

ANALIZA KFD I TEMPERATURNOG POLJA TROMBEOVOG ZIDA U CILJU POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI PASIVNE SOLARNE KUĆE

TAMARA BAJC, MAJA TODORVIĆ, JELENA SVORCAN, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

U radu je prikazana CFD analiza temperaturnog polja za pasivnu kuću sa Trombeovim zidom, za karakterističan zimski i letnji dan, za umereno kontinentalne klimatske uslove. Izvršena je optimizacija konstrukcije Trombeovog zida, poređenjem temperaturnog polja u Trombeovom zidu bez zaštite zastakljenja na spoljnoj strani zida od direktnog sunčevog zračenja, kao i sa zaštitnim PV trakama. Za karakterističan letnji dan, posmatran je slučaj kada je staklo sa spoljašnje strane zida prekriveno PV trakama u toku dana, da bi se sprečilo pregrevanje zida i kuće. Spoljašnji deo jezgra zida je prekriven tamnim premazom, da bi se poboljšala apsorptivnost zida. Trombeov zid je orijentisan ka jugu i konstruisan sa otvorima i u spoljnom i u unutrašnjem delu zida, ka prostoriji. Svi otvori su sa pokretnim klapnama, tako da omogućuje ili sprečava strujanje vazduha kroz zid. Ove klapne se otvaraju odnosno zatvaraju, u zavisnosti od spoljašnje temperature vazduha, intenziteta sunčevog zračenja, temperature u zidu i u prostoriji. Vrednosti koeficijentata prolaženja toplote za konstrukciju kuće su definisane prema standardima pasivne gradnje. Simulacijama su dobijena temperaturna i brzinska polja u Trombeovom zidu i u kući, kao i toplotni fluks usled sunčevog zračenja. Na osnovu ovih rezultata, urađena je analiza mogućih ušteda energije.

KLJUČNE REČI: CFD analiza; pasivna kuća; Trombeov zid; PV trake

TROMBE WALL'S CFD AND TEMPERATURE FIELD ANALYSES WITH AN AIM TO INCREASE PASSIVE SOLAR HOUSE'S ENERGY EFFICIENCY

The paper deals with CFD analysis of temperature field in Trombe wall for typical winter and summer day for a moderate continental climate. Construction of the Trombe wall is optimized, using different type of glassing on the outside of the wall. For summer day, the glass is considered to be covered with PV stripes during the daylight in order to prevent overheating. The central concrete core of the wall is covered with a layer of dark paint, on the outside, to improve absorptivity of the wall. The Trombe wall is oriented on South side of the house, and designed with openings with flaps in concrete core. Those openings are simulated in opened and closed positions. The U-values of the house envelope are considered according to passive house standards. Temperature fields in concrete core and in the room with Trombe wall are simulated, as well as velocity fields and radiation heat flux. According to these results, analysis of energy savings potential is performed.

KEY WORDS: CFD analysis; passive house; Trombe wall; PV stripes

1. Uvod

Osnovni pokretač za ovo istraživanje je bila analiza koja je urađena pre nekoliko godina [1], a koja je pokazala značajan doprinos Trombeovog zida u smanjenju ukupne potrebne energije za grejanje, za klimatsko područje Beograda.

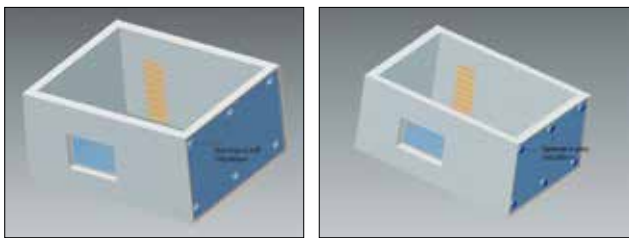
Ta studija je, takođe, pokazala da Trombeov zid značajano utiče na povećanje toplotnog opterećenja u letnjem periodu, što dalje utiče na povećanje potrebne energije za hlađenje.

S obzirom na to, u ovom radu su razmatrane optimalne kombinacije zastakljenja Trombeovog zida i zaštitnih prekrivki i za zimske i za letnje uslove. Razmatrana su tri karakteristična slučaja: zimski dan sa jednostrukim zastakljenjem na spoljašnjoj strani Trombeovog zida i zatvorenim svim klapnama u zidu (slučaj 1), zimski dan sa klapnama otvorenim u zidu, a zatvorenim u staklenom delu (slučaj 2) i letnji dan, kada je staklo potpuno prekriveno PV trakama, sa otvorenim klapnama u staklu, a zatvorenim u betonskom jezgru zida (slučaj 3).

2. Model pasivne kuće sa Trombeovim zidom

Model pasivne kuće sa Trombeovim zidom koji je korišćen u simulacijama je jednostavna, jednosobna kuća sa Trombeovim zidom na južnoj strani: širina 5000 mm x dužina 6000 mm (plus 350 mm za Trombeov zid) x visina 3000 mm. Locirana je u Beogradu, u Srbiji.

Trombeov zid je na južnoj strani i sastoji se od: 4 mm jednostrukog stakla, 150 mm vazdušnog prostora između jezgra i zastakljenja, 2 mm tamnog premaza i 200 mm betonskog jezgra. Apsoptivnost (i emisivnost) spoljašnje strane betonskog jezgra, koja je premazana tamnim premazom je 1.0. Model ima šest istih otvora sa klapnama u jezgru, koji su pozicionirani blizu četiri ugla zida i po jedan između njih, u sredini (slika 1). Dimenzije otvora su 300 mm x 200 mm, a od odgovarajućih ivica zida su udaljeni po 300 mm. Takođe, u staklu se nalazi identičnih šest otvora, sa klapnama, koji služe da zaštite zid od pregrevanja. Ove klapne mogu biti otvorene ili zatvorene, u zavisnosti od spoljašnje temperature, intenziteta sunčevog zračenja, temperature u zidu i u prostoriji. Ostali zidovi (severni, istočni i zapadni) su «sendvič» konstrukcije, debljine 400 mm, veoma dobro izolovani, u skladu sa standardima pasivne gradnje [2]. Kuća ima prozor dimenzija: 2200 mm x 1200 mm i vrata: 900 mm x 2100 mm. Krov i pod su takođe «sendvič» konstrukcije, dobro izolovani i debljine 400 mm. Omotač je građen u skladu sa standardima pasivne gradnje, pri čemu su koeficijenti prolaženja toplote za zidove, pod i krov $U = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$, a za prozor $U = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Slika 1. 3D model kuće sa otvorima u betonskom jezgru (levo) i u staklu (desno)

3. Polazne pretpostavke

Da bi se definisali raspodela temperature po prostoriji i režim upravljanja rada klapni, razmatrano je više varijanti sa različitim graničnim uslovima i ulaznim podešavanjima. Uopšteno, dva slučaja su simulirana u zimskom periodu (1. januar), sa zatvorenim i otvorenim klapnama u jezgru, slučaj 1 i slučaj 2. Takođe, slučaj karakterističnog letnjeg dana (15. jul) sa otvorenim klapnama u staklu, zatvorenim klapnama u jezgru (ka prostoriji) i sa PV trakama duž staklenog, spoljašnjeg, dela zida – slučaj 3.

Za svaki od razmatranih modela korišćene su sledeće pretpostavke: osnovne Navije-Stoksove jednačine, zajedno sa RANS modelom turbulencije i jednačine koje uzimaju u obzir sunčevo zračenje rešene su pomoću komercijalnog, trodimenzionalnog, softvera ANSYS FLUENT v14.0, odnosno paralelnog modela, sa konačnim zapreminama. Fluid, vazduh, smatran je idealnim i nestišljivim gasom. Solver je baziran na modelu pritiska, zajedno sa kuplovanim modelom pritisak-brzina. Sve prostorne diskretizacije su drugog reda. Svi modeli su razmatrani kao stacionarni i posmatrani su u isto doba dana: u 13 h.

Najčešće primenjivan, standardni model k-ε, korišćen je za zatvaranje sistema jednačina. Uticaj sunčevog zračenja je uzet u obzir pomoću DO modela radijacije i solarnog kalkulatora za Beograd, za definisani period u godini i vreme. U simulacijama, Businesskova pretpostavka je korišćena za simuliranje strujanja vazduha koje je izazvano samo razlikom temperatura, odnosno gustina vazduha u prostoriji. Drugi izvori toplote nisu razmatrani.

4. Osnovne jednačine

Problemi prirodnog strujanja vazduha u prostoriji i prenošenja toplote konvekcijom i zračenjem mogu se opisati jednačinama održanja mase, impulsa i energije. Strujanje vazduha se smatra pretežno turbulentnim [3].

Jednačina održanja mase za 3D strujanje vazduha:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

gde je ρ [kg/m³] gustina vazduha, a u, v, w su komponente brzine u x, y i z pravcu. Za nestišljivo strujanje, gustina vazduha je konstantna (lokalne promene gustine vazduha su zanemarljive u odnosu na lokalne promene brzine), pa se jednačina (1) može napisati kao:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Navije–Stoksove jednačine za nestišljivo 3D strujanje sa konstantnom viskoznošću (jednačine održanja impulsa) glase:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + X \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + Y \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + Z \end{aligned} \quad (3.3)$$

gde je ρ [kg/m³] gustina vazduha, a u, v, w su komponente brzine u x, y i z pravcu, X ($X = 0$), Y ($Y = -\rho g$) i Z ($Z = 0$) su projekcije masenih sila F u x, y i z pravcu, a P je tenzor napona.

Jednačina održanja energije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= \\ &= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

gde su u, v i w komponente brzine u x, y i z pravcu, ρ [kg/m³] je gustina vazduha, T je temperatura, a a je toplotna difuzivnost fluida ($a = \lambda/\rho C_p$).

Zbog turbulentne prirode strujanja vazduha, neophodno je primeniti Rejnoldsovu statistiku:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (5)$$

gde je \bar{u}_i prosečna brzina za ustaljeno strujanje, a u'_i je fluktuaciona brzina.

Osnovne jednačine za turbulentno strujanje su:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \bar{F}_i \quad (7)$$

gde je τ_{ij} tenzor smicajnih napona:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

Ako se (5), (6), (7) i (8) iskombinuju, dobijaju se Reynolds-osrednjena Navije–Stoksova jednačina (RANS):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= \\ &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \left(2\mu s_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right)}{\partial x_j} + \rho \bar{F}_i \end{aligned} \quad (9)$$

gde je $\overline{\rho u_i' u_j'}$ Reynoldsov tenzor tangencijalnog napona.

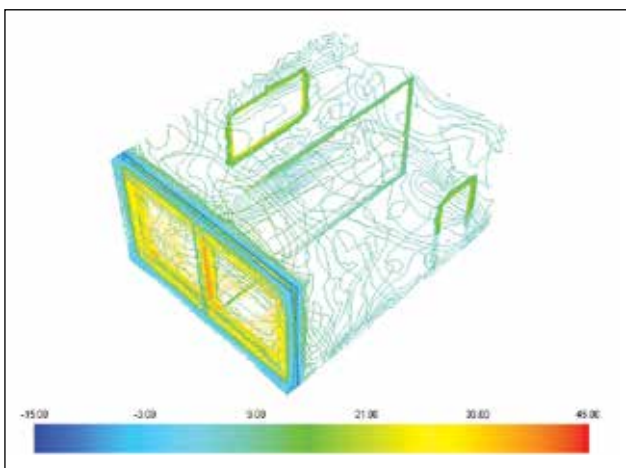
Standardni k - ϵ model je korišćen za zatvaranje sistema osnovnih jednačina. k - ϵ model je turbulentni model koji transportne jednačine rešava po turbulentnoj kinetičkoj energiji k i njenom koeficijentu disipacije ϵ [4]. Povezuje ρ , k i ϵ sa turbulentnom viskoznošću μ_t koristeći konstantu c_μ :

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

5. Rezultati simulacije i analiza

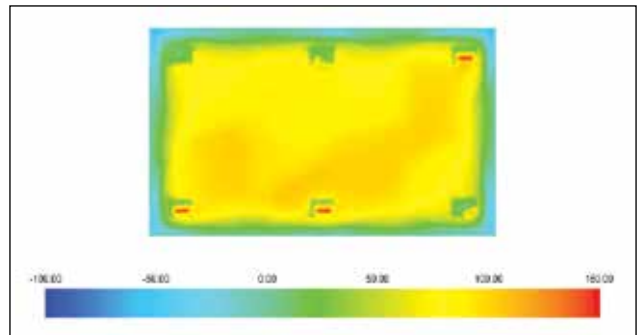
Slučaj 1

Simulacija je rađena za karakterističan zimski dan (1. januar u 13 h). Klapne u jezgru Trombeovog zida i u staklu su zatvorene. Za simulaciju sunčevog zračenja, korišćen je „sun calculator“ u Fluent-u. Slika 2 prikazuje temperaturno polje u Trombeovom zidu i u prostoriji. Prosečna temperatura u sobi je posmatrana u središnjoj tački, u sredini sobe (C-tačka u nastavku) i za slučaj 1, za mestimično oblačno vreme (vektor položaja Sunca: $-0,308094$, $Y: 0,341061$, $Z: 0,888119$ i faktor osunčanosti $0,75$) iznosi $13,6$ °C.



Slika 2. Raspodela temperature po prostoriji i u Trombeovom zidu za slučaj 1 [°C]

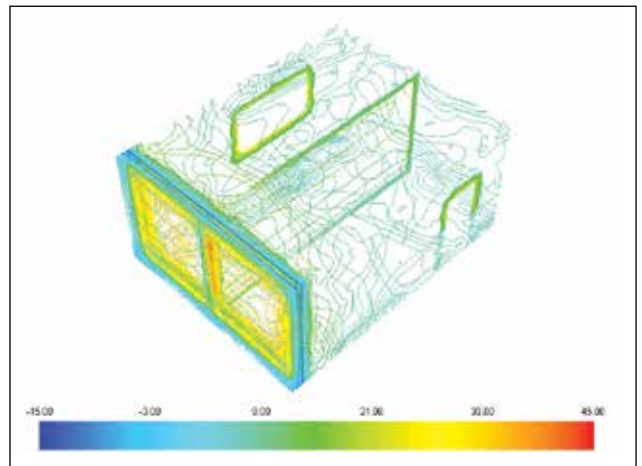
Slika 3 prikazuje toplotni fluks usled zračenja na unutrašnjoj površini Trombeovog zida za slučaj 1 (klapne zatvorene). Prosečan toplotni fluks usled zračenja na ovoj površini je oko $69,5$ W/m^2 .



Slika 3. Toplotni fluks usled zračenja na unutrašnjoj površini jezgra za slučaj 1 [W/m^2]

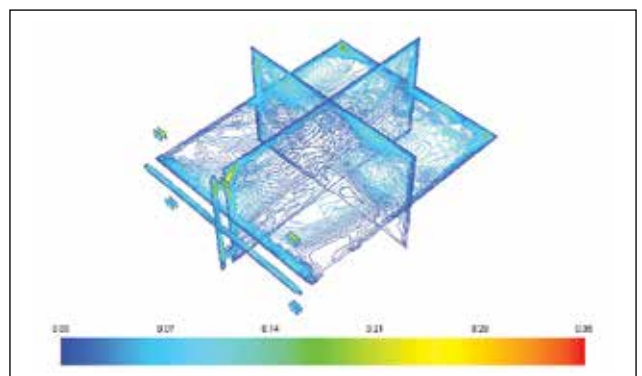
Slučaj 2

Simulacija je vršena za karakterističan zimski dan (1. januar u 13 h). Klapne u betonskom jezgru su otvorene, a klapne u staklu su zatvorene. Takođe, za simulaciju sunčevog zračenja, korišćen je «sun calculator» u Fluent-u. Slika 4 prikazuje temperaturno polje u Trombeovom zidu i u sobi. Prosečna temperatura u sobi, u C-tački, za slučaj 2, za mestimično oblačno vreme (isti uslovi osunčanosti kao u slučaju 1) je $14,7$ °C.



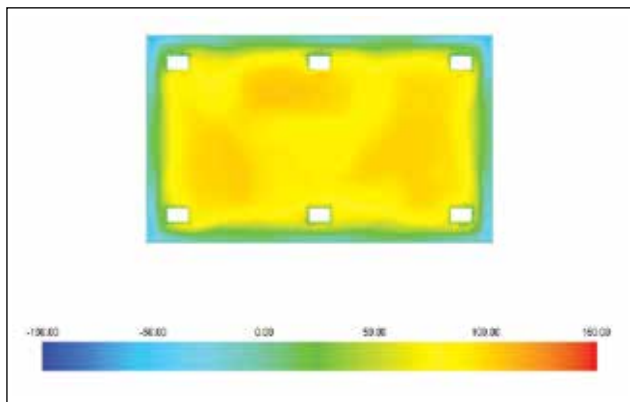
Slika 4. Temperaturno polje za slučaj 2 sa otvorenim klapnama u betonskom jezgru [°C]

Strujanje vazduha u Trombeovom zidu i sobi je prirodno, uzrokovano samo razlikom gustina, koja je posledica temperaturske razlike po visini prostorije. Na slici 5 je prikazano brzinsko polje za slučaj 2, sa otvorenim klapnama u betonskom jezgru. Vidi se da je brzina unutar Trombeovog zida između $0,1$ m/s i $0,2$ m/s .



Slika 5. Konture brzine unutar Trombeovog zida i u sobi [m/s]

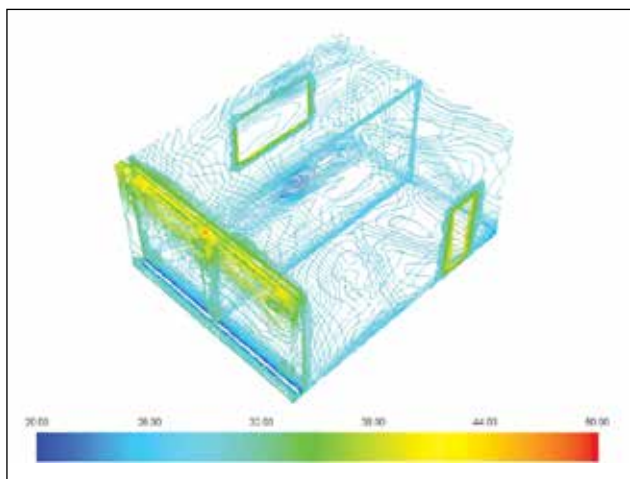
Rezultat simulacije za toplotni fluks usled zračenja [W/m^2] na unutrašnjoj površini betonskog jezgra za slučaj sa otvorenim klapnama u jezgru, prikazan je na slici 6. Prosečna vrednost toplotnog fluksa je $68,1 \text{ W/m}^2$.



Slika 6. Toplotni fluks usled zračenja na unutrašnjoj strani zida za 2. slučaj [W/m^2]

Slučaj 3

Ovaj slučaj je razmatran za karakterističan letnji dan (15. jul u 13 h), kada su klapne u betonskom jezgru zatvorene, da bi se izbeglo pregrevenje prostorije, a klapne u staklu na spoljnoj strani Trombeovog zida otvorene, i staklo je potpuno prekriveno PV trakama, koje štite zid od direktnog sunčevog zračenja. Simulacija je pokazala da PV trake imaju veliki zaštitni efekat, što je prikazano na slikama 7 i 8. Prosečna temperatura u tački C je oko $29,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

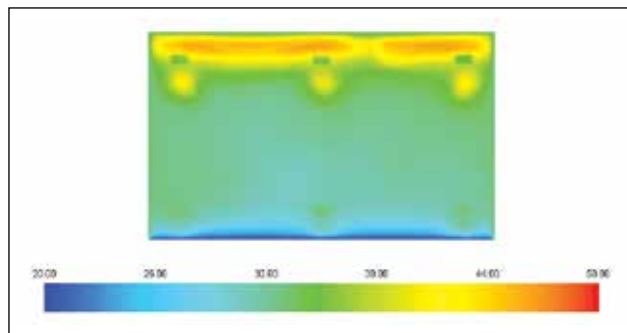


Slika 7. Temperaturno polje za 3. slučaj sa PV trakama [$^\circ\text{C}$]

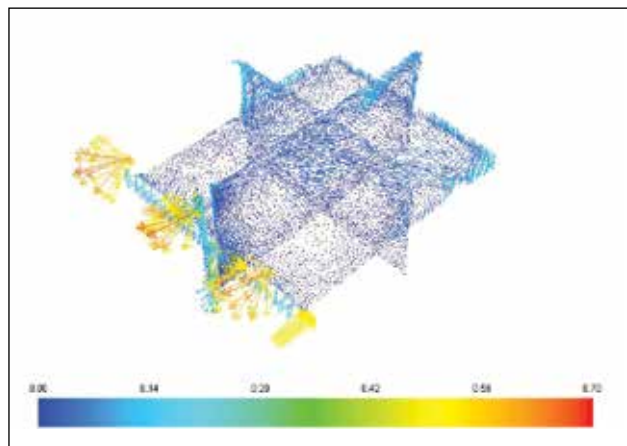
U toku prosečnog letnjeg dana, prosečna temperatura betonskog jezgra Trombeovog zida je oko $32 \text{ }^\circ\text{C}$ do $35 \text{ }^\circ\text{C}$, zahvaljujući PV trakama sa spoljašnje strane stakla. Temperaturno polje na spoljašnjoj strani betonskog jezgra je prikazano na slici 8.

Brzinsko polje je simulirano pretpostavljajući da je brzina vetra na ulazu u otvore u staklu $0,5 \text{ m/s}$. Raspodela vektora brzine u Trombeovom zidu i u sobi je prikazana na slici 9.

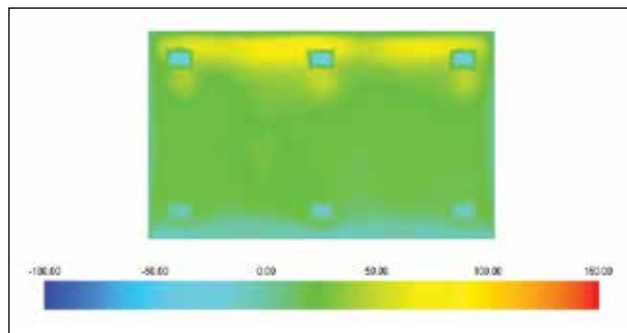
Na kraju, toplotni fluks usled zračenja [W/m^2] na unutrašnjoj strani Trombeovog zida, za letnje uslove i staklo prekriveno PV trakama je prikazan na slici 10. Prosečna vrednost toplotnog fluksa je oko $24,2 \text{ W/m}^2$, što je posledica značajnog uticaja zaštite zida PV trakama od direktnog sunčevog zračenja.



Slika 8. Temperaturno polje na spoljašnjoj strani betonskog jezgra [$^\circ\text{C}$]



Slika 9. Vektori brzine u Trombeovom zidu i u sobi za slučaj 3 [m/s]



Slika 10. Toplotni fluks na unutrašnjoj strani Trombeovog zida za slučaj 3 [W/m^2]

6. Zaključci

Simulacije su pokazale značajan uticaj Trombeovog zida na raspodelu temperature u model-kući za klimatske karakteristike Beograda.

Doprinos Trombeovog zida u zimskom periodu je veoma veliki (pokazano je da je prosečna temperatura u sobi oko $14,7 \text{ }^\circ\text{C}$ za slučaj 2). To ukazuje da je potrebna energija za grejanje oko 50% manja u poređenju sa pasivnom kućom bez Trombeovog zida.

Međutim, u letnjim uslovima, Trombeov zid predstavlja dodatno toplotno opterećenje. Korišćenjem PV traka sa spoljašnje strane Trombeovog zida, kao sistema zaštite od direktnog sunčevog zračenja, moguće je postići prihvatljivu temperaturu u kući (oko $29,8 \text{ }^\circ\text{C}$), ali je i dalje neophodno hladiti kuću do temperature od $26 \text{ }^\circ\text{C}$, što znači da je

potrebno dodatnih oko 10% energije više za hlađenje. Međutim, važno je naglasiti da je doprinos PV traka za proizvodnju električne energije potrebne za pogon uređaja za hlađenje značajan (oko 60% za letnji dan, ako je efikasnost PV traka 7%, vertikalna površina staklenog dela prekrivenog PV trakama 14,64 m², prosečna insolacija na vertikalnu površinu, orijentisanu ka jugu oko 3,3 kWh/m² za prosečan letnji dan, prosečna potrebna energija za rad uređaja za hlađenje oko 1 kW/h i prosečno korišćenje uređaja 36 h/nedeljno).

Otuda je Trombeov zid dobro rešenje za klimatske uslove Beograda, ali da bi se došlo do konačnog zaključka, potrebno je uraditi detaljnu analizu potrošnje energije za karakterističnu meteorološku model-godinu i na osnovu toga definisati da li su veći troškovi usled dodatne energije potrebne za hlađenje, ili korist usled smanjene potrošnje energije za grejanje i uticaj korišćenja obnovljivih izvora energije na ukupnu potrošnju primarne energije.

Zahvalnost

Rezultati objavljeni u ovom radu nastali su kao rezultat istraživanja u okviru Nacionalnih istraživačkih projekata tehnološkog razvoja TR 33047 i TR 35035 finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] **Bajc, T.**, *Energetske potrebe pasivne kuće sa Trombeovim zidom za klimatsko područje Beograda*, diplomski rad, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, februar 2009.
- [2] www.passiv.de
- [3] *** 2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals. 2009. ASHRAE.
- [4] **Nielsen, P. (ed.), F. Allard, H. Awbi, L. Davidson, A. Schälin**, *Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design*, Rehva, 2007.
- [5] **Bejan, A.**, *Convective heat transfer*, 2004, John Wiley and Sons, INC.
- [6] **Liu, Y., D. Wang, C. Ma, J. Liu**, *A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of trombe wall*, Solar Energy. Res. 91 (2013) 1–10.
- [7] **Koyunbabaa, B. K., Z. Yilmazb, K. Ulgen**, *An approach for energy modeling of a building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system*, Energy and Buildings. Res. xxx (2011) xxx–xxx (article in press).
- [8] **Pardo, A., S. Dominguez, J. Fernandez**, *Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790*, Energy and Buildings, Res 42 (2010), 763–773.

kgh

INSTALIRAJTE ZAŠTITU

**FLEKSIBILNA ZAŠTITA OD POŽARA
ZA PRODOR KROZ ZIDOVE
ETA-11/0454 potvrda**



Armaflex

Protect

Armaproprotect

1000



Tel.: +381 (0)61 280 11 18
mile.stanovnik@armacell.com

Armaflex.com

FilterFRIGO
D.O.O.

HVAC&R Proizvodnja, Servis, Inženjering & Konsalting
Beograd, Ustanička 135, Tel.011/289 48 17 Fax: 347 33 21
Proizvodnja-magacin: 27 11 973 E-mail:filfrigo@eunet.rs
www.filterfrigo.com