

BILANS TOPLOTE SUNČEVOG ZRAČENJA ZA JEDNOSTRUKO VERTIKALNO STAKLO NA OBJEKTIMA PORED VELIKIH VODENIH POVRŠINA

Dimitrije Lilić¹

SAŽETAK:

U arhitekturi niske energije (pasivnoj arhitekturi) korišćenje sunčeve energije je od primarne važnosti. Sunčevo zračenje koje pada na zastakljenu površinu jednim delom se reflektuje, deo staklo apsorbuje a deo prođe kroz staklo. Bilans sunčevog zračenja za zastakljene površine na objektima koji se nalaze pored velikih vodenih površina, zavisi od niza faktora; između ostalog i od refleksije sunčevog zračenja od površine vode. Formiranim matematičkim modelom obuhvaćena je kompleksna interakcija relevantnih parametara i dat primer za uticaj prisustva vodene površine na reflektovano, apsorbovano i propušteno sunčevo zračenje za jednostuko, vertikalno, zapadno-istočno orijentisano staklo.

Ključne reči: energetska efikasnost, pasivna arhitektura, staklo, sunčevo zračenje, bilans toplote, refleksija površine vode

1. UVOD

U arhitekturi niske energije (pasivnoj arhitekturi) korišćenje sunčeve energije je od primarne važnosti. Pasivno korišćenje sunčeve energije za grejanje i osvetljenje kao i zaštita od preteranog osunčavanja doprinose energetske efikasnosti i održivom razvoju. Kod objekata pored velikih vodenih površina (i na vodi) prolaz sunčevog zračenja kroz zastakljene površine zavisi od niza faktora; između ostalog i od refleksije sunčevog zračenja od površine vode.

¹ Dr Dimitrije Lilić dipl.inž, Agencija za energetske efikasnost, Beograd, Omladinskih brigada 1.

U radu je obuhvaćena kompleksna interakcija relevantnih parametara i dat primer za uticaj prisustva vodene površine na refleksiju, apsorpciju i prolaz sunčevog zračenja za obično jednostruko, vertikalno, zapadno - istočno orijentisano staklo.

2. 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 preostali deo prodire u vodenu masu i 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 pa tako deo zračenja može biti vraćen nazad u atmosferu [6].

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 direktnog sunčevog zračenja od mirne površine vode (ρ_{shDi}) za dati upadni ugao ($i = 90^\circ - \gamma$), može se izračunati korišćenjem Fresnelove jednačine:

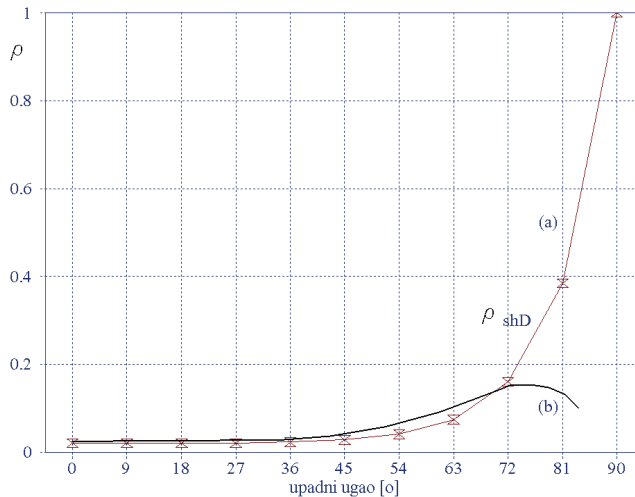
$$\rho_{shDi} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(i - i')}{\tan^2(i + i')} + \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} \right) \quad (1)$$

Ugao prelamanja (refrakcije) zraka (i') možemo dobiti pomoću odnosa datog Snelovim zakonom:

$$i' = \arcsin\left(\frac{\cos \gamma}{1.33}\right) \quad (2)$$

Koeficijent refleksije za difuzno zračenje može se dobiti iz izraza [5]:

$$\rho_{shd} = 2 \int_0^{\pi/2} \rho_{shDi} \sin i \cos i di \quad (3)$$



Slika 1. Promena koeficijenta refleksije direktnog sunčevog zračenja (ρ_{shD}), za mirnu površinu vode, kriva (a), i za zatalasanu morskú površinu, vetar 4 Bf, kriva (b) [7], u zavisnosti od promene upadnog ugla zračenja

Koeficijent refleksije od vodene površine za direktno zračenje zavisi od upadnog ugla sunčevog zračenja, pravca, smera, oblika i veličine talasa (slika 1); čistoće vode i sl., dok je za difuzno zračenje, za mirnu površinu vode $\rho_{shd} = 0.065$.

3. SUNČEVO ZRAČENJE NA VERTIKALNU RAVAN PORED VODENE POVRŠINE

Kod objekata na vodi i pored vodenih površina, pored direktnog i difuznog sunčevog zračenja koje pada na neku ravan, imamo i 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.

Pretpostavljajući izotropno nebesko zračenje i prisustvo vodene mirne površine sa napred navedenim osobinama, koja ima koeficijent refleksije direktnog sunčevog zračenja, ρ_{shD} , i koeficijent refleksije difuznog sunčevog zračenja, ρ_{shd} , sunčevo zračenje G koje prima neka površina je [1-3]:

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

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

Gde je:

- I - fluks direktnog sunčevog zračenja na ravan upravnu na zračenje, (W/m^2)
- D - fluks difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan, (W/m^2)
- η - ugao između pravca Sunca i normale površine, ($^\circ$)
- γ - elevacija Sunca, ($^\circ$)
- α - azimut Sunca, od smeru juga: pozitivno u smeru zapada, negativno u smeru istoka, ($^\circ$)
- α' - azimut normale površine, ($^\circ$)
- β - ugao nagiba površine u odnosu na horizontalnu ravan, ($^\circ$), $\beta=90^\circ$ za vertikalnu ravan,
- f - deo difuznog sunčevog zračenja D viđeno sa površine $f = (1 + \cos \beta)/2 = \cos^2(\beta/2)$ [4,6].

Ako označimo sa:

- I_D - fluks direktnog sunčevog zračenja na posmatranu vertikalnu ravan, (W/m^2) i
 - I_d - fluks difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan, (W/m^2),
- možemo napisati izraz za ukupno sunčevo zračenje koje, uz prisustvo vodene površine, pada na vertikalnu spoljašnju površinu, I_u :

$$I_u = I_D + \rho_{shd} I_D + 0,5(1 + \rho_{shd}) I_d \quad (3)$$

Prvi član u izrazu (3) predstavlja direktno usmereno sunčevo zračenje koje pada na vertikalnu površinu; drugi član predstavlja direktno sunčevo zračenje reflektovano od vodene površine koje pada na vertikalnu površinu i koje je zadržalo usmereni karakter; i treći član predstavlja ukupno difuzno zračenje na vertikalnu površinu koje sadrži i reflektovanu komponentu od vodene površine.

4. BILANS TOPLOTE SUNČEVOG ZRAČENJA ZA VERTIKALNO STAKLO PORED VODENE POVRŠINE

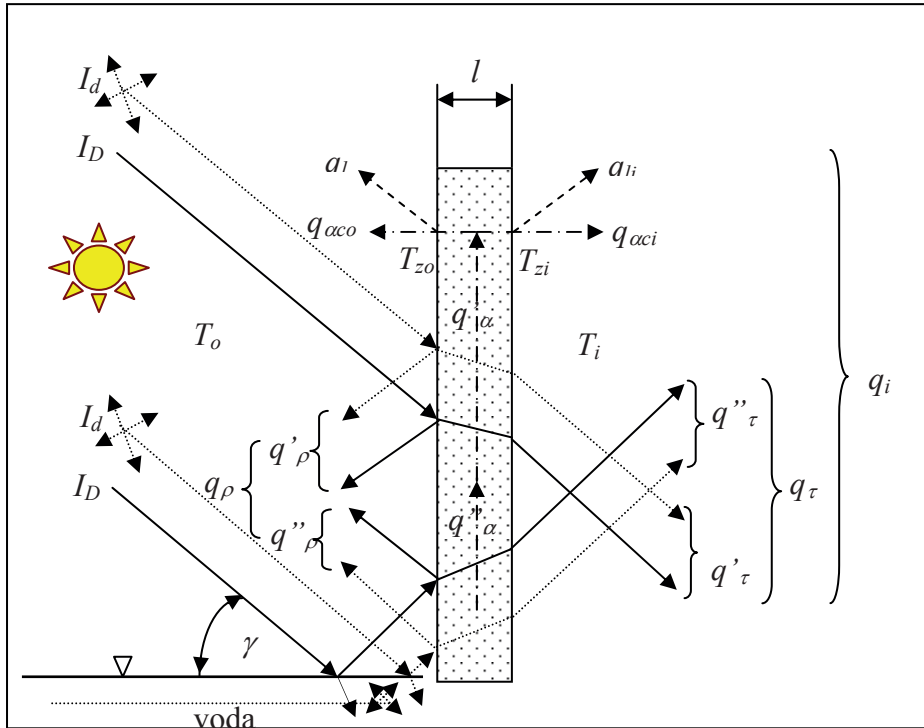
Ukupno sunčevo zračenje koje uz prisustvo vodene površine pada na vertikalnu spoljašnju površinu stakla, I_u , jednim delom se reflektuje, q_p , deo staklo apsorbuje, q_a , a ostali deo prodire u prostoriju, q_r . Saglasno slici 2 možemo napisati:

$$\begin{aligned}
 I_u &= I'_u + I''_u = (I_D + 0.5I_d) + (\rho_{shD}I_D + 0.5\rho_{shd}I_d) \\
 &= (1 + \rho_{shD})I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})I_d = q_\rho + q_a + q_\tau
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 q_\rho &= q'_\rho + q''_\rho = (\rho_{sD}I_D + 0.5\rho_{sd}I_d) + (\rho_{sD}\rho_{shD}I_D + 0.5\rho_{sd}\rho_{shd}I_d) \\
 &= (1 + \rho_{shD})\rho_{sD}I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})\rho_{sd}I_d
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 q_\alpha &= q'_\alpha + q''_\alpha = (\alpha_{sD}I_D + 0.5\alpha_{sd}I_d) + (\alpha_{sD}\rho_{shD}I_D + 0.5\alpha_{sd}\rho_{shd}I_d) \\
 &= (1 + \rho_{shD})\alpha_{sD}I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})\alpha_{sd}I_d
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 q_\tau &= q'_\tau + q''_\tau = (\tau_{sD}I_D + 0.5\tau_{sd}I_d) + (\tau_{sD}\rho_{shD}I_D + 0.5\tau_{sd}\rho_{shd}I_d) \\
 &= (1 + \rho_{shD})\tau_{sD}I_D + 0.5(1 + \rho_{shd})\tau_{sd}I_d
 \end{aligned}
 \tag{7}$$



Slika 2. Prikaz bilansa toplote sunčevog zračenja za vertikalno staklo pored vodene površine

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

apsorbovanog sunčevog zračenja od stakla koje učestvuje u razmeni toplote konvekcijom sa unutrašnjim vazduhom, q_{aci} , i dela apsorbovanog sunčevog zračenja od stakla koje učestvuje u razmeni toplote niskotemperaturnim zračenjem sa površinama u prostoriji, q_{li} :

$$q_i = q_\tau + q_{aci} + q_{li} \quad (8)$$

5. UTICAJ PRISUSTVA VODENE POVRŠINE NA BILANS TOPLOTE SUNČEVOG ZRAČENJA

Dinamika promene relevantnih veličina prikazana je na dijagramima za *TLT* (True Local Time). Takođe, koriste se i termini *LSoT* (lokalno sunčevo vreme), solarno vreme i sl. Tada razmatranja sunčevog zračenja imaju prirodnu simetriju u odnosu na stvarno lokalno podne ($TLT=12h$). Civilni život zahteva upotrebu uniformne vremenske skale za određen region, takozvano standardno vreme (*ST*) ili lokalno standardno vreme (*LStV*) [4,5].

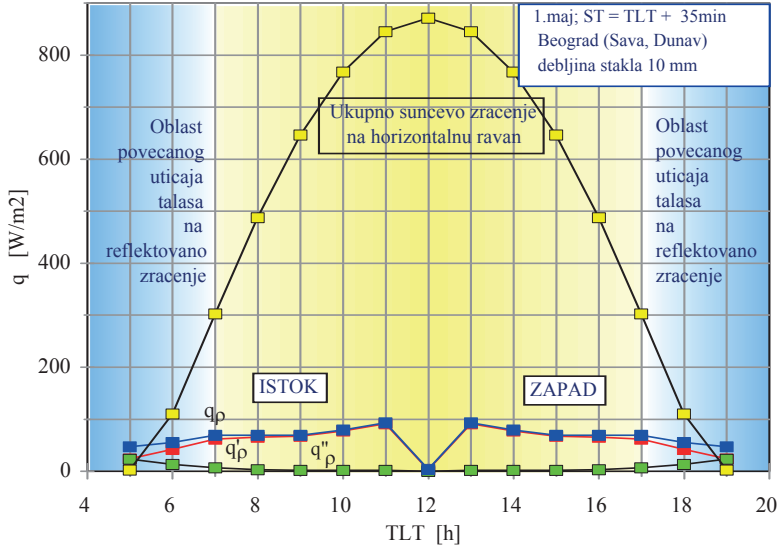
Za lokaciju Beograda ($44^{\circ}50';20^{\circ}30'$), za posmatrani dan, 1. maj, za letnje merenje vremena, Sunce kulminira na jugu (zaokruženo na minute) za $ST = 12h$ i 35 min.

Na slici 3, za dati primer, prikazane su promene:

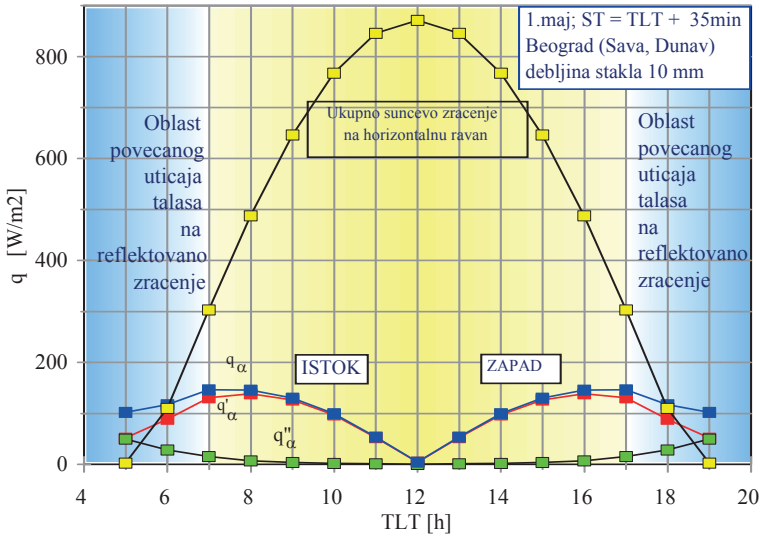
- ukupnog reflektovanog sunčevog zračenja, (q_ρ), reflektovanog sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla (q'_ρ) i reflektovanog sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od površine vode (q''_ρ), slika 3(a);

- 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), slika 3(b); i

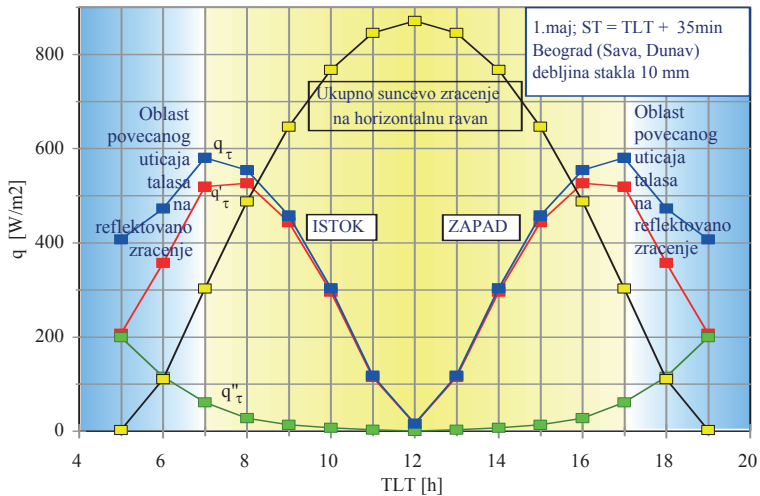
- ukupno propuštenog sunčevog zračenja kroz staklo, (q_τ), propuštenog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu, (q'_τ) i propuštenog sunčevog zračenja koje potiče od sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla nakon refleksije od površine vode (q''_τ), slika 3(c).



(a)



(b)

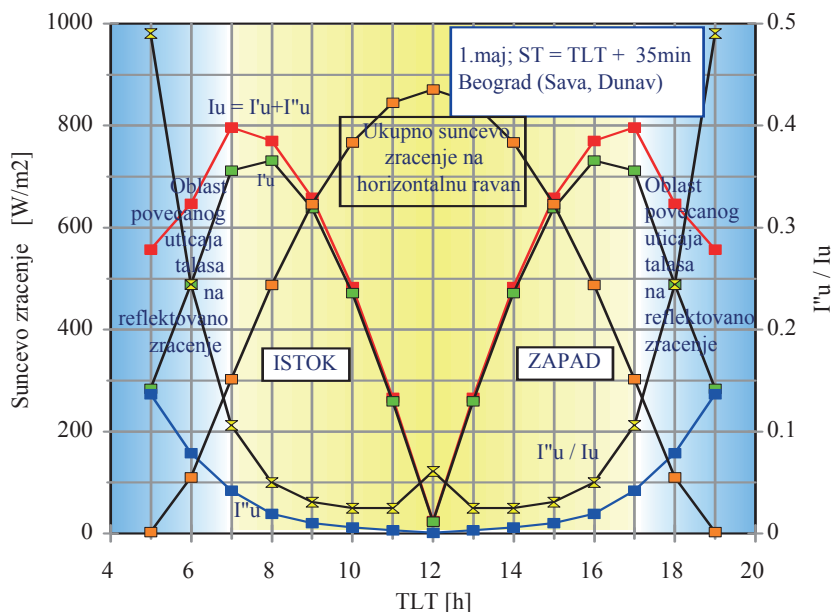


(c)

Slika 3. Promena reflektovanog (a), apsorbovanog (b) i propusnog (c) sunčevog zračenja, za dati primer, za istočno-zapadno orijentisano staklo.

Na slici 4 prikazana je promena ukupnog sunčevog zračenja na spoljašnju površinu stakla - zida (I_u), sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla - zida (I'_u), sunčevog zračenja koje pada na spoljašnju površinu stakla - zida nakon refleksije od mirne vodene površine (I''_u), i odnosa (I''_u/I_u), za dati primer, za istočno - zapadno orijentisanu površinu, staklo - zid.

Odnos, I''_u/I_u , kreće se 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 vertikalnu površinu, u ovom slučaju, kreće se od blizu 50% u ranim jutarnjim satima za istočno orijentisanu površinu, i kasnim popodnevним satima za zapadno orijentisanu površinu, i sa minimumom oko 2.5%, oko podnevnih časova. Kod niskih elevacija Sunca talasi utiču na smanjenje koeficijenta refleksije sunčevog zračenja od vodene površine, slika 1, što je na dijagramima, za dati primer i vetar 4 Bf, predstavljeno kao oblast povecanog uticaja talasa na reflektovano sunčevo zračenje.



Slika 4. Promena ukupnog sunčevog zračenja na spoljašnju površinu stakla - zida (I_u); sunčevog zračenja koje pada direktno na spoljašnju površinu stakla - zida (I'_u), odnosno nakon refleksije od mirne vodene površine (I''_u) i odnosa (I''_u/I_u), za istočno - zapadno orijentisanu vertikalnu površinu

Za zapadno orijentisanu vertikalnu površinu, spoljašnji zid i zastakljene površine na njemu, neposredno posle 17 časova udeo reflektovanog sunčevog zračenja u ukupnom iznosi oko 15%, slika 4, kada na dalji tok krive (I''_u/I_u) povećan uticaj ima zatalasanost vodene površine.

Ukupno difuzno zračenje koje pada na vertikalne površine pored vode iznosi oko 53,25% od difuznog sunčevog zračenja na horizontalnu ravan.

6. ZAKLJUČAK

U arhitekturi niske energije (pasivnoj arhitekturi) pasivno korišćenje sunčeve energije za grejanje i osvetljenje kao i zaštita od preteranog osunčavanja doprinose energetske efikasnosti i održivom razvoju. Kod objekata pored velikih vodenih površina (i na vodi) uticaj sunčevog zračenja na toplotni bilans spoljašnjeg zida i zastakljenih površina na njemu zavisi od niza faktora; između ostalog i od refleksije

sunčevog zračenja od površine vode. Do visokog udela reflektovanog sunčevog zračenja od vodene površine, u ukupnom zračenju na vertikalnu površinu, dolazi: kod niske elevacije Sunca i mirne površine vode, u ranim prepodnevrim satima kod istočno orijentisanih površina, u kasnim popodnevrim satima kod zapadno orijentisanih površina, za severnu zemljinu poluloptu, južna orijentacija zimi, i sl. Kod nižih elevacija Sunca povećanje talasa značajnije utiče na smanjenje koeficijenta refleksije direktnog sunčevog zračenja od vodene površine.

U prikazanom primeru, udelu reflektovanog sunčevog zračenja od površine vode u ukupnom sunčevom zračenju na spoljašnju površinu od $I''_u/I_u = 0.15$ (15%), „granični slučaj”, korenspondiraju vrednosti za $I''_u \approx 110 \text{ W/m}^2$ i za propušteno sunčevo zračenje kroz staklo reflektovano od površine vode $q''_\tau \approx 80 \text{ W/m}^2$.

Sagledavanje uticaja prisustva vodene površine na toplotni bilans spoljašnjeg zida i zastakljenih površina na njemu doprinosi: detaljnijem kvantifikovanju relevantnih parametara i dinamike njihovih uticaja, tačnijim inženjerskim prognozama i predviđanjima termičkog ponašanja objekata, usavršavanju algoritama kontrolnih sistema, povećanju energetske efikasnosti objekata, korišćenju obnovljivih izvora energije i dr.

Poznavanje dinamike i kvantifikovanje uticaja refleksije sunčevog zračenja od površine vode na toplotni bilans spoljašnjeg zida i zastakljenih površina na njemu, daje nam mogućnosti koje možemo, a ne moramo da iskoristimo. Nepoznavanje nam ostavlja samo jednu mogućnost.

7. LITERATURA

- [1] Lilić, D.: *Doprinos sunčevog zračenja kroz zastakljene površine bilansu toplote brodskih prostora*, „Naučnotehnički pregled”, Vol. L, str. 52-62, Beograd, 2000.
- [2] Lilić, D.: *Analiza uticaja nagiba zastakljene površine broda na refleksiju, apsorpciju i propustljivost sunčevog zračenja*, „Naučnotehnički pregled”, Vol. LI, str. 136-145, Beograd, 2000.
- [3] Lilić, D.: *Izračunavanje koeficijentata refleksije, apsorpcije i propustljivosti sunčevog zračenja za jednostruko i dvostruko vertikalno staklo za lokaciju Beograda*, „KGF”, broj 3, str. 55-63, Beograd, 2000.
- [4] Todorović, B.: *Klimatizacija*, SMEITS, Beograd, 1998.
- [5] Kasten, F.: *Measurement and Analysis of Solar Radiation Data*, Energy and Buildings, 3(1981)1-29.
- [6] *Pomorska enciklopedija*, 5, Jugoslovenski leksikografski zavod, Zagreb, 1981.

**SOLAR HEAT BALANCE FOR SINGLE CERTICAL
GLASS SHEET ON OBJECTS CLOSE TO
THE LARGE WATER SURFACES**

ABSTRACT:

Solar energy usage has primary consideration in the Low Energy Architecture (Passive Architecture). Solar radiation that falls on the glass sheet surface is partly being reflected, another part of it is absorbed by the glass sheet and the rest is transmitted through the glass sheet. Solar heat balance for glazed surfaces on the objects near large water surfaces depends on many factors; among others, is the water surface solar reflection. Relevant parameters' interaction has been encompassed by formed mathematical model. Presented is the example of the influence of the large water surface presence on reflected, absorbed and transmitted solar radiation for single, vertical, west-east oriented glass sheet.

Key words: energy efficiency, passive architecture, glass sheet, solar radiation, heat balance, water surface reflection

