

Trombov zid i njegov uticaj na godišnje potrebnu energiju za grijanje

Milan Pupčević¹, Biljana Antunović², Predrag Mršić³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

milan.pupcevic@mf.unibl.org, biljana.antunovic@aggf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org

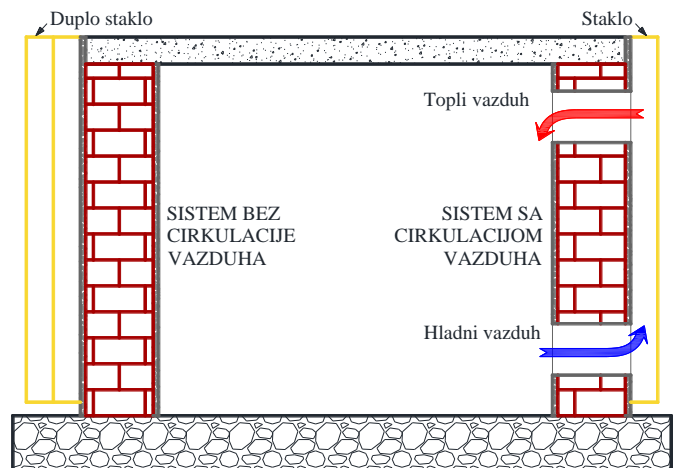
Sažetak - Trombov zid kao pojam postoji decenijama, ali našao je svoju primjenu samo u pojedinim zemljama koje imaju veliki broj osunčanih dana. Zanimljivo je uočiti da posljednjih godina, kada se od obnovljivih izvora energije solarna energija najviše potencira, malo pažnje dobijaju akumulacija solarne energije i solarni pasivni sistemi, iako su mnogo jeftiniji i jednostavniji za korišćenje malim potrošačima. Dosadašnja istraživanja navode da su primjenom Trombovog zida uštede za toplotnu energiju u toku grejne sezone i do 30%. Ideja ovog rada je da se prvenstveno definišu karakteristike za usvojeni tipski objekat na prostoru Bosne i Hercegovine i da se za navedeni objekat izračuna godišnje potrebna toplotna energija za grijanje, prema trenutno važećim evropskim standardima. S obzirom na to da je jedna od osnovnih mjera poboljšanja energetske efikasnosti objekata izolacija spoljnih zidova, drugi korak je ponovljeni proračun sa izolacijom zidova i definisanje perioda otplate. Cilj je da se dobijeni period otplate analizira sa periodom otplate ugradnje staklenih površina na južni zid postojećeg objekta, to jeste formiranjem solarnog Trombovog zida. Proračun Trombovog zida je zahtjevan zbog velikog broja nepoznatih veličina u sistemu, što je riješeno primjenom numeričke optimizacione metode Pattern Search. Na osnovu proračunom dobijenih podataka uočava se da Trombov zid, pored toga što smanjuje gubitke toplote objekta, obezbjeđuje i 25% sezonski potrebne energije za grijanje, to jeste energetska ušteda sa Trombovim zidom iznosi 36,6%.

Ključne riječi - Trombov zid; godišnje potrebna energija za grijanje; solarna energija;

I. UVOD

Trombov zid se prvi put pojavio u mjestu Odeju u Pirinejima (Francuska). Félix Trombe je 1965. godine sagradio kuću sa tamnim zidom na južnoj strani, koji je po njemu dobio naziv Trombov zid. Trombov zid je okrenut prema Suncu i zamišljen kao pasivni sunčev kolektor. Zid je istovremeno služio za apsorbovanje toplote, za akumulaciju toplote i kao tijelo za zagrijavanje unutrašnjih prostorija. Pojedini autori navode uštede za toplotnu energiju u toku grejne sezone i do 30% primjenom Trombovog zida [1], što će biti detaljno analizirano ovim radom.

Trombov zid obično se izrađuje od opeke, betona ili kamena. Na udaljenosti od 2 do 10 cm ispred zida nalazi se staklo [2], [3], prema Sl. 1.



Sl. 1. Princip rada Trombovog zida sa i bez cirkulacije vazduha

Postoji nekoliko sličnih rješenja, to jeste solarni zid može biti sa cirkulacijom vazduha (Sl. 1. desno), pasivni bez cirkulacije (Sl. 1. lijevo) ili sa većim vazdušnim prostorom između zida i stakla, što se rijetko koristi u praksi [4].

Efikasnost Trombovog zida se povećava ako se u toku noći preko njegove spoljne strane spusti zastor koji će spriječiti gubitak toplote [5].

Prednosti Trombovog zida su: ugodna toplota elemenata zgrade, rad bez pokretnih dijelova i bez održavanja, relativno lako uključivanje u izgradnju strukture kao unutrašnji ili vanjski zid i jeftini klasični građevinski materijali. Nedostatak Trombovog zida je taj da vanjski zidovi postaju izvor gubitaka toplote tokom dužih oblačnih perioda [6].

U praksi se koriste dvije konstrukcijske varijante Trombovog zida, bez otvora i sa otvorima pri osnovi i vrhu zida, a svaka sa jednim ili dva stakla na spoljnoj strani zida [7]. Nakon prolaska kroz staklo, sunčevo zračenje pada na Trombov zid i zagrijava ga. Brzina prenošenja toplote sa vanjske na unutrašnju stranu zida zavisi od materijala od kojeg je napravljen i njegove debljine. Sa ciljem sprečavanja pretjeranog zagrijavanja prostorija ispred ili iza Trombovog zida, postavljaju se odgovarajući toplotni zastori. Uopšteno, otvori za prolaz toplote u unutrašnjost u ljetnim mjesecima su zatvoreni, kako ne bi došlo do narušavanja toplotnog komfora.

Za vrijeme ventilacijskog ciklusa sunčeva energija se akumulira u spremnik, zagrijavajući pritom vazdušni kanal i uzrokujući cirkulaciju kroz otvor na vrhu i dnu zida. Za vrijeme ciklusa grijanja, Trombov zid otpušta akumuliranu toplotnu energiju [8]. U ovom radu će biti razmatran pasivni solarni zid bez cirkulacije vazduha sa dva stakla.

II. PRORAČUN GODIŠNJE POTREBNE TOPLOTNE ENERGIJE ZA GRIJANJE OBJEKTA

Usvojeni objekat je zbog broja osunčanih dana smješten lokacijski u južnu regiju Bosne i Hercegovine, tačnije u Mostar. Proračun godišnje potrebne toplotne energije je rađen prema [9] i [10].

Usvojena unutrašnja projektna temperatura objekta je 20 °C. Prema Kuliću [11] spoljna projektna temperatura za Mostar iznosi -6 °C, međutim gubici toplote neće biti definisani za fiksnu temperaturu, nego na osnovu preuzetih temperatura spoljnog vazduha za svaki mjesec prema [12].

Bruto površina osnove objekta iznosi 115,6 m², koju čine dimenzije objekta od 10,75 i 10,75 m. Visina objekta je 5,8 m. Objekat čine prizemlje i sprat, na osnovu čega je korisna površina 196,9 m², a grijana korisna zapremina 511,9 m³.

Osnovne mjere poboljšanja izolovanosti objekata u okruženju su izolacija spoljnog omotača i zamjena stolarije. Rekonstrukcija krova i poda, sistema grijanja i pripreme tople potrošne vode, kao i elektroinstalacija i opreme, skoro uvijek se radi kao druga faza sanacije objekta. S obzirom na to da je sistem solarnog zida određena vrsta izolacije omotača, to jeste ugrađuju se dva sloja stakla sa spoljne strane, pri čemu ostaje zarobljen vazduh, kao mjeru sanacije za uporednu analizu je usvojeno rješenje izolacije omotača-spoljnih zidova.

Na osnovu standardom definisanih jednačina i dobijenih vrijednosti za tražene koeficijente prolaza toplote, proračunati su gubici i dobiti toplote. Rezultati proračuna su prezentovani za svaki mjesec posebno i sumarno za cijelu godinu. Vrijednosti dobijene proračunom za godišnje potrebnu energiju za grijanje $Q_{H,nd}$, koja obuhvata transmisionu Q_{tr} i ventilacionu Q_{ve} gubitke, unutrašnje Q_{int} i solarne Q_{sol} dotoke sa faktorom iskorišćenja dotoka toplote, prikazane su u Tabeli 1. Toplota koja potiče od unutrašnjih dobitaka toplote sastoji se od dobitaka od ljudi i dobitaka od električnih uređaja.

TABELA I. GODIŠNJA POTREBNA ENERGIJA ZA GRIJANJE

Mjesec	Okt.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
Q_{tr}	2706	5516	7946	8752	6969	5988	3733
Q_{ve}	299	611	880	969	772	663	413
$Q_{H,ht}$	3006	6127	8826	9721	7741	6651	4147
Q_{int}	422	408	422	422	381	422	408
Q_{sol}	187	263	225	244	278	409	258
$Q_{H,gn}$	610	672	647	667	659	831	667
$\eta_{H,gn}$	0.97	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98
$Q_{H,nd}$	2413	5460	8180	9056	7084	5829	3491
Ukupno za sezonu grijanja $Q_{H,nd}$ [kWh]							41517

Godišnja potrebna toplotna energija za grijanje izračunava se prema jednačini (1):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (1)$$

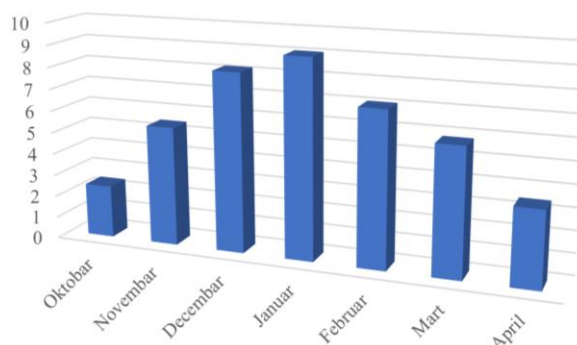
pri čemu se ukupni toplotni gubici $Q_{H,ht}$ određuju pomoću jednačine (2), a ukupni dobiti toplote $Q_{H,gn}$ određuju se kao zbir ukupnih unutrašnjih i solarnih dobitaka, prema jednačini (3). Faktor iskorišćenja dobitaka toplote $\eta_{H,gn}$ definiše se u zavisnosti od toplotne akumulativnosti konstrukcija objekta.

$$Q_{H,ht} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (2)$$

$$Q_{H,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (3)$$

Godišnje potrebna energija za grijanje predstavljena je u vidu dijagrama po mjesečnim vrijednostima na Sl. 2.

Mjesečna potrebna energija za grijanje MWh



Sl. 2. Mjesečno potrebna energija za grijanje

III. TERMIČKE KARAKTERISTIKE TROMBOVOG ZIDA

Nažalost, nije moguće iskoristiti maksimalno dozračenu energiju na solarni vertikalni zid, zbog ugla upada sunčevih zraka i refleksije od stakla. To utiče na količinu dozračene energije koja je maksimalna kada su sunčeve zrake okomite na ravan prijemnika. Podaci o globalnom zračenju, koji su korišćeni tokom proračuna, preuzeti su iz [12], kao vrijednosti za svaki sat u toku godine.

Za usvojene karakteristike sistema dozračena energija se računa pomoću jednačine (4),

$$q_s = (\tau \cdot \alpha) \cdot G, \quad (4)$$

pri čemu su:

- G - globalno zračenje [W/m²] i
- $\tau \cdot \alpha$ - transmitivno-apsorptivne karakteristike sistema.

Zbog obimnosti rada usvojene su prosječne vrijednosti transmitivno-apsorptivnih karakteristika prema [13], [14].

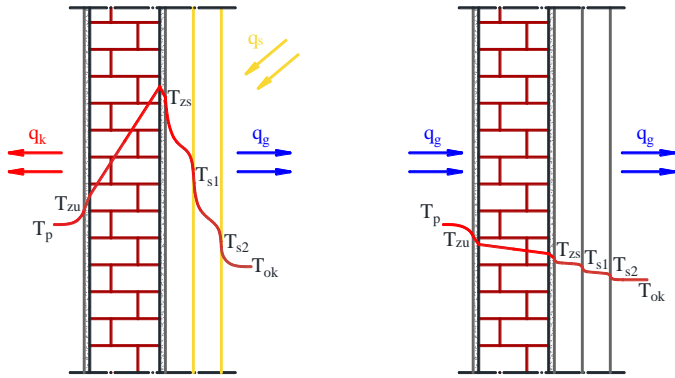
Termičke karakteristike definisane su za usvojeni sistem Trombovog zida, koji se sastoji od zida i dva stakla koji ga razdvajaju od spoljnog vazduha, a prema preporukama [15]-[18]. Trombov zid sačinjen je od opeke debljine 25 cm ($\lambda = 0,76$ W/mK), sa obostranim malterom debljine 2 cm. Stakla su na međusobnom rastojanju od 10 cm, a isti razmak je usvojen i između zida i prvog stakla.

Energija sunca koju zid prima na spoljnoj površini transformiše se u nekoliko oblika, prema jednačini (5).

$$q_s = q_k + q_a + q_g \quad (5)$$

Trenutno korisna energija za sistem je toplota koja se predaje grijanom prostoru q_k . Takođe, korisna toplota je i toplota akumulacije sistema, koja se skladišti u elementima Trombovog zida na račun povećanja temperature zida q_a . Nepovoljna osobina sistema su gubici kroz transparentne površine ka spoljnjem vazduhu q_g .

Temperaturne krive Trombovog zida se razlikuju za dva opšta slučaja, prema Sl. 3. U prvom slučaju, kod toplotnih dobitaka, temperatura zida je viša od temperature prostorije (Sl. 3. lijevo). To je moguće ukoliko trenutno postoji dozračenja sunčeva energija ili nekoliko časova posle zalaska sunca kada je temperatura zida zbog same akumulacije toplote i dalje viša od temperature prostora. Kada temperatura zida postane niža od temperature prostora tada govorimo o drugom mogućem slučaju, gubicima toplote, gdje sa vremenom rastu gubici iz prostorije (Sl. 3. desno).



Sl. 3. Raspodjela temperatura kod Trombovog zida

Kao što se uočava na Sl. 3. analiziraju se temperature površina zida, temperature oba stakla kao i temperatura u samoj unutrašnjosti zida (centar). Korisna toplota može se definisati na dva načina, pomoću karakteristike samog zida (jednačina 5) i preko konvekcije toplote sa unutrašnje površine zida u prostoriji.

Toplotni fluks kroz homogen materijal definiše se kao:

$$q_k = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{zs} - T_{zu}), \quad (6)$$

pri čemu su:

- δ [m] - debljina konstrukcije,
- λ [W/mK] - koeficijent toplotne vodljivosti elementa konstrukcije i
- T_{zs} i T_{zu} [K] - temperature površina zida, spoljna i unutrašnja.

Kao što je rečeno, korisni toplotni fluks može se definisati i prelazom toplote sa zida na vazduh u grijanoj prostoriji, pomoću jednačine:

$$q_k = (\alpha_{zu-p} - h_{r,zu-p}) \cdot (T_{zs} - T_p), \quad (7)$$

gdje su:

- α_{zu-p} [W/m²K] - koeficijent prelaza toplote (konvekcija) i
- $h_{r,zu-p}$ [W/m²K] - koeficijent prenosa toplote zračenjem sa unutrašnje površine zida na vazduh u grijanom prostoru.

Pojedini autori [17] zanemaruju toplotu zračenjem u prostor zbog male razlike u temperaturi unutrašnje površine zida i samog prostora, na osnovu čega jednačina (7) dobija oblik:

$$q_k = \alpha_{zu-p} \cdot (T_{zs} - T_p). \quad (8)$$

Prema [18] koeficijent prelaza toplote za prirodnu cirkulaciju vazduha definiše se pomoću Grashofovog (Grashof) i Nuseltovog (Nusselt) broja, prema jednačini (9):

$$\alpha_{zu-p} = \frac{Nu \cdot \lambda}{H}. \quad (9)$$

Za unutrašnju površinu zida debljine $\delta = 29$ cm i visine $H = 2,6$ m, Grashofov broj definisan je jednačinom:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu^2}, \quad (10)$$

gdje su:

- g [m/s²] - ubrzanje zemljine teže,
- β [1/K] - koeficijent zapreminskog širenja,
- ΔT [K] - razlika temperature unutrašnje površine zida i temperature sobnog vazduha ($\Delta T = T_{zu} - T_p$),
- H [m] - karakteristična dimenzija i
- ν [m²/s] - kinematička viskoznost fluida.

Na osnovu dobijene vrijednosti za Grashofov broj može se očitati vrsta strujanja fluida i karakteristični Nuseltov broj. Za date karakteristike sistema urađeno je nekoliko iteracija i dobijen je uvijek isti režim strujanja fluida sa Nuseltovim brojem oblika:

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr_f)^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_z} \right)^{0,25}. \quad (11)$$

Za Prandtllove brojeve su usvojene sljedeće vrijednosti:

- $Pr_f = 0,703$ - za fluid i
- $Pr_z = 0,699$ - za zid.

Koeficijent prelaza toplote u prostoru (zarobljeni vazduh) između zida (temperature T_{zs}) i prvog stakla (T_{s1}) i između dva stakla (T_{s1} i T_{s2}) je prema [17] definisan jednačinama:

$$\alpha_{zs-s1} = 0,82 \cdot \frac{\Delta T^{0,327}}{L_1^{0,019}} \cdot [1 - 0,018 \cdot (T_{sr} - 283)] \quad (12)$$

$$\alpha_{s1-s2} = 0,82 \cdot \frac{\Delta T^{0,327}}{L_2^{0,019}} \cdot [1 - 0,018 \cdot (T_{sr} - 283)], \quad (13)$$

gdje su:

- L [m] - rastojanje između površina i
- T_{sr} [K] - srednja temperatura.

Kao poslednji konvektivni član definisan je koeficijent prelaza toplote sa drugog stakla u okolinu. S obzirom na to da je brzina strujanja okolnog vazduha promjenljiva, prema [19]-[21], ovaj član se može definisati primjenom Mek Adams (Mc Adams) jednačina:

$$\alpha_{s2-ok} = 5,7 + 3,8 \cdot w \quad \text{za } w < 5 \text{ i} \quad (14)$$

$$\alpha_{s2-ok} = 6,47 + w^{0,78} \quad \text{za } w > 5, \quad (15)$$

pri čemu je w [m/s] brzina strujanja vazduha.

Kao što je i ranije navedeno prema preporukama je usvojeno da nema zračenja od zida u grijani prostor, to jeste $h_{r,zu-p} = 0$. Ukoliko se želi definisati navedeni koeficijent prenosa toplote zračenjem, mogao bi se izraziti kako je to urađeno za zračenje sa stakla u okolni vazduh, prema sljedećoj jednačini [17]:

$$h_{r,s2-ok} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{s2}^2 + T_{ok}^2) \cdot (T_{s2} + T_{ok}), \quad (16)$$

pri čemu su:

- ε [-] - koeficijent emisije zračenja (usvojena vrijednost 0,95) i
- σ [W/m²K⁴] - Štefan-Bolcmanova konstanta (5,668·10⁻⁸).

Prema [18], prenos toplote zračenjem između dvije paralelne površine, za razliku od jednačine (16), ima dva koeficijenta emisije zračenja. Za definisani sistem usvojene su jednake vrijednosti datih koeficijenata, a jednačine glase:

$$h_{r,zs-s1} = \frac{\sigma \cdot (T_{zs}^2 + T_{s1}^2) \cdot (T_{zs} + T_{s1})}{\frac{1}{\varepsilon_{zs}} + \frac{1}{\varepsilon_{s1}} - 1} \text{ i} \quad (17)$$

$$h_{r,s1-s2} = \frac{\sigma \cdot (T_{s1}^2 + T_{s2}^2) \cdot (T_{s1} + T_{s2})}{\frac{1}{\varepsilon_{s1}} + \frac{1}{\varepsilon_{s2}} - 1}. \quad (18)$$

Gubici toplote sistema od spoljne apsorbujuće površine zida prema okolnom vazduhu mogu se definisati na više načina. Toplotni fluks između zida i prvog stakla je identičan fluksu između dva stakla kao i između stakla i okolnog vazduha, prema jednačinama (19) i (20):

$$q_g = U_{gs} \cdot (T_{zs} - T_{ok}) = (\alpha_{zs-s1} + h_{r,zs-s1}) \cdot (T_{zs} - T_{s1}) \text{ i} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} q_g &= (\alpha_{s1-s2} + h_{r,s1-s2}) \cdot (T_{s1} - T_{s2}) = \\ &= (\alpha_{s2-ok} + h_{r,s2-ok}) \cdot (T_{s2} - T_{ok}). \end{aligned} \quad (20)$$

Za poznate temperature okoline i pretpostavljenu temperaturu spoljne površine zida, mogu se definisati gubici toplote od solarnog zida u okolinu. Na osnovu pretpostavljenih

temperatura (ili mjerenih) prvenstveno se definišu koeficijenti prenosa toplote konvekcijom i zračenjem, a zatim ukupni koeficijent gubitaka kao:

$$U_{gs} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zs-s1} + h_{r,zs-s1}} + \frac{1}{\alpha_{s1-s2} + h_{r,s1-s2}} + \frac{1}{\alpha_{s2-ok} + h_{r,s2-ok}}}. \quad (21)$$

Posljednji ali najvažniji dio toplote ovog sistema je toplota akumulirana u konstrukciji, koja se može izraziti preko porasta temperature konstrukcije:

$$q_a = \frac{\delta \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T_z}{\tau_v}, \quad (22)$$

pri čemu su:

- ρ [kg/m³] - gustina materijala od kojeg je sačinjen zid,
- c [J/kgK] - specifični toplotni kapacitet materijala konstrukcije,
- ΔT [K] - temperaturna razlika zida za usvojeni vremenski period τ_v , ukoliko se proračun vrši za svaki čas poznata je temperatura na početku (za prošli čas) a temperatura na kraju akumulacije (trenutna) se izračunava na osnovu akumulirane toplote.

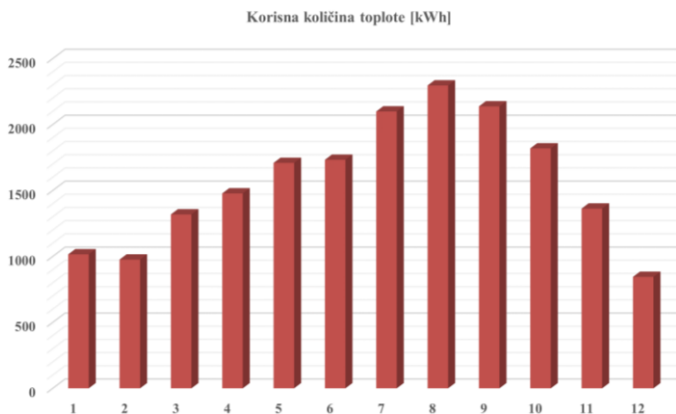
Prema izloženom matematičkom modelu napisan je program za proračun temperatura razmatranih površina, pri čemu se temperature dobijaju iterativno. Program preuzima dostupne podatke iz excel fajla za dozračenu energiju, spoljnu temperaturu i brzinu vazduha za svaki sat.

Na osnovu prve pretpostavke program iterativno proračunava temperature površina za prvi usvojeni čas, a zatim sa tim dobijenim temperaturama računa za sljedeći, sve dok ne uradi za cijelu godinu to jeste 8760 časova. Za rješavanje nelinearnih algebarskih jednačina, tokom programiranja za proračun traženih temperatura korišćena je numerička optimizaciona metoda Pattern Search.

Prema vrijednostima dobijenim za korisnu i akumuliranu toplotu, kao i za gubitke, može se definisati uticaj tih količina toplote na ukupnu sezonski potrebnu toplotnu energiju za grijanje. Da bi se to analiziralo proračun godišnje potrebne energije za grijanje urađen je i treći put, ali sa izostavljenim južnim zidom objekta, koji je Trombov zid i nema tih gubitaka nego se računaju posebno. Potrebna energija se smanjuje sezonski sa 41518 kWh na 35138 kWh sezonski.

Na osnovu podataka dobijenih proračunom uočava se da solarni zid na južnoj strani, pored toga što smanjuje gubitke toplote objekta, obezbjeđuje i 25% sezonski potrebne energije (Sl. 4.), to jeste 8813 kWh toplotne energije u odnosu na 35138 kWh koliko je potrebno za grejnu sezonu.

Ukoliko se analizira energetska ušteda sa Trombovim zidom, kada se od ukupno potrebne toplotne energije u iznosu od 35138 kWh oduzme količina koju je obezbijedio Trombov zid (8813 kWh), dobija se umanjenje potrebne energije za grijanje sa 41518 na 26325 kWh. Može se zaključiti da je energetska ušteda sa Trombovim zidom 36,6%.



Sl. 4. Korisna mjesečna količina toplote koja se oslobodi u prostor

IV. EKONOMSKA ANALIZA

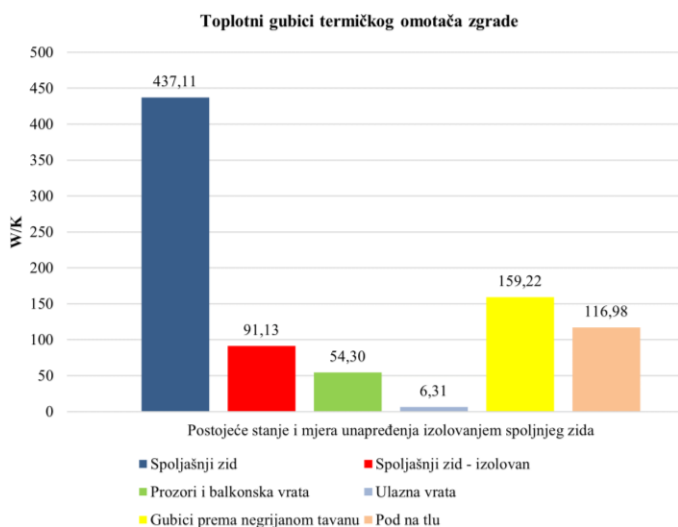
Na osnovu proračuna gubitaka toplote uočava se da je površina spoljnih zidova 229 m². Investicija za izolaciju objekta sa ekstrudiranim polistirenom ($\lambda = 0,035$ W/mK), debljine 10 cm, definisana je kao:

$$C_i = c_i \cdot A_i = 50 \cdot 229 = 11450 \text{ [KM]}, \quad (23)$$

pri čemu su:

- C_i [KM] - investicioni troškovi,
- c_i [KM/m²] - jedinična cijena radova (usvojeno kao prosječna cijena za 2022. godinu) i
- A_i [m²] - površina izolovanog zida.

Za novu karakteristiku konstrukcije (koeficijent prolaza toplote spoljnog zida umanjeno je sa $U = 1,859$ na $U = 0,3$ W/m²K), izvršen je cjelokupni navedeni proračun ponovo sa novim parametrima. Definirana je nova vrijednost godišnje potrebne toplote za grijanje u iznosu 22502 kWh ili 114,3 kWh po 1 m² grijanog prostora. U odnosu na postojeće stanje smanjenje potrošnje toplotne energije, sa 41518 na 22502 kWh, iznosi 46%. Na Sl. 5. uočava se udio gubitaka toplote u zavisnosti od elementa konstrukcije, kao i poboljšanje izolovanjem objekta.



Sl. 5. Udio gubitaka toplote u zavisnosti od elementa konstrukcije

Za prikaz isplativosti projekta korištena je metoda perioda povrata. Otplatni period je period potreban da se investiciono ulaganje pokrije očekivanim pozitivnim gotovinskim tokovima. Broj godina potrebnih za nadoknadu ulaganja je jednak početnom ulaganju kroz godišnji novčani prihod, prema jednačini:

$$C_t = \sum_{\tau=1}^{\tau_p} C_{\tau} \Rightarrow \tau_p = \frac{C_t}{C_{\tau}}, \quad (24)$$

pri čemu su:

- τ_p [god] - period povrata i
- C_{τ} [KM] - čisti novčani tok po godinama τ .

Period otplate navedene investicije definisan je za dva izvora toplote sistema grijanja, i to za električnu energiju (τ_{pe}) i pelet (τ_{pp}), prema sledećim jednačinama:

$$\tau_{pe} = \frac{C_t}{C_{\tau_e}} = \frac{11450}{3423} = 3,3 \text{ [god]} \text{ i} \quad (25)$$

$$\tau_{pp} = \frac{C_t}{C_{\tau_p}} = \frac{11450}{1826} = 6,3 \text{ [god]}, \quad (26)$$

pri čemu su čisti novčani tokovi po godinama, za trenutne cijene energenata, definisani kao:

$$C_{\tau_e} = (Q_{H,nd} - Q_{H,nd,2}) \cdot C_{ee} = 3423 \text{ [KM]} \text{ i} \quad (27)$$

$$C_{\tau_p} = (Q_{H,nd} - Q_{H,nd,2}) \cdot C_{pe} = 1826 \text{ [KM]}. \quad (28)$$

Treba naglasiti da je period otplate izolovanja objekta, sa električnom energijom kao energentom, veoma kratak zato što su godišnji troškovi za grijanje veoma visoki, tačnije za grijanje sa elektro kotlom 7475 KM. Na Sl. 6. uočava se period otplate za navedene kotlove kojima su energenti pelet i električna energija, a pored toga definisan je period otplate za sistem grijanja primjenom toplotne pumpe i gradske toplane.

Ukoliko se ugradnjom Trombovog zida godišnja potrošnja energenta umanjuje za navedenih 15193 kWh, ušteda na energentu iznosi 2735 KM za grijanje električnim kotlom, odnosno 1459 KM za grijanje na pelet:

$$C_{\tau_e} = 15193 \cdot 0,18 = 2735 \text{ [KM]} \text{ i} \quad (29)$$

$$C_{\tau_p} = 15193 \cdot 0,096 = 1459 \text{ [KM]}. \quad (30)$$

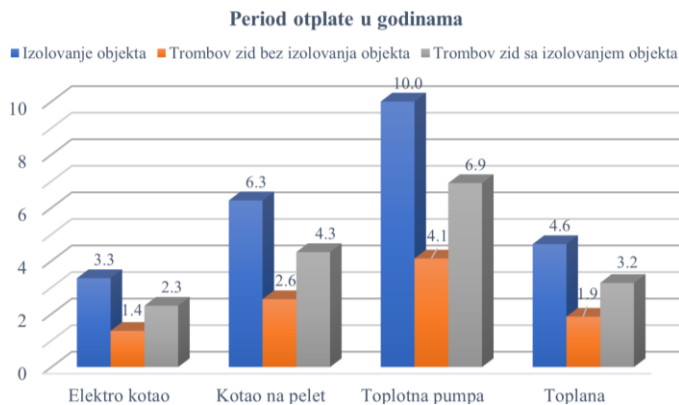
Za investiciju duplog staklenog solarnog zida, koja iznosi 3726 KM prema jednačini (31):

$$C_t = c_i \cdot A_i = 60 \cdot 62,1 = 3726 \text{ [KM]}, \quad (31)$$

mogu se definisati periodi otplate za iste energente prema sljedećim jednačinama:

$$\tau_{pe} = \frac{C_t}{C_{\tau_e}} = \frac{3726}{2735} = 1,4 \text{ [god]} \text{ i} \quad (32)$$

$$\tau_{pp} = \frac{C_t}{C_{\tau_p}} = \frac{3726}{1459} = 2,6 \text{ [god]}. \quad (33)$$



Sl. 6. Period otplate u funkciji tipa energenta i stepena izolovanosti objekta

V. ZAKLJUČAK

Za stambeni porodični objekat, lokacijski pozicioniran u Mostaru, prvenstveno su definisane karakteristike omotača i svih građevinskih slojeva. Prema trenutno važećim pravilnicima u BiH, definisana je godišnje potrebna energija za grijanje. Proračun je rađen za grejnu sezonu, to jeste od 1. oktobra do 30. aprila. Dobijena vrijednost sezonski potrebne toplote za grijanje iznosi 41517,6 kWh, to jeste 210,9 kWh/m² grijanog prostora.

Ukoliko se na objektu primijeni mjera poboljšanja u vidu izolacije spoljnih zidova, čija investicija iznosi 11450 KM, period otplate navedene investicije sa sistemom grijanja pomoću električne energije i elektro kotla iznosi 3,3 godine, to jeste sa grijanjem na pelet 6,3 godina. Naravno, navedena analiza je zahtijevala ponovljen proračun godišnje potrebne energije za grijanje.

Na osnovu pregledne analize velikog broja radova i istraživanja, definisane su jednačine za termičku analizu Trombovog zida. Na osnovu dozračene sunčeve energije, definisane korisne energije koja se odaje prostoru kao i akumulirane energije u zidu i gubitaka ka okolini, može se analizirati uticaj Trombovog zida na godišnje potrebnu energiju za grijanje. Period otplate za investiranje u solarni zid iznosi 1,4 godine sa elektro kotlom kao izvorom toplote to jeste 2,6 godina sa grijanjem na pelet kao gorivom. Na osnovu navedenog uočava se da je period otplate investicije u Trombov zid za 60% kraći od investicije u izolaciju omotača objekta.

Ukoliko se za navedeni objekat investira i u izolaciju spoljnih zidova i u Trombov zid, tada je vrijednost godišnji potrebne energije za grijanje 12473 kWh, to jeste energetska ušteda je 29045 kWh. Navedeno umanjenje u potrošnji toplotne energije daje godišnje uštede za električnu energiju ili pelet kao energente redom: 5228 KM i 2788 KM. U tom slučaju Trombov zid obezbjeđuje 41,4% potrebne energije za grijanje.

LITERATURA

- [1] X. Hong, W. He, Z. Hu, C. Wang, and J. Ji, Three-Dimensional Simulation On The Thermal Performance Of A Novel Trombe Wall With Venetian Blind Structure, *Energy and Buildings* (2014).
- [2] A. Abdeena, A. Serageldinb, M. Ibrahima, A. El-Zafarany, S. Ookawarad, and R. Muratad, Experimental, analytical, and numerical investigation into the feasibility of integrating a passive Trombe wall into a single room, *Applied thermal engineering* 154 (2019).
- [3] S. Corasaniti, L. Manni, F. Russo, and F. Gori, Numerical simulation of modified Trombe-Michel Walls with exergy and energy analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 88 (2017).
- [4] X. He, Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD, *Computers and Electronics in Agriculture* (2017).
- [5] <http://www.yourdictionary.com/trombe-wall>
- [6] M. Pupčević, Primjena reverzibilnog ciklusa centrifugalnog rashladnog uređaja za konverziju geotermalne i solarne energije u električnu, završni rad drugog ciklusa, Mašinski fakultet Banja Luka, 2016.
- [7] T. Bajc, and M.N. Todorović, CFD Analyses for Passive House with Trombe Wall and Impact to Energy Demand, *Energy and Buildings* (2014).
- [8] B.K. Koyunbaba, and Z. Yilmaz, The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels, *Renewable Energy* 45 (2012).
- [9] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske, Službeni glasnik Republike Srpske, broj 30/15.
- [10] Pravilnik o metodologiji za izračunavanje energetske karakteristike zgrada, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske, Službeni glasnik Republike Srpske, broj 30/15.
- [11] E. Kulić, Priručnik za projektovanje sistema grijanja sa riješenim primjerima, Mašinski fakultet u Sarajevu, KGH broj 4/1981.
- [12] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energijskim karakteristikama zgrada, Federalno ministarstvo prostornog uređenja, Službene novine federacije BiH, broj 81/2019, prilog E-klima.
- [13] A. Briga, A. Martins, J.B. Cunha, J.C. Lanzinha, and A. Paiva, Energy Performance of Trombe Walls: Adaptation of Iso 13790:2008(E) to The Portuguese Reality, *Energy and Buildings* 74, May 2014.
- [14] D. Lilić, Doprinos sunčevog zračenja kroz zastakljene površine bilansu toplote brodskih prostora, *Naučnotehnički pregled*, vol. L, br. 3, 2000.
- [15] I. Hernandez, J. Xaman, Y. Chavez, I. Hernandez, and R. Alvarado, Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico, *Energy* 109 (2016).
- [16] W. Li, and W. Chen, Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM-encapsulated porous heat storage Trombe-wall system, *Solar Energy* 188 (2019).
- [17] M. Lambić, Solar walls The passive solar heating, University of Novi Sad, 1999.
- [18] Đ. Kozić, B. Vasiljević, i V. Bekavac, Priručnik za termodinamiku u jedinicama SI, Mašinski fakultet u Beogradu, 2005.
- [19] O. Rejeb, H. Dhaou, and A. Jemni, Parameters effect analysis of a photovoltaic thermal collector: Case study for climatic conditions of Monastir, Tunisia, *Energy Conversion and Management*, Volume 89, 2015, Pages 409-419.
- [20] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, and J. Hensen, Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty, *Applied Thermal Engineering*, March 2013.
- [21] E. Santolinib, B. Pulvirentia, S. Bennib, L. Barbaresia, D. Torreggiani, and P. Tassarib, Numerical study of wind - driven natural ventilation in a greenhouse with screens, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017.