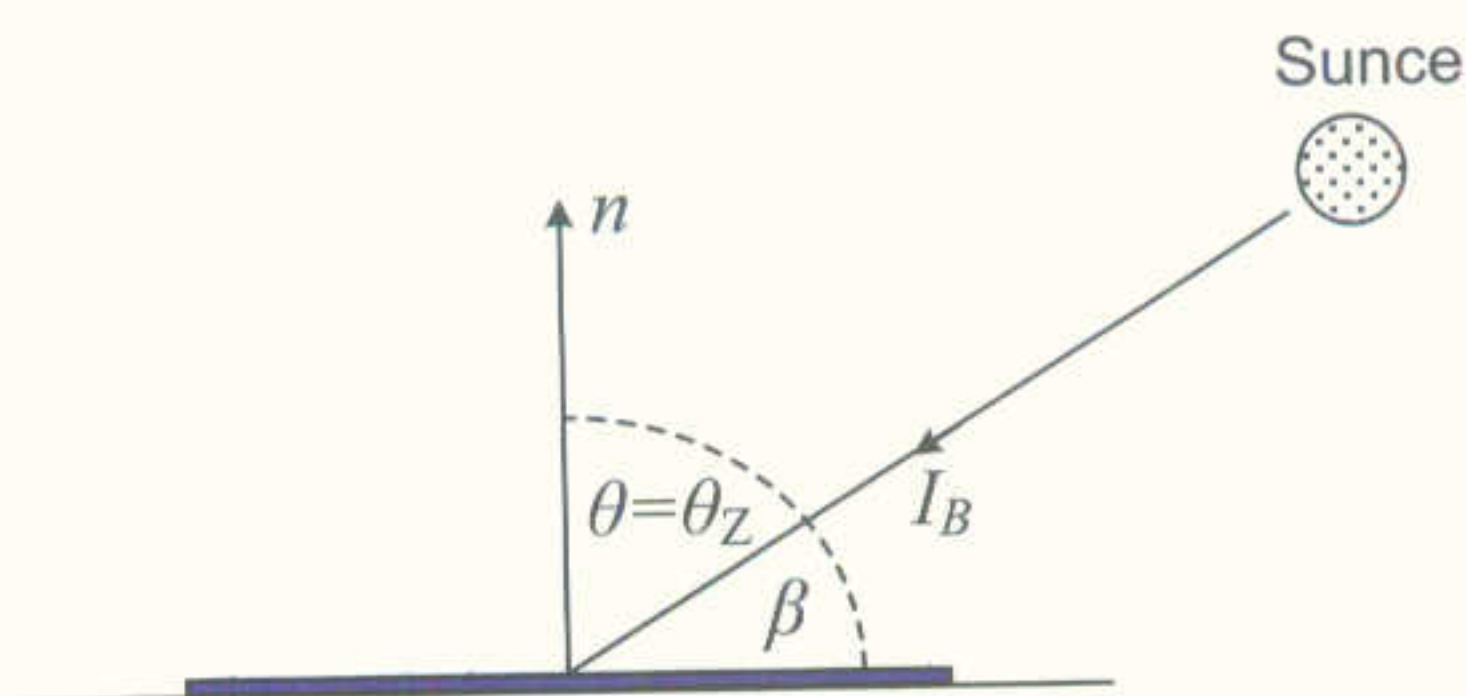
$$\cos \theta = \sin \beta \quad (4.47)$$

tako da je $\beta + \theta = 90^\circ$. U ovom slučaju incidentni ugao direktnog zračenja u odnosu na normalu se poklapa sa zenitnim uglom, $\theta = \theta_Z$, kao u ranijem slučaju kod izračunavanja ekstraterestričke iradijanse na horizontalnu površinu, relacija (4.19).

Direktna komponenta iradijanse na horizontalnu površinu je:

$$I_{BH} = I_B \cos \theta = I_B \cos \theta_Z = I_B \sin \beta \quad (4.48)$$

Direktno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu je prikazano na slici 4.9.



Slika 4.9. Direktno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu

Na osnovu direktne komponente iradijanse I_{BH} na horizontalnu površinu može se izračunati direktna komponenta iradijanse na solarni kolektor sa nagibnim uglom Σ :

$$I_{BC} = I_B \cos \theta = \frac{I_{BH}}{\sin \beta} \cos \theta = I_{BH} \frac{\cos \theta}{\sin \beta} = I_{BH} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_Z} = I_{BH} R_B \quad (4.49)$$

gde $R_B = \cos \theta / \sin \beta$ predstavlja faktor nagiba (kosine). Faktor nagiba se menja u toku dana, s obzirom da se menja altitudni i azimutni ugao sunca.

U slučaju direktnog zračenja koje dospeva na vertikalnu površinu (na primer, na solarni kolektor koji je postavljen na fasadu zgrade), incidentni ugao θ u odnosu na normalu na vertikalnu površinu se dobija korišćenjem uslova $\Sigma=90^\circ$ u izrazu (4.46):

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \quad (4.50)$$

Direktna komponenta iradijanse na vertikalnu površinu je:

$$I_{BV} = I_B \cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \quad (4.51)$$

Incidentni ugao direktnog zračenja na solarni kolektor (4.46) može da se izrazi i preko časovnog ugla H , ugla deklinacije δ i geografske širine L . Pri tome, treba koristiti transformaciju sfernih koordinata iz mesnog ekvatorskog u horizontski koordinatni sistem.

4.2.2 Difuzna komponenta iradijanse na solarni kolektor

Difuzno zračenje je teže odrediti nego direktno zračenje, s obzirom na brojne faktore koji na njega utiču. Najjednostavniji model za procenu difuznog zračenja je izotropski model koji pretpostavlja ravnomernu raspodelu difuznog zračenja na nebeskoj polusferi. Na osnovu ovog modela, difuzno zračenje dolazi jednakim intenzitetom iz svih pravaca sa nebeske polusfere. Ovakav model je ustanovljen 1962. godine i poznat je kao *Liu-Jordan*-ov model difuznog zračenja. Po modelu koji se koristi, difuzna komponenta iradijanse I_{DH} koja pada na horizontalnu površinu srazmerna je iradijansi direktnog zračenja I_B , bez obzira na položaj sunca na nebu:

$$I_{DH} = C I_B \quad (4.52)$$

gde je C difuzna konstanta.

Difuzna konstanta C se može odrediti na osnovu sledećeg empirijskog izraza koji je predložen u ASHRAE modelu:

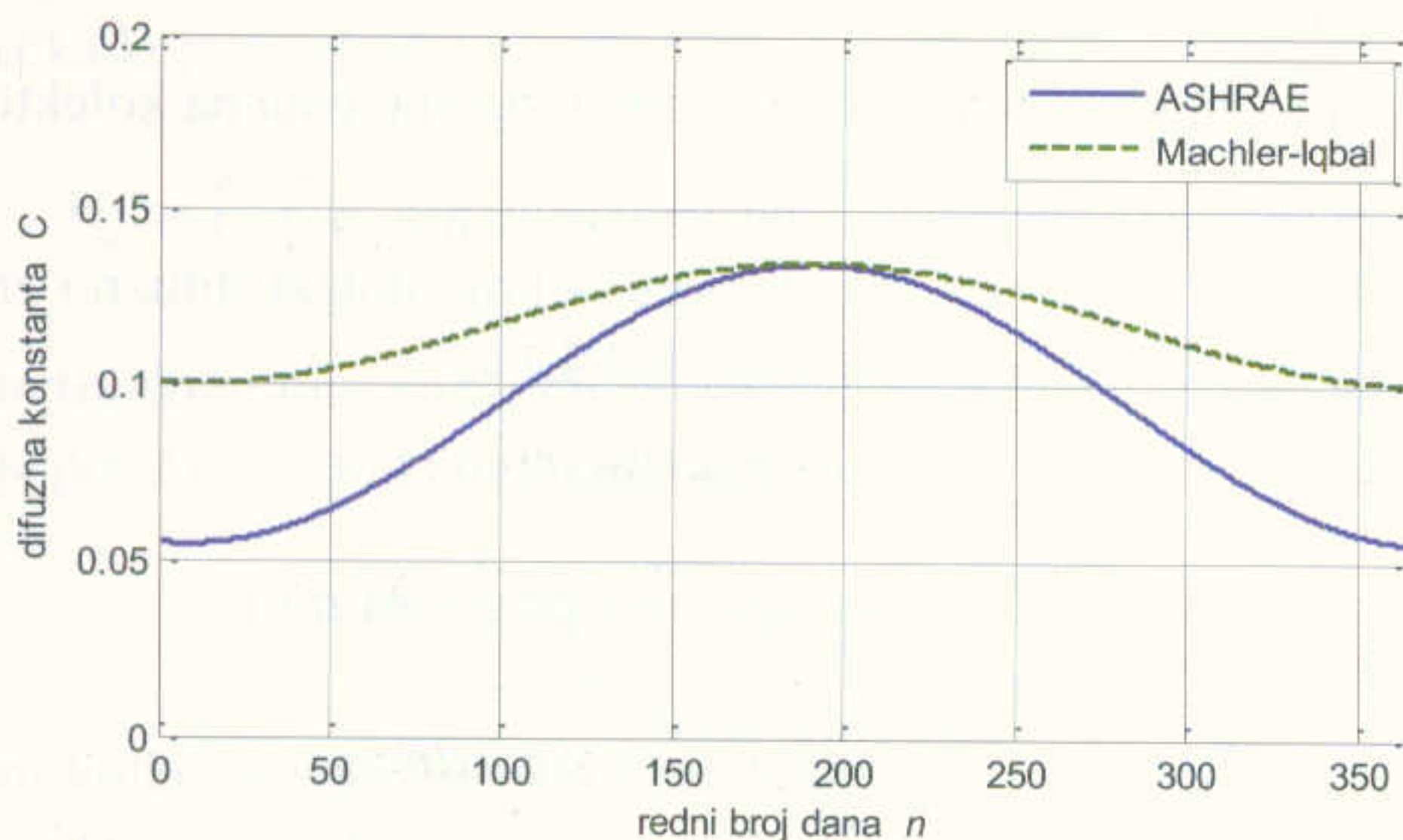
$$C = 0,095 + 0,04 \sin\left(\frac{360}{365}(n-100)\right) \quad (4.53)$$

gde je n redni broj dana u godini.

Prethodni izraz je izveden na osnovu *Liu-Jordan*-ove korelacije između direktnog i difuznog zračenja uspostavljene 1960. godine na osnovu merenja sunčevog zračenja na 98 lokacija u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi. Da bi se omogućila univerzalna primena prethodnog modela za difuzno zračenje, *Machler* i *Iqbal* su 1967. godine predložili sledeći izraz za izračunavanje difuzne konstante C :

$$C = 0,1180 + 0,0175 \sin\left(\frac{360}{365}(n-100)\right) \quad (4.54)$$

Promena difuzne konstante C u toku godine na osnovu ASHRAE modela i *Machler-Iqbal*-ovog izraza prikazana je na slici 4.10.



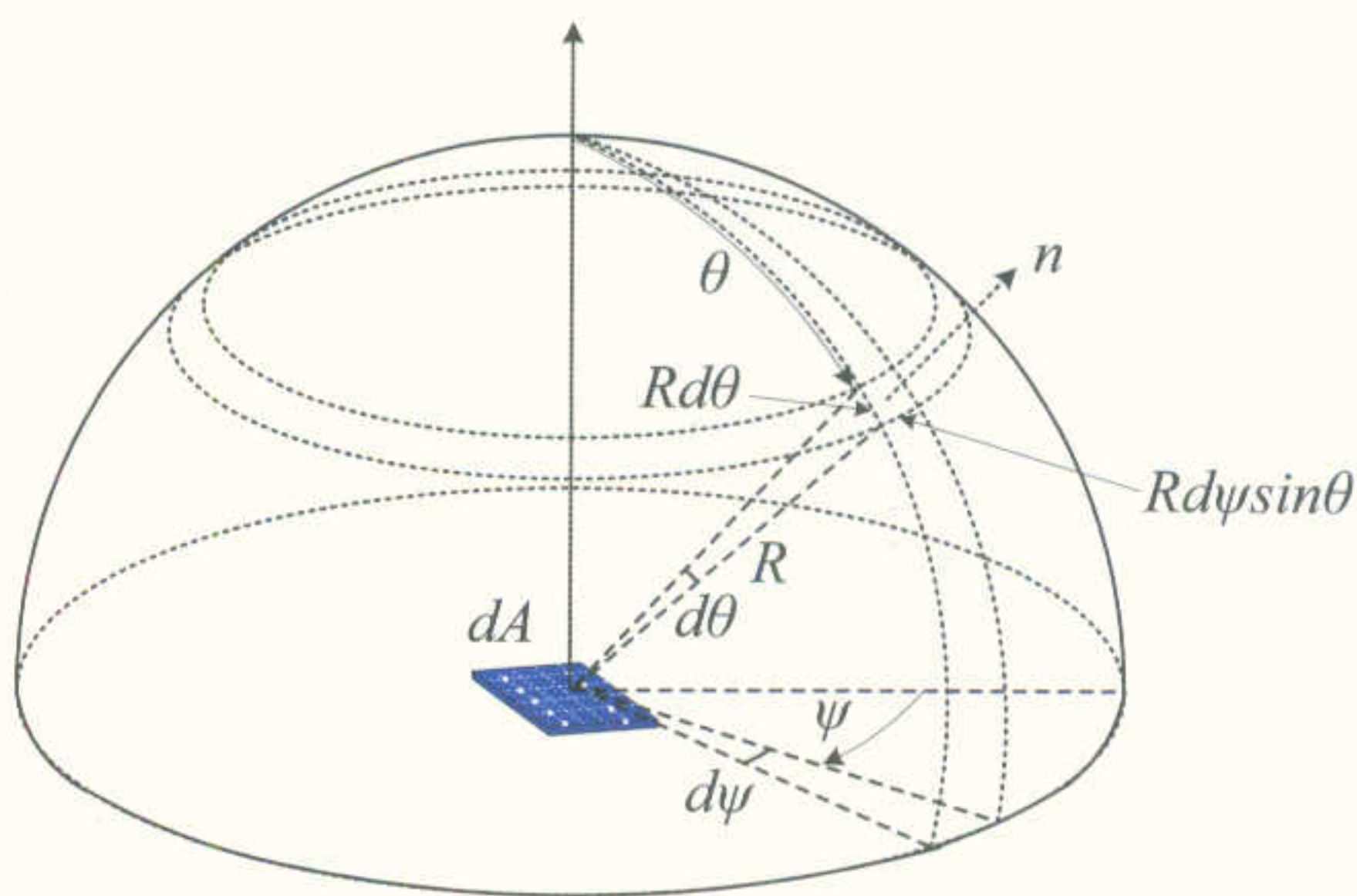
Slika 4.10. Promena difuzne konstante u toku godine

Za određivanje difuznog zračenja na proizvoljno orijentisani kolektor potrebno je koristiti veličinu koja definiše raspodelu zračenja po nebeskoj polusferi. U tu svrhu se koristi radijansa L koja je definisana izrazom (2.18). U slučaju difuznog zračenja može se definisati radijansa kao snaga difuznog zračenja iz određenog pravcu po jedinici prostornog ugla i po jedinici površine koja je normalna na osu prostornog ugla:

$$L_D = \frac{dI_D}{d\Omega \cos \theta} = \frac{\partial^2 P_D}{\partial \Omega \partial A \cos \theta} \quad (4.55)$$

gde je θ ugao između normale na površinu i ose prostornog ugla $d\Omega$.

Izotropski model prepostavlja da difuzno zračenje na solarni kolektor dolazi jednakim intenzitetom iz svih pravaca. Međutim, efektivno zračenje na solarni kolektor zavisi od incidentnog ugla zračenja θ u odnosu na normalu na kolektor. Na slici 4.11 je prikazan model nebeske polusfere sa odgovarajućim uglovima za određivanje difuzne komponente zračenje na kolektor površine dA .



Slika 4.11. Model za određivanje difuznog zračenja na kolektor

Elementarna površina dS na nebeskoj polusferi sa koje dolazi difuzno zračenje može se definisati na osnovu sfernih koordinata na slici 4.11:

$$dS = (Rd\theta)(Rd\psi \sin \theta) \quad (4.56)$$

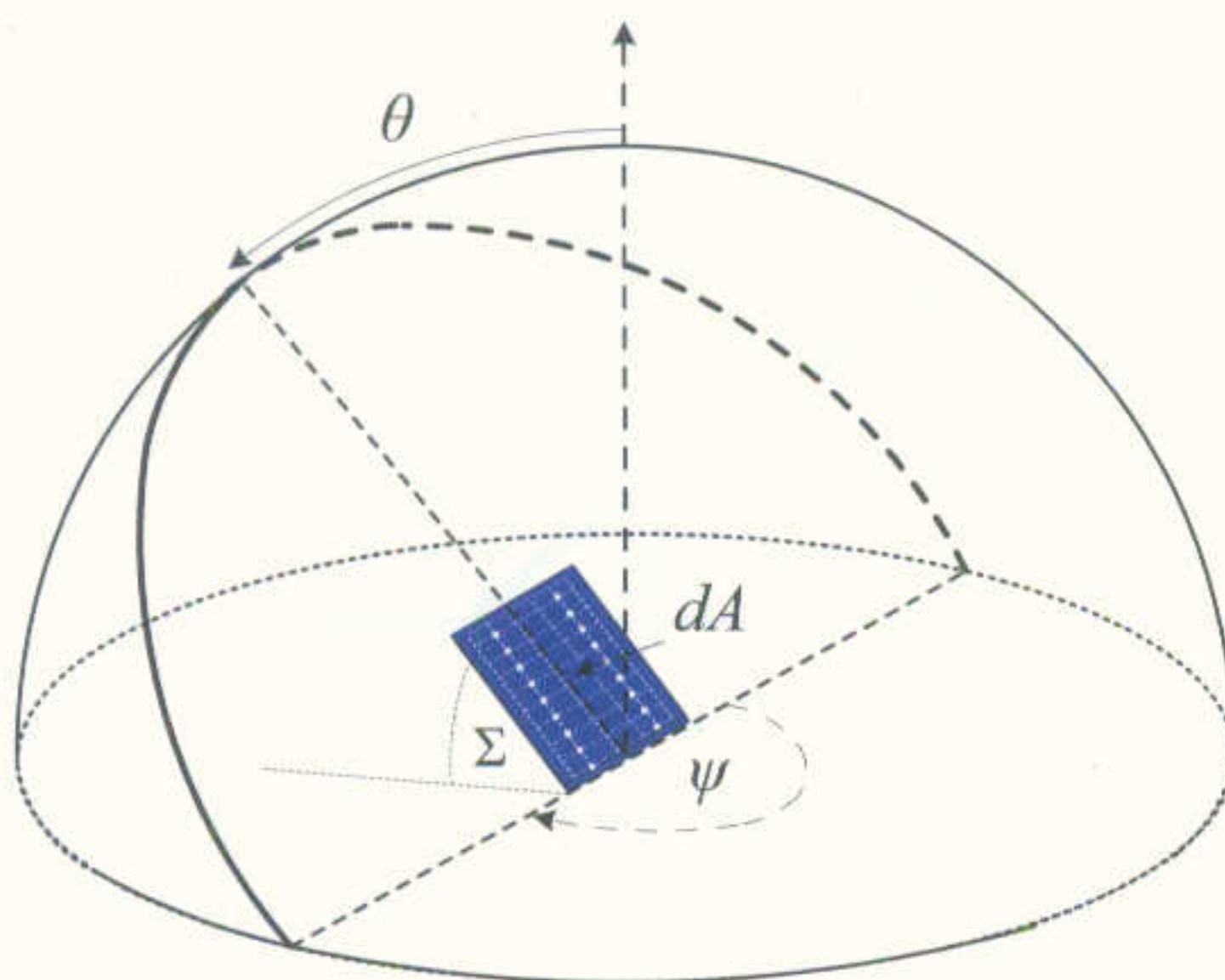
Elementarni prostorni ugao $d\Omega$ koji odgovara površini dS je:

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{Rd\theta Rd\psi \sin \theta}{R^2} = \sin \theta d\theta d\psi \quad (4.57)$$

U slučaju horizontalno postavljenog kolektora, na kolektor pada celokupno difuzno zračenje sa nebeske polusfere. Na osnovu (4.55) i (4.57), difuzna komponenta iradijanse na solarni kolektor koji je postavljen horizontalno je:

$$I_{DH} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_D \sin \theta \cos \theta d\theta d\psi = \pi L_D \quad (4.58)$$

Na slici 4.12 prikazan je kolektor površine dA koji je postavljen pod uglom Σ u odnosu na horizontalnu površinu. U ovom slučaju difuzno zračenje koje dolazi sa isečka nebeske polusfere koji je određen nagibnim uglom Σ neće padati na aktivnu površinu kolektora.



Slika 4.12. Isečak nebeske polusfere određen nagibnim uglom kolektora Σ sa koga ne dolazi difuzno zračenja na solarni kolektor

Difuzna komponenta zračenja na kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ se dobija ako se pri integraljenju radijanse L_D po nebeskoj polusferi izostavi difuzno zračenje sa isečka koji je određen nagibnim uglom Σ :

$$I_{DC} = \int_0^{\pi} \int_0^{\pi/2} L_D \sin \theta \cos \theta d\theta d\psi + \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^{\pi/2-\Sigma} L_D \sin \theta \cos \theta d\theta d\psi \quad (4.59)$$

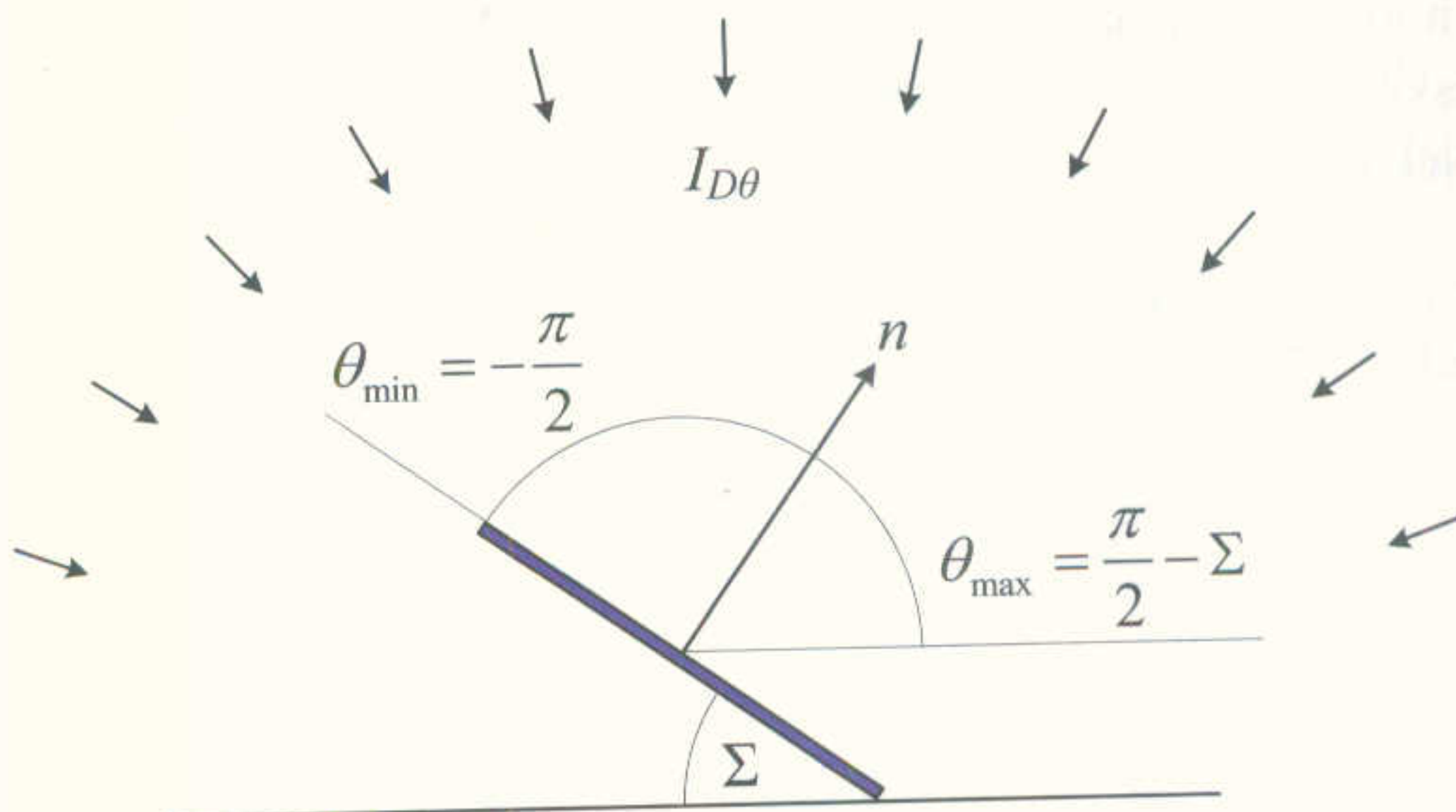
Rešavanjem prethodnog integrala dobija se izraz za difuznu komponentu iradijanse na kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ :

$$I_{DC} = \pi L_D \frac{3 + \cos 2\Sigma}{4} = I_{DH} \frac{3 + \cos 2\Sigma}{4} \quad (4.60)$$

Kada je solarni kolektor postavljen u horizontalnoj ravni ($\Sigma=0$), prethodni izraz daje maksimalnu vrednost za difuznu komponentu iradijanse na kolektor koja iznosi I_{DH} .

Ako je kolektor postavljen vertikalno ($\Sigma=\pi/2$), onda je difuzna komponenta iradijanse na kolektor $I_{DH}/2$.

U literaturi se često koristi jednostavan model za izračunavanje difuzne komponente iradijanse koji pretpostavlja ravnomernu raspodelu difuznog zračenja u cilindričnom koordinatnom sistemu. Pri tome, korišćeni model se svodi na ravan, kao što je prikazano na slici 4.13.



Slika 4.13. Cilindrični model za određivanje difuznog zračenja na solarni kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ u odnosu na horizontalnu površinu

U cilju određivanja difuzne komponente iradijanse na kolektor, uvodi se veličina $I_{D\theta}=dI_D/d\theta$ koja daje raspodelu ukupne difuzne iradijanse I_D po incidentnom uglu θ . Za proizvoljan nagibni ugao Σ kolektora u odnosu na horizontalnu površinu, difuzna komponenta iradijanse na površinu kolektora prema ovom modelu je:

$$I_{DC} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2-\Sigma} I_{D\theta} \cos \theta d\theta = I_{D\theta} (1 + \cos \Sigma) \quad (4.61)$$

Za solarni kolektor postavljen horizontalno, difuzna komponenta iradijanse na kolektor će biti:

$$I_{DH} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{D\theta} \cos \theta d\theta = 2I_{D\theta} \quad (4.62)$$

Na osnovu prethodnih jednačina dobija se izraz za difuznu komponenta iradijanse na površinu kolektora u funkciji difuznog zračenja na horizontalnu površinu i nagibnog ugla kolektora:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} = C I_B \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \quad (4.63)$$

Prethodni izraz daje vrednost $I_{DC} = I_{DH}$ u slučaju horizontalno postavljenog kolektora ($\Sigma=0$) i vrednost $I_{DC} = I_{DH}/2$ u slučaju vertikalno postavljenog kolektora ($\Sigma=\pi/2$). U ovim graničnim slučajevima izraz (4.63) koji je izveden iz cilindričnog modela daje iste vrednosti za difuznu iradijansu kao i izraz (4.60) koji je izveden iz sfernog modela. Međutim, u intervalu između navedena dva granična slučaja ($\Sigma=0$ i $\Sigma=\pi/2$), vrednosti za difuznu iradijansu koje daje cilindrični model odstupaju do 12,5% I_{DH} u odnosu na vrednosti koje daje sferni model. Pri tome, treba imati u vidu da su oba modela aproksimativna pošto pretpostavljaju da je nebo izotropski izvor difuznog zračenja.

Zbog svoje jednostavnosti, izotropski modeli se često koriste u inženjerskim proračunima. Međutim, ravnomerna distribucija difuznog zračenja na nebeskoj polusferi često daje rezultate koji odstupaju od stvarnih meteoroloških podataka. Pokazalo se da izotropski modeli daju dobre rezultate pod uslovom da je nebo potpuno prekriveno oblacima. Pri delimičnoj prekrivenosti neba oblacima izotropski modeli daju rezultate sa većom greškom.

Anizotropski modeli za procenu difuznog zračenja uvažavaju činjenicu da na nebeskoj polusferi postoje oblasti sa normalnim i oblasti sa povećanim intenzitetom difuznog zračenja. Povećani intenzitet sunčevog zračenja se javlja u okolini sunčevog diska (cirkumsolarno zračenje) i blizu linije horizonta.

Jednostavnu modifikaciju izotropskog modela za kolektore orijentisane prema jugu izvršio je *Koronakis* uvodeći pretpostavku da vertikalna ravan orijentisana prema jugu zahvata 2/3 ukupnog difuznog zračenja:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{2 + \cos \Sigma}{3} \quad (4.64)$$

Cirkumsolarni anizotropski model pretpostavlja da ukupno difuzno zračenje dolazi iz oblasti gde se nalazi sunčev disk u datom trenutku. Ovakav model difuzno zračenje tretira kao direktno zračenje:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_Z} \quad (4.65)$$

gde $R_B = \cos \theta / \cos \theta_Z$ predstavlja faktor nagiba.

Temps i *Coulson* su takođe modifikovali izotropski model uvodeći član koji modeluje difuzno zračenje koje dolazi iz blizine sunčevog diska i član koji modeluje difuzno zračenje iz oblasti blizu horizonta:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} (1 + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) \left(1 + \sin^3 \left(\frac{\Sigma}{2} \right) \right)$$

gde su θ incidentni ugao direktnog zračenja i θ_z zenitni ugao.

Klucher-ov model predstavlja nadogradnju prethodnog modela tako što se funkcija F koja definiše stepen prekrivenosti neba oblacima:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} (1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) \left(1 + F \sin^3 \left(\frac{\Sigma}{2} \right) \right)$$

gde je:

$$F = 1 - \left(\frac{I_{DH}}{I_{BH} + I_{DH}} \right)^2$$

Anizotropski model koji su predložili *Hay* i *Davies* pretpostavlja da difuzno zračenje potiče od sunčevog diska i od ostatka neba sa izotropskim zračenjem:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{I_{BH}}{I_{0H}} R_B + \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \left(1 - \frac{I_{BH}}{I_{0H}} \right) \right)$$

gde je I_{BH} direktna iradijansa na horizontalnu površinu, a I_{0H} ekstraterestrična iradijansa na horizontalnu površinu.

Reindl-ov model predstavlja nadogradnju prethodnog modela tako što uvodi difuzno zračenje koje dolazi iz oblasti blizu horizonta:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{I_{BH}}{I_{0H}} R_B + \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \left(1 - \frac{I_{BH}}{I_{0H}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{I_{BH}}{I_{BH} + I_{DH}}} \sin^3 \frac{\Sigma}{2} \right) \right)$$

Perez-ov model je najčešće korišćeni anizotropski model zbog svoje velike tačnosti. Model usvaja tri oblasti na nebu sa različitim intenzitetom difuznog zračenja: cirkumsolarna oblast, oblast blizu horizonta i preostali deo neba sa izotropnim difuznim zračenjem. Jednačina za difuznu iradijansu na površini solarnog kolektora koji je postavljen pod uglom Σ je:

$$I_{DC} = I_{DH} \left((1 - F_1) \frac{1 + \cos \Sigma}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \Sigma \right)$$

gde F_1 i F_2 predstavljaju koeficijente sjajnosti neba za modelovanje cirkumsolarnog diska i oblasti iznad horizonta, a koeficijenti a i b uzimaju u obzir intenzitet difuznog zračenja cirkumsolarnog diska na nagnutu i horizontalnu površ. Koeficijenti F_1 i F_2 se određuju na osnovu indeksa čistine neba, a koeficijenti a i b se određuju na osnovu solarne geometrije:

$$a = \max(0, \cos \theta) \quad (4.72)$$

$$b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z) \quad (4.73)$$

S obzirom da postoji više matematičkih modela za procenu difuzne komponente zračenja na solarni kolektor, to znači da svaki od njih pravi određenu grešku, odnosno nesigurnost u proračunu, što treba imati u vidu pri analizi solarnog potencijala za potrebe planiranja i projektovanja solarnih elektrana. Rezultati proračuna difuzne iradijance na solarni kolektor pokazuju da se korišćenjem izotropskog modela sa cilindričnim koordinatnim sistemom dobijaju vrednosti koje manje odstupaju od vrednosti koje daju anizotropski modeli. Zbog toga se za izračunavanje difuzne komponente iradijance preporučuje izraz (4.63) koji je izveden na osnovu cilindričnog modela.

4.2.3 Reflektovana komponenta iradijance na solarni kolektor

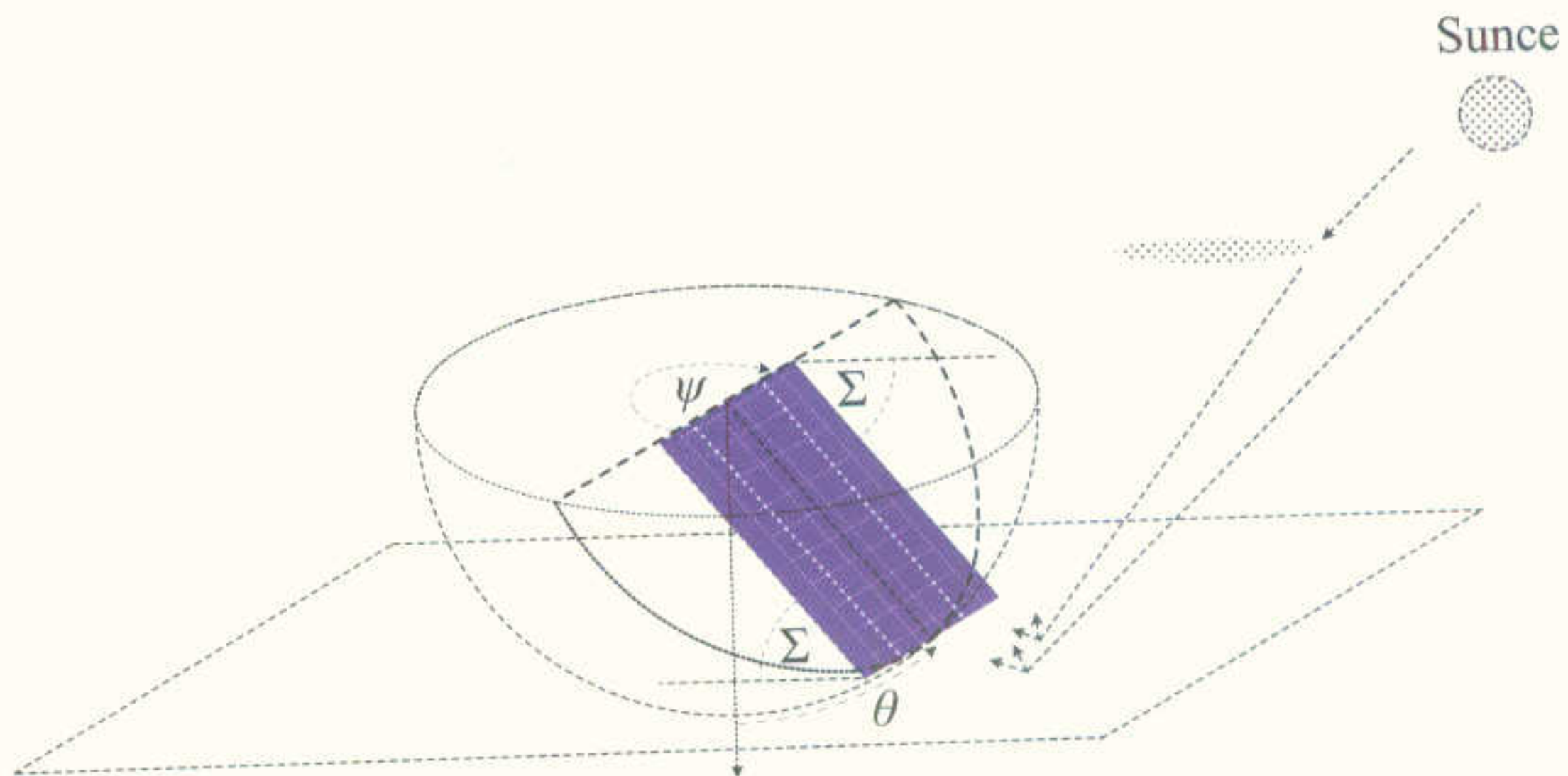
Poslednja komponenta iradijance na solarni kolektor je reflektovana komponenta iradijance. Zračenje sunca se može reflektovati od okolnih objekata ili od podloge koja okružuje kolektor. Reflektovanje incidentne svetlosti od površine se naziva albedo (lat. *albedo* – belina). Solarni zraci koji padnu na zemlju se delom reflektuju, pri čemu intenzitet refleksije zavisi od refleksionih karakteristika površine. Kvantitativna mera refleksivnosti neke površine je koeficijent refleksije ρ čije su uobičajene vrednosti od 0,1 za asfalt (na primer) do 0,85 za svež sneg. Refleksione karakteristike za različite vrste podloge su prikazane u tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Koeficijent refleksije za različite vrste podloge

Podloga	Koeficijent refleksije
sneg	0,4÷0,85
listopadna šuma	0,15÷0,18
četinarska šuma	0,08÷0,15
trava	0,1÷0,25
žitarice	0,15÷0,25
suva zemlja	0,2÷0,35
vlažna zemlja	0,05÷0,15
suv pesak	0,35÷0,45
vlažan pesak	0,2÷0,3
asfalt	0,04÷0,12
beton	0,35÷0,55

Reflektovano zračenje na solarni kolektor dolazi kao rezultat refleksije direktnog i difuznog zračenja od podloge ili od površine Zemlje. Na slici 4.14 je prikazan

kolektor koji je postavljen pod uglom Σ u odnosu na horizontalnu površinu. Oko kolektora je opisana polusfera kroz koju je moguć prolaz reflektovanog zračenja na kolektor iz okolnog prostora. Na aktivnu površinu kolektora može dolaziti reflektovano zračenje koje prolazi kroz isečak polusfere koji određen nagibom kolektora, kao što je prikazano na slici 4.14.



Slika 4.14. Isečak polusfere određen nagibnim uglom kolektora Σ kroz koji dolazi reflektovano zračenje na solarni kolektor

Ukupno reflektovano zračenje od površine tla (nezavisno od položaja kolektora) se dobija integraljenjem po svim prostornim uglovima prikazane polusfere iznad površine tla:

$$\rho I_H = \rho(I_{BH} + I_{DH}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_R \sin \theta \cos \theta d\theta d\psi = \pi L_R \quad (4.74)$$

gde L_R predstavlja radijansu reflektovanog zračenja.

Reflektovana komponenta zračenja na kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ se dobija integraljenjem radijanse L_R po isečku opisane polusfere koji je određen nagibom kolektora:

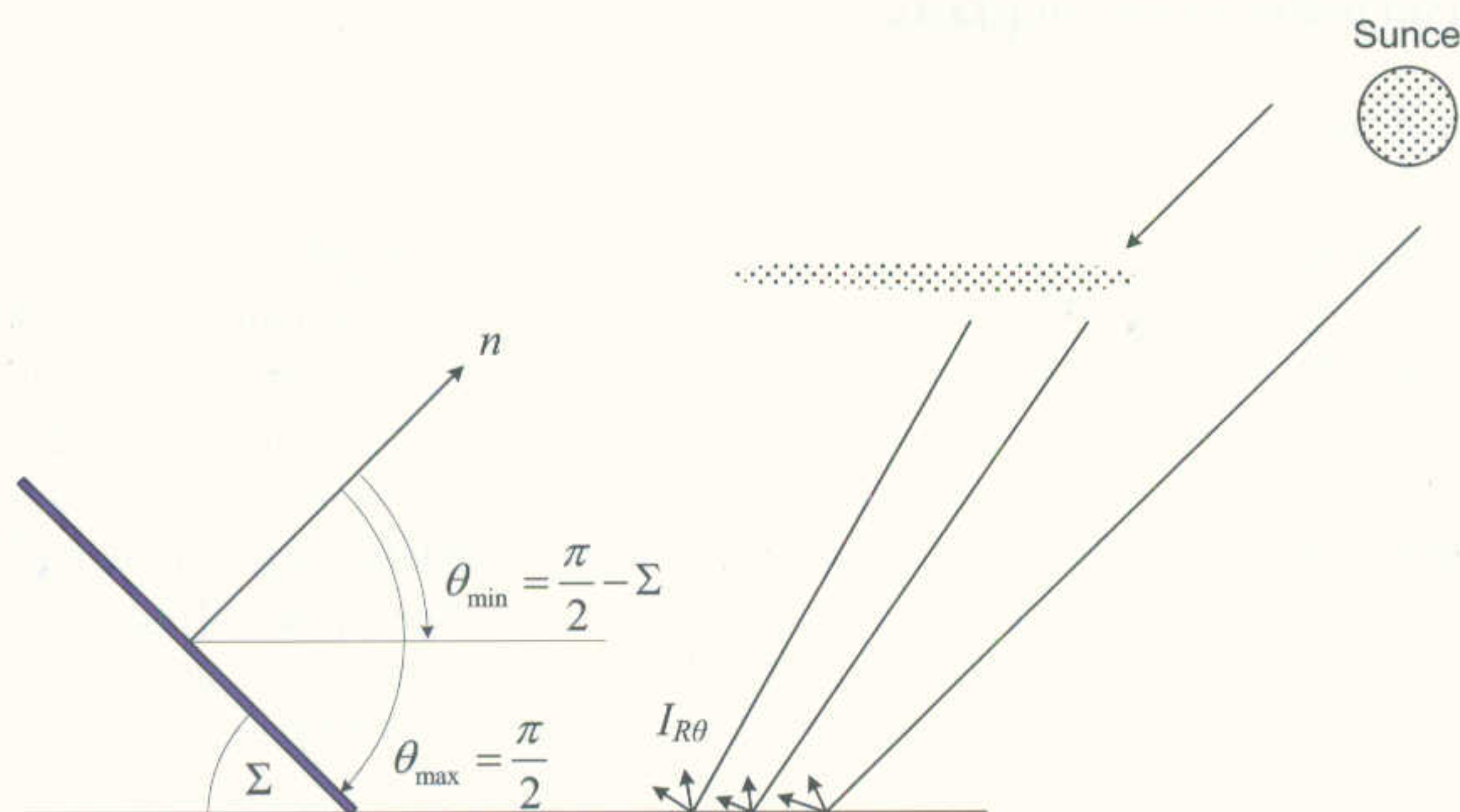
$$I_{RC} = \int_0^{\pi} \int_{\pi/2-\Sigma}^{\pi/2} L_R \sin \theta \cos \theta d\theta d\psi \quad (4.75)$$

Rešavanjem prethodnog integrala dobija se izraz za reflektovanu komponentu iradijanse na kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ :

$$I_{RC} = \pi L_R \frac{1 - \cos 2\Sigma}{4} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \frac{1 - \cos 2\Sigma}{4} \quad (4.76)$$

Kada je solarni kolektor postavljen u horizontalnoj ravni ($\Sigma=0$), prethodni izraz daje vrednost za reflektovanu komponentu iradijanse jednaku nuli. Ako je kolektor postavljen vertikalno ($\Sigma=\pi/2$), onda je vrednost za reflektovanu komponentu iradijanse na kolektor $\rho I_H/2$.

U literaturi se često koristi cilindrični model za izračunavanje reflektovane komponente iradijanse koji se svodi na ravan, kao što je prikazano na slici 4.15.



Slika 4.15. Cilindrični model za izračunavanje reflektovanog zračenja na solarni kolektor koji postavljen pod nagibnim uglom Σ

U cilju određivanja reflektovanog zračenja, potrebno je uvesti veličinu $I_{R\theta} = dI_R/d\theta$ koja daje raspodelu ukupne reflektovane iradijanse I_R po uglu θ . Ukupno reflektovano zračenje od površine tla se dobija integraljenjem po svim uglovima za prostor iznad površine zemlje:

$$\rho(I_{BH} + I_{DH}) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{R\theta} \cos \theta d\theta = 2I_{R\theta} \quad (4.77)$$

Pošto je solarni kolektor postavljen pod nagibnim uglom Σ u odnosu na horizontalnu površinu, incidentni ugao θ reflektovanog zračenja u odnosu na normalu na solarni kolektor je ograničen. Reflektovana komponenta iradijanse na površinu kolektora je:

$$I_{RC} = \int_{\pi/2-\Sigma}^{\pi/2} I_{R\theta} \cos \theta d\theta = I_{R\theta} (1 - \cos \Sigma) \quad (4.78)$$

Na osnovu prethodnih jednačina dobija se izraz za reflektovanu komponentu iradijanse na površinu solarnog kolektora u funkciji ukupnog zračenja na horizontalnu površinu i nagibnog ugla kolektora:

$$I_{DC} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \quad (4.79)$$

Prethodni izraz obuhvata obe komponente reflektovanog zračenja koje potiču od direktnog i difuznog zračenja. Model je izveden pod pretpostavkom da je refleksiona

površina ispred solarnog kolektora neograničena i da se refleksija vrši podjednako svim pravcima sa koeficijentom refleksije ρ . Zamenom izraza za direktnu i difuznu komponentu horizontalne iradijance, proračun reflektovane komponente zračenja može izvršiti prema sledećem izrazu:

$$I_{RC} = \rho I_B (\sin \beta + C) \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \quad (4.8)$$

U slučaju horizontalno postavljenog solarnog kolektora, nagibni ugao kolektora $\Sigma=0$, tako da je reflektovana komponenta iradijance na kolektor jednaka nuli. Kada kolektor postavljen vertikalno, nagibni ugao kolektora je $\Sigma=\pi/2$, tako da se dobija da je reflektovano zračenje na kolektor upola manja u odnosu na ukupno reflektovano zračenje od površine zemlje. U intervalu između navedena dva granična slučaja ($\Sigma=0$ i $\Sigma=\pi/2$), vrednosti za reflektovanu komponentu iradijance koje daje cilindrični model odstupaju do 12,5% I_{DH} u odnosu na vrednosti koje daje izraz (4.76) na osnovu sfernog modela. S obzirom da su navedeni modeli aproksimativni, za izračunavanje reflektovane komponente iradijance biće korišćen izraz (4.63) koji je izveden na osnovu cilindričnog modela.

4.2.4 Ukupna iradijansa na solarni kolektor

Na osnovu izraza (4.26), (4.34), (4.63) i (4.80), može se napisati izraz za ukupnu iradijansu na solarni kolektor za vedar dan:

$$I_C = I_B \cos \theta + C I_B \frac{1 + \cos \Sigma}{2} + \rho I_B (\sin \beta + C) \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \quad (4.81)$$

U slučaju horizontalne površine ili horizontalno postavljenog solarnog kolektora, ukupna solarna iradijansa I_H na horizontalnu površinu može se predstaviti kao zbir direktna komponente iradijance I_{BH} i difuzne komponente iradijance I_{DH} :

$$I_H = I_{BH} + I_{DH} \quad (4.82)$$

jer je reflektovana komponenta iradijance na horizontalnu površinu jednaka nuli.

U slučaju terena sa složenom (realnom) topografijom sa promenljivim reflektivnim karakteristikama, proračun reflektovane komponente solarnog zračenja na proizvoljno orijentisanu površ solarnog kolektora je kompleksan zadatak i zahteva primenu softvera koji se temelje na numeričkim matematičkim modelima na bazi konačnih elemenata.

4.2.5 Izračunavanje insolacije na solarni kolektor

Prethodni izrazi za iradijansu na solarni kolektor predstavljaju snagu zračenja po jedinici površine solarnog kolektora (u W/m^2). Insolacija na solarni kolektor predstavlja dozračenu energiju po jedinici površine (u Wh/m^2) u određenom vremenskom periodu. Insolacija na solarni kolektor tokom zadatog perioda T se određuje prema izrazu:

$$\bar{I}_C = \int_0^T I_C dt \quad (4.83)$$

gde I_C predstavlja iradijansu, a $\bar{I}_C$ insolaciju na kolektor.

Insolacija se obično određuje na satnom, dnevnom ili godišnjem nivou. Kao pogodni pokazatelji potencijala solarnog zračenja, često se izračunavaju i srednje satne i srednje dnevne vrednosti insolacije za pojedine mesece ili na godišnjem nivou. Srednje satne insolacije na solarni kolektor koji je postavljen u okolini Beograda pod nagibnim uglom od 34° , izračunate na osnovu merenja horizontalne iradijanse za 2009. godinu, prikazane su u tabeli 3.2

4.3 Optimalni nagibni i azimutni uglovi fiksno postavljenih solarnih kolektora

Zbog dnevnih i sezonskih promena azimutnog i altitudnog ugla sunca menja se incidentni ugao pod kojim sunčevi zraci padaju na solarni kolektor sa fiksnim azimutnim i nagibnim uglom. U cilju optimalnog iskorišćenja solarnog zračenja, potrebno je optimizovati prostornu orijentaciju fiksno postavljenih solarnih kolektora. Model za vedre dane (*Clear Day model*) ne uzima u obzir oblačnost, tako da se optimizacija azimutnog i nagibnog ugla solarnog kod ovog modela vrši pod pretpostavkom da su dani vedri.

Približan postupak određivanja orijentacije i nagiba solarnog kolektora na severnoj geografskoj širini pri vedrim danima podrazumeva da kolektor treba da bude okrenut prema jugu i da treba da bude postavljen pod nagibnim uglom jednakim latitudnom uglu L (uglu geografske širine) mesta na kome se nalazi kolektor. Zbog toga je direktno sunčevo zračenje normalno na kolektor u solarno podne u danima ravnodnevnice (21. mart i 21. septembar):

$$\Sigma = L \quad (4.84)$$

$$\phi_C = 0^\circ \quad (4.85)$$

Ovakav postupak određivanja nagibnog ugla kolektora nije optimalan jer pretpostavlja da su srednje insolacije na kolektor jednake u letnjem i zimskom periodu. Na osnovu dijagrama putanje sunca na slici 3.10 jasno je da je u letnjem periodu značajno veća obdanica, a samim tim i insolacija na kolektor, tako da letnji meseci obezbeđuju veću insolaciju od zimskih. Iz tog razloga bolji pristup u određivanju nagibnog ugla solarnog kolektora zasniva se na optimizaciji ukupne godišnje insolacije koja se izračunava na osnovu vrednosti iradijanse na kolektor u toku godine. Direktna komponenta insolacije na južno orijentisani solarni kolektor ($\phi_C = 0$) je

$$\bar{I}_{BC} = \int_0^T I_B \cos \theta dt = \int_0^T I_B (\cos \beta \cos \phi_S \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma) dt \quad (4.86)$$

gde je T posmatrani period vremena.

Uslov za određivanje optimalnog nagibnog ugla kolektora na osnovu direktnog zračenja na kolektor je:

$$\frac{\partial \bar{I}_{BC}}{\partial \Sigma} = 0 \quad (4.87)$$

odnosno:

$$\int_0^T I_B (\cos \beta \cos \phi_s \cos \Sigma - \sin \beta \sin \Sigma) dt = 0 \quad (4.88)$$

Optimalni nagibni ugao kolektora u posmatranom periodu T pri direktnom zračenju na kolektor se određuje prema sledećem izrazu:

$$\operatorname{tg} \Sigma = \frac{\int_0^T I_B \cos \beta \cos \phi_s dt}{\int_0^T I_B \sin \beta dt} \quad (4.89)$$

Za geografsku širinu Beograda $L=44,8^\circ$ prethodni izraz daje vrednost optimalnog nagibnog ugla kolektora $\Sigma \approx 38,5^\circ$ na godišnjem nivou.

Prethodni postupak određivanja nagibnog ugla solarnog kolektora zanemaruje difuznu i reflektovanu komponentu zračenja na kolektor. Tačniji postupak zahteva nalaženje optimalnog nagibnog ugla kolektora koji zavisi od odnosa sve tri komponente zračenja na kolektor. Ukupna insolacija na južno orijentisani solarni kolektor ($\phi_c = 0$) je:

$$\bar{I}_C = \int_0^T \left(I_B (\cos \beta \cos \phi_s \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma) + C I_B \frac{1 + \cos \Sigma}{2} + \rho I_B (\sin \beta + C) \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) dt \quad (4.90)$$

Korišćenjem uslova

$$\frac{\partial \bar{I}_C}{\partial \Sigma} = 0 \quad (4.91)$$

dobija se izraz za izračunavanje optimalnog nagibnog ugla kolektora u posmatranom periodu T na osnovu ukupnog zračenja na kolektor:

$$\operatorname{tg} \Sigma = \frac{\int_0^T I_B \cos \beta \cos \phi_s dt}{\int_0^T I_B \left(\sin \beta + \frac{C}{2} - \frac{\rho}{2} (\sin \beta + C) \right) dt} \quad (4.92)$$

Za geografsku širinu Beograda $L=44,8^\circ$, prethodni izraz daje vrednost optimalnog nagibnog ugla kolektora $\Sigma \approx 37,5^\circ$ na godišnjem nivou, za vrednost koeficijenta refleksije $\rho=0,2$ pod pretpostavkom da su svi dani vedri. Razlika u odnosu na vrednos

optimalnog ugla koja je dobijena uvažavanjem samo direktnog zračenje je oko 1° . Zbog toga je pri određivanju optimalnih nagibnih uglova solarnih kolektora pri vedrom vremenu moguće zanemariti uticaj difuznog i reflektovanog zračenja.

Potrebno je još utvrditi kako se menja incidentni ugao sunčevog zračenja na južno orijentisan solarni kolektor koji je postavljen pod optimalnim nagibnim uglom Σ . Incidentni ugao zračenja za solarni kolektor orijentisan prema jugu se dobija iz izraza (4.46) uz uslov $\phi_c = 0$:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \phi_s \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (4.93)$$

Na osnovu transformacije polarnih koordinata iz mesnog ekvatorskog sistema u horizontski sistem (3.17) i (3.19), dobija se:

$$\cos \theta = (\sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta) \sin \Sigma + (\cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta) \cos \Sigma \quad (4.94)$$

odnosno nakon sređivanja prethodnog izraza:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(L - \Sigma) + \cos \delta \cos H \cos(L - \Sigma) \quad (4.95)$$

Zbog spore promene ugla deklinacije δ moguće je svakodnevno vršiti ručno podešavanje nagibnog ugla solarnog kolektora, tako da direktno solarno zračenje pada normalno na ravan kolektora u solarno podne. Prema slici 3.15, direktno sunčevo zračenje je normalno na solarni kolektor u solarno podne ako je nagibni ugao kolektora:

$$\Sigma = L - \delta \quad (4.96)$$

U tom slučaju je $L - \Sigma = \delta$, tako da je incidentni ugao direktnog sunčevog zračenja na južno orijentisan solarni kolektor sa ručnim podešavanjem nagibnog ugla:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos H \quad (4.97)$$

Zbog relativno spore promene ugla deklinacije, ručno podešavanje nagibnog ugla čak i ne mora da se vrši svakodnevno već periodično.

4.4 Solarni kolektori sa sistemima za optimalno praćenje sunca

Kod solarnih kolektora sa fiksnim azimutnim i nagibnim uglom nije moguće postići da direktno zračenje bude uvek normalno na kolektor. U izvesnim slučajevima je pogodno koristiti solarne kolektore koji imaju mehaničke sisteme za praćenje položaja sunca (*solar trackers*) koji obezbeđuju da direktno zračenje bude normalno na kolektor. Maksimalno iskorišćenje zračenja na kolektor pri vedrom danu se praktično postiže ako je direktno zračenje uvek normalno na površinu kolektora, odnosno kada incidentni ugao direktnog zračenja u odnosu na normalu na kolektor iznosi $\theta = 0^\circ$.

Postoji više vrsta sistema za praćenje položaja sunca koji se koriste u praksi:

- sistemi za praćenje po dve ose,