

Analiza uticaja nagiba zastakljene površine broda na refleksiju, apsorpciju i prolaz sunčevog zračenja

Mr Dimitrije Lilić, dipl.inž.¹⁾

Zastakljene površine brodova i objekata na vodi, osim vertikalnog položaja mogu biti nagnute pod nekim uglom. Sunčevo zračenje, koje pada na zastakljenu površinu broda, jednim delom se reflektuje, deo staklo apsorbuje a deo prođe kroz staklo. Refleksija, apsorpcija i prolaz sunčevog zračenja kod zastakljene površine broda zavisi od niza faktora, a to su: geografski položaj lokacije na kojoj se nalazi brod, orijentacija broda, položaj zastakljene površine na brodu, trenutni položaj Sunca, intenzitet direktnog i difuznog sunčevog zračenja na zastakljenu površinu, refleksija sunčevog zračenja od površine vode, vrsta i debljina stakla, nagib zastakljene površine, veličina i osenčenost zastakljene površine i sl. Formiranim matematičkim modelom i računarskim programom je obuhvaćena kompleksna interakcija relevantnih parametara, a na primeru za položaj broda u okolini Beograda, na Savi ili Dunavu, razmatran je uticaj nagiba zastakljene površine na refleksiju, apsorpciju i prolaz sunčevog zračenja.

Ključne reči: Brod, zastakljena površina, nagib zastakljene površine, sunčevo zračenje, koeficijent refleksije stakla, koeficijent apsorpcije stakla, koeficijent propustljivosti stakla, bilans toplote.

Uvod

SUNČEVO zračenje je jedan od osnovnih faktora koji utiče na parametre mikroklimе u prostorijama broda, i potrebe održavanja tih parametara u određenim granicama. Potrošnja energije u te svrhe uzrokuje potrebu njenom racionalizacijom.

Pored vertikalnog položaja, zastakljene površine brodova i objekata na vodi, mogu biti i nagnute pod nekim uglom. Npr. kormilarnice na brodovima i slične prostorije na platformama, prostorije u trupu broda, prednje zastakljene površine brzih čamaca, posebni zahtevi za određene uglove nagiba antibalističkog stakla ratnih brodova i dr.

Direktno i difuzno sunčevo zračenje koje ulazi u prostoriju broda, pada na zastakljenu površinu i jednim delom se reflektuje, deo staklo apsorbuje, a deo prodire u prostoriju.

Sunčevo zračenje (koje obično staklo propušta u opsegu talasnih dužina do $\approx 2.7 \mu\text{m}$) spada u tzv. kratkotalasno zračenje, za razliku od dugotalasnog niskotemperaturnog zračenja ($>2.7 \mu\text{m}$), koje emituju zagrejane površine.

Na brodovima, zastakljene površine uglavnom su izrađene od jednostrukog stakla, najčešće debljine od 6 do 15 mm, a u nekim slučajevima i debljeg (npr. približno 45 mm, antibalističko staklo ratnih brodova i sl.).

Refleksija, apsorpcija i prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljene površine broda zavisi od niza faktora, a to su:

- geografski položaj lokacije na kojoj se nalazi brod,
- orijentacija broda,
- položaj prostorije na brodu, odnosno zastakljene površine na njoj,
- trenutni položaj Sunca,
- intenzitet direktnog i difuznog sunčevog zračenja na zastakljenu površinu,
- refleksija sunčevog zračenja o površinu vode,
- vrsta i debljina stakla,

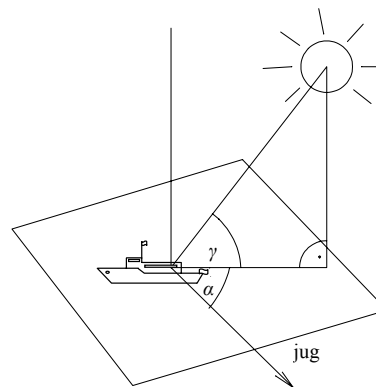
- nagib zastakljene površine,
- veličina i osenčenost zastakljene površine, i sl.

Formiranim matematičkim modelom i računarskim programom [1], treba da se obuhvati kompleksna interakcija relevantnih parametara i sagleda uticaj nagiba zastakljene površine broda na refleksiju, apsorpciju i prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljene površine brodskih prostora.

Razmatrane su južno i istočno orijentisane površine broda, za poziciju broda na Savi ili Dunavu u okolini Beograda i za celodnevnu promenu pozicije Sunca, 1. maja, za staklo debljine 10mm i za promenu ugla nagiba stakla u opsegu $\pm 45^\circ$ u odnosu na vertikalno staklo, odnosno $45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$, na sl.7.

Pozicije broda i Sunca

Za proračun sunčevog zračenja kroz zastakljene površine u prostorije broda treba, između ostalog, znati pozicije broda i Sunca, odnosno njihovu međuzavisnost.



Slika 1. Pozicija Sunca u odnosu na brod

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Pozicija Sunca u odnosu na poziciju broda, na sl.1, data je relacijama:

$$\sin \gamma = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1)$$

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \gamma} \quad (2)$$

gde su:

- γ ($^{\circ}$) - elevacija Sunca,
- α ($^{\circ}$) - azimut Sunca, računajući od smera juga, pozitivno u smeru zapada, negativno u smeru istoka,
- φ ($^{\circ}$) - geografska širina lokaliteta na kome se nalazi brod, (za Beograd iznosi 44° i $49'$)
- δ ($^{\circ}$) - deklinacija Sunca, ugao koji odgovara visini Sunca iznad ekvatora u vreme posmatranja, i
- ω ($^{\circ}$) - sunčev časovni ugao, ugao između časovnog kruga (geografski pravac Sunca) i meridijana (geografski pravac juga), u vreme posmatranja.

Radi upoređenja merenja sunčevog zračenja na različitim lokacijama, konvencija Svetske meteorološke organizacije (WMO) preporučuje da se sva meteorološka merenja vrše prema TLT (True Local Time). Takođe, koriste se i termini LSoT (lokalno sunčano vreme), solarno vreme i sl. Tada sva razmatranja zračenja imaju prirodnu simetriju u odnosu na stvarno podne. Za TLT=12h, stvarno lokalno podne, Sunce kulminira na jugu.

Civilni život zahteva upotrebu uniformne vremenske skale za određeni region, tzv. standardno vreme (ST) ili lokalno standardno vreme (LST).

Veza između sunčanog vremena (TLT) i standardnog vremena (ST) data je izrazom:

$$TLT = ST(\lambda_s) + (\lambda - \lambda_s) \cdot 4 \text{ min}/1^{\circ} + Z \quad (3)$$

gde su:

- λ - geografska dužina posmatrane tačke locirane na meridijanu λ , (za Beograd iznosi 20° i $28'$)
- λ_s - izabrani standardni meridijan i
- Z [min] - jednačina vremena.

Treba uzeti u obzir i letnje pomeranje merenja vremena za određene regione, kada je ST_{leto} uvećano za 1h za područje SRJ, pa je tada:

$$ST = ST_{\text{zima}} = ST_{\text{leto}} - 1h \quad (4)$$

Na pr. za lokaciju Beograda, 1. maja za letnje merenje vremena je: $ST = TLT + 35\text{min}$.

Sunčevo zračenje na nagnutoj ravni

Ravne površine nagnute pod uglom β u odnosu na horizontalnu ravan i sa normalom upravljenom po azimutu α' , prima zračenje $G(\beta, \alpha')$ koje u osnovi sadrži tri fluksa zračenja:

$$G(\beta, \alpha') = I(\beta, \alpha') + D(\beta, \alpha') + R(\beta, \alpha') \quad (5)$$

$I(\beta, \alpha')$ je direktno sunčevo zračenje na nagnutoj ravni i dato je izrazom:

$$I(\beta, \alpha') = I \cos \eta \quad (6)$$

gde je I direktno sunčevo zračenje na ravan upravnu na zračenje, a η je ugao između pravca Sunca i normale nagnute ravni. Pomoću sferne geometrije, η je dato pomoću izraza:

$$\cos \eta = \sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos (\alpha - \alpha') \quad (7)$$

Za vertikalnu ravan, $\beta=90^{\circ}$, izraz (7) glasi:

$$\cos \eta = \cos \gamma \cos (\alpha - \alpha') \quad (7a)$$

$D(\beta, \alpha')$ je deo f od difuznog sunčevog zračenja D koje može da bude viđeno sa ravni, i $R(\beta, \alpha')$ je deo $(1-f)$ od reflektovanog globalnog zračenja R koje pada na ravan.

Na osnovu toga imamo relacije:

$$D(\beta, \alpha') = fD \quad (8)$$

$$R(\beta, \alpha') = (1 - f)R = (1 - f)\rho_s G \quad (9)$$

gde je: ρ_s - srednji kratkotalasni albedo tla viđenog sa ravni.

Prema tome imamo:

$$G(\beta, \alpha') = I \cos \eta + fD + (1 - f)\rho_s G \quad (10)$$

Pretpostavljajući izotropsko nebesko zračenje i izotropsku refleksiju tla, sferna geometrija daje [2,3]:

$$f = (1 + \cos \beta)/2 = \cos^2(\beta/2) \quad (11)$$

Uprošćenjem, jednačina (10) proizlazi u:

$$G(\beta, \alpha') = I \cos \eta + D \cos^2(\beta/2) + \rho_s G [1 - \cos^2(\beta/2)] \quad (12)$$

Za vertikalnu ravan, izraz (12) glasi:

$$G(90^{\circ}, \alpha') = I \cos \eta + 0.5 D + 0.5 \rho_s G \quad (12a)$$

Jednačina (12) se može upotrebiti za proračun $G(\beta, \alpha')$ iz izmerenih podataka za G i D . I je dato pomoću izraza:

$$I = B/\sin \gamma = (G - D)/\sin \gamma \quad (13)$$

gde su:

- $G = B + D$ - globalno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu,
- B - direktno sunčevo zračenje na horizontalnu ravan,
- D - difuzno sunčevo zračenje na horizontalnu ravan.

Sunčevo zračenje na ravan pored vodene površine

Kod objekata na vodi (i pored vodenih površina), pored direktnog i difuznog sunčevog zračenja koje ulazi u prostoriju, dolaze do izražaja komponente reflektovanog direktnog i difuznog zračenja površine vode.

Direktno zračenje reflektovano od mirne površine vode, ima isti azimut kao i direktno zračenje i negativan ugao elevacije.

Difuzno sunčevo zračenje koje pada na površinu vode, jednim delom se reflektuje i zadržava difuzni karakter, a ostali deo prodire u vodu.

Pretpostavka je da je masa vode dovoljno velika, odnosno voda dovoljno duboka da sa dnom apsorbira celokupnu refraktovanu energiju.

Pretpostavljajući izotropsko nebesko zračenje i prisustvo vodene mirne (horizontalne, ogledalne) površine navedenih osobina, koja ima koeficijent refleksije na direktno sunčevo zračenje, ρ_{shD} , i koeficijent refleksije za difuzno sunčevo zračenje, ρ_{shd} , izraz (12) za sunčevo zračenje koje prima kosa površina pored vode u određenom trenutku vremena (TLT ili ST), može se modifikovati u:

$$G(\beta, \alpha') = I \cos \eta' + \rho_{shD} I \cos \eta'' + D \cos^2(\beta/2) + \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)] \quad (14)$$

odnosno:

$$G(\beta, \alpha') = I [\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos (\alpha - \alpha')] + \rho_{shD} I [\sin (-\gamma) \cos \beta + \cos (-\gamma) \sin \beta \cos (\alpha - \alpha')] + \quad (14a)$$

$$+ D \cos^2(\beta/2) + \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)]$$

Za $\beta = 90^\circ$, izraz je:

$$G(90^\circ, \alpha') = I \cos \eta' + 0.5 D + 0.5 \rho_{shd} D + \rho_{shd} I \cos \eta'' \quad (14b)$$

odnosno:

$$G(90^\circ, \alpha') = I \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha') + \rho_{shd} I \cos(-\gamma) \cos(\alpha - \alpha') + 0.5 D (1 + \rho_{shd}) \quad (14c)$$

gde su:

η' - ugao između pravca Sunca i normale nagnute ravni (zastakljene površine),

η'' - ugao između direktnog sunčevog zračenja reflektovanog mirne površine vode i normale nagnute ravni (zastakljene površine),

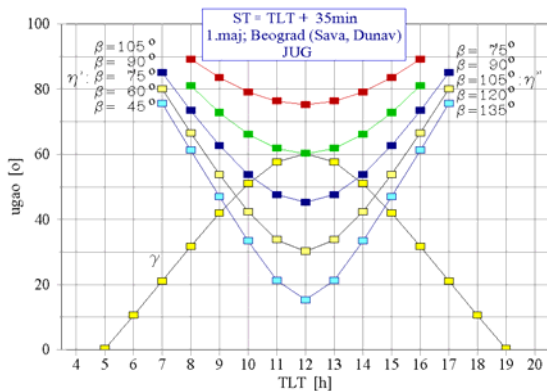
Uticaj nagiba zastakljene površine broda na koeficijente refleksije, apsorpcije i propustljivost sunčevog zračenja

Deo sunčevog zračenja koje pada na površinu ravnog stakla se reflektuje nazad, deo staklo apsorbira, a ostatak prođe kroz staklo. Relativni odnosi tri komponente definisani su pomoću koeficijenata refleksije, apsorpcije i propustljivosti sunčevog zračenja za ravno staklo i izračunati su prema postupku i izrazima iz [1].

Upadni ugao direktnog sunčevog zračenja u odnosu na normalu zastakljene površine (η') zavisi od međusobnog položaja Sunca i posmatrane zastakljene površine i neprekidno se menja u toku dana i u toku godine. Pošto koeficijenti apsorpcije, refleksije i propustljivosti za direktno sunčevo zračenje zavise i od upadnog ugla direktnog zračenja, to se i njihove vrednosti menjaju u toku dana i u toku godine.

Upadni ugao direktnog sunčevog zračenja reflektovanog od mirne površine vode u odnosu na normalu zastakljene površine (η''), zavisi od međusobnog položaja Sunca i posmatrane zastakljene površine i neprekidno se menja u toku dana i u toku godine, to se i koeficijenti apsorpcije, refleksije i propustljivosti za direktno sunčevo zračenje reflektovano od mirne površine, takođe, menjaju u toku dana i u toku godine.

Za difuzno zračenje, koeficijenti imaju konstantne vrednosti.

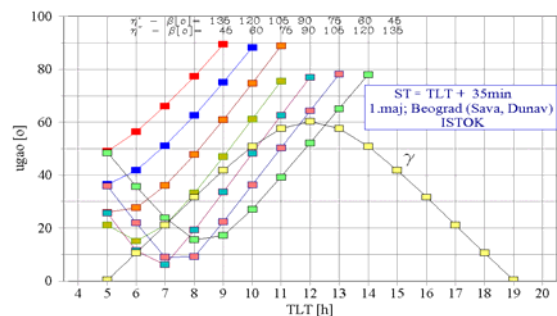


Slika 2. Časovna promena upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja (η'); upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja reflektovanog od mirne površine vode (η''); i ugla elevacije Sunca (γ)

Na sl.2 prikazana je časovna promena upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja u odnosu na normalu

zastakljene površine (η'); upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja reflektovanog od mirne površine vode u odnosu na normalu zastakljene površine (η''); i ugla elevacije Sunca (γ); za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav) za južno orijentisano staklo u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno, standardnog vremena (ST).

Na sl.3, prikazana je časovna promena upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja u odnosu na normalu zastakljene površine (η'); upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja reflektovanog od mirne površine vode u odnosu na normalu zastakljene površine (η''); i ugla elevacije Sunca (γ); za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav), za istočno orijentisano staklo, u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno, standardnog vremena (ST).



Slika 3. Časovna promena upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja (η'); upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja reflektovanog od mirne površine vode (η''); i ugla elevacije Sunca (γ)

Za zapadno orijentisano staklo, promena upadnih uglova (η') i (η''), ima simetričan tok u odnosu na istočno orijentisano staklo, a za $TLT=12h$.

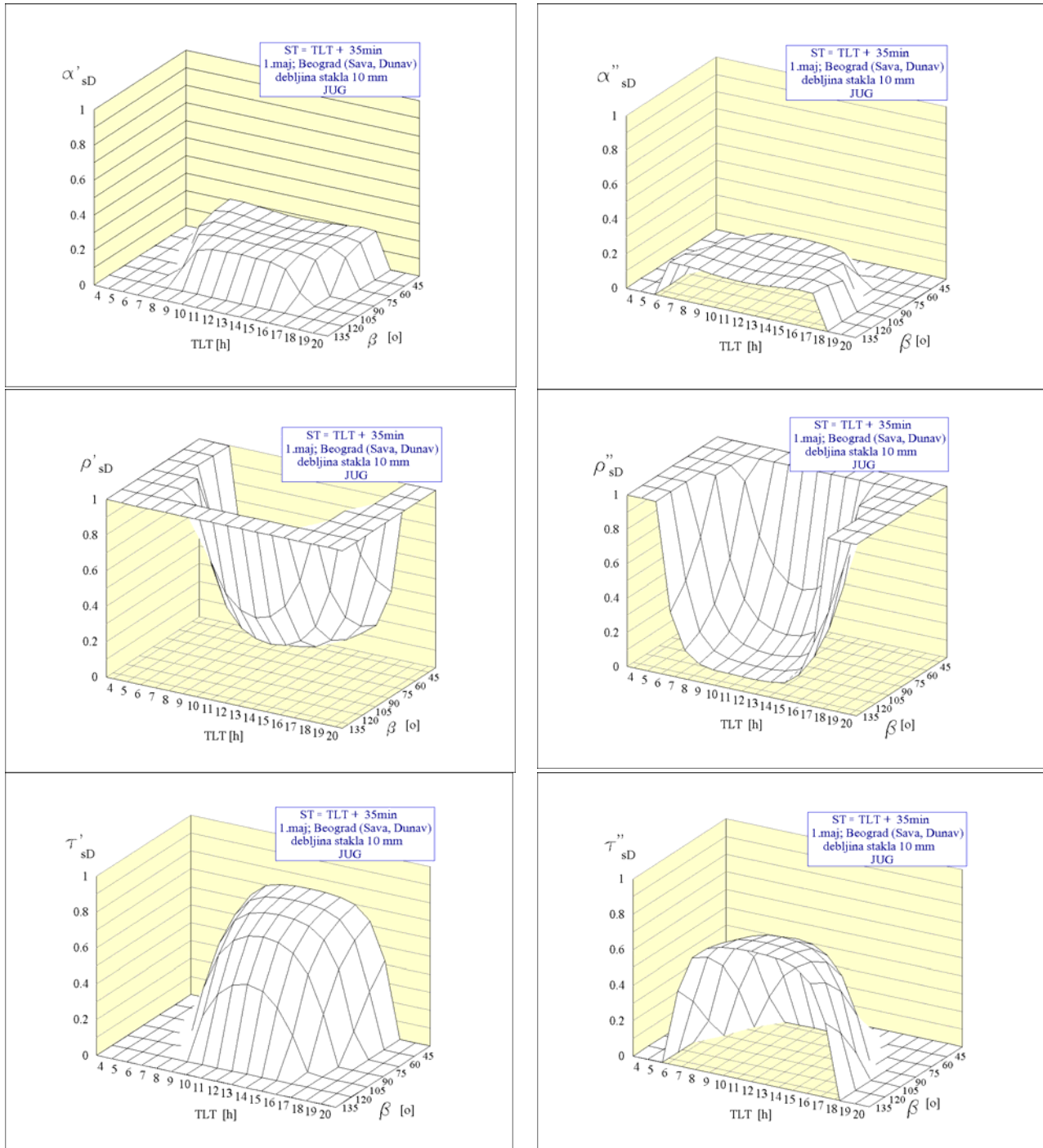
Na sl.4, prikazana je časovna promena koeficijenata apsorpcije, α'_{SD} , (a'), refleksije, ρ'_{SD} , (b'), i propustljivosti stakla, τ'_{SD} , (c'), za direktno sunčevo zračenje; i promena koeficijenata apsorpcije, α''_{SD} , (a''), refleksije, ρ''_{SD} , (b''), i propustljivosti stakla, τ''_{SD} , (c''), za direktno sunčevo zračenje reflektovano od mirne površine vode; za staklo debljine 10 mm, za južno orijentisano staklo, za pozicije Sunca 1. maja za lokaciju Beograda (Sava, Dunav) u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno standardnog vremena (ST).

Sa porastom ugla nagiba (β) južno orijentisane zastakljene površine, za direktno sunčevo zračenje opada koeficijent τ'_{SD} , a ρ'_{SD} raste, dok za reflektovano direktno sunčevo zračenje τ''_{SD} raste a opada ρ''_{SD} . Koeficijenti α'_{SD} i α''_{SD} menjaju se u manjoj meri i imaju približno jednake i ujednačene vrednosti.

U ovom slučaju za južno orijentisane površine, za $\beta \leq \gamma_{TLT=12h}$, na zastakljenu površinu u toku dana ne pada reflektovano direktno sunčevo zračenje, dok za $\beta \geq 180^\circ - \gamma_{TLT=12h}$, na zastakljenu površinu u toku dana ne pada direktno sunčevo zračenje. U Beogradu, 1. maja, $\gamma_{TLT=12h} = \gamma_{max} = 60.24^\circ$ ($\sim 60^\circ 15'$).

Na sl.5 prikazana je časovna promena koeficijenata apsorpcije, α'_{SD} , (a'), refleksije, ρ'_{SD} , (b'), i propustljivosti stakla, τ'_{SD} , (c'), za direktno sunčevo zračenje; i promena koeficijenata apsorpcije, α''_{SD} , (a''), refleksije, ρ''_{SD} , (b''), i propustljivosti stakla, τ''_{SD} , (c''), za direktno sunčevo zračenje reflektovano od mirne površine vode; za staklo debljine 10 mm, za istočno orijentisano staklo, za pozicije

Sunca 1. maja za lokaciju Beograda (Sava, Dunav) u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno, standardnog vremena (ST).



Slika 4. Časovna promena koeficijenta apsorpcije, α'_{sD} , (a'), refleksije, ρ'_{sD} , (b'), i propustljivosti stakla, τ'_{sD} , (c'), za direktno sunčevo zračenje; i promena koeficijenta apsorpcije, α''_{sD} , (a''), refleksije, ρ''_{sD} , (b''), i propustljivosti stakla, τ''_{sD} , (c''), za direktno sunčevo zračenje reflektovano od mirne površine vode

Sa porastom ugla nagiba (β), istočno orijentisane zastakljene površine, opada vremenski period kojim su ove izložene direktnom sunčevom zračenju dok raste vremenski period izloženosti reflektovanom direktnom sunčevom zračenju.

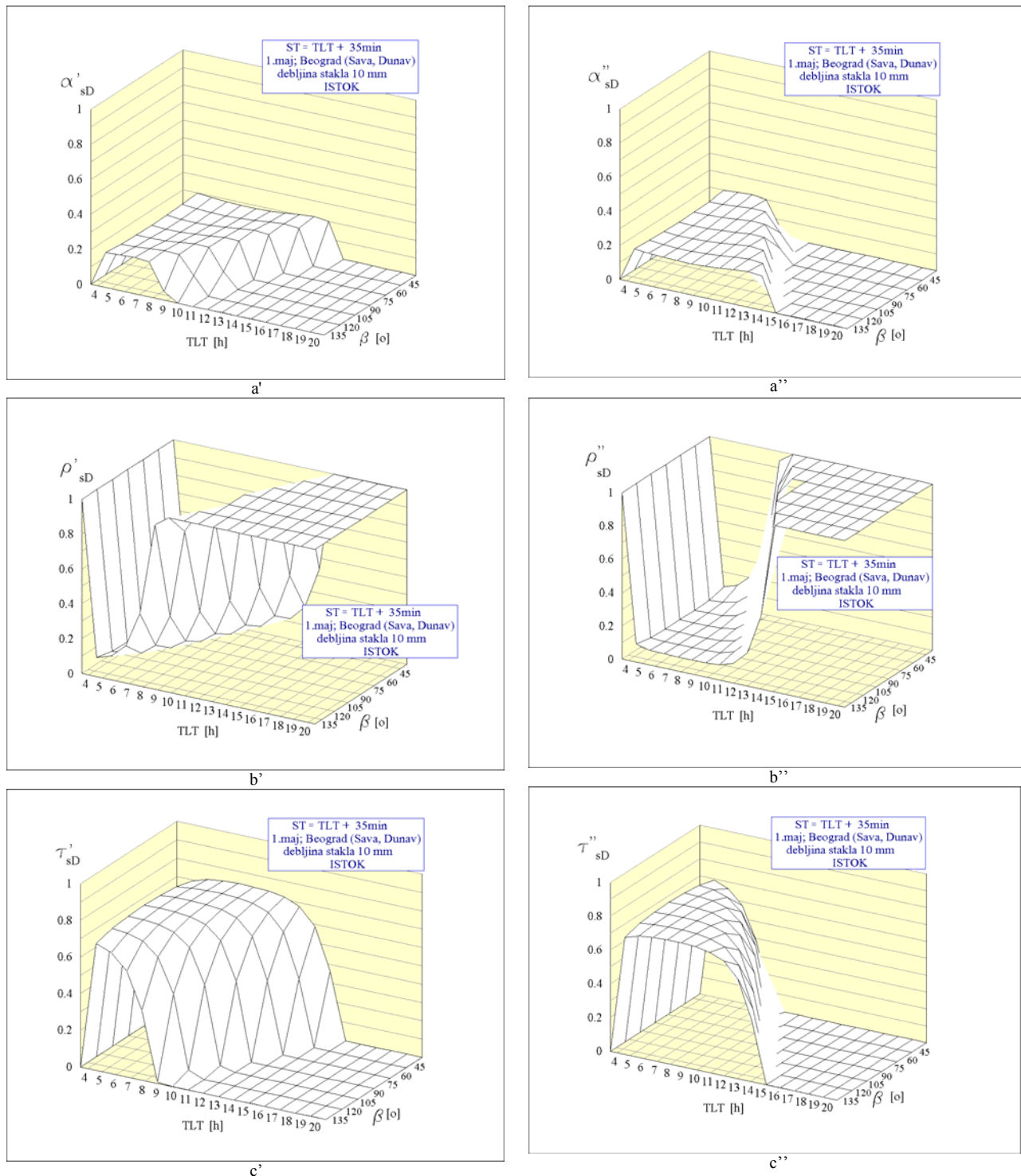
Kada nema direktnog, odnosno reflektovanog direktnog sunčevog zračenja na zastakljene površine nema ni ovih koeficijenta, mada su radi bolje preglednosti, na slikama 4

i 5, u ovim slučajevima vrednosti koeficijenta α'_{sD} , α''_{sD} , τ'_{sD} i τ''_{sD} predstavljene vrednostima 0, dok su za ρ'_{sD} i ρ''_{sD} predstavljene vrednostima 1.

Za zapadno orijentisano staklo, promena navedenih koeficijenta ima simetričan tok u odnosu na istočno

orijentisano staklo a za TLT=12h.

Za difuzno sunčevo zračenje koeficijenti refleksije, apsorpcije i propustljivosti imaju konstantne vrednosti i u ovom slučaju, za staklo debljine 10 mm, iznose: $\rho_{sd} = 0.152$, $\alpha_{sd} = 0.195$ i $\tau_{sd} = 0.653$.



Slika 5. Časovna promena koeficijenta apsorpcije, α'_{sD} , (a'), refleksije, ρ'_{sD} , (b'), i propustljivosti stakla, τ'_{sD} , (c'), za direktno sunčevo zračenje; i promena koeficijenta apsorpcije, α''_{sD} , (a''), refleksije, ρ''_{sD} , (b''), i propustljivosti stakla, τ''_{sD} , (c''), za direktno sunčevo zračenje reflektovano od mirne površine vode

Refleksija sunčevog zračenja od površine vode

Direktno sunčevo zračenje koje pada na mirnu površinu vode, jednim delom se reflektuje pod uglom jednakim upadnom uglu i zadržava usmereni karakter, a ostali deo prodire u vodenu masu. Sunčevo zračenje koje je prodrlo u vodenu masu jednim delom se apsorbuje i pretvara u drugi oblik energije, a jednim delom raspršuje i gubi usmereni karakter toka. Raspršenje nastaje na molekulima vode i prisutnih čestica u vodi i zavisi od oblika i veličina čestica, njihovog indeksa prelamanja i talasne dužine upadnog

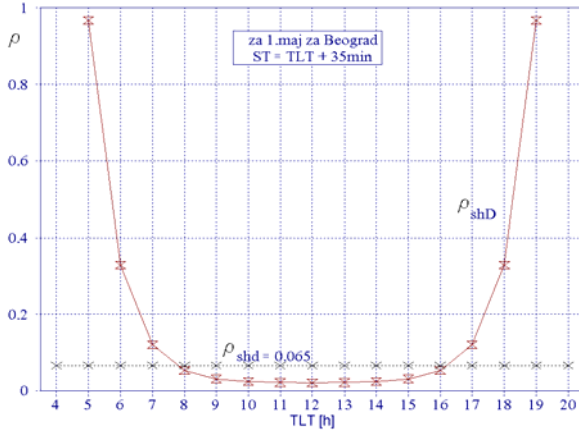
zračenja, pa tako jedan deo zračenja može biti vraćen nazad u atmosferu.

Pretpostavka učinjena za ove potrebe je da je masa vode dovoljno velika, odnosno voda dovoljno duboka, sa zanemarivim delom vraćenog raspršenog zračenja, da sa dnom apsorbuje celokupno direktno i difuzno zračenje koje je prodrlo u vodu.

Koeficijent refleksije od vodene površine za direktno zračenje zavisi od upadnog ugla sunčevog zračenja; pravca, smeru i intenziteta vetra, odnosno pravca, smeru, oblika i veličine talasa; čistoće vode i sl., dok je za difuzno

zračenje, za dati slučaj, konstantna veličina. Upadni ugao direktnog sunčevog zračenja u odnosu na vodenu površinu zavisi od međusobnog položaja Sunca i posmatrane vodene površine i neprekidno se menja u toku dana i u toku godine pa se i vrednosti koeficijenta refleksije menjaju u toku dana i u toku godine.

Na sl.6, prikazana je časovna promena koeficijenta refleksije za direktno sunčevo zračenje (ρ_{shD}) i za difuzno sunčevo zračenje (ρ_{shd}), za mirnu površinu vode u Beogradu (Sava, Dunav), za pozicije Sunca 1. maja, u funkciji (TLT), odnosno (ST), izračunatih su prema postupku i izrazima datim u [1].

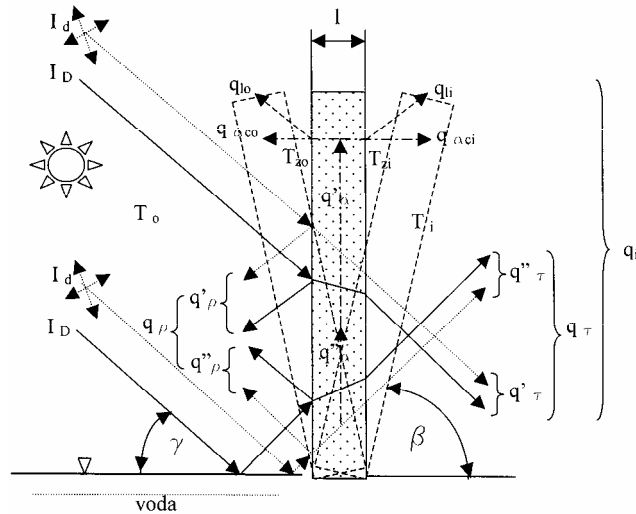


Slika 6. Časovna promena koeficijenta refleksije za direktno sunčevo zračenje (ρ_{shD}) i za difuzno sunčevo zračenje (ρ_{shd}), za mirnu površinu vode u Beogradu (Sava, Dunav), za pozicije Sunca 1. maja, u funkciji TLT (ST)

Iz prikazanog dijagrama uočljivo je da postoji simetrija u promenama relevantnih koeficijenata u odnosu na TLT=12h, stvarno lokalno podne, odnosno kada Sunce kulminira na jugu.

Uticaj nagiba zastakljene površine broda na refleksiju, apsorpciju i prolaz sunčevog zračenja

Na sl.7, dat je prikaz bilansa toplote sunčevog zračenja za staklo broda, uz prisustvo mirne vodene površine.



Slika 7. Prikaz bilansa toplote sunčevog zračenja za staklo broda

Ukupno sunčevo zračenje koje, uz prisustvo vodene površine, u datom trenutku vremena (TLT ili ST), pada na spoljašnju površinu stakla broda I_u , jednim delom se

reflektuje q_ρ , deo staklo apsorbuje q_a , a ostali deo prodire u prostoriju q_τ , odnosno:

$$\begin{aligned} I_u &= I'_u + I''_u = I [\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ D \cos^2(\beta/2) + \\ &+ \rho_{shD} I [\sin(-\gamma) \cos \beta + \cos(-\gamma) \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)] = q_\rho + q_a + q_\tau \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} q_\rho &= q'_\rho + q''_\rho = \\ &= \rho'_{sD} I [\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ \rho_{sd} D \cos^2(\beta/2) + \\ &+ \rho''_{sD} \rho_{shD} I [\sin(-\gamma) \cos \beta + \cos(-\gamma) \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ \rho_{sd} \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} q_\alpha &= q'_\alpha + q''_\alpha = \\ &= \alpha'_{sD} I [\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ \alpha_{sd} D \cos^2(\beta/2) + \\ &+ \alpha''_{sD} \rho_{shD} I [\sin(-\gamma) \cos \beta + \cos(-\gamma) \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ \alpha_{sd} \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} q_\tau &= q'_\tau + q''_\tau = \\ &= \tau'_{sD} I [\sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &= \tau_{sd} D \cos^2(\beta/2) + \\ &+ \tau''_{sD} \rho_{shD} I [\sin(-\gamma) \cos \beta + \cos(-\gamma) \sin \beta \cos(\alpha - \alpha')] + \\ &+ \tau_{sd} \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)] \end{aligned} \quad (18)$$

Ukupno difuzno sunčevo zračenje koje pada na spoljašnju površinu broda (I_{du}) jednako je zbiru izotropskog nebeskog, difuznog zračenja (I'_{du}) i difuznog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu broda nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine (I''_{du}):

$$I_{du} = I'_{du} + I''_{du} = D \cos^2(\beta/2) + \rho_{shd} D [1 - \cos^2(\beta/2)] \quad (19)$$

Toplotni dobici od sunčevog zračenja kroz vertikalnu zastakljenu površinu broda q_i (W/m^2), mogu da se predstavljaju kao zbir propuštene komponente q_τ , dela apsorbovanog zračenja stakla koje konvekcijom sa površine stakla pređe na unutrašnji vazduh q_{aci} , i komponente dobijene razmenom niskotemperaturnim zračenjem sa površinama u prostoriji q_{li} , što je šematski prikazano na sl.7:

$$q_i = q_\tau + q_{aci} + q_{li} \quad (20)$$

gde je:

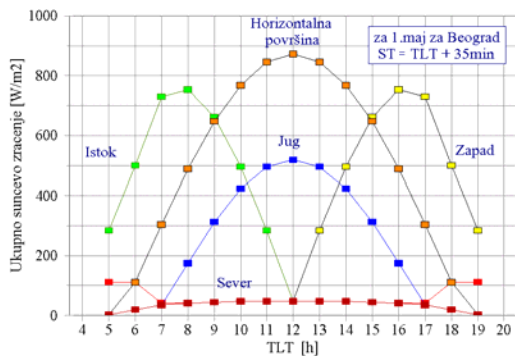
$$\begin{aligned} q_{aci} &= \frac{\alpha_{ci} \Delta T_i}{\alpha_{ci} \Delta T_i + \alpha_{co} \Delta T_o} (q_\alpha - q_{li} - q_{lo}) = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{co} \Delta T_o}{\alpha_{ci} \Delta T_i}} (q_\alpha - q_{li} - q_{lo}) \end{aligned} \quad (21)$$

α_{co} (W/m^2K) - spoljašnji koeficijent prelaza toplote konvekcijom,

- α_{ci} (W/m^2K) - unutrašnji koeficijent prelaza toplote konvekcijom
- $\Delta T_i = T_{zi} - T_i$ (K) - razlika između temperature unutrašnje površine stakla T_{zi} i temperature unutrašnjeg vazduha T_i .
- $\Delta T_o = T_{zo} - T_o$ (K) - razlika između temperature spoljašnje površine stakla T_{zo} i temperature spoljašnjeg vazduha T_o
- $q_{ii}; q_{io}$ (W/m^2) - delovi apsorbovanog sunčevog zračenja stakla, razmenjenog niskotemperaturnim zračenjem sa spoljašnjom okolinom q_{io} i sa unutrašnjim površinama prostorije q_{ii} .

Apsorbovano sunčevo zračenje koje konvekcijom sa površine stakla pređe na: unutrašnji vazduh, q_{aci} , odnosno spoljašnji vazduh q_{aco} , zavisi od odnosa ($\alpha_{co}\Delta T_o / \alpha_{ci}\Delta T_i$) i razmene toplote niskotemperaturnim zračenjem.

Na sl.8 prikazan je dijagram časovne promene ukupnog sunčevog zračenja u Beogradu, 1. maja, na površine sa naznačenom orijentacijom dobijen linearnom interpolacijom, iz [2].



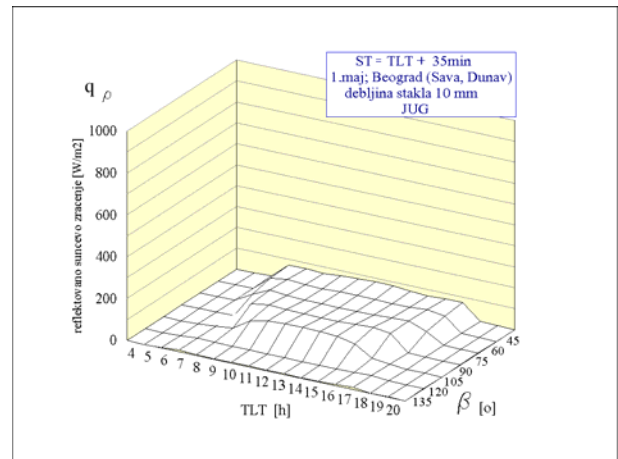
Slika 8. Ukupno sunčevo zračenje, za Beograd, na orijentisane površine, korišćeno u primeru

Na sl.9, prikazane su časovne promene reflektovanog (q_p), (10a); apsorbovanog (q_a), (10b); i propuštenog (q_r), (10c); sunčevog zračenja prema izrazima (16,17 i 18), za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav), južno orijentisano staklo debljine 10mm, u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno standardnog vremena (ST).

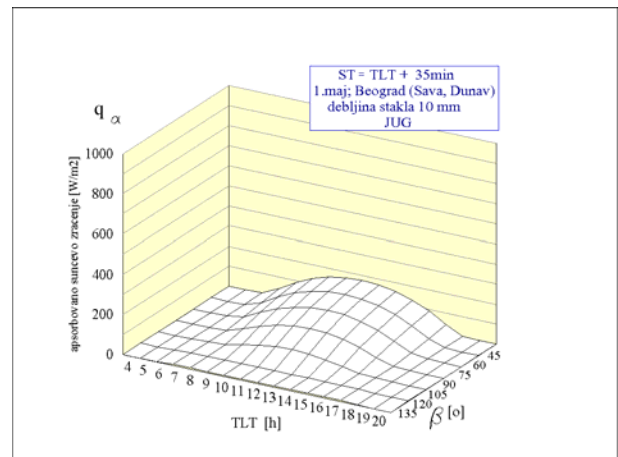
Uočeno je da porastom ugla nagiba zastakljene površine (β), opada propušteno sunčevo zračenje (u većoj meri), opada apsorbovano sunčevo zračenje (u manjoj meri), dok reflektovano sunčevo zračenje ima približno ujednačene vrednosti.

Na sl.10,, za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav) i južno orijentisano staklo, debljine 10 mm, u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno standardnog vremena (ST), a prema izrazima (15 i 18), prikazane su časovne promene:

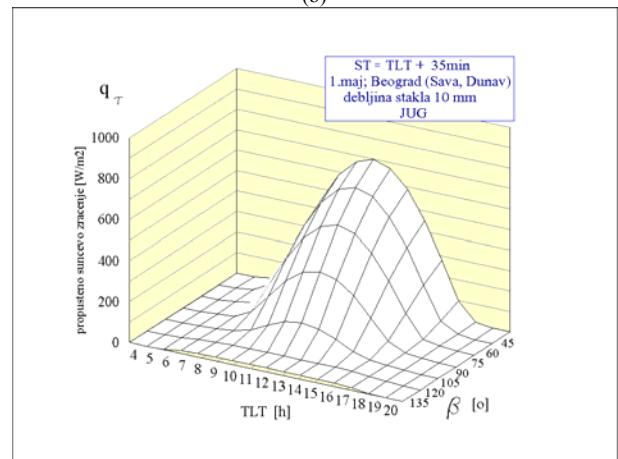
- ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u), (10a);
- odnosa (I''_u / I_u), koji predstavlja udeo ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine (I''_u) u ukupnom sunčevom zračenju koje pada na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u), (10b) i
- odnosa (q''_τ / q_τ), koji predstavlja udeo propuštenog sunčevog zračenja kroz zastakljenu površinu broda koje potiče od refleksije od prisutne mirne vodene površine (q''_τ) u ukupno propuštenom sunčevom zračenju kroz zastakljenu površinu broda (q_τ), (10c).



(a)



(b)



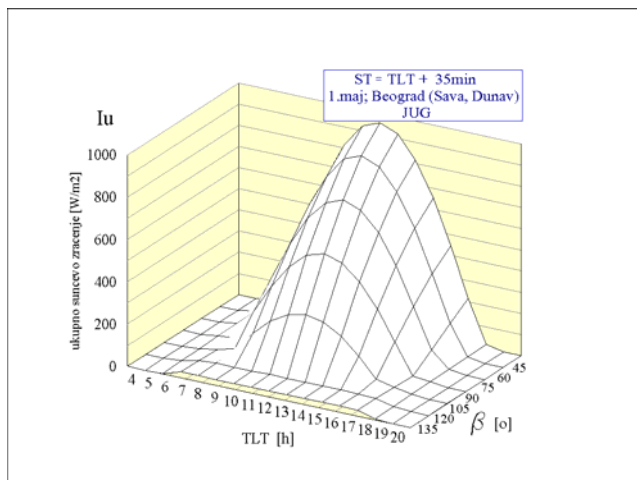
(c)

Slika 9. Časovna promena reflektovanog (q_p), (a); apsorbovanog (q_a), (b); i propuštenog (q_r), (c); sunčevog zračenja prema izrazima (16,17 i 18)

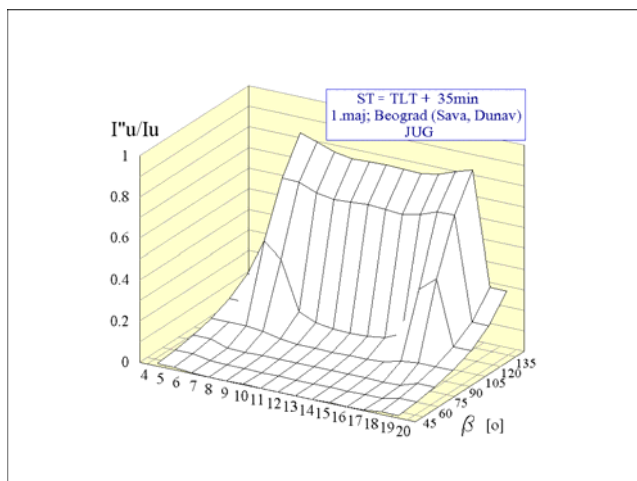
Uočeno je, da porastom ugla nagiba zastakljene površine (β):

- opada ukupno sunčevo zračenje na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u) kao i vremenski period izloženosti uticaju direktnog zračenja (10a);
- raste udeo ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine (I''_u) u ukupnom sunčevom zračenju koje pada na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u), (10b), naročito u većoj meri za $\beta > 90^\circ$; i shodno tome:
- raste udeo propuštenog sunčevog zračenja kroz zastakljenu površinu broda koje potiče od refleksije od prisutne mirne vodene površine (q''_τ) u ukupno

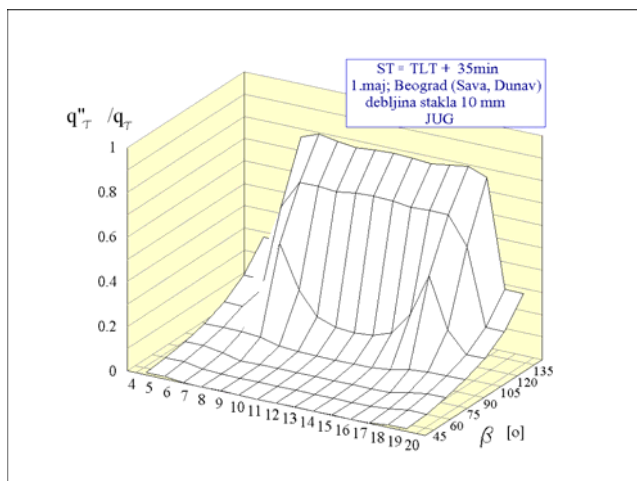
propuštenom sunčevom zračenju kroz zastakljenu površinu broda (q_{τ}), (10c).



(a)



(b)

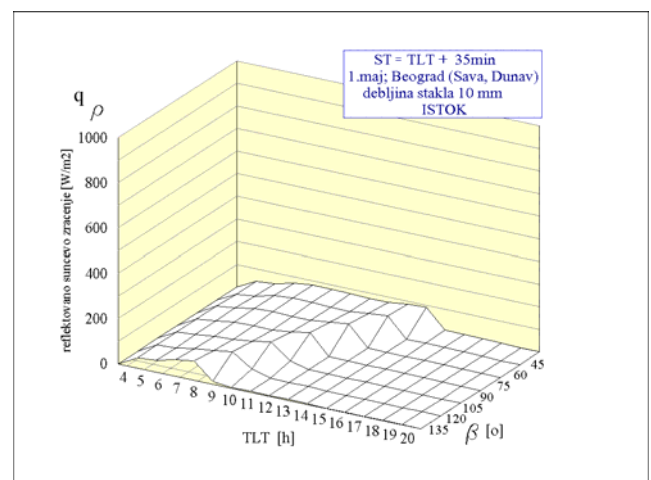


(c)

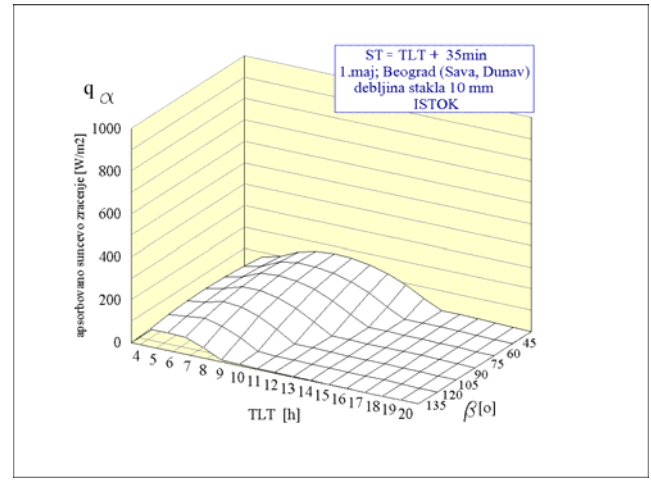
Slika 10. Časovna promena ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla (I_u), (a); odnosa (I''_u / I_u), (b), i odnosa (q''_{τ} / q_{τ}), (c), prema izrazima (15 i 18)

Na sl.11, prikazane su časovne promene reflektovanog (q_{ρ}), (a); apsorbiranog (q_{α}), (b); i propuštenog (q_{τ}), (c); sunčevog zračenja prema izrazima (16,17 i 18), za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav), istočno orijentisano staklo debljine 10mm, u zavisnosti od nagiba

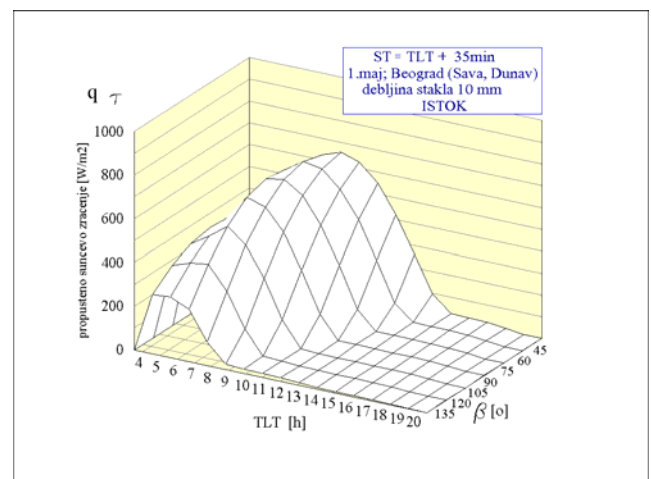
zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno, standardnog vremena (ST).



(a)



(b)

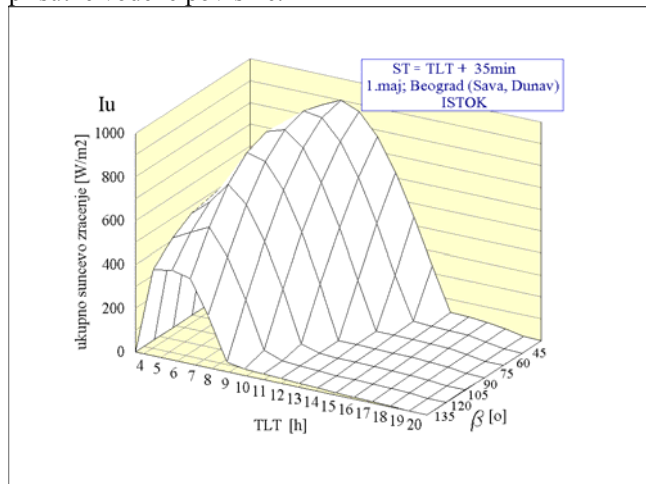


(c)

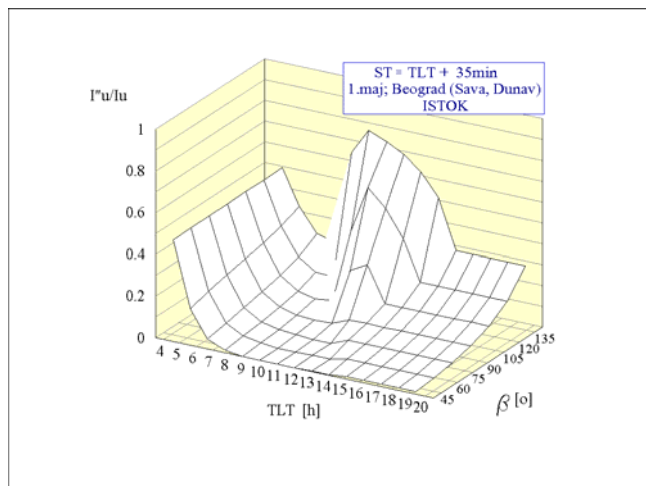
Slika 11. Časovna promena reflektovanog (q_{ρ}), (a); apsorbiranog (q_{α}), (b); i propuštenog (q_{τ}), (c); sunčevog zračenja prema izrazima (16, 17 i 18)

Uočeno je, da porastom ugla nagiba zastakljene površine (β), opada propušteno sunčevo zračenje, opada apsorbirano sunčevo zračenje (u manjoj meri), reflektovano sunčevo zračenje ima približno ujednačene vrednosti, a u većoj meri opada vremenski period izloženosti direktnom sunčevom zračenju. Takođe, u ranim

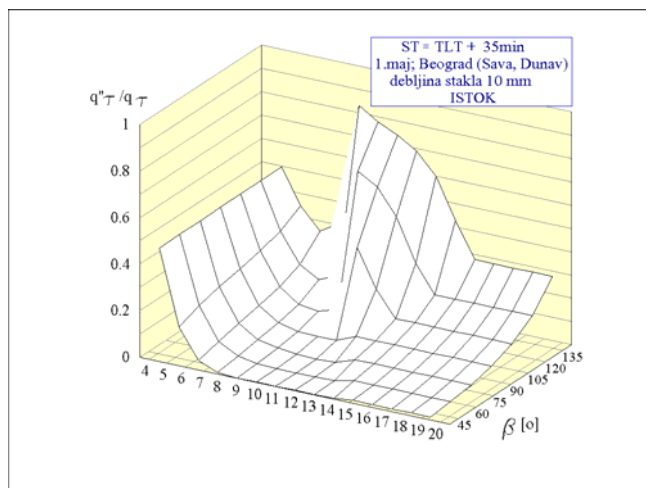
jutarnjim satima i niskih elevacija Sunca, dolazi do izražaja visok koeficijent refleksije direktnog sunčevog zračenja prisutne vodene površine.



(a)



(b)



(c)

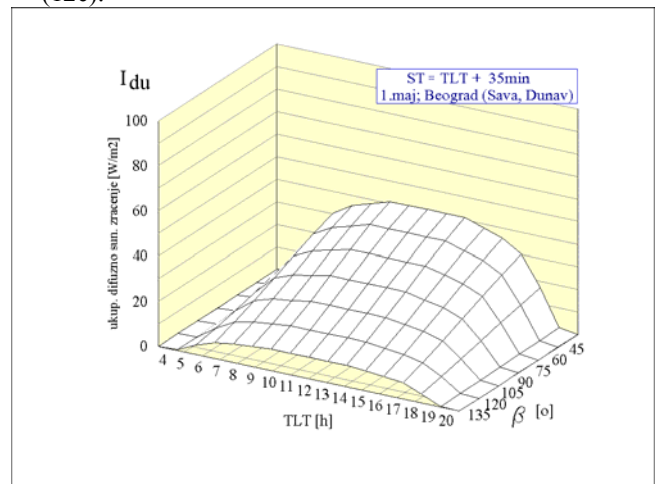
Slika 12. Časovna promena ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla (I_u), (a); odnosa (I''_u / I_u), (b), i odnosa (q''_τ / q_τ), (c), prema izrazima (15 i 18)

Na sl.12, za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav) i istočno orijentisano staklo, debljine 10mm, u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno standardnog vremena (ST), a prema izrazima (15 i 18), prikazane su časovne promene:

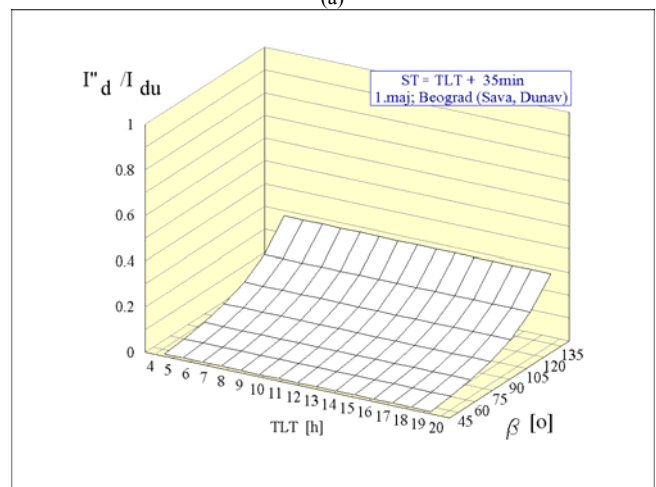
– ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju

površinu zastakljene površine broda (I_u), (12a);

- odnosa (I''_u / I_u), koji predstavlja udeo ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine (I''_u) u ukupnom sunčevom zračenju koje pada na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u), (12b) i odnosa (q''_τ / q_τ) koji predstavlja udeo propuštenog sunčevog zračenja kroz zastakljenu površinu broda koje potiče od refleksije od prisutne mirne vodene površine (q''_τ) u ukupno propuštenom sunčevom zračenju kroz zastakljenu površinu broda (q_τ), (12c).



(a)



(b)

Slika 13. Časovna promena ukupnog difuznog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu broda (I_{du}), (a); odnosa (I''_d / I_{du}), (b), prema izrazu (19)

Uočeno je:

- da sa porastom ugla nagiba zastakljene površine (β) opada ukupno sunčevo zračenje na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u) kao i vremenski period izloženosti uticaju direktnog zračenja, (12a);
- da je zbog visokog koeficijenta refleksije direktnog sunčevog zračenja od prisutne vodene površine, u ranim jutarnjim satima, visok udeo (blizu 50%) ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine (I''_u) u ukupnom sunčevom zračenju koje pada na spoljašnju površinu zastakljene površine broda (I_u), (12b), sa malim uticajem promene ugla nagiba (β);
- da je u ranim jutarnjim satima visok udeo propuštenog sunčevog zračenja kroz zastakljenu površinu broda koje

potiče od refleksije od prisutne mirne vodene površine (q''_v) u ukupno propuštenom sunčevom zračenju kroz zastakljenu površinu broda (q''_t), takođe sa malim uticajem promene ugla nagiba (β); (12c) i

- porastom ugla nagiba (β), naročito u većoj meri za $\beta > 90^\circ$, oko sredine dana, naglo raste udeo ukupnog i propuštenog sunčevog zračenja koje potiče od refleksije od prisutne vodene površine, a raste i njihov uticajni vremenski period (12b i 12c).

Na sl.13, prikazana je časovna promena ukupnog difuznog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu broda (I''_{du}), (a) i odnosa (I''_d / I''_{du}), (b), prema izrazu (19), za pozicije Sunca 1. maja u Beogradu (Sava, Dunav), u zavisnosti od nagiba zastakljene površine (β), i u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT), odnosno standardnog vremena (ST).

Za pretpostavljeno izotropno difuzno sunčevo zračenje i prisustvo mirne vodene površine, sa porastom ugla nagiba zastakljene površine (β):

- ravnomerno opada ukupno difuzno sunčevo zračenje na spoljašnju površinu broda (I''_{du}) jer dolazi do izražaja nizak koeficijent refleksije za difuzno sunčevo zračenje od površine vode, $\rho_{shd} = 0.065$, (13a);

- umereno raste udeo difuznog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu broda nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine (I''_{du}) u ukupnom difuznom sunčevom zračenju koje pada na spoljašnju površinu broda, (13b), i ima konstantnu vrednost u toku dana.

Pretpostavljeno, izotropno, nebesko difuzno sunčevo zračenje i prisustvo mirne vodene površine, daje adekvatnu sliku za difuzno sunčevo zračenje za sve orijentacije spoljašnjih površina broda.

Zaključak

Formiranim matematičkim modelom i računarskim programom [1] obuhvaćena je kompleksna interakcija relevantnih parametara i izvršena analiza uticaja nagiba zastakljene površine broda (β) na refleksiju, apsorpciju i prolaz sunčevog zračenja, i time dat doprins realnijem sagledavanju i izračunavanju toplotnih dobitaka, promenljivih u toku dana i u toku godine, jer posledice nepreciznog proračuna se odražavaju kako na kvalitet uspostavljanja termičkih uslova u kontrolisanom prostoru, tako i na visinu investicionih i eksploatacionih troškova postrojenja za grejanje i klimatizaciju.

Rad omogućava i izračunavanje intenziteta sunčevog zračenja na ostale spoljašnje površine broda, realnije sagledavanje i izračunavanje toplotnih dobitaka pri prolazu toplote kod spoljašnjih zidova broda, izračunavanje reflektovanog sunčevog zračenja od spoljašnje površine broda i dr.

Razmatrane su južno i istočno orijentisane površine broda, za poziciju broda na Savi ili Dunavu u okolini Beograda, i za celodnevnu promenu pozicije Sunca 1. maja, za staklo debljine 10mm i za promenu ugla nagiba stakla u opsegu $\pm 45^\circ$ u odnosu na vertikalno staklo, odnosno $45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$, prema sl.7.

Za zapadno orijentisane površine broda, promene relevantnih veličina imaju simetričan tok u odnosu na istočno orijentisane površine u odnosu na solarno podne, odnosno za TLT=12h.

Kod izračunavanja koeficijenata apsorpcije, refleksije i propustljivosti za direktno sunčevo zračenje, i reflektovano direktno sunčevo zračenje, od primarnog značaja je upadni

ugao zračenja u odnosu na zastakljenu površinu. Promenom ugla nagiba zastakljene površine (β), promena upadnih uglova direktnog (η') i reflektovanog direktnog zračenja (η'') obrnuto je srazmerna, pa je i promena odgovarajućih koeficijenata obrnuto srazmerna. Za vertikalnu zastakljenu površinu, $\beta = 90^\circ$, upadni uglovi direktnog i reflektovanog direktnog zračenja su jednaki, pa i korespondentni koeficijenti imaju jednake vrednosti.

Koeficijent refleksije od vodene površine za direktno zračenje zavisi od upadnog ugla sunčevog zračenja, pravca, smera i intenziteta vetra, odnosno pravca, smera, oblika i veličine talasa, čistoće vode i slično, dok je za difuzno zračenje, konstantna veličina. Upadni ugao direktnog sunčevog zračenja u odnosu na vodenu površinu zavisi od međusobnog položaja Sunca i posmatrane vodene površine i neprekidno se menja u toku dana i u toku godine, pa se i vrednosti koeficijenta refleksije za određenu lokaciju, menjaju u toku dana i u toku godine. Najintezivnije promene koeficijenta refleksije vodene površine za direktno sunčevo zračenje dešavaju se u ranim prepodnevima i kasnim popodnevnim satima, odnosno kod niskih elevacija Sunca. Povećanjem zatalasanosti vodene površine, opada refleksija direktnog sunčevog zračenja kod niskih elevacija Sunca.

Uočeno je kod južno orijentisanih zastakljenih površina, da porastom ugla nagiba zastakljene površine (β), opada propušteno sunčevo zračenje i opada apsorbovano sunčevo zračenje, dok reflektovano sunčevo zračenje ima približno ujednačene vrednosti.

Kod istočno orijentisanih površina, uočeno je da porastom ugla nagiba zastakljene površine (β), opada propušteno sunčevo zračenje, opada apsorbovano sunčevo zračenje, reflektovano sunčevo zračenje ima približno ujednačene vrednosti, a u većoj meri opada vremenski period izloženosti direktnom sunčevom zračenju. Takođe, u ranim jutarnjim satima kod niskih elevacija Sunca dolazi do izražaja visok koeficijent refleksije direktnog sunčevog zračenja prisutne vodene površine.

Do visokog udela reflektovanog sunčevog zračenja vodene površine, u ukupnom zračenju na površinu broda, dolazi u slučajevima: niske elevacije Sunca i mirne površine vode u ranim prepodnevima i kasnim popodnevnim satima kod površina orijentisanih prema istoku, odnosno zapadu; za severnu zemljinu poluloptu, južna orijentacija zimi, naročito kod porasta uglova nagiba (β) iznad 90° , odnosno kad je površina nagnuta prema vodenoj površini, i sl.

Porastom ugla nagiba spoljašnjih površina broda (β) opada ukupno difuzno sunčevo zračenje na spoljašnju površinu broda, jer raste udeo difuznog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu broda nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine. Ukupno difuzno zračenje koje pada na vertikalne površine pored vode iznosi $\approx 53\%$ difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan.

Literatura

- [1] LILIĆ, D. Doprinos sunčevog zračenja kroz zastakljene površine bilansu toplote brodskih prostora. *Naučnotehnički pregled*, 2000, vol.L, br.3, p.52-76.
- [2] TODOROVIĆ, B. *Klimatizacija*, SMEITS, Beograd, 1998.
- [3] KASTEN, F. Measurement and Analysis of Solar Radiation Data. *Energy and Buildings*, 1981, vol.3, p.1-29.