

# Uticaj dimenzija kormilarnice na razmenu toplote zračenjem

Mr Dimitrije Lilić, dipl.inž.<sup>1)</sup>

U zatvorenom prostoru, razmena toplote zračenjem odvija se između unutrašnjih površina. Deo uniformnog difuznog zračenja jedne površine koje pada na neku drugu površinu definisan je geometrijskim faktorom oblika između tih površina. Izložene su osnovne teorijske postavke na osnovu kojih je formiran matematički model i računarski program za izračunavanje geometrijskih faktora oblika. Za model prostoriju - kormilarnicu, sa difuzno emitujućim i reflektujućim unutrašnjim površinama, formiranim matematičkim modelom i računarskim programom izračunati su geometrijski faktori oblika i tabelarno prikazani za nekoliko dimenziona različitih praznih prostorija-kormilarnice. Numeričkim simulacijama analiziran je i uticaj promene relevantnih dimenzija kormilarnice na razmenu toplote zračenjem između unutrašnjih površina.

*Ključne reči:* Brod, kormilarnica, zračenje, refleksija, geometrijski faktor oblika, ugaoni faktor, faktor pogleda.

## Uvod

Za boravak i rad ljudi i uređaja u nekom zatvorenom prostoru potrebno je održavanje parametara mikroklimе u određenim granicama, a samim tim povećana je i potrošnja energije u te svrhe. Istovremeno, sa povećanjem potrošnje energije javlja se prirodna potreba za njenom racionalnom upotrebom.

Kod zastakljenih prostorija izloženih sunčevom zračenju, zavisno od refleksionih – apsorpcionih karakteristika unutrašnjih površina na sunčevo zračenje i geometrije prostorije, značajan deo propuštene sunčeve energije može zračenjem da bude vraćen kroz zastakljenu površinu.

Direktno i difuzno sunčevo zračenje koje prodiре u prostoriju, pada na površinu ravnog stakla i jednim delom se reflektuje, delom ga staklo apsorbuje, a deo zračenja prodiре u prostoriju, i praktično u istom momentu, brzinom svetlosti, vrši beskonačnu refleksiju i apsorpciju na delovima unutrašnjih površina. Apsorbovani deo zračenja uzrokuje porast temperature strukture, dok se, ne uvek zanemari, preostali deo reflektuje u pravcu zastakljenih površina i gotovo se potpuno propušta u spoljnu okolinu.

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 zračenja ( $>2.7 \mu\text{m}$ ) koje emituju zagrejane površine.

Razmena toplote niskotemperaturnim zračenjem dešava se i u zatvorenom prostoru; odato zračenje od jedne površine dospeva na druge površine, gde se delom reflektuje više puta unutar zatvorenog prostora sa delimičnom apsorpcijom u svakom kontaktu sa površinom.

Lambertov zakon opisuje difuzno zračenje koje predstavlja aproksimaciju za mnoge stvarne procese zračenja i refleksije, posebno za hrapave nemetalne površine. Najveći broj analiza zračenja zasnovan je na pretpostavci sivog - difuznog zračenja i refleksije.

Uobičajeno je da razmatranje razmene toplote zračenjem između dve površine počne razmatranjem specijalnog slučaja - kada se površine smatraju crnim. U tom slučaju povr-

šine su dobri apsorberi, i proces razmene energije je uprošćen jer ne obuhvata refleksiju. Takođe, sve crne površine emituju energiju u perfektno difuznom obliku, koje nema svoj pravac, što uprošćava izračunavanje razmenjene količine toplote.

Razmatranje geometrijske zavisnosti za crne površine ima širi značaj i može se primeniti na sva zračenja koja imaju uniformni difuzioni oblik a koje odaje neka površina.

Deo uniformnog difuznog zračenja jedne površine koje pada na neku drugu površinu definisan je geometrijskim faktorom oblika između te dve površine i zavisi od njihovih dimenzija i njihovog međusobnog geometrijskog odnosa. U literaturi, ovaj faktor se javlja pod nazivima: faktor intercepcije (interception), faktor pogleda (view), faktor konfiguracije (configuration), faktor oblika (shape), ugaoni (angle) faktor i sl., [1,2].

Za formiranje matematičkog modela i programa za izračunavanje raspodele i apsorpcije sunčevog zračenja po unutrašnjim površinama prostorije, apsorpcije sunčevog zračenja od same prostorije, za razmenu toplote zračenjem između unutrašnjih površina prostorije, kao i za određivanje sunčeve energije koja može zračenjem da bude vraćena kroz zastakljenu površinu, potrebno je, između ostalog, izračunati geometrijske faktore oblika za sve individualne površine prostorije.

Cilj rada je da se za model prostorije – kormilarnice broda, sa difuzno emitujućim i reflektujućim unutrašnjim površinama, formira matematički model i računarski program za izračunavanje geometrijskih faktora oblika i izvrši numerička analiza uticaja promene relevantnih dimenzija kormilarnice na razmenu toplote zračenjem između unutrašnjih površina.

## Model prostorije - kormilarnice

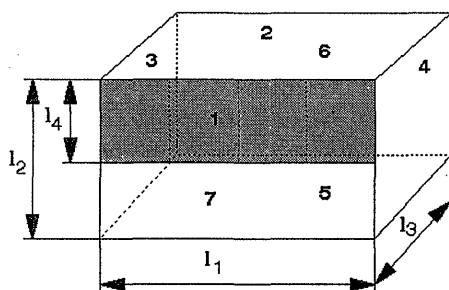
Zastakljene prostorije izložene sunčevom zračenju, osim kod stacionarnih objekata, postoje i kod objekata na vodi (brodovi, platforme i sl.). Kod ratnih brodova to su najčešće

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

kormilarnice, dok kod većih brodova (trgovačkih i putničkih) mogu, pored kormilarnica, da budu i druge prostorije (saloni i sl.).

Kod objekata na vodi i objekata blizu vodenih površina, pored direktnog i difuznog sunčevog zračenja u unutrašnjosti prostorija, dolazi do izražaja i komponenta reflektovanog zračenja, pre svega, direktnog zračenja od površine vode.

Karakteristika prostora kormilarnica je da su to obično "plitke" ( $l_3 \approx l_2$ ) a relativno široke prostorije ( $l_1 > l_3$ ) (sl.1, osnovni oblik kormilarnice).



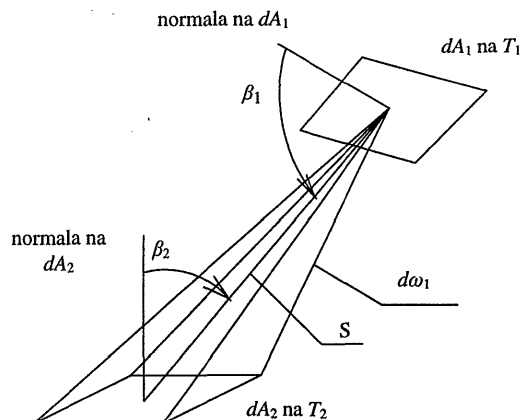
Slika 1. Geometrijska konfiguracija osnovnog oblika kormilarnice:  $l_1$ - širina,  $l_2$ - visina,  $l_3$ - dubina,  $l_4$ - visina zastakljene površine, 1- zastakljena površina, 2- suprotan zid, 3,4- levi, desni zid, 5- pod, 6- tavanica, 7- prednji zid

Za prikazani model prazne kormilarnice, sl.1, sa difuzno emitujućim i reflektujućim unutrašnjim površinama, označena su: četiri zida, pod, tavanica i zastakljena površina na prednjem zidu. U tehnici klimatizacije i grejanja to su i osnovne površine koje su od značaja za termičke uslove u prostoriji.

### Osnovne teorijske postavke matematičkog modela

#### Razmena toplote zračenjem između dve elementarne površine

Razmena toplote zračenjem između dve elementarne crne površine šematski je prikazana na sl.2.



Slika 2. Razmena toplote zračenjem između dve crne elementarne površine

Elementarne površine  $dA_1$  i  $dA_2$  su izotermne, na temperaturama  $T_1$  i  $T_2$ , respektivno, i međusobno proizvoljno orijentisane.  $S$  predstavlja rastojanje između dve elementarne površine, dok  $\beta_1$  i  $\beta_2$  predstavljaju uglove između normala elementarnih površina i pravca  $S$ .

Neto energija u jedinici vremena razmenjena između crnih elementarnih površina  $dA_1$  i  $dA_2$  duž puta  $S$  data je izrazom:

$$d^2 Q'_{d_1 \leftrightarrow d_2} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi S^2} dA_1 dA_2 \quad (1)$$

gde (') označava da se razmena vrši u jednom pravcu.

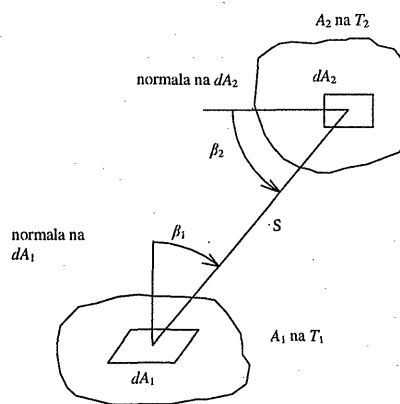
Deo zračenja koje napušta elementarnu površinu  $dA_1$  i pada na  $dA_2$  je definisan kao geometrijski faktor oblika,  $dF_{d_1-d_2}$ , i može se napisati:

$$dF_{d_1-d_2} = \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (2)$$

#### Geometrijski faktor oblika i razmena energije zračenjem između dve površine

##### Geometrijski faktor oblika za dve konačne površine

Na sl.3, dat je geometrijski prikaz za razmenu energije zračenjem između dve konačne površine.



Slika 3. Geometrijski prikaz razmene energije zračenjem između dve konačne površine

Po definiciji, geometrijski faktor oblika  $F_{1-2}$  je deo zračenja emitovanog sa površine  $A_1$  koje pada na površinu  $A_2$ . Totalna energija koja napušta crnu površinu  $A_1$  je  $\sigma T_1^4 A_1$  dok je  $A_1$  izotermna površina na  $T_1$ . Zračenje koje napušta elementarnu površinu  $dA_1$  i pada na elementarnu površinu  $dA_2$ , a na osnovu izraza (1), može se napisati na sledeći način:

$$d^2 Q'_{d_1-d_2} = \sigma T_1^4 \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi S^2} dA_1 dA_2 \quad (3)$$

Ako se ovaj izraz integriše po površinama  $A_1$  i  $A_2$ , dobija se energija zračenja koja napušta površinu  $A_1$  i pada na površinu  $A_2$ . Geometrijski faktor oblika se tada može izračunati kao:

$$F_{1-2} = \frac{\int \int_{A_1 A_2} (\sigma T_1^4 \cos \beta_1 \cos \beta_2 / \pi S^2) dA_2 dA_1}{\sigma T_1^4 A_1} \quad (4)$$

odnosno;

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int \int_{A_1 A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi S^2} dA_2 dA_1 \quad (5)$$

To se može napisati u obliku geometrijskog faktora koji uključuje elementarne površine:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int \int_{A_1 A_2} dF_{d_1-d_2} dA_1 = \frac{1}{A_1} \int F_{d_1-d_2} dA_1 \quad (6)$$

Istovetnim postupkom za izračunavanje izraza (5) može se naći geometrijski faktor oblika u odnosu na površinu  $A_2$  ka površini  $A_1$ :

$$F_{2-1} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi S^2} dA_2 dA_1 \quad (7)$$

#### Reciprocitet geometrijskih faktora oblika između konačnih površina

Dvostruki integrali dati izrazima (5 i 7) su identični, pa u ovom slučaju važi princip reciprociteta, odnosno:

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (8)$$

Za geometrijski faktor oblika između elementarne površine  $dA_1$  i konačne površine  $A_2$ , princip reciprociteta je dat izrazom:

$$A_2 dF_{2-d_1} = d A_1 F_{d_1-2} \quad (9)$$

Dalje međurelacije između geometrijskih faktora mogu se naći iz izraza (6) i principa reciprociteta datih izrazima (8 i 9) pa je:

$$\begin{aligned} F_{2-1} &= \frac{A_1}{A_2} F_{1-2} = \frac{A_1}{A_2} \frac{1}{A_1} \int_{A_2} F_{d_1-2} dA_1 = \\ &= \frac{1}{A_2} \int_{A_1} dF_{2-d_1} A_2 = \int_{A_1} dF_{2-d_1} \end{aligned} \quad (10)$$

#### Razmena toplote zračenjem između konačnih površina

Energija zračenja od površine  $A_1$  koja pada na površinu  $A_2$ , po definiciji geometrijskog faktora, je:

$$Q_{1-2} = \sigma T_1^4 A_1 F_{1-2} \quad (11)$$

Istovetno važi za zračenje od površine  $A_2$  koje pada na površinu  $A_1$ :

$$Q_{2-1} = \sigma T_2^4 A_2 F_{2-1} \quad (12)$$

Neto razmenjena energija od  $A_1$  prema  $A_2$  je:

$$Q_{1 \leftrightarrow 2} = Q_{1-2} - Q_{2-1} = \sigma T_1^4 A_1 F_{1-2} - \sigma T_2^4 A_2 F_{2-1} \quad (13)$$

Korišćenjem (8), neto razmenjena energija zračenjem može biti napisana u dvostrukoj formi:

$$Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_1 F_{1-2} \quad (14)$$

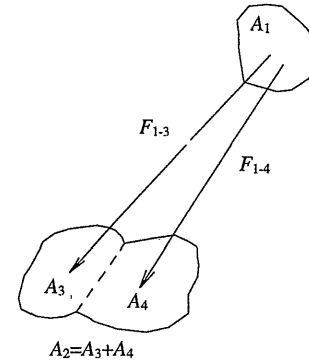
$$Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_2 F_{2-1} \quad (15)$$

#### Izračunavanje geometrijskog faktora oblika za parove površina

Zbog često teškog direktnog izračunavanja geometrijskog faktora oblika po integralnoj definiciji, za mnoge geometrijske slučajeve moguće je na osnovu poznatih relacija (kraćim putem) doći do geometrijskih faktora.

U slučaju prikazanom na sl.4, izotermna crna površina  $A_1$  razmenjuje energiju sa drugom površinom  $A_2$ . Geometrijski faktor oblika  $F_{1-2}$  je deo totalne energije koju emituje površina  $A_1$  i koja pada na površinu  $A_2$ . Ako je površina  $A_2$  podeljena na dve površine  $A_3$  i  $A_4$ , deo totalne energije koja odlazi od površine  $A_1$  i pada na površinu  $A_3$  i deo koji odlazi od površine  $A_1$  i pada na površinu  $A_4$  mora biti u zbiru jednak  $F_{1-2}$ . To se može napisati u obliku:

$$F_{1-2} = F_{1-(3+4)} = F_{1-3} + F_{1-4} \quad (16)$$



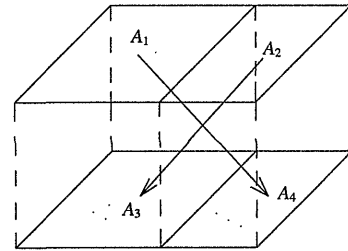
Slika 4. Razmena energije zračenjem između dve površine kada je jedna površina podeljena

Kada je  $F_{1-2}$  i  $F_{1-4}$  poznato, a treba naći željeni geometrijski faktor  $F_{1-3}$  onda iz:

$$F_{1-3} = F_{1-2} - F_{1-4} \quad (17)$$

i upotrebom principa reciprociteta, izraz (8), sledi:

$$F_{3-1} = \frac{A_1}{A_3} F_{1-3} = \frac{A_1}{A_3} (F_{1-2} - F_{1-4}) \quad (18)$$



Slika 5. Geometrijski prikaz za princip reciprociteta kada postoji geometrijska simetrija

Za slučaj prikazan na sl.5, kada postoji geometrijska simetrija, sa slike je evidentno da je  $A_2 = A_4$  i  $F_{2-3} = F_{4-1}$ , tako da je  $A_2 F_{2-3} = A_4 F_{4-1}$ . Iz reciprociteta sledi  $A_4 F_{4-1} = A_1 F_{1-4}$ . Odatle se dobija relacija:

$$A_2 F_{2-3} = A_1 F_{1-4} \quad (19)$$

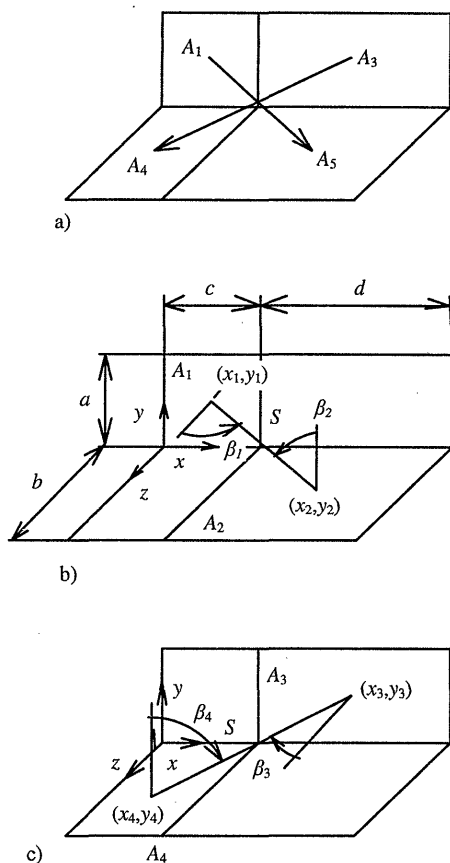
Na sl.6 dve pravougaone površine pod pravim uglom koje imaju zajedničku ivicu, podeljene su na po dve površine. Prikazane površine su nejednakih veličina tako da ne postoji očevitna simetrija.

Na osnovu osnovne definicije, jednačina (5) i sa sl.6 (b) gde su:  $S^2 = (x_2 - x_1)^2 + y_1^2 + z_2^2$ ,  $\cos \beta_1 = z_2/S$  i  $\cos \beta_2 = y_1/S$ , dobija se sledeći izraz:

$$\begin{aligned} A_1 F_{1-2} &= \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{x_1=0}^c \int_{y_1=0}^a \int_{z_2=0}^{c+d} \int_{x_2=0}^b \frac{y_1 z_2}{[(x_2 - x_1)^2 + y_1^2 + z_2^2]^2} dz_2 dx_2 dy_1 dx_1 \end{aligned} \quad (20)$$

Saglasno sl.6 (c), može se pokazati i da je:

$$\begin{aligned} A_3 F_{3-4} &= \frac{1}{\pi} \int_{A_3} \int_{A_4} \frac{\cos \beta_3 \cos \beta_4}{S^2} dA_4 dA_3 = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{x_3=c}^{c+d} \int_{y_3=0}^a \int_{x_4=0}^c \int_{z_4=0}^b \frac{y_3 z_4}{[(x_3 - x_4)^2 + y_3^2 + z_4^2]^2} dz_4 dx_4 dy_3 dx_3 \end{aligned} \quad (21)$$

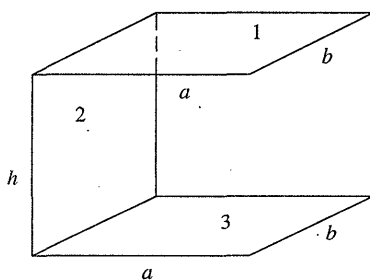


Slika 6. Geometrijski prikaz za princip reciprociteta za dijagonalno suprotne parove pravougaonika za dve površine pod pravim uglom sa zajedničkom ivicom

Veštačkom zamenom integracionih promenljivih  $x_1, y_1, x_2$  i  $z_2$  za  $x_4, y_3, x_3$  i  $z_4$  proizlazi da su integrali, izrazi (20 i 21) identični, što dokazuje da u ovom slučaju važi relacija:

$$A_1 F_{1-2} = A_3 F_{3-4} \quad (22)$$

Za dobijanje geometrijskih faktora oblika, za površine sa međusobnim položajem prikazanim na sl.7, u inženjerskoj praksi se koriste već izrađeni odgovarajući dijagrami [2,3,5].



Slika 7. Geometrijski prikaz izračunavanja geometrijskog faktora oblika za površine sa prikazanim međusobnim položajem

Međutim, zbog nedovoljne preciznosti za relevantna razmatranja, izračunavanje geometrijskog faktora oblika za dve identične, paralelne i direktno suprotstavljene površine, a prema sl.7, može se vršiti prema izrazu [4]:

$$F_{1-3} = \frac{2}{ab\pi} \left[ b\sqrt{h^2 + a^2} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + a\sqrt{b^2 + h^2} \tan^{-1} \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} - bh \tan^{-1} \frac{b}{h} - ah \tan^{-1} \frac{a}{h} - \frac{h^2}{2} \ln \frac{(h^2 + a^2 + b^2)h^2}{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)} \right] \quad (23)$$

Izračunavanje geometrijskog faktora oblika za pravougaone površine iste dužine sa jednom zajedničkom ivicom i pod međusobno pravim uglom, a prema sl.7, može se vršiti prema izrazu [4]:

$$F_{2-3} = \frac{1}{\pi} \left[ \tan^{-1} \frac{b}{h} + \frac{a}{b} \tan^{-1} \frac{b}{a} - \frac{\sqrt{a^2 + h^2}}{h} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{h}{4b} \ln \frac{(a^2 + b^2 + h^2)h^2}{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)} + \frac{a^2}{4bh} \ln \frac{(a^2 + b^2 + h^2)a^2}{(a^2 + b^2)(a^2 + h^2)} - \frac{b}{4h} \ln \frac{(a^2 + b^2 + h^2)b}{(a^2 + b^2)(h^2 + b^2)} \right] \quad (24)$$

Geometrijski faktori oblika za zatvoren prostor

Za prostoriju, odnosno zatvoren prostor, od  $k$  površina, za  $i$ -tu površinu važi relacija:

$$\sum_{j=1}^k F_{i-j} = 1 \quad (25)$$

### Izračunavanje geometrijskih faktora oblika

Za zatvoren prostor sa  $k$  ravnih površina, potrebno je izračunati  $N$  geometrijskih faktora. Odnos između broja geometrijskih faktora  $N$  i broja strana  $k$  nekog zatvorenog prostora je dat izrazom:

$$N = k^2 - \sum_{j=1}^k j = k(k-1) \quad (26)$$

Za osnovni oblik prazne prostorije-kormilarnice sa  $k=7$  površina, broj potrebnih i izračunatih geometrijskih faktora oblika iznosi  $N=42$ .

U tabelama 1,2,3 i 4 formiranim programom za računar, izračunati su geometrijski faktori oblika (sa prikazana 3 decimalna mesta) za neke relativne odnose dimenzija (proporcije) prostorije - kormilarnice, (tabela 1  $\Rightarrow l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 2 : 1 : 1.5 : 0.25$ ; tabela 2  $\Rightarrow l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 3 : 1 : 2 : 0.25$ ).

Tabela 1. Geometrijski faktori oblika,  $F_{i-j}$ , za  $l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 2:1:1.5:0.25$

	zastak.pov.	suprot.zid	levi zid	desni zid	pod	plafon	prednji zid
F i-j	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7
j=1	0	0.042	0.042	0.042	0.027	0.069	0.000
j=2	0.169	0	0.183	0.183	0.183	0.183	0.178
j=3	0.126	0.137	0	0.095	0.135	0.135	0.141
j=4	0.126	0.137	0.095	0	0.135	0.135	0.141
j=5	0.164	0.275	0.269	0.269	0	0.364	0.312
j=6	0.414	0.275	0.269	0.269	0.364	0	0.228
j=7	0.000	0.134	0.141	0.141	0.156	0.114	0
$\Sigma$	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 2. Geometrijski faktori oblika,  $F_{i-j}$ , za  $l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 3:1:2:0.25$

	zastak.pov.	suprot.zid	levi zid	desni zid	pod	plafon	prednji zid
F i-j	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7
j=1	0	0.036	0.038	0.038	0.028	0.054	0.000
j=2	0.143	0	0.162	0.162	0.159	0.159	0.148
j=3	0.100	0.108	0	0.060	0.103	0.103	0.110
j=4	0.100	0.108	0.060	0	0.103	0.103	0.110
j=5	0.221	0.319	0.308	0.308	0	0.476	0.352
j=6	0.435	0.319	0.308	0.308	0.476	0	0.280
j=7	0.000	0.111	0.124	0.124	0.132	0.105	0
$\Sigma$	1	1	1	1	1	1	1

**Tabela 3.** Promena geometrijskih faktora oblika zavisno od promene relativne širina prostorije kormilarnice,  $l_1/l_2$ 

$l_1/l_2$	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	5	10
F 1-2	0	0.03	0.058	0.084	0.106	0.169	0.203	0.236	0.264
F 1-3;F 1-4	0.5	0.344	0.279	0.235	0.203	0.126	0.09	0.056	0.028
F 1-5	0	0.034	0.064	0.09	0.112	0.164	0.188	0.211	0.23
F 1-6	0	0.248	0.32	0.355	0.377	0.414	0.429	0.44	0.449
F 2-1	0	0.007	0.014	0.021	0.027	0.042	0.051	0.059	0.066
F 3-1;F 4-1	0	0.014	0.023	0.029	0.034	0.042	0.045	0.047	0.047
F 5-1	0	0.006	0.011	0.015	0.019	0.027	0.031	0.035	0.038
F 6-1	0	0.041	0.053	0.059	0.063	0.069	0.071	0.073	0.075
F 2-7	0	0.024	0.046	0.066	0.084	0.134	0.16	0.186	0.207
F 3-7;F 4-7	0	0.048	0.079	0.1	0.114	0.141	0.149	0.155	0.157
F 5-7	0	0.066	0.097	0.116	0.13	0.156	0.167	0.176	0.184
F 6-7	0	0.031	0.055	0.072	0.085	0.114	0.127	0.138	0.147

**Tabela 4.** Promena geometrijskih faktora oblika zavisno od promene relativne dužine (dubine) prostorije-kormilarnice,  $l_3/l_2$ 

$l_3/l_2$	0	0.25	0.5	0.75	1	2	3	5	10
F 1-2	1	0.619	0.452	0.344	0.267	0.114	0.06	0.024	0.006
F 1-3;F 1-4	0	0.043	0.071	0.091	0.106	0.138	0.15	0.159	0.163
F 1-5	0	0.014	0.048	0.086	0.118	0.19	0.215	0.231	0.239
F 1-6	0	0.279	0.357	0.387	0.401	0.42	0.425	0.427	0.428
F 2-1	0.25	0.155	0.113	0.086	0.067	0.028	0.015	0.006	0.002
F 3-1;F 4-1	0.125	0.087	0.071	0.061	0.053	0.035	0.025	0.016	0.008
F 5-1	0	0.014	0.024	0.029	0.03	0.024	0.018	0.012	0.006
F 6-1	0.5	0.279	0.179	0.129	0.1	0.053	0.035	0.021	0.011
F 2-7	0.75	0.549	0.396	0.291	0.219	0.088	0.045	0.018	0.005
F 3-7;F 4-7	0.375	0.293	0.243	0.207	0.18	0.115	0.083	0.052	0.027
F 5-7	0.5	0.387	0.31	0.253	0.211	0.122	0.085	0.052	0.026
F 6-7	0	0.122	0.155	0.152	0.14	0.094	0.067	0.042	0.022

Numerička promena geometrijskih faktora oblika zavisno od promene relativne širine prostorije-kormilarnice,  $l_1/l_2$ , prikazana je u tabeli 3, dok je numerička promena geometrijskih faktora oblika zavisno od promene relativne dužine (dubine) prostorije - kormilarnice,  $l_3/l_2$ , prikazana u tabeli 4.

### Uticaj dimenzija kormilarnice na razmenu toplote zračenjem - analiza rezultata

Prema prikazanim teorijskim postavkama, formirani matematički model i program za računar za izračunavanje geometrijskih faktora oblika za osnovni oblik prostorije-kormilarnice (sl.1), omogućava analizu uticaja promene relevantnih dimenzija prostorije-kormilarnice na raspodelu zračenja koje ima uniformni difuzni karakter, po unutrašnjim površinama prostorije.

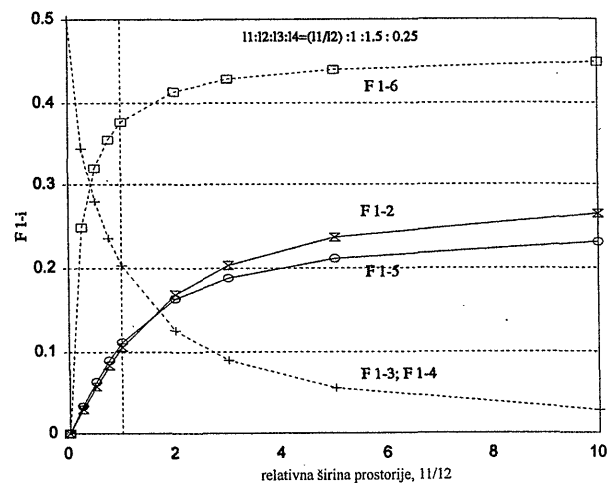
Pošto je visina prostorije obično konstantna za jedan objekat, njena dimenzija nije varirana. Promene (varijacije) ostalih dimenzija prostorije vršene su u relativnom odnosu na visinu prostorije,  $l_2$ . Visina zastakljene površine iznosi 0.25  $l_2$ , odnosno 25% površine prednjeg zida.

Polazne dimenzije prostorije uzete su u relativnom odnosu,  $l_1 : l_2 : l_3 : l_4 = 2 : 1 : 1.5 : 0.25$ , (primer iz tabele 1) s tim što je posmatrana promena jedne dimenzije u relativnom odnosu na visinu prostorije,  $l_2$ , dok su ostale dimenzije bile konstantne.

Numeričke simulacije ovih promena vršene formiranim matematičkim modelom prikazane su numerički (tabele 3 i 4) i na dijagramima, slike od 8 do 11. Na dijagramima je prikazana promena geometrijskih faktora oblika u opsegu promena relativnih odnosa dimenzija prostorija od 0 do 10 (do 10 visina prostorije).

Promene geometrijskih faktora  $F_{1-i}$ , (zastakljena površina - ostale površine) zavisno od promene relativne širine

prostorije-kormilarnice,  $l_1/l_2$ , prikazane su na dijagramu sl.8.

**Slika 8.** Promena faktora  $F_{1-i}$  (zastakljena površina - ostale površine) zavisno od promene relativne širine prostorije-kormilarnice,  $l_1/l_2$ 

Porastom relativne širine prostorije-kormilarnice naglo opada veličina difuznog zračenja koja sa unutrašnje površine prozora pada na bočne zidove dok na suprotan zid, tavanicu i pod raste.

Najintenzivnija razmena difuznog zračenja vrši se između prozora i tavanice i nakon početne vrednosti faktora  $F_{1-6} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor  $F_{1-6} = 0.377$  (oko 38 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  faktor  $F_{1-6} = 0.44$  (44 %).

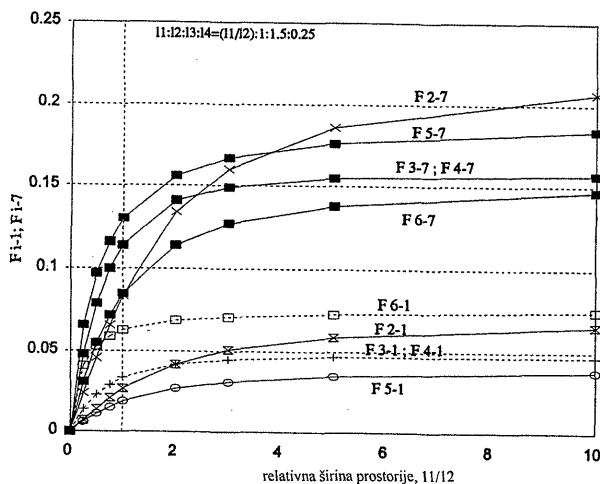
Intenzivna razmena difuznog zračenja vrši se i između prozora i suprotnog zida i nakon početne vrednosti faktora  $F_{1-2} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor  $F_{1-2} = 0.106$  (10.6 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  faktor  $F_{1-2} = 0.236$  (oko 24 %).

Razmena difuznog zračenja koja se vrši između prozora i poda iznosi nakon početne vrednosti faktora  $F_{1-5} = 0$  za

$l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor  $F_{1.5} = 0.112$  (oko 11 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  faktor  $F_{1.5} = 0.211$  (oko 21 %).

U ovom slučaju, difuzno zračenje sa prozora koje pada na bočne zidove, sa početne vrednosti koja za  $l_1/l_2 = 0$  iznosi po 50 % ( $F_{1.3} = F_{1.4} = 0.5$ ), pada za  $l_1/l_2 = 1$  na po oko 20 % (0.203), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi po 5.6 % (0.056).

Promena geometrijskih faktora  $F_{i.1}$ , (ostale površine – zastakljena površina) i  $F_{i.7}$ , (ostale površine – prednji zid) zavisno od promene relativne širine prostorije,  $l_1/l_2$ , prikazane su na dijagramu, sl.9.



Slika 9. Promena faktora  $F_{i.1}$  (ostale površine – zastakljena površina) i  $F_{i.7}$  (ostale površine – prednji zid) zavisno od promene relativne širine prostorije–kormilarnice,  $l_1/l_2$

Porastom relativne širine prostorije raste veličina difuznog zračenja koja sa unutrašnjih površina pada na prozor i unutrašnju površinu prednjeg zida. S obzirom da je manji deo prednjeg zida zastakljen (25%), to se i grupa krivih koja se odnosi na zastakljenu površinu nalazi ispod krivih koje se odnose na prednji zid.

Između poda i spoljašnjeg zida, posle početne vrednosti faktor  $F_{5.7} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor iznosi  $F_{5.7} = 0.13$  (13 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi  $F_{5.7(0.5)} = 0.176$  (oko 18 %).

Razmena difuznog zračenja vrši se i između suprotnog zida i spoljašnjeg zida i posle početne vrednosti faktora  $F_{2.7} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor iznosi  $F_{2.7} = 0.084$  (8.4 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi  $F_{2.7} = 0.186$  (18.6 %).

Razmena difuznog zračenja između bočnih zidova i prednjeg zida iznosi nakon početne vrednosti faktora  $F_{3.7} = F_{4.7} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  iznosi po 0.114 (po 11.4 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi po 0.155 (po 15.5 %).

U ovom slučaju, difuzno zračenje koje sa tavanice pada na prednji zid, sa početne vrednosti faktora koji za  $l_1/l_2 = 0$  iznosi  $F_{6.7} = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  iznosi 0.085 (8.5 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi 0.138 (oko 14 %).

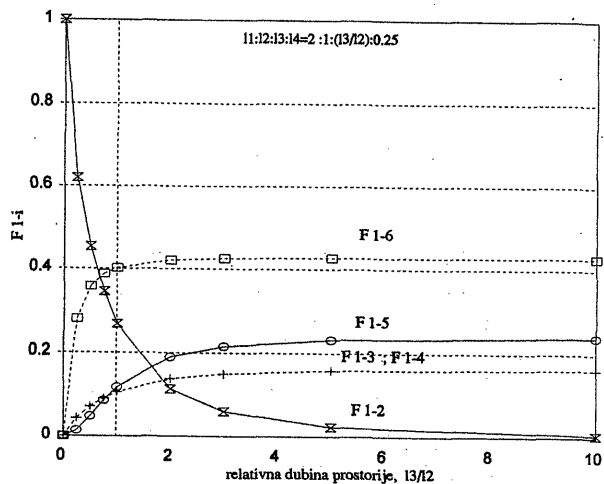
Između tavanice i zastakljene površine, posle početne vrednosti faktora  $F_{6.1} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor iznosi  $F_{6.1} = 0.063$  ( $\approx 6$  %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi  $F_{6.1} = 0.073$  ( $\approx 7$  %).

Između suprotnog zida i zastakljene površine, nakon početne vrednosti faktora  $F_{2.1} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktor iznosi  $F_{2.1} = 0.027$  (oko 3 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznose  $F_{2.1} = 0.047$  ( $\approx 5$  %).

Između bočnih zidova i zastakljene površine, posle početne vrednosti faktora  $F_{3.1} = F_{4.1} = 0$  za  $l_1/l_2 = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  faktori iznose po 0.034 (3.4 %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznose po 0.123 (po  $\approx 12$  %).

U ovom slučaju, difuzno zračenje koje sa poda pada na zastakljenu površinu, odnosno sa početne vrednosti faktora koji za  $l_1/l_2 = 0$  iznosi  $F_{5.1} = 0$ , za  $l_1/l_2 = 1$  iznosi 0.019 ( $\approx 2$  %), dok za  $l_1/l_2 = 5$  iznosi 0.035 (3.5 %).

Promena geometrijskih faktora  $F_{i.1}$ , (zastakljena površina – ostale površine) zavisno od promene relativne dubine (dužine) prostorije,  $l_3/l_2$ , prikazane su na dijagramu, sl.10.



Slika 10. Promena faktora  $F_{i.1}$  (zastakljena površina – ostale površine) zavisno od promene relativne dubine (dužine) prostorije–kormilarnice,  $l_3/l_2$

Porastom relativne dubine prostorije naglo pada razmena difuznog zračenja između zastakljene površine i suprotnog zida. Sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 100 % ( $F_{1.2} = 1$ ), pada za  $l_3/l_2 = 1$  na  $\approx 27$  % (0.267), a za  $l_3/l_2 = 5$  na 2.4 % (0.024).

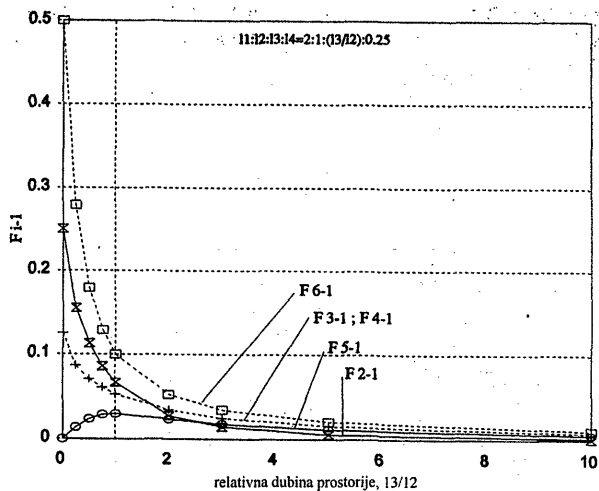
Porastom relativne dubine prostorije raste udeo difuznog zračenja koje sa površine prozora pada na površine bočnih zidova, pada i tavanice.

Za tavana faktor  $F_{1.6}$  sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 0, raste za  $l_3/l_2 = 1$  na  $\approx 40$  % (0.401) a za  $l_3/l_2 = 5$  na  $\approx 43$  % (0.427).

Za pod, faktor  $F_{1.5}$  sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 0, raste za  $l_3/l_2 = 1$  na  $\approx 12$  % (0.118) a za  $l_3/l_2 = 5$  na  $\approx 23$  % (0.231).

Za bočne zidove, faktori  $F_{1.3} = F_{1.4}$ , sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 0, rastu za  $l_3/l_2 = 1$  na 10.6 % (0.106) a za  $l_3/l_2 = 5$  na  $\approx 16$  % (0.159).

Promena geometrijskih faktora  $F_{i.1}$ , (ostale površine – zastakljena površina) zavisno od promene relativne dubine prostorije,  $l_3/l_2$ , prikazane su na dijagramu, sl.11.



Slika 11. Promena faktora  $F_{i.1}$  (ostale površine – zastakljena površina) zavisno od promene relativne dubine (dužine) prostorije–kormilarnice,  $l_3/l_2$

Sa porastom relativne dubine prostorije naglo pada razmena difuznog zračenja između ostalih površina i zastakljene površine, osim između poda i prozora, gde sa početne vrednosti 0 raste, sa maksimumom za  $l_3/l_2 = 1$ , a zatim blago opada.

Za tavanicu faktor  $F_{6-1}$ , sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 50 % ( $F_{6-1} = 0.5$ ), pada za  $l_3/l_2 = 1$  na 10 % (0.1), za  $l_3/l_2 = 5$  na 2.1 % (0.021).

Za bočne zidove, faktori  $F_{3-1} = F_{4-1}$ , sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi po 12.5 % (0.125), padaju za  $l_3/l_2 = 1$  na po 5.3 % (0.53) a za  $l_3/l_2 = 5$  na po 1,6 % (0.016).

Za suprotan zid faktor  $F_{2-1}$ , sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 25 % ( $F_{2-1} = 0.25$ ), pada za  $l_3/l_2 = 1$  na 6.7 % (0.067), a za  $l_3/l_2 = 5$  na 0.6 % (0.006).

Za pod, faktor  $F_{5-1}$ , sa početne vrednosti koja za  $l_3/l_2 = 0$  iznosi 0, raste i za  $l_3/l_2 = 1$  ima maksimum od 3 % (0.03), a zatim blago opada, i za  $l_3/l_2 = 5$  iznosi 1.2 % (0.012).

### Zaključak

Iz prethodnih razmatranja se uočava da je uticaj geometrije prostorije-kormilarnice na raspodelu i apsorpciju sunčevog zračenja najintezivniji u opsegu promena relativnih odnosa dimenzija prostorije od 0 do 3 (5), gde se i kreću najčešće promene odnosa dimenzija za najveći broj prostorija - kormilarnica.

Na dijagramima je prikazana promena geometrijskih faktora oblika u opsegu promena relativnih odnosa dimenzija prostorija od 0 do 10 (do 10 visina prostorije). Daljim povećanjem opsega, promene ovih faktora su sve manje i približavaju se asimptotskim vrednostima.

Formirani matematički model i program za izračunavanje geometrijskih faktora oblika za osnovni model prostorije omogućava da se analizira uticaj geometrije osnovnog modela prostorije na raspodelu zračenja koje ima uniformni difuzni karakter, po unutrašnjim površinama prostorije. Model omogućava analize i izračunavanje geometrijskih faktora oblika i za kombinovane promene dimenzija prostorije, kako u relativnim odnosima tako i u apsolutnim iznosima dimenzija.

### Literatura

- [1] SIEGEL, HOWEL *Thermal Radiation Heat Transfer*. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1972.
- [2] ... *Fundamentals Handbook*, ASHRAE, New York, 1985.
- [3] Mc ADAMS, W.H. *Heat transmission*. Mc Graw-Hill Book Co. New York, 1954.
- [4] ECKERT, E., DRAKE, R. *Heat and Mass Transfer*. Mc Graw-Hill Book Co. New York, 1959.
- [5] KOZIĆ, Đ., BEKAVAC, V., VASILJEVIĆ, B. *Priručnik za termodinamiku*. Mašinski fakultet, Beograd, 1979.

Rad primljen: 8.3.1999.god.