

primljen: 09.12.2022.
korigovan: 30.01.2023.
prihvaćen: 03.03.2023.

pregledni rad

UDK : 697.11
620.9:721

TROMBOV ZID KAO ARHITEKTONSKI ELEMENT ZA OBEZBEĐIVANJE INDIREKTNIH SOLARNIH DOBITAKA U ZGRADAMA

Dušan Randelović¹, Miomir Vasov²,
Jelena Savić³, Aleksandra Ćurčić⁴, Jelena Stevanović⁵

Rezime: Globalni ekološki problemi su dostigli velike razmere usled sve veće potrošnja energije u sektoru zgradarstva. Sa udelom od oko 40% u ukupnoj potrošnji energije ovaj sektor predstavlja veliki potencijal za rešavanje ovog problema. Sistemi pasivnog solarnog dizajna mogu na efikasan način, bez utroška energije, doprineti poboljšanju unutrašnjeg komfora. Trombov zid, kao reprezent pasivne solarne arhitekture, uz pomoć termo-akumulacione mase može doprineti smanjenju potrošnje energije za grejanje u zimskom periodu. Ovaj sistem je u upotrebi već više decenija, ali su eksperimentalna istraživanja i njegova masovnija upotreba aktuelni tek poslednjih nekoliko godina. Uporedo sa povećanjem potreba za uštedom energije, raste i aktuelnost primene pasivnih sistema. Napredne tehnologije, savremeni materijali, praćenje i kontrolisanje uticaja primenjenih sistema, omogućili su da pasivni dizajn postane sve popularniji. Upotreba pasivnih sistema postaje neminovnost, a poznavanje njihovih karakteristika i načina funkcionisanja imperativ u projektovanju.

Ključne reči: pasivni dizajn, Trombov zid, ušteda energije, održivost

TROMBE WALL AS AN ARCHITECTURAL ELEMENT FOR PROVIDING INDIRECT SOLAR GAINS IN BUILDINGS

Abstract: Global environmental problems have reached significant proportions due to the increasing energy consumption in the building sector., This sector has a great potential for solving this problem, with a share of about 40% of total energy consumption. Passive solar design systems can effectively improve internal comfort without the consumption of energy. The Trombe wall, as a representative of passive solar architecture, with the use of thermo-accumulation mass, can help in reducing the energy consumption for heating in the winter. This system has been in use for several decades, but experimental research and widespread use have only been current in recent years. In the past, little attention was paid to energy consumption, so passive systems were not as popular. With the advent of advanced materials technology, installation, monitoring, and control of the impact of applied techniques, passive design is becoming more and more popular nowadays. The use of passive systems becomes a necessity, and getting acquainted with their features and how they work is a matter of course.

Key words: Passive Design, Trombe Wall, Energy Savings, Sustainability

¹ Docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

² Vanredni profesor, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

³ Docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

⁴ Doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

⁵ Doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

1 UVOD

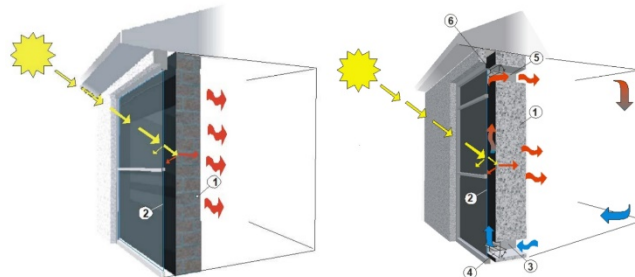
Potrošnja energije u sektoru zgradarstva je alarmantna, što za posledicu ima to da bi bez primene najefikasnijih mera za smanjenje potrošnje energije emisija štetnih gasova bila još veća. Bez obzira na to što ekološko projektovanje predstavlja koncept koji je aktuelan vekovima unazad, zelena gradnja poslednjih godina dobija sve više na značaju. Počev od analize lokalnih klimatskih karakteristika, preko adekvatne primene sistema pasivnog dizajna (Trombovog zida [1], zelenih krovova [2], dvostruke fasade [3] itd.), arhitekta u svojim projektima mogu značajno doprineti rešavanju ovog globalnog problema [4]. Predmet ovog rada je analiza sistema Trombovog zida kao predstavnika pasivne solarne arhitekture. Od kratkog istorijata, pregleda osnovnih karakteristika i preporuka za primenu konstrukcije Trombovog zida, do nekoliko primera dobre prakse, u ovom radu su date osnovne smernice za projektovanje ove konstrukcije. Na kraju je dat i kratak pregled softvera za simulaciju potrošnje energije primenom Trombovog zida.

2 ISTORIJAT, KARAKTERISTIKE I PREDNOSTI PRIMENE TROMBOVOG ZIDA

Pasivno solarno projektovanje predstavlja pravi izazov za arhitekta i doprinosi poboljšanoj energetskej efikasnosti isprojektovanih objekata. O'Brien, Kesik i Athienitis u svom radu *Solar design days: A tool for passive solar house design* [5] daju konkretne smernice za ispravno pasivno solarno projektovanje. Jedan od poznatih principa pasivnog solarnog projektovanja je Trombov zid. Trombov zid je prvi patentirao Edward S. Morse 1881. godine [6]. On je uočio potencijal iskorišćenja sunčeve energije termalnom akumulacijom toplote pomoću masivnog zida. Na ovaj način se mogu postići uštede u iskorišćenju energije za grejanje i hlađenje. Ova konstrukcija je dobila na značaju i počela da bude široko poznata zahvaljujući Francuskom inženjeru Felixu Trombu (po kome on i danas nosi ime) i francuskom arhitekti Jacques Michel-u koji su ga dodatno razvili [7], [8]. Strategije energetskej efikasne pasivne projektovanja su u velikoj meri zavisne od meteoroloških faktora, pa samim tim se od projektanta zahteva šire razumevanje klimatskih faktora [9]. U zavisnosti od klime, doba dana i spoljašnje temperature efikasnost ovog sistema može

značano da osciluje. Kako bi se ovaj sistem adaptirao različitim klimatskim uslovima i potrebama korisnika razlikujemo razne pojavne oblike Trombovog zida. Naime, Saadatian i drugi [10] navode da pored osnovne varijante (Classic Trombe wall), postoje i Zigzag Trombov zid (Zigzag Trombe wall), Vodeni Trombov zid (Water Trombe wall), Solarni Transparentni zid (Solar transwall), Solarni Hibridni zid (Solar hybrid wall), Trombov zid od faznopromenljivih materijala (Trombe wall with phase-change material), Kompozitni Trombov zid (Composite Trombe wall), Fluidni Trombov zid (Fluidised Trombe wall), Fotovoltaični Trombov zid (Photovoltaic (PV) Trombe wall).

Kako bi se omogućilo strujanje vazduha izvorno je ovaj sistem podrazumevao ventilacione otvore u donjem i gornjem delu. Ovo strujanje može biti prirodnim putem ali se ponekad obezbeđuje i prinudnim strujanjem vazduha (postavljanjem ventilatora). Ventilacioni otvori, ventilacija i izolacija su tri komponente trombovog zida koje imaju značajan uticaj na njegovu efikasnost. Akumuliranjem sunčeve energije se doprinosi grejanju, provetravanju i poboljšanom toplotnom komforu unutar prostorija. Princip funkcionisanja Trombovog zida ilustrativno je prikazan na *Slici 1*.



Slika 1 - Način funkcionisanja Trombovog zida [11]

U Trombovom zidu se mogu koristiti različiti materijali koji poseduju visoki toplotni kapacitet [10]. Visoki stepen akumulacije toplote imaju beton, kamen, zemlja, ali i voda, pa su najpogodniji za izradu ovakvih grejnih elemenata. Beton i čelik su bolji za skladištenje toplote od drveta, a čelik nije znatno superiorniji od betona ako se uzme u obzir efekat konvekcije [12]. Beton, terakota i krečnjak su najpovoljniji inercioni materijali za primenu u stanovanju: oni nude istovremeno prilično visok toplotni kapacitet skladištenja, mali utrošak energije prilikom procesa proizvodnje i nisku cenu [13]. Betonski, kameni ili zidovi od opeke, okrenuti ka strani koja je najviše izložena suncu u toku godine, služe da tokom dana akumuliraju toplotu.

Akumulirana toplota se tokom hladnijih noći emituje u prostorije. Ovaj prenos ne mora biti direktan, već se može koristiti prirodna osobina vazduha, usled koje se topliji vazduh podiže, a hladniji spušta. Položaj termoizolacije može imati veliki uticaj na potrošnju energije za grejanje i hlađenje zgrade, zbog čega je preporuka da se termička masa pozicionira sa unutrašnje strane izolacionog omotača [14].

Trombov zid je zbog osobine stakla da propušta kratkotalasno sunčevo zračenje, a da zadržava dugotalasno zračenje (koje je inače glavni nosilac toplote) funkcionalno zasnovan na efektu staklene bašte. Broj, debljina i vrsta stakala značajno utiču na performanse Trombovog zida. Efekat zastakljenja takođe zavisi i od geografskih karakteristika lokacije, kao i od orijentacije zida.

Jaber i Ajib [15] preporučuju korišćenje roletni u cilju sprečavanja prodora sunčevog zračenja u zgradu, kao i izolacionih zavesa između stakla i zida, čime bi se izbegao prenos toplote u zgradu tokom leta.

3 PRIMERI DOBRE PRAKSE

Primena Trombovog zida na školskoj zgradi Ladakha doprinosi poboljšanju unutrašnjeg komfora (*Slika 2*). Ovo je pozitivan primer primene Trombovog zida i u praksi. Jedan od nedostataka primene ovih konstrukcija svakako mogu predstavljati izuzetno mali otvori u masivnim zidovima. To za posledicu može imati i to da je u prostoriji veoma mračno i depresivno.



Slika 2 - Trombov zid na objektu za obrazovanje i kulturu Ladakha (SECMOL)

Solarni ili Trombov zid u Santa Fe-u funkcioniše tako da termička masa akumulira sunčeve zrake (*Slika 3*). U ovom slučaju betonski zid obojen crnom bojom upija maksimalnu količinu toplote. Ova konstrukcija Trombovog zida nema ventilacione otvore, ali postoje

otvori za vazduh koji pomoću konvekcije vrući vazduh prenose u životni prostor. Budući da je termička masa iza stakala, smanjeni su neželjeni toplotni gubici u zimskom periodu.



Slika 3 - Trombov zid u Santa Fe-u

Estetski aspekt nekada može da utiče na investitore i na odluku da li će primeniti ovaj sistem ili ne [16]. Rezidencijalni objekat Burger, Oregon, SAD, izgrađen 2008. godine predstavlja modernu varijantu primene ove konstrukcije (*Slika 4*). Kružni prozori iza spoljašnjeg vertikalnog staklenog portala koji je obojen u crno predstavljaju otvore na Trombovom zidu od betona. Ovo je dokaz da ova konstrukcija itekako može doprineti poboljšanju atraktivnosti zgrade. Dakle, pored termičkog komfora na ovaj način je poboljšan i vizuelni doživljaj korisnika prostora.



Slika 4 - Rezidencijalni objekat Burger, Oregon, SAD

Trombov zid je sve popularniji zbog niskih troškova ugradnje, jednostavnosti konstrukcije, minimalnog održavanja i prilagodljivosti brojnim situacijama. Trombov zid u centru za posetioce u Nacionalnom parku Zion čak 13 procenata akumulirane sunčeve energije pretvara u toplotnu, a unutrašnja temperatura zida može dostići oko 38°C (*Slika 5*).



Slika 5 - Trombov zid u centru za posetioce u Nacionalnom parku Zion

4 SOFTVERI ZA SIMULACIJU POTROŠNJE ENERGIJE

Eksperimentalna istraživanja ovih konstrukcija (Slika 6, Slika 7) [17], [18] su svakako najpouzdaniji način da se dođe do konkretnih činjenica i saznanja o funkcionisanju ovog sistema.



Slika 6 - Eksperimentalna studija termičkih karakteristika Trombovog zida



Slika 7 - Procena efikasnosti Trombovog zida u suptropskoj klimi

U praksi, međutim, često prevladava iskustveno ili intuitivno projektovanje ovih sistema. Sa pojavom i razvojem savremenih softvera ovaj problem je prevaziđen, a sve je jednostavnije i izvesnije doći do podataka i imati pouzdane pretpostavke vezane za buduće projekte [19]. Mnogobrojni savremeni softveri za energetska simulaciju omogućavaju modeliranje Trombovog zida, a pre svega tu spadaju *BLAST*, *DOE-2*, *TRNSYS*, *SUNREL*, *ESP-r*, kao i *EnergyPlus*.

Jedan od najpopularnijih programa za energetska simulaciju je svakako *EnergyPlus*. Peter Graham Ellis [20] u svojoj tezi razvija i validira model Trombovog zida u programu *EnergyPlus*. Na ovaj način je omogućeno variranje fizičkih parametara i optimalno projektovanje. Ovaj softver omogućava sveobuhvatnu analizu uz uključivanje raznih faktora poput tačno definisanih klimatskih karakteristika, konstrukcije, prisustva ljudi, osvetljenja, termičke mase, električnih uređaja, vremena korišćenja, uticaja sunčevog zračenja, zasenčenja, vetra, infiltracije itd, a sve to za tačno definisani vremenski period. Model Trombovog zida u softveru *EnergyPlus* podrazumeva uključivanje svih navedenih fenomena za zidove i prozore, što je validirano i eksperimentalno potvrđeno i u praksi [20]. U vazдушnom prostoru između stakla i masivne strukture zida dolazi do akumuliranja toplote, što se skladišti u termičkoj masi. Model Trombovog zida se zasniva na metodi toplotne ravnoteže. Ovaj metod podrazumeva sledeće pretpostavke:

- Temperature unutrašnjih površina su ujednačene
- Difuzno zračenje površina
- Vazduh koji ulazi u prostoriju se momentalno meša sa postojećim vazduhom
- Vazduh je u celoj prostoriji ujednačene temperature
- Jednodimenzionalni transfer toplote

Transfer toplote predstavlja glavnu komponentu u istraživanju ovih sistema. Kompleksnost je utoliko veća ako se uzme u obzir i efekat kondukcije kroz zid, prenosa sunčeve energije kroz staklo, razmena dugih talasa zračenjem, gubitak toplote, itd.

5 ZAKLJUČAK

Veliki broj radova ukazuje na efikasnost primene ovog sistema. Simulacije za predikciju potrošnje energije doprinose definisanju smernica za projektovanje i implementiranje ovog sistema u cilju energetske uštede [21], [22]. Sa arhitektonskog stanovišta veoma je važno uzeti u obzir i dovoljan

upad prirodne svetlosti, zatim obezbediti prijatne vizure i adekvatan ambijentalni komfor. S obzirom na to da je u projektovanju neophodno praviti razne kompromise, veoma je važno imati pregled smernica za projektovanje i odabir najoptimalnijeg rešenja.

Ograničenja koja je neophodno napomenuti i koja bi mogla biti predlog za dalja istraživanja se tiču interakcije sa objektima u okruženju, mogućim opstrukcijama od strane okolnih konstrukcija objekata, kao i sama konfiguracija terena i kompleksnost projektovanja u cilju omogućavanja svih neophodnih komfora u objektu. Promena temperature na samoj konstrukciji Trombovog zida je veoma važan parametar, pa se preporučuje detaljna analiza termodinamičkih svojstava ove konstrukcije, ali i eksperimentalna potvrda dobijenih rezultata. Nedostaci primene ovog sistema se pre svega ogledaju u ograničenju i zavisnosti od spoljašnjih klimatskih uslova (kada su u letnjem periodu temperature previsoke problem sa hlađenjem prostorija može prevazići benefite postignute u zimskom periodu). Takođe veliki problem mogu predstavljati periodi oblačnog vremena, pa ovi detalji mogu biti mesto dodatnih transmisionih toplotnih gubitaka. Niski toplotni otpor ovog sistema utiče na povećanje toplotnog fluksa, a dobitke je teško predvideti. Savesno ponašanje korisnika zgrada takođe ima veliki uticaj na potrošnju finalne energije, na šta bi se moglo uticati podizanjem ekološke svesti. Jadani način da se i sami korisnici zgrada uključe u rešavanje ovog problema jeste primena sistema koji ne bi zahtevali dodatnu potrošnju energije, a svojim funkcionisanjem bi značajno doprineli poboljšanju komfora u zgradama.

LITERATURA

[1] Randelović Dušan, Vasov Miomir, Ignjatović Marko, Bogdanović Protić Ivana, Kostić Dragan, **Impact Of Trombe Wall Construction On Thermal Comfort And Building Energy Consumption**, *Facta Universitatis Series: Architecture and Civil Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 279–292, (2018). <https://doi.org/10.2298/FUACE180302008R>

[2] Randelović Dušan, Vasov Miomir, Savić Jelena, Ćurčić Aleksandra, **Application of green roof as a model for improving the energy performance of elementary schools**, in V International Symposium for Students of Doctoral Studies in the Fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection PhIDAC 2019 – Proceedings, pp. 124–132, 2019

[3] Andjelković Aleksandar, Cvjetković Tanja, Djaković Damir, Stojanović Ivan, **The development of simple**

calculation model for energy performance of double skin façades, *Thermal Science*, vol. 16, no. suppl. 1, pp. 251–267, (2012). <https://doi.org/10.2298/TSCI120201076A>

[4] Randelović Dušan J., Vasov Miomir S., Ignjatović Marko G., Stojiljković Mirko M., Blagojević Milena B., **Improvement of the energy performance of Elementary school Ćele kula in Niš by applying passive solar design systems**, in Proceedings of the International HVAC&R Congress, vol. 49, no. 1, pp. 71–83, 2018

[5] O'Brien William, Kesik Ted, Athienitis Andreas, **Solar design days: A tool for passive solar house design**, in ASHRAE Transactions, 2014, vol. 120, no. PART 1, pp. 101–113.

[6] Morse ES, **Warming and ventilating apartments by the sun S-rays**, 1881.

[7] Mazria Edward., *The passive solar energy book: a complete guide to passive solar home, greenhouse, and building design*. Rodale Press, 1979.

[8] Denzer Anthony., *The solar house: pioneering sustainable design*. Rizzoli, 2013.

[9] Randelović Dušan, Vasov Miomir, Krstić Hristina, Ćurčić Aleksandra, Stevanović Jelena, **Determination Of Climate Characteristics As A Dominant Parameter In Building Design - Case Study The City Of Nis**, in 2nd International Conference on Urban Planning - ICUP2018, pp. 163–170, 2018

[10] Saadatian Omidreza, Sopian K., Lim C. H., Asim Nilofar, Sulaiman M. Y., **Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 6340–6351, (Oct. 2012). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.032>

[11] Szyszka Jerzy, Kogut Janusz, Skrzypczak Izabela, Kokoszka Wanda, **Selective Internal Heat Distribution in Modified Trombe Wall**, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 95, no. 4, (2017). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042018>

[12] Ma Peizheng, Wang Lin-Shu, **Effective heat capacity of interior planar thermal mass (iPTM) subject to periodic heating and cooling**, *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 44–52, (Apr. 2012). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.020>

[13] Jeanjean Anaïs, Olives Régis, Py Xavier, **Selection criteria of thermal mass materials for low-energy building construction applied to conventional and alternative materials**, *Energy and Buildings*, vol. 63, pp. 36–48, (Aug. 2013). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.047>

[14] Andjelković Bojan, Stojanović Branislav, Stojiljković Mladen, Janevski Jelena, Stojanović Milica, **Thermal mass impact on energy performance of a low, medium and heavy mass building in Belgrade**, *Thermal Science*, vol. 16, no. suppl. 2, pp. 447–459, (2012). <https://doi.org/10.2298/TSCI120409182A>

[15] Jaber Samar, Ajib Salman, **Optimum design of**

- Trombe wall system in mediterranean region**, *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1891–1898, (Sep. 2011).
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.025>
- [16] Abbassi Fakhreddine, Dimassi Narjes, Dehmani Leila, **Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations**, *Energy and Buildings*, vol. 80, pp. 302–308, (Sep. 2014).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.036>
- [17] Briga Sá Ana, Paiva Anabela, Gonçalves Lanzinha João Carlos, Cunha J. Boaventura J., **Desempenho Térmico da Parede de Trombe: Estudo Experimental**, 2012.
- [18] Krüger Eduardo, Suzuki Eimi, Matoski Adalberto, **Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location**, *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 364–372, (Nov. 2013).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.035>
- [19] Kostadinović Danka, Dimitrijević Jovanović Dragana, Randelović Dušan, Jovanović Marina, Bakic Vukman, **Integration of Building Energy Modeling (BEM) and Building Information Modeling (BIM): Workflows and Case Study**, in The 20th International Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia-SIMTERM, 2022, pp. 305–315, 2022
- [20] Ellis Peter Graham, **Development and Validation of the Unvented Trombe Wall Model in Energyplus**, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [21] Bogdanović Veliborka, Randelović Dušan, Vasov Miomir, Ignjatović Marko, Stevanović Jelena, **Improving thermal stability and reduction of energy consumption by implementing Trombe wall construction in the process of building design - the Serbia region**, in Thermal Science, 2018, vol. 22, no. 6 part A, pp. 2355–65.
<https://doi.org/10.2298/TSCI180308167B>
- [22] Randjelović Dusan, Vasov Miomir, Ignjatović Marko, Stojiljković Mirko, Bogdanović Veliborka, **Investigation of a passive design approach for a building facility: a case study**, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, (2021). <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1938761>

IZVOR SLIKA

- Slika 1: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042018>
- Slika 2: <https://permies.com/t/60432/a/45348/Trombe-wall-small-house-at-SECMOL-2016.JPG>
- Slika 3: <http://ilovecob.com/archive/trombe-wall>
- Slika 4: <http://www.dchamberlinarchitect.com/architecture-residential-BURGER.htm>
- Slika 5: <https://www.sfgate.com/homeandgarden/article/Old-idea-warm-wall-3222133.php>
- Slika 6: https://www.researchgate.net/publication/263070710_Desempenho_Termico_da_Parede_de_Trombe_Estudo_Experimental/figures?lo=1
- Slika 7: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.035>