

Doprinos sunčevog zračenja kroz zastakljene površine bilansu toplote brodskih prostora

Mr Dimitrije Lilić, dipl.inž.¹⁾

Sunčevo zračenje koje pada na zastakljenu površinu broda jednim delom se reflektuje, delom ga staklo apsorbuje, a deo prođe kroz staklo. Prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljene površine broda zavisi od niza faktora: geografskog položaja lokacije broda, orijentacije broda, položaja zastakljene površine na brodu, trenutnog položaja Sunca, intenziteta direktnog i difuznog sunčevog zračenja na zastakljenu površinu, refleksije sunčevog zračenja od površine vode, vrste i debljine stakla, veličine i osenčenosti zastakljene površine, i sl. Formiranim matematičkim modelom i računarskim programom je obuhvaćena kompleksna interakcija relevantnih parametara, i dati su primeri za prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljene površine za položaj broda u okolini Beograda, na Savi ili Dunavu.

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

Uvod

BRODOVI i objekti na vodi su tokom svog veka, uglavnom, u najvećoj mogućoj meri izloženi uticaju sunčevog zračenja. Sunčevo zračenje predstavlja jedan od osnovnih faktora koji utiče na parametre mikroklimе u prostorijama broda, odnosno potrebu da se ti parametri održavaju u određenim granicama. Povećanjem potrošnje energije u te svrhe javlja se prirodna potreba za njenom racionalnom upotrebom.

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

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

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

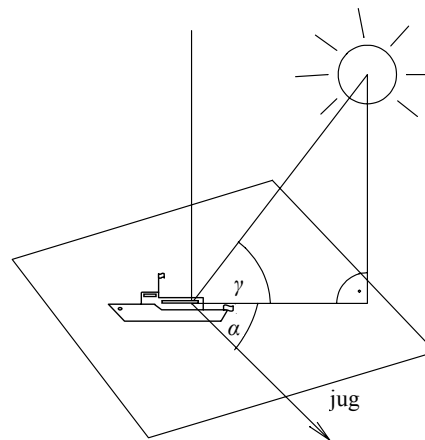
Prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljene površine broda zavisi od niza faktora, kao što su:

- geografski položaj lokacije broda,
- 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 od površine vode,
- vrsta i debljina stakla,
- veličina i osenčenost zastakljene površine i sl.

Cilj istraživanja je da se formiranim matematičkim modelom i računarskim programom obuhvati kompleksna interakcija relevantnih parametara pri prolazu sunčevog zračenja u brodski prostor.

Pozicije broda i Sunca

Za prodor sunčevog zračenja kroz zastakljenu površinu u prostoriju broda potrebno je poznavati pravac Sunca viđenog sa broda, odnosno poznavati pozicije broda i Sunca, odnosno njihovu korelativnu vezu.



Slika 1. Pozicija Sunca u odnosu na brod

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

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

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

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

$$\cos \alpha = \frac{\sin \varphi \sin \gamma - \sin \delta}{\cos \varphi \cos \gamma} \quad (3)$$

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,
- δ ($^{\circ}$) – deklinacija Sunca, ugao koji odgovara visini Sunca iznad ekvatora u vreme posmatranja (tabela 1),
- ω ($^{\circ}$) – sunčev časovni ugao, ugao između časovnog kruga (geografski pravac Sunca) i meridijana (geografski pravac juga) u vreme posmatranja.

Promena δ u toku jednog dana je mala, pa se za praktičnu primenu može smatrati da ne zavisi od ω . U tabeli 1 [1] date su vrednosti za δ za svaki dan u godini. Postoji mala promena za δ za vreme prestupne godine ali za najveći broj primena dovoljno je upotrebiti δ - vrednost za treću godinu posle prestupne kao reprezentativnu vrednost. Vrednost δ se kreće u granicama od -23.44° za najkraći zimski dan, 0 za ravnodnevnicu do $+23.44^{\circ}$ za najduži letnji dan.

Dok deklinacija Sunca δ opisuje zavisnost ugla sunčeve

Pozicija Sunca		sever	istok	jug	zapad	sever
----------------	--	-------	-------	-----	-------	-------

Prema tabeli 2 se mogu izvesti sledeće relacije:

$$\frac{TLT - 12h}{\omega} = \frac{1dan}{360^{\circ}} = 4 \frac{min}{1^{\circ}} \quad (4)$$

$$TLT = \omega \cdot 4 \frac{min}{1^{\circ}} + 12h$$

Za TLT=12h, stvarno lokalno podne, Sunce kulminira na jugu. U cilju mogućeg upoređenja merenja sunčevog zračenja na različitim lokacijama, konvencija Svetske meteorološke organizacije (WMO) preporučuje, da se sva meteorološka merenja vrše prema TLT (solarno vreme). Tada sva razmatranja zračenja imaju prirodnu simetriju u odnosu na stvarno podne.

Stvarno lokalno vreme (TLT) teče neujednačeno, jer se časovni ugao ω menja nejednako u vremenu, iz dva sledeća razloga:

- a) prividna orbita Sunca, tzv. ekliptik, nije krug već elipsa;
- b) vreme nije mereno na ekliptiku, ali zbog definicije vremena pomoću rotacije Zemlje oko njenih osa, mereno je na ekvatoru.

Za praktičnu primenu, pomoću astronomskih razmatranja utvrđen je srednji časovni ugao ω_{sr} , i definisano odgovarajuće srednje lokalno vreme (MLT). Razlika između ove dve vremenske skale nazvana je jednačina vremena - Z.

$$Z = TLT - MLT \quad (5)$$

Promena Z za vreme godine rezultira od delimično

Tabela 1. Deklinacija Sunca (δ) u stepenima, za svaki dan u godini

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1.	-23.01	-17.12	-7.62	4.50	15.04	22.04	23.12	19.05	8.32	-3.14	-14.39	-21.79
2.	-22.93	-16.94	-7.24	4.59	15.34	22.17	23.05	17.79	7.96	-3.53	-14.71	-21.94
3.	-22.83	-16.54	-6.86	5.27	15.64	22.30	22.97	17.53	7.59	-3.92	-15.03	-22.08
4.	-22.73	-16.25	-6.47	5.65	15.93	22.42	22.89	17.27	7.22	-4.30	-15.34	-22.22
5.	-22.62	-15.95	-6.09	6.03	16.22	22.53	22.80	17.00	6.85	-4.69	-15.64	-22.36
6.	-22.51	-15.64	-5.70	6.41	16.50	22.64	22.70	16.73	6.49	-5.07	-15.95	-22.48
7.	-22.35	-15.33	-5.31	6.79	16.78	22.74	22.60	16.45	6.11	-5.46	-16.24	-22.60
8.	-22.25	-15.02	-4.92	7.16	17.06	22.84	22.49	16.17	5.73	-5.84	-16.54	-22.71
9.	-22.12	-14.70	-4.53	7.54	17.33	22.92	22.37	15.89	5.36	-6.22	-16.83	-22.81
10.	-21.97	-14.38	-4.14	7.91	17.59	23.00	22.25	15.60	4.98	-6.60	-17.11	-22.90
11.	-21.82	-14.05	-3.75	8.28	17.85	23.08	22.12	15.30	4.60	-6.98	-17.39	-22.99
12.	-21.66	-13.72	-3.36	8.64	18.11	23.15	21.99	15.01	4.22	-7.35	-17.66	-23.07
13.	-21.49	-13.35	-2.96	9.01	18.35	23.21	21.85	14.70	3.84	-7.73	-17.93	-23.14
14.	-21.32	-13.05	-2.57	9.37	18.60	23.26	21.70	14.40	3.45	-8.10	-18.20	-23.21
15.	-21.14	-12.70	-2.17	9.73	18.84	23.31	21.55	14.09	3.07	-8.47	-18.45	-23.26
16.	-20.95	-12.36	-1.78	10.05	19.07	23.35	21.39	13.77	2.69	-8.84	-18.71	-23.31
17.	-20.76	-12.01	-1.38	10.44	19.30	23.38	21.22	13.46	2.30	-9.21	-18.96	-23.35
18.	-20.56	-11.66	-0.99	10.79	19.52	23.41	21.05	13.14	1.91	-9.57	-19.20	-23.39
19.	-20.35	-11.31	-0.59	11.14	19.74	23.42	20.87	12.81	1.53	-9.94	-19.43	-23.41
20.	-20.14	-10.95	-0.20	11.48	19.95	23.44	20.69	12.48	1.14	-10.30	-19.66	-23.43
21.	-19.92	-10.59	.20	11.82	20.16	23.44	20.50	12.15	.75	-10.65	-19.89	-23.44
22.	-19.70	-10.23	.59	12.16	20.36	23.44	20.30	11.82	.36	-11.01	-20.11	-23.44
23.	-19.46	-9.86	.99	12.49	20.56	23.43	20.10	11.48	-.03	-11.36	-20.32	-23.44
24.	-19.23	-9.49	1.38	12.83	20.75	23.42	19.89	11.14	-.42	-11.71	-20.53	-23.42
25.	-18.98	-9.12	1.77	13.15	20.93	23.40	19.68	10.80	-.81	-12.06	-20.73	-23.40
26.	-18.73	-8.75	2.17	13.48	21.11	23.37	19.46	10.45	-1.20	-12.40	-20.92	-23.37
27.	-18.48	-8.37	2.56	13.80	21.28	23.33	19.24	10.10	-1.59	-12.74	-21.11	-23.33
28.	-18.22	-8.00	2.95	14.12	21.44	23.29	19.01	9.75	-1.98	-13.08	-21.29	-23.29
29.	-17.95		3.34	14.43	21.60	23.24	18.78	9.40	-2.37	-13.41	-21.46	-23.24
30.	-17.68		3.73	14.74	21.75	23.18	18.54	9.04	-2.75	-13.74	-21.63	-23.18
31.	-17.40		4.12		21.90		18.30	8.68		-14.07		-23.11

elevacije γ od vremena u godini (datum), časovni ugao ω definiše zavisnost γ od vremena u toku dana (časovno vreme). ω je računato od meridijana (pravac juga) kao pozitivno popodne (zapadno Sunce), a kao negativno prepodne (istočno Sunce). U tabeli 2 je dat prikaz zavisnosti ω od stvarnog lokalnog vremena – TLT, (True Local Time).

Tabela 2. Zavisnost ω od stvarnog lokalnog vremena

ω	$^{\circ}$	-180	-90	0	+90	+180
TLT	h	0	6	12	18	24

krivene sinusne krive iz razloga efekta (a), do duple sinusne krive od efekta (b). Pošto je u slučaju deklinacije Sunca, mala promena Z u toku jednog dana i u toku jedne godine u odnosu na drugu, prestupna godina može biti zanemarena za najveći broj primena. U tabeli 3 [1] date su vrednosti Z za svaki dan u godini. Ekstremne vrednosti za Z su $Z=-14$ min u februaru i $Z=+16$ min u oktobru/novembru.

Časovni ugao ω je meren za meridijan za datu tačku posmatranja, pa je stvarno lokalno vreme (TLT) kao i srednje lokalno vreme (MLT) važeće jedino za posmatranu lokaciju.

zontalnu ravan i sa normalom upravljenom po azimutu α' ,

Tabela 3. Jednačina vremena Z, u min, za svaki dan u godini (vrednosti su zaokružene na pune minute)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1.	-4.	-14.	-12.	-4.	3.	2.	-4.	-6.	-.	10.	16.	11.
2.	-4.	-14.	-12.	-4.	3.	2.	-4.	-6.	.	11.	16.	11.
3.	-4.	-14.	-12.	-3.	3.	2.	-4.	-6.	1.	11.	16.	10.
4.	-5.	-14.	-12.	-3.	3.	2.	-4.	-6.	1.	11.	16.	10.
5.	-5.	-14.	-12.	-3.	3.	2.	-4.	-6.	1.	11.	16.	9.
6.	-6.	-14.	-11.	-3.	3.	1.	-5.	-6.	2.	12.	16.	9.
7.	-6.	-14.	-11.	-2.	3.	1.	-5.	-6.	2.	12.	16.	9.
8.	-7.	-14.	-11.	-2.	3.	1.	-5.	-6.	2.	12.	16.	8.
9.	-7.	-14.	-11.	-2.	4.	1.	-5.	-5.	3.	13.	16.	8.
10.	-7.	-14.	-10.	-1.	4.	1.	-5.	-5.	3.	13.	16.	7.
11.	-8.	-14.	-10.	-1.	4.	.	-5.	-5.	3.	13.	16.	7.
12.	-8.	-14.	-10.	-1.	4.	.	-5.	-5.	4.	13.	16.	6.
13.	-9.	-14.	-10.	-1.	4.	.	-6.	-5.	4.	14.	16.	6.
14.	-9.	-14.	-9.	.	4.	.	-6.	-5.	4.	14.	15.	5.
15.	-9.	-14.	-9.	.	4.	.	-6.	-4.	5.	14.	15.	5.
16.	-10.	-14.	-9.	.	4.	-1.	-6.	-4.	5.	14.	15.	4.
17.	-10.	-14.	-8.	.	4.	-1.	-6.	-4.	5.	15.	15.	4.
18.	-10.	-14.	-8.	1.	4.	-1.	-6.	-4.	6.	15.	15.	3.
19.	-11.	-14.	-8.	1.	4.	-1.	-6.	-4.	6.	15.	15.	3.
20.	-11.	-14.	-8.	1.	3.	-1.	-6.	-3.	7.	15.	14.	2.
21.	-11.	-14.	-7.	1.	3.	-2.	-6.	-3.	7.	15.	14.	2.
22.	-12.	-14.	-7.	1.	3.	-2.	-6.	-3.	7.	15.	14.	1.
23.	-12.	-13.	-7.	2.	3.	-2.	-6.	-3.	7.	15.	14.	1.
24.	-12.	-13.	-6.	2.	3.	-2.	-6.	-2.	8.	16.	13.	.
25.	-12.	-13.	-6.	2.	3.	-3.	-6.	-2.	8.	16.	13.	.
26.	-13.	-13.	-6.	2.	3.	-3.	-6.	-2.	9.	16.	13.	.
27.	-13.	-13.	-5.	2.	3.	-3.	-6.	-2.	9.	16.	12.	-1.
28.	-13.	-13.	-5.	2.	3.	-3.	-6.	-1.	9.	16.	12.	-1.
29.	-13.	.	-5.	3.	3.	-3.	-6.	-1.	10.	16.	12.	-2.
30.	-13.	.	-5.	3.	3.	-4.	-6.	-1.	10.	16.	11.	-2.
31.	-13.	.	-4.	2.	2.	.	-6.	-.	10.	16.	10.	-3.

Civilni život zahteva upotrebu uniformne vremenske skale za određen region, tzv. standardno vreme (ST). To je definisano pomoću MLT za određeni izabrani standardni meridijan, geografske dužine λ_s . MLT za 0-meridijan koji prolazi kroz Grinič u Engleskoj nazvano je srednje vreme po Griniču, GMT:

$$\text{GMT} = \text{MLT}(\lambda_s = 0) \quad (6)$$

Standardno vreme na drugom meridijanu λ_s , istočno od Griniča u odnosu na GMT je:

$$\text{ST}(\lambda_s) = \text{GMT} + \lambda_s \cdot 4 \text{ min}/1^\circ \quad (7)$$

Analogno ovome, srednje lokalno vreme za bilo koju tačku lociranu na meridijanu λ , povezano je sa GMT pomoću relacije:

$$\text{MLT}(\lambda) = \text{GMT} + \lambda \cdot 4 \text{ min}/1^\circ \quad (8)$$

Kombinacijom jednačina (7 i 8), dobija se relacija između MLT i ST:

$$\text{MLT}(\lambda) = \text{ST}(\lambda_s) + (\lambda - \lambda_s) \cdot 4 \text{ min}/1^\circ \quad (9)$$

Kombinacijom jednačina (9 i 5) dobija se jednačina koja omogućava izračunavanje TLT iz standardnog vremena ST:

$$\text{TLT} = \text{ST}(\lambda_s) + (\lambda - \lambda_s) \cdot 4 \text{ min}/1^\circ + Z \quad (10)$$

Ako je posmatrana lokacija zapadno od Griniča, geografske dužine λ i λ_s prikazane jednačine uzimaju se kao negativne.

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

$$\text{ST} = \text{ST}_{\text{zima}} = \text{ST}_{\text{leto}} - 1 \text{ h} \quad (11)$$

Sunčevo zračenje na nagnutoj ravni

Ravne površine nagnute pod uglom β u odnosu na horizontalnu ravan i sa normalom upravljenom po azimutu

primaju zračenje $G(\beta, \alpha')$ koje u osnovi sadrži tri fluksa zračenja:

$$G(\beta, \alpha') = I(\beta, \alpha') + D(\beta, \alpha') + R(\beta, \alpha') \quad (12)$$

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

$$I(\beta, \alpha') = I \cos \eta \quad (13)$$

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 izrazom:

$$\cos \eta = \sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \beta \cos(\alpha - \alpha') \quad (14)$$

Za vertikalnu ravan, $\beta=90^\circ$, izraz (14) glasi:

$$\cos \eta = \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha') \quad (14a)$$

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

Na osnovu toga izvedene su relacije:

$$D(\beta, \alpha') = fD \quad (15)$$

$$R(\beta, \alpha') = (1-f)R = (1-f)\rho_s G \quad (16)$$

gde je ρ_s - srednji kratkotalasni albedo tla viđenog sa ravni, i izraz:

$$G(\beta, \alpha') = I \cos \eta + fD + (1-f)\rho_s G \quad (17)$$

Pretpostavljajući izotropsko nebesko zračenje i izotropsku refleksiju tla, sferna geometrija daje [1,2]:

$$f = (1 + \cos \beta) / 2 = \cos^2(\beta/2) \quad (18)$$

Uprošćenjem jednačina (17 i 18) nastaje izraz:

$$G(\beta, \alpha') = I \cos \eta + D \cos^2(\beta/2) + \rho_s G [1 - \cos^2(\beta/2)] \quad (19)$$

Za vertikalnu ravan, izraz (19) glasi:

$$G(90^\circ, \alpha') = I \cos \eta + 0.5D + 0.5\rho_s G \quad (19a)$$

Jednačina (19) se može upotrebiti da se izračuna $G(\beta, \alpha')$ iz izmerenih podataka za G i D . I je dato pomoću izraza:

$$I = B / \sin \gamma = (G - D) / \sin \gamma \quad (20)$$

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 vertikalnu 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 od površine vode.

Direktno zračenje reflektovano od mirne površine vode ima azimut isti 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 da sa dnom apsorbuje celokupnu refraktovanu energiju.

Pretpostavljajući izotropsko nebesko zračenje i prisustvo vodene mirne (horizontalne, ogledalne) površine sa napred navedenim osobinama, koja ima koeficijent refleksije na direktno sunčevo zračenje, ρ_{shD} , i koeficijent refleksije za difuzno sunčevo zračenje, ρ_{shd} , izraz (19a) za sunčevo zračenje koje prima vertikalna površina, može se modifikovati u izraz:

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

odnosno:

$$G(90^\circ, \alpha') = I \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha') + \rho_{shD} I \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha') + 0.5D(1 + \rho_{shd}) \quad (21a)$$

Ako se označi:

I_D (W/m²) – fluks direktnog sunčevog zračenja na posmatranu vertikalnu ravan i

I_d (W/m²) – fluks difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan,

tada može da se napiše izraz za ukupno sunčevo zračenje koje, uz prisustvo vodene površine, pada na vertikalnu spoljašnju površinu stakla broda, I_u :

$$I_u = I_D + \rho_{shD} I_D + 0.5(1 - \rho_{shd}) I_d \quad (21)$$

Prvi član u izrazu (21) predstavlja direktno usmereno sunčevo zračenje koje pada na vertikalnu površinu; drugi član predstavlja direktno sunčevo zračenje reflektovano od vodene (horizontalne, ogledalne) površine koje pada na vertikalnu površinu i koje je zadržalo usmereni karakter; i treći član:

$$I_{du} = 0.5(1 + \rho_{shd}) I_d \quad (22)$$

predstavlja ukupno difuzno zračenje na vertikalnu površinu, koje sadrži i reflektovanu komponentu od vodene (horizontalne, ogledalne) površine.

zonalne, ogledalne) površine.

Koeficijent refleksije direktnog sunčevog zračenja od mirne, nezaprjljane površine vode (horizontalne, ogledalne površine), ρ_{shD} , je u funkciji upadnog ugla zračenja i ugla prelamanja i matematički model za njegovo izračunavanje dat je u radu.

Koeficijent refleksije difuznog sunčevog zračenja od mirne, nezaprjljane površine vode (horizontalne, ogledalne površine), ρ_{shd} , je konstantna veličina za dati slučaj pa je i matematički model za njegovo izračunavanje prikazan.

Izrazi (21 i 22) su modifikovani za prisustvo horizontalne, ogledalne površine, odnosno nezaprjljane, mirne površine vode.

U slučaju zatalasanosti vodene površine, reflektovani deo direktnog sunčevog zračenja poprima oblik kombinovane usmerene i difuzne refleksije, pa se tada umesto izraza (21), može modifikovati i koristiti izraz (19a), odnosno:

$$I_u = I_D + 0.5I_d + 0.5\rho_{shG} G = I_D + 0.5(I_d + \rho_{shG} G) \quad (23)$$

gde su:

- G – globalno zračenje na horizontalnu, vodenu površinu,
 ρ_{shG} – srednji kratkotalasni albedo površine vode videne sa ravni.

Kratkotalasni albedo, koji predstavlja odnos reflektovanog sunčevog zračenja prema atmosferi i globalnog sunčevog zračenja na horizontalnu površinu, je veličina koja se menja u toku dana i toku godine i za vodenu površinu, dat u literaturi, iznosi od 2% do 80% [2], 0.08-0.80 [3]. Sunčevog zračenja od zatalasane vodene površine predstavlja kombinaciju usmerene i difuzne refleksije i zavisi od međusobnog položaja Sunca i posmatrane površine; pravca, smera i intenziteta vetra, odnosno pravca, smera, oblika i veličine talasa; čistoće vode i sl., i usled nedostatka preciznijih podataka nameće se korišćenje procenjene vrednosti, naročito kod niskih elevacija Sunca.

Apsorpcija, refleksija i transmisija sunčevog zračenja kroz ravno staklo

Deo sunčevog zračenja koje pada na površinu ravnog stakla se reflektuje nazad, deo – staklo apsorbuje, a ostatak prođe kroz staklo što može da se izrazi pomoću refleksije površine i specifičnog koeficijenta apsorpcije koji se odnosi na materijal stakla (medijuma).

Refleksija površine je definisana kao reflektovani deo zračenja na unutrašnjoj ili spoljašnjoj površini ravnog stakla, i data je sledećim izrazom dobijenim iz Fresnelove jednačine:

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(i - i')}{\tan^2(i + i')} + \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} \right) = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} \left[1 + \frac{\cos^2(i + i')}{\cos^2(i - i')} \right] \quad (25)$$

gde su:

- r – refleksija površine,
 i – upadni ugao zraka, može se izračunati iz jednačine (14) ($\eta=i$) i
 i' – ugao prelamanja (refrakcije) zraka.

Kada je upadno zračenje normalno na površinu između dva medijuma, odnosno kada je $i=i'=0$, onda se normalna refleksija površine može izračunati pomoću indeksa refrakcije n , iz izraza:

rakcije n , iz izraza:

$$r = \left(\frac{n - n'}{n + n'} \right)^2 \quad (25a)$$

Kada zraci dolaze iz vazduha, $n'=1$:

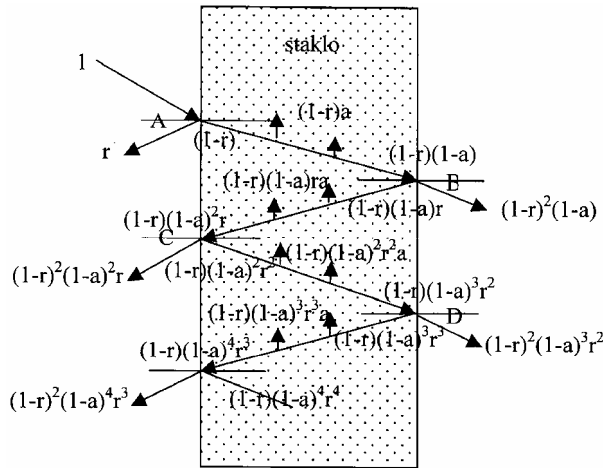
$$r = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (25b)$$

Prema sl.2 [4], u tački A, gde pada jedinica energije zračenja, r je reflektovana, a $(1-r)$ refraktovana energija (prelomljena) u masu ravnog stakla i pri prolasku postepeno apsorbovana energija, do pada u tačku B, na drugoj površini stakla. Apsorbovani deo energije može biti izražen sledećom formulom:

$$a = 1 - \exp\left(-\frac{kl}{\cos i'}\right) \quad (26)$$

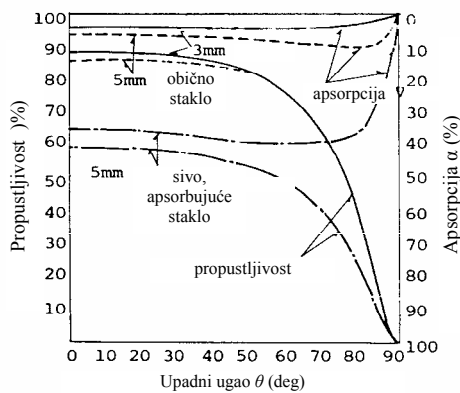
gde su:

- l (mm) – debljina ravnog stakla,
- k (mm^{-1}) – specifični koeficijent apsorpcije (on je karakteristika stakla i iznosi oko 0.02 mm^{-1} za obično ravno staklo [4]).

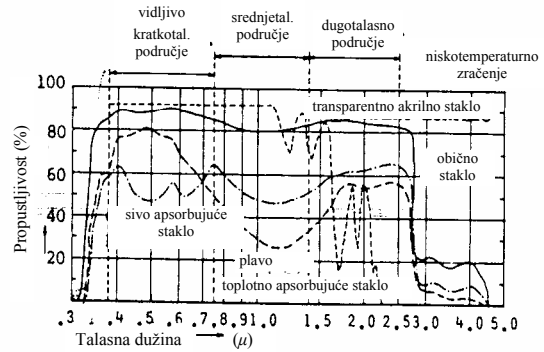


Slika 2. Prikaz procesa apsorpcije sunčeve energije u staklu pomoću višestruke refleksije na površinama

Neophodna informacija za prolaz i apsorpciju energije je upadni ugao zračenja koji je za mnoge praktične probleme poznat. Na sl.3 [4] prikazana je zavisnost između propustljivosti i apsorpcije zavisno od upadnog ugla zračenja za obično i sivo toplotno apsorbujuće staklo.



Slika 3. Zavisnost propustljivosti i apsorpcije od upadnog ugla sunčevog zračenja



Slika 4. Promena propustljivosti stakla zavisno od talasnih dužina

Prolaz energije zračenjem kroz ravno staklo se menja sa talasnim dužinama zračenja, kao što je prikazano na sl.4 [4].

Važno je uočiti da je staklo nepropustljivo za dugotalasno, niskotemperaturno zračenje ($>2.7\mu\text{m}$) dok je propustljivo za područje ($<2.7\mu\text{m}$) u kome je intenzitet sunčevog zračenja najveći. Ova osobina stakla, da propušta kratkotalasno zračenje koje se posle apsorpcije od unutrašnjih površina delimično emituje kao dugotalasno, niskotemperaturno zračenje, poznata je pod imenom "efekat staklene baštice" u primenu, karakteristike propustljivosti stakla zavisno od talasnih dužina daju se aproksimativno za pojedina talasna područja, kao što je prikazano u tabeli 4, [4].

Tabela 4. Koeficijent propustljivosti stakla zavisno od vrste stakla i područja talasnih dužina zračenja

Područje talasnih dužina	Energ-etski udeo	Čisto staklo 3 mm	Čisto staklo 5 mm	Sivo apsorbujuće 5 mm	Plavo apsorbujuće 5 mm	Čisto akrilno 3 mm
Kratkotalasno	0.5	0.88	0.85	0.52	0.70	0.92
Srednjetalasno	0.4	0.82	0.76	0.50	0.35	0.89
Dugotalasno	0.1	0.83	0.80	0.61	0.50	0.40
Sunčevo zračenje, srednje	1.0	0.85	0.81	0.52	0.59	0.90
Niskotemperaturno zračenje	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Na sl.2 u tački A, deo energije direktnog zračenja $(1-r)a$ je apsorbovan a deo $(1-r)(1-a)$ pada u tačku B, gde se deo $(1-r)(1-a)r$ reflektuje nazad u pravcu tačke C, a deo $(1-r)^2(1-a)$ prelama u unutrašnji prostor i postaje deo propuštene energije. Posmatrajući dalje proces refleksije i prelamanja energije zračenja od tačke B do tačke C na drugoj površini, deo $(1-r)(1-a)ra$ je apsorbovan, a deo $(1-r)^2(1-a)r$ prelomljen (refraktovan) prema spolja i postaje deo reflektovane energije u odnosu na ukupnu dozračenu energiju. Dalje imamo ponavljanje procesa refleksije i prelamanja, dok se deo energije apsorbuje u masi ravnog stakla. Kao krajnji rezultat prethodnih razmatranja, možemo dobiti koeficijent apsorpcije α_D , koeficijent refleksije ρ_D i koeficijent propustljivosti τ_D za ravno staklo, kao beskonačni zbir posmatranih komponenata za vreme procesa što ćemo dati izrazom:

$$\alpha_D = a(1-r)\left[1+r(1-a)+r^2(1-a)^2+\dots\right]=\frac{a(1-r)}{1-r(1/a)} \quad (27)$$

$$\rho_D = r\left\{1+(1-a)^2(1-r)^2\left[1+(1-a)^2r^2+\dots\right]\right\}=r\left(1+\frac{(1-a)^2(1-r)^2}{1-r^2(1-a)^2}\right) \quad (28)$$

$$\tau_D = (1-r)^2(1-a)\left[1+r^2(1-a)^2+\dots\right]=\frac{(1-r)^2(1-a)}{1-r^2(1-a)^2} \quad (29)$$

Apsorpcija, refleksija i propustljivost kod ravnog stakla zavise od upadnog ugla i ugla prelamanja direktnog zračenja i može biti povezano sa relacijama datim u prethodnim izrazima pomoću odnosa datog Snellovim zakonom:

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sin i}{\sin i'} \quad (30)$$

gde je: n ; n' - indeksi refrakcije ($n = 1.00029$ za vazduh; $n' = 1.52-1.69$ za kvarcno staklo).

Takođe, za direktno, odnosno za difuzno zračenje, važi relacija:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (31)$$

Koeficijenti propustljivosti i apsorpcije za ravno staklo za difuzno zračenje mogu biti dobijeni integracijom koeficijenata propustljivosti i apsorpcije za različite upadne uglove za poluloptu.

$$\tau_d = 2 \int_0^{\pi/2} \tau_{Di} \sin i \cos i di \quad (32)$$

$$\alpha_d = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha_{Di} \sin i \cos i di \quad (33)$$

gde su:

- τ_{Di} – koeficijent propustljivosti za upadni ugao zraka,
- α_{Di} – koeficijent apsorpcije za upadni ugao zraka,
- τ_d – koeficijent propustljivosti za difuzno zračenje i
- α_d – koeficijent apsorpcije za difuzno zračenje.

Upadni ugao direktnog sunčevog zračenja u odnosu na zastakljenu površinu zavisi od međusobnog položaja Sunca i posmatrane zastakljene površine i neprekidno se menja u toku dana i 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 godine.

Za difuzno zračenje koeficijenti imaju konstantne vrednosti.

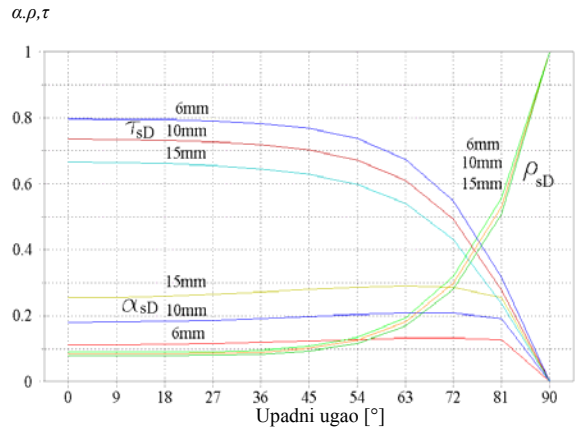
Relativni parametri i njihova promena je prikazana u obliku dijagrama, na slikama 5, 6, 7, 8 i 9.

Na dijagramu sl.5, date su krive promene koeficijenata apsorpcije, refleksije i propustljivosti za direktno (D) zračenje zavisno od upadnog ugla sunčevog zračenja i debljine stakla.

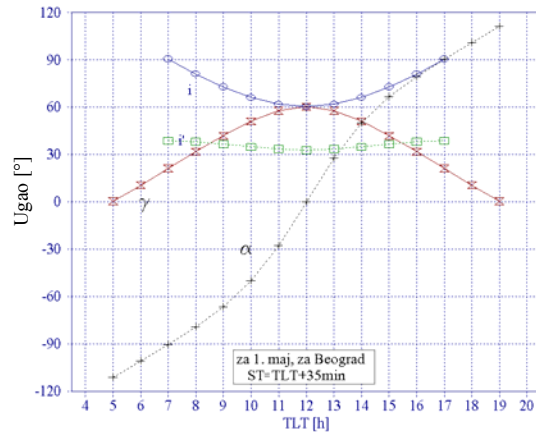
Promena koeficijenata u toku dana data je u funkciji TLT (True Local Time), stvarnog lokalnog vremena kao i u funkciji ST, standardnog vremena.

Veza između TLT, odnosno ST, i upadnog ugla zračenja određena je izrazima (10 i 11) pa za 1. maj i letnje merenje vremena: $ST = TLT + 35$ min.

Na sl.6 prikazana je časovna promena upadnog ugla zračenja (i), ugla refrakcije (vazduh – staklo) (i'), elevacije (γ) i azimuta (α) Sunca, za jedan dan u godini (1. maj), za južno orijentisano staklo, za Beograd (Sava, Dunav), u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT) i standardnog vremena (ST).

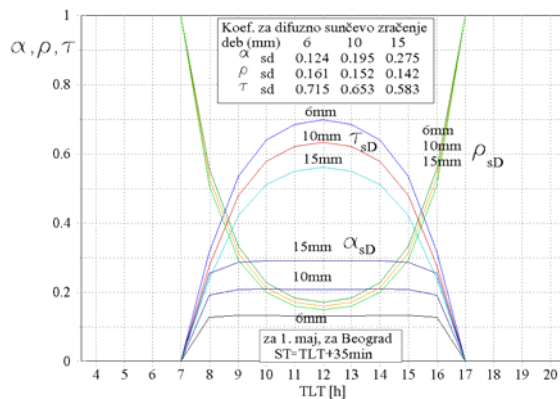


Slika 5. Zavisnost koeficijenta apsorpcije (α_{sD}), refleksije (ρ_{sD}) i propustljivosti (τ_{sD}) stakla, za direktno sunčevo zračenje, zavisno od upadnog ugla zračenja i debljine stakla



Slika 6. Časovna promena upadnog ugla zračenja (i), ugla refrakcije (vazduh-staklo) (i') i azimuta (α) Sunca za jedan dan u godini (1. maj), za južno orijentisano staklo, za Beograd (Sava, Dunav) u funkciji TLT (ST)

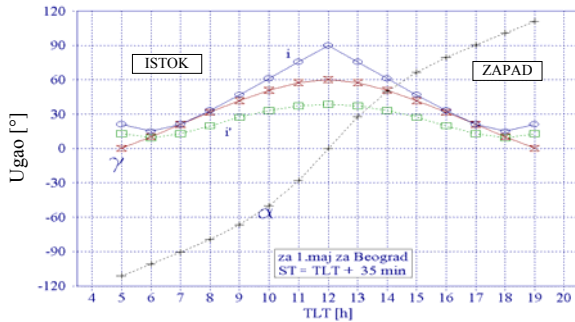
Na sl.7, prikazana je časovna promena koeficijenata apsorpcije, α_{sD} , refleksije, ρ_{sD} , i propustljivosti stakla, τ_{sD} , za direktno sunčevo zračenje i promena koeficijenata apsorpcije α_d , refleksije ρ_d i propustljivosti stakla τ_d .



Slika 7. Časovna promena koeficijenata apsorpcije (α), refleksije (ρ) i propustljivosti (τ) za direktno (D) i difuzno (d) sunčevo zračenje, za jedan dan u godini (1. maj), za južno orijentisano staklo, za Beograd (Sava, Dunav), zavisno od debljine stakla i TLT (ST)

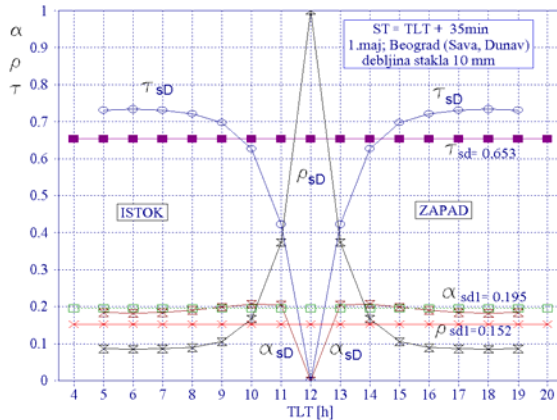
cije, α_{sd} , refleksije, ρ_{sd} , i propustljivosti stakla, τ_{sd} , za difuzno sunčevo zračenje, za 1.maj, za južno orijentisano staklo, za lokaciju Beograda (Sava, Dunav), zavisno od debljine stakla i TLT (ST).

Na sl.8 za vazduh – staklo prikazana je časovna promena upadnog ugla zračenja (i), ugla refrakcije (vazduh – staklo)(i'), elevacije (γ) i azimuta (α) Sunca, za jedan dan u godini (1. maj), za istočno-zapadno orijentisano staklo, za Beograd (Sava, Dunav), u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT) i standardnog vremena (ST).



Slika 8. Časovna promena upadnog ugla zračenja (i), ugla refrakcije (vazduh – staklo) (i'), elevacije (γ) i azimuta (α) Sunca za jedan dan u godini (1. maj), za istočno-zapadno orijentisano staklo, za Beograd (Sava, Dunav) u funkciji TLT (ST)

Na sl.9 je prikazana časovna promena koeficijenta apsorpcije, α_{sD} , refleksije, ρ_{sD} , i propustljivosti stakla, τ_{sD} , za direktno sunčevo zračenje; i promena koeficijenta apsorpcije, α_{sd} , refleksije, ρ_{sd} , i propustljivosti stakla, τ_{sd} , za difuzno sunčevo zračenje; za staklo debljine 10 mm, za istočno-zapadno orijentisano staklo, za poziciju Sunca 1. maja za lokaciju Beograda (Sava, Dunav) u funkciji TLT (ST)



Slika 9: Časovna promena koeficijenta apsorpcije (α), refleksije (ρ) i propustljivosti (τ) za direktno (D) i difuzno (d) sunčevo zračenje, za jedan dan u godini (1. maj), za istočno-zapadno orijentisano staklo, debljine 10mm, za Beograd (Sava, Dunav), u funkciji TLT (ST)

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

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

dnom 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.

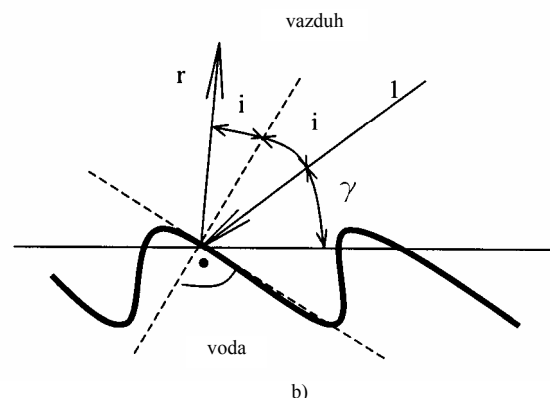
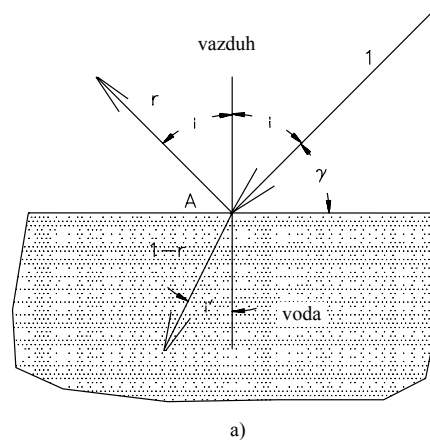
Pretpostavka je da je masa vode dovoljno velika, odnosno voda dovoljno duboka, sa zanemarivim delom vraćenog raspršenog zračenja, da sa dnom apsorbuje celokupno direktno i difuzno zračenje koje je prodrlo u vodu. Refleksija sunčevog zračenja od mirne površine vode, odnosno reflektovani deo usmerenog zračenja koji pada na mirnu površinu vode može se izračunati korišćenjem Fresnelove jednačine:

$$\rho_{shD} = r = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(i-i')}{\tan^2(i+i')} + \frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')} \right) \quad (34)$$

gde su:

- r – refleksija površine vode i u ovom slučaju jednaka je i koeficijentu refleksije direktnog sunčevog zračenja od horizontalne, ogledalne površine, za dati upadni ugao, ρ_{shD}
- i – upadni ugao zraka, može se izračunati iz jednačine (14) ($\eta=i$), za horizontalnu površinu $i = 90^\circ - \gamma$
- i' – ugao prelamanja (refrakcije) zraka.

Prema sl.10 u tački A, gde pada jedinica energije zračenja, r je reflektovana, a $(1-r)$ refraktovana energija (prelomljena) u masu vode i pri prolasku postepeno apsorbovana energija.



Slika 10. Prikaz procesa refleksije sunčevog zračenja od vodene površine

Refleksija od mirne vodene površine zavisi od upadnog ugla i ugla prelamanja direktnog zračenja i može biti povezana sa prethodnim izrazom pomoću izraza (30), tj. odnosa datog Snelovim zakonom gde je, pri tome, za vodu $n'=1.32-1.33$, za $t=14$ do 100°C .

Tako možemo dobiti izraz za izračunavanje ugla refrakcije:

$$i' = \arcsin\left(\frac{\cos \gamma}{1.33}\right) \quad (35)$$

Koeficijent refleksije za difuzno zračenje za mirnu površinu vode može da se dobije integracijom koeficijenata refleksije za različite upadne uglove za poluloptu:

$$\rho_{shd} = 2 \int_0^{\pi/2} \rho_{shDi} \sin i \cos i di \quad (36)$$

odnosno, pošto je $i = 90^{\circ} - \gamma$, imamo:

$$\rho_{shd} = 2 \int_0^{\pi/2} \rho_{shDi} \sin \gamma \cos \gamma di \quad (37)$$

gde je: ρ_{shDi} koeficijent refleksije za upadni ugao zraka i .

U slučaju zatalasanosti vodene površine menja se koeficijent refleksije direktnog sunčevog zračenja, i to naročito ako je Sunce nisko na nebu, jer se smanjuje prosečan upadni ugao, a time i koeficijent refleksije (sl.10). Relevantni parametri i njihova promena je prikazana u obliku dijagrama, na slikama (11,12 i 13).

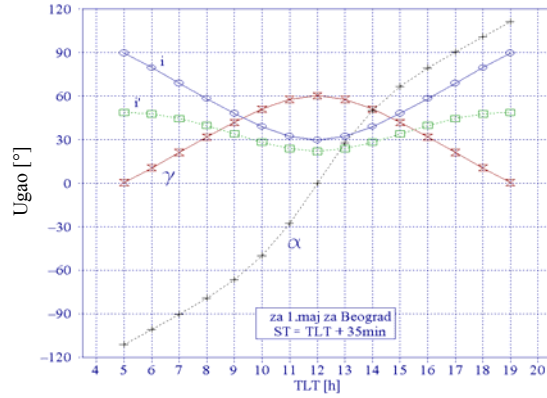
Na dijagramu (sl.12) je prikazana promena koeficijenta refleksije direktnog sunčevog zračenja za mirnu površinu vode zavisi od promene upadnog ugla zračenja (kriva a). Na istoj slici je uneta i kriva za zatalasanu morskú površinu, vetar 4 Bf, prema [5]. Koeficijent difuznog sunčevog zračenja ne zavisi od zatalasanosti vodene površine već od atmosferskih uslova [5].

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, 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.

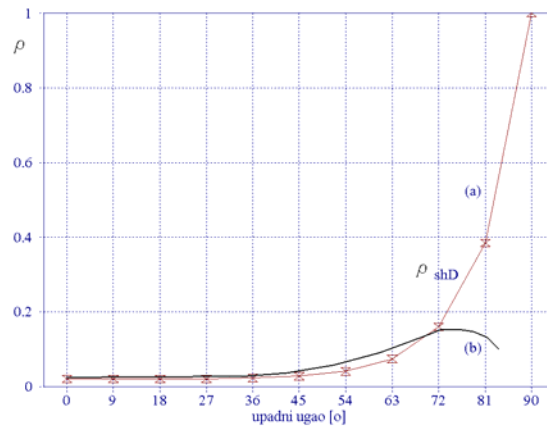
Promena koeficijenta u toku dana data je u funkciji TLT, stvarnog lokalnog vremena, kao i u funkciji ST, standardnog vremena, za određen dan u godini (1.maj), i određenu lokaciju (Beograd, Sava, Dunav).

Na slici 11 prikazani su: časovna promena upadnog ugla zračenja (i), ugla refrakcije (vazduh – voda) (i'), elevacije (γ) i azimuta (α) Sunca, za jedan dan u godini (1. maj), za površinu vode za Beograd (Sava, Dunav), u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT) i standardnog vremena (ST) Na sl.12 date su krive promene koeficijenata refleksije za direktno sunčevo zračenje zavisi od upadnog ugla direktnog sunčevog zračenja; za mirnu površinu vode kriva (a) i za zatalasanu površinu morske vode, vetar 4 Bf, prema [5].

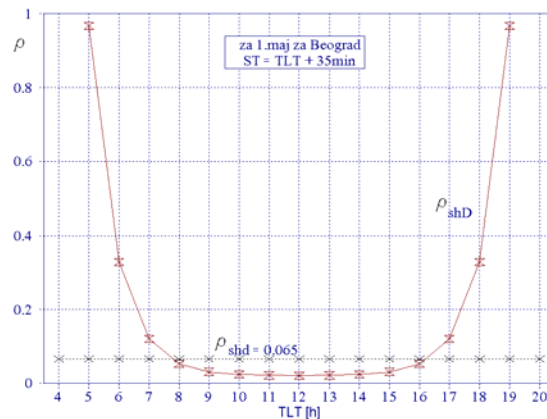
Na sl.13 prikazana je časovna promena koeficijenta refleksije za direktno sunčevo zračenje (ρ_{shd}) i za difuzno sunčevo zračenje (ρ_{shd}) za mirnu površinu vode u Beogradu (Sava, Dunav), za jedan dan u godini (1. maj), u funkciji stvarnog lokalnog vremena (TLT) i standardnog vremena (ST).



Slika 11. Časovna promena upadnog ugla zračenja (i), ugla refrakcije (vazduh – voda) (i'), elevacije (γ) i azimuta (α) Sunca za jedan dan u godini (1. maj), za površinu vode za Beograd (Sava, Dunav) u funkciji TLT (ST)



Slika 12. Promena koeficijenta refleksije direktnog sunčevog zračenja (ρ_{shd}), za mirnu površinu vode kriva (a) i za zatalasanu morskú površinu, vetar 4 Bf, kriva (b) prema [5], u zavisnosti od promene upadnog ugla zračenja

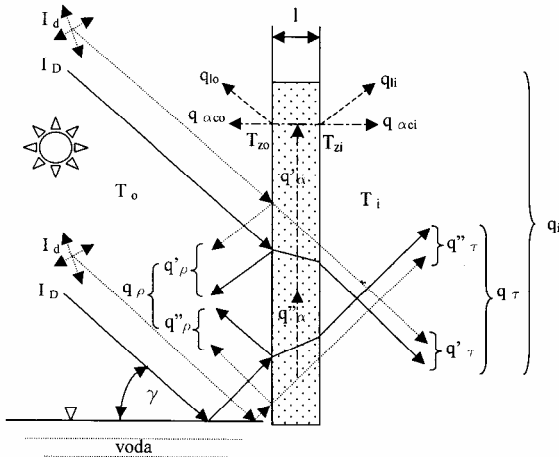


Slika 13. Časovna promena koeficijenta refleksije za direktno sunčevo zračenje (ρ_{shd}) i za difuzno sunčevo zračenje (ρ_{shd}), za mirnu površinu vode u Beogradu (Sava, Dunav), za jedan dan u godini (1. maj), u funkciji TLT (ST)

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

Prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljenu površinu broda

Na sl.14 je dat prikaz bilansa toplote sunčevog zračenja za vertikalno staklo broda, uz prisustvo mirne vodene površine.



Slika 14. Prikaz bilansa toplote sunčevog zračenja za vertikalno staklo broda

Ukupno sunčevo zračenje koje, uz prisustvo vodene površine, u datom trenutku vremena pada na vertikalnu spoljašnju površinu stakla broda I_u , jednim delom se reflektuje q_ρ , deo staklo apsorbuje q_α , a ostali deo prodire u prostoriju, q_τ , odnosno:

$$I_u = I'_u + I''_u = (I_D + 0.5I_d) + (\rho_{shD}I_D + 0.5\rho_{shd}I_d) = (1 + \rho_{shD})I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})I_d = q_\rho + q_\alpha + q_\tau \quad (38)$$

$$q_\rho = q'_\rho + q''_\rho = (\rho_{sD}I_D + 0.5\rho_{sd}I_d) + (\rho_{sD}\rho_{shD}I_D + 0.5\rho_{sd}\rho_{shd}I_d) = (1 + \rho_{shD})\rho_{sD}I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})\rho_{sd}I_d \quad (39)$$

$$q_\alpha = q'_\alpha + q''_\alpha = (\alpha_{sD}I_D + 0.5\alpha_{sd}I_d) + (\alpha_{sD}\rho_{shD}I_D + 0.5\alpha_{sd}\rho_{shd}I_d) = (1 + \rho_{shD})\alpha_{sD}I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})\alpha_{sd}I_d \quad (40)$$

$$q_\tau = q'_\tau + q''_\tau = (\tau_{sD}I_D + 0.5\tau_{sd}I_d) + (\tau_{sD}\rho_{shD}I_D + 0.5\tau_{sd}\rho_{shd}I_d) = (1 + \rho_{shD})\tau_{sD}I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})\tau_{sd}I_d \quad (41)$$

Toplotni dobici od sunčevog zračenja kroz vertikalnu zastakljenu površinu broda, q_i (W/m^2), mogu se predstaviti kao zbir od: propuštene komponente, q_τ , dela apsorbiranog 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 slici 14:

$$q_i = q_\tau + q_{aci} + q_{li} \quad (42)$$

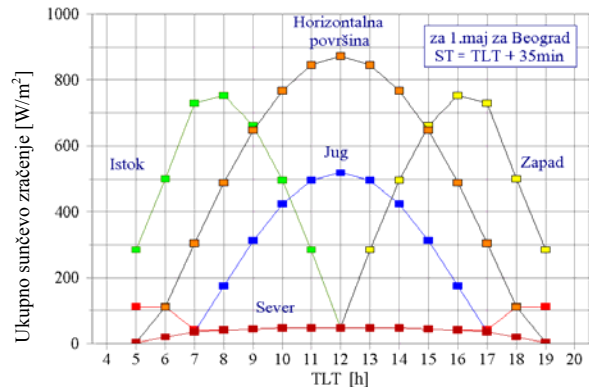
gde su:

$$q_{aci} = \frac{\alpha_{ci}\Delta T_i}{\alpha_{ci}\Delta T_i + \alpha_{co}\Delta T_o} (q_\alpha - q_{li} - q_{lo}) = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{co}\Delta T_o}{\alpha_{ci}\Delta T_i}} (q_\alpha - q_{li} - q_{lo}) \quad (43)$$

- 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_{li}, q_{lo} (W/m^2) – delovi apsorbiranog sunčevog zračenja stakla, razmenjenog niskotemperaturnim zračenjem; sa spoljašnjom okolinom q_{lo} i sa unutrašnjim površinama prostorije q_{li} .

Apsorbirano 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.15 je prikazan dijagram časovne promene ukupnog sunčevog zračenja u Beogradu, na površine sa naznačenom orijentacijom, dobijen linearnom interpolacijom, prema [2], korišćen u narednim primerima.

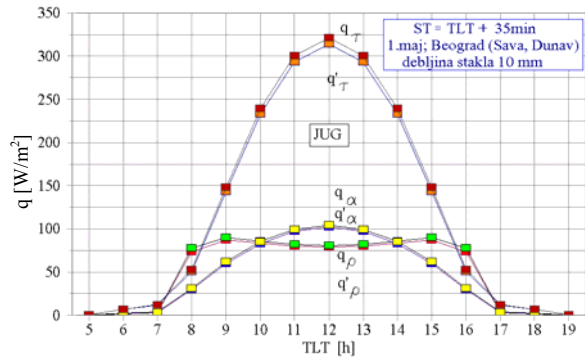


Slika 15. Ukupno sunčevo zračenje, za Beograd, na orijentisane površine, korišćeno u primeru

Na sl.16 za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, za južno orijentisano obično staklo debljine 10 mm, prema izrazima (39,40 i 41) i vrednostima sunčevog zračenja prema sl.15, prikazane su krive promene:

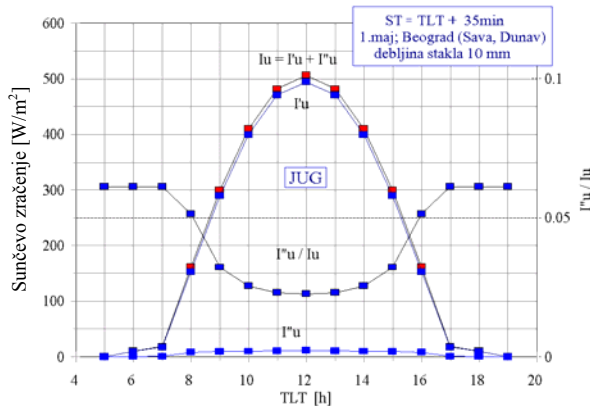
- ukupnog reflektovanog sunčevog zračenja (q_ρ), i reflektovanog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (q'_ρ);
- ukupno apsorbiranog sunčevog zračenja od stakla (q_α) i apsorbiranog sunčevog zračenja od stakla koje potiče od sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (q'_α) i
- ukupno propuštenog sunčevog zračenja kroz staklo, (q_τ), i propuštenog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla, (q'_τ).

Razlika između korespondentnih krivih potiče od sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od prisutne mirne vodene površine.



Slika 16. Časovna promena reflektovanog, apsorbovanog i propuštenog sunčevog zračenja prema izrazima (39,40 i 41), za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, južno orijentisano staklo debljine 10 mm.

Na sl.17 prikazane su promene: ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla (I_u), sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (I'_u), sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od mirne vodene površine (I''_u), i odnosa (I''_u / I_u), prema izrazima (38,39,40 i 41) i prema vrednostima sunčevog zračenja sa sl.15, za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, južno orijentisano staklo debljine 10mm



Slika 17. Časovna promena ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla (I_u), sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (I'_u), sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od mirne vodene površine (I''_u), i odnosa (I''_u / I_u), prema izrazima (38,39,40 i 41), za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, južno orijentisano staklo

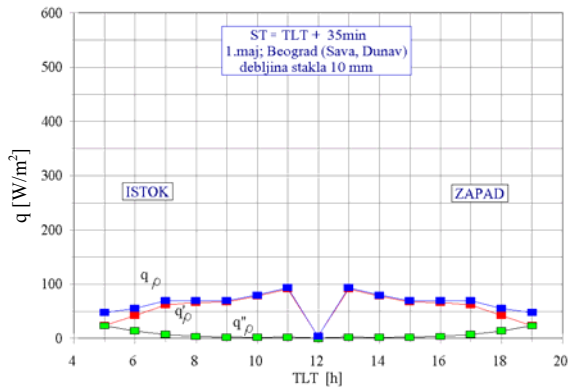
Odnos I''_u / I_u se kreće u navedenim uslovima od 0.061 do 0.023, odnosno udeo reflektovanog sunčevog zračenja od prisustva mirne vodene površine u odnosu na ukupno sunčevo zračenje koje pada na spoljašnju površinu stakla, u ovom slučaju, kreće se od 6.1%, u ranim jutarnjim i kasnim popodnevnim satima, do 2.3%, u podne.

Na sl.18 za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, za istočno-zapadno orijentisano obično staklo, debljine 10 mm, prema izrazima (39,40 i 41) i vrednostima sunčevog zračenja prema slici 15, prikazane su krive promene:

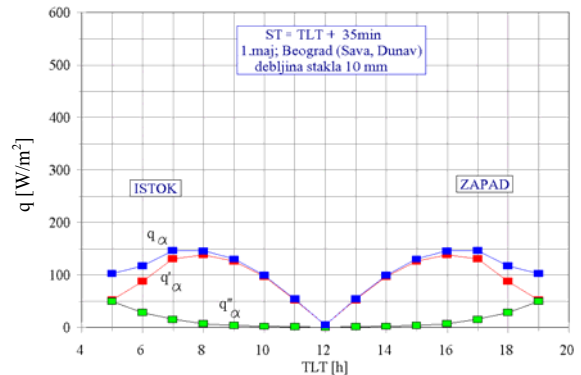
- ukupnog reflektovanog sunčevog zračenja, (q_ρ), reflektovanog sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (q'_ρ) i reflektovanog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od površine vode (q''_ρ), sl.18(a),
- ukupno apsorbovanog sunčevog zračenja od stakla (q_α), apsorbovanog sunčevog zračenja od stakla koje potiče od sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju

površinu stakla (q'_α) i apsorbovanog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od površine vode (q''_α), sl.18(b) i

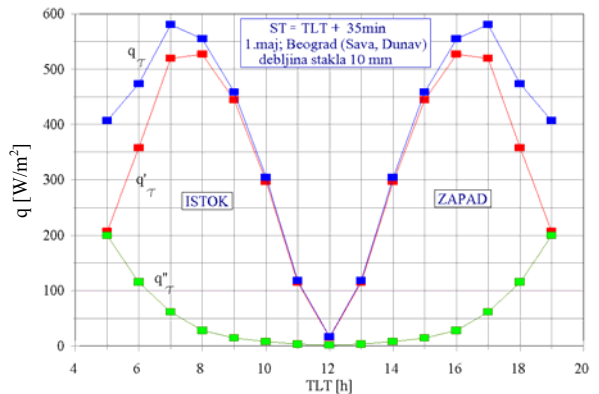
- ukupno propuštenog sunčevog zračenja kroz staklo (q_τ), propuštenog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu (q'_τ) i propuštenog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od površine vode (q''_τ), sl.18(c).



(a)



(b)

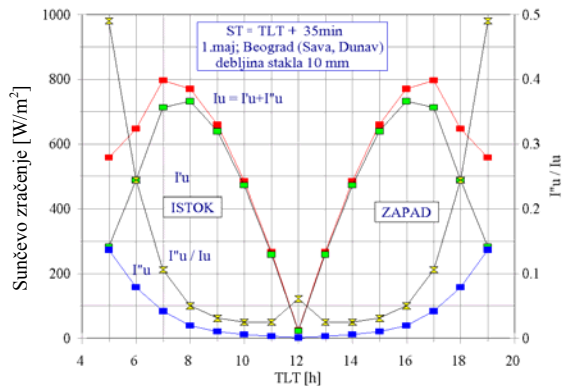


(c)

Slika 18. Časovna promena reflektovanog (a), apsorbovanog (b) i propuštenog (c) sunčevog zračenja prema izrazima (39,40 i 41), za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, istočno-zapadno orijentisano staklo, debljine 10mm.

Na sl.19 prikazane su promene: ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla (I_u), sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (I'_u), sunčevog zračenja koje pada na

kla (I'_u), sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od mirne vodene površine (I''_u), i odnosa (I''_u / I_u), prema izrazima (38,39,40 i 41) i prema vrednostima sunčevog zračenja sa sl.15, za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, istočno - zapadno orijentisano staklo debljine 10mm.



Slika 19. Časovna promena ukupnog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla (I_u); sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (I'_u), sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od mirne vodene površine (I''_u), i odnosa (I''_u / I_u), prema izrazima (38,39,40 i 41), za Beograd (Sava, Dunav), 1.maja, istočno - zapadno orijentisano staklo

Odnos I''_u / I_u se kreće u navedenim uslovima od blizu 0.50 do 0.025, odnosno udeo reflektovanog sunčevog zračenja od prisustva mirne vodene površine u odnosu na ukupno sunčevo zračenje koje pada na spoljašnju površinu stakla, u ovom slučaju, kreće se od $\approx 50\%$, u ranim jutarnjim satima za istočno orijentisano staklo, i kasnim popodnevnim satima, za zapadno orijentisano staklo; sa minimumom od 2.5%, ≈ 11 časova, odnosno 13 časova; i porastom do 6,1% u podne. U ovom slučaju dolazi do izražaja visok koeficijent refleksije direktnog sunčevog zračenja od vodene površine, u ranim jutarnjim i kasnim popodnevnim satima za istočno - zapadno orijentisano staklo, prikazane su promene: pre podne za istočno orijentisano staklo i popodne za zapadno orijentisano staklo. Pre podne (TLT < 12h), zapadno orijentisano staklo, i popodne (TLT > 12h). Istočno orijentisano staklo je izloženo samo difuznom sunčevom zračenju što, radi bolje preglednosti, na dijagramima nije prikazano. Samo difuznom sunčevom zračenju izloženo je i severno orijentisano staklo za $8h < TLT < 16h$. Prema izrazima (22 i 38), ukupno difuzno zračenje, koje pada na vertikalne površine pored vode, iznosi 53,25% od difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan.

Zaključak

Formirani matematički model i računarski program obuhvata kompleksnu interakciju relevantnih parametara kod prolaza sunčevog zračenja kroz zastakljene površine broda, i time doprinosi realnijem sagledavanju i izračunavanju toplotnih dobitaka promenljivih u toku dana i u toku godine. Posledice nepreciznog proračuna odražavaju se kako na kvalitet uspostavljanja termičkih uslova u kontrolisanom prostoru, tako i na visinu investicionih i eksploatacionih troškova postrojenja za grejanje i klimatizaciju zastakljenih površina, izloženi rad omogućava i izračunavanje intenziteta sunčevog zračenja na ostale spoljašnje površine broda, odnosno što realnije sagledavanje i izračunavanje toplotnih dobitaka pri prolazu toplote kod spoljašnjih zidova broda.

Do visokog uдела reflektovanog sunčevog zračenja od

vodne površine u ukupnom zračenju na vertikalnu površinu broda, dolazi u slučajevima niske elevacije Sunca i mirne površine vode: u ranim prepodnevnim i kasnim popodnevnim satima kod površina orijentisanih prema istoku, odnosno zapadu; za severnu zemljinu poluloptu, južna orijentacija zimi i sl.

Povećanje direktnog sunčevog zračenja koje pada na vertikalnu spoljašnju površinu broda kreće se po relaciji $(1 + \rho_{shD})$, odnosno, zavisi od povećanja koeficijenta refleksije direktnog sunčevog zračenja ρ_{shD} , i može da se kreće od 100%, kod mirne vodene površine i za vrlo niske elevacije Sunca, pa do 2% za ugao elevacije Sunca od 90° .

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 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 za određenu lokaciju menjaju u toku dana i u toku godine. Najintenzivnije promene koeficijenta refleksije od vodene površine za direktno sunčevo zračenje dešavaju se u ranim prepodnevnim i kasnim popodnevnim satima, odnosno kod niskih elevacija Sunca. Sa povećanjem zatalasanosti vodene površine opada refleksija direktnog sunčevog zračenja kod niskih elevacija Sunca.

Niske elevacije Sunca su kombinovane sa niskim intenzitetima sunčevog zračenja, međutim, na povećanje prolaza sunčevog zračenja kroz zastakljene površine broda je od značaja upadni ugao zračenja u odnosu na zastakljene površine, odnosno orijentacija površina.

Površine izložene direktnom sunčevom zračenju kod izlaska – zalaska Sunca (u ovom slučaju: istočno, zapadno i severno orijentisane) imaju visok početni udeo reflektovanog sunčevog zračenja od vodene površine u ukupnom sunčevom zračenju na vertikalnu površinu broda (za mirnu površinu vode iznosi blizu 50%).

Površine izložene difuznom sunčevom zračenju kod izlaska – zalaska Sunca (u ovom slučaju južno orijentisana) imaju nizak početni udeo reflektovanog sunčevog zračenja od vodene površine u ukupnom sunčevom zračenju na vertikalnu površinu broda (6.1%).

U ovom slučaju pre podne (TLT < 12h), zapadno orijentisano staklo; popodne (TLT > 12h) istočno orijentisano staklo; i za (približno, $8h < TLT < 16h$) severno orijentisano staklo izloženo je samo difuznom sunčevom zračenju. Ukupno difuzno zračenje koje pada na vertikalne površine pored vode iznosi oko 53% od difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan.

Uticaj vrste i debljine stakla obuhvaćen je izračunavanjem koeficijenata refleksije, apsorpcije i propustljivosti stakla. Za istu vrstu stakla, sa porastom debljine, raste koeficijent apsorpcije, dok srazmerno u zbiru opadaju koeficijenti: propustljivosti u većoj meri i refleksije u manjoj meri.

Literatura

- [1] KASTEN, F. Measurement and Analysis of Solar Radiation Data. *Energy and Buildings*, 1981, no.3, p.1-29.
- [2] TODOROVIĆ, B. *Klimatizacija*. SMEITS, Beograd, 1998.
- [3] SIEGEL, HOWEL: *Thermal Radiation Heat Transfer*. Mc Grow-Hill Book Company, New York, 1972.
- [4] KIMURA, KEN-ICHI: *Scientific Basis of Air Conditioning*. Appliedscience publishers LTD, London, 1977.
- [5] ...: *Pomorska enciklopedija*. Jugoslavenski leksikografski zavod, tom 5, Zagreb, 1981.