

# ENERGETSKE POTREBE PASIVNE KUĆE SA TROMBEOVIM ZIDOM U KLIMATSKOM PODRUČJU BEOGRADA

## ENERGY DEMANDS FOR PASSIVE HOUSE WITH TROMBE WALL FOR BELGRADE WEATHER CONDITIONS

TAMARA BAJC,  
Aerprojekt, Beograd,  
MAJA TODORVIĆ,

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

*U radu je analizirana isplativost pasivne gradnje, sa Trombeovim zidom, u klimatskom području Beograda. Posmatrana su tri objekta iste veličine i geometrije, od kojih jedan pripada standardnom tipu gradnje, drugi je pasivna kuća bez Trombeovog zida i treći objekat predstavlja pasivnu kuću sa Trombeovim zidom. Računate su potrebe za energijom za grejanje i klimatizaciju navedenih objekata i izvršeno je njihovo poređenje. Za postizanje optimalnih temperatura u objektu, u zimskom i prelaznom periodu, primenjena je odgovarajuća regulacija strujanja vazduha iz prostora Trombeovog zida i prostorija u objektu. Na kraju je sprovedena tehnno-ekonomska analiza ukupnih troškova, koja uključuje investicione troškove izgradnje objekata, instalacija u njima i eksploatacione troškove, za sva tri objekta.*

*The paper deals with a cost-effectiveness analysis of a passive house construction with a Trombe wall for Belgrade weather conditions. The analysis was performed by comparing three houses of the same size and geometry: a standard-build house type, a passive house, and a passive house with a Trombe wall. For these three types energy demands for heating and air-conditioning were calculated. To achieve the optimal indoor temperature in the building in winter and transitional period, the proper regulation of air flow the from Trombe wall air space into the rooms was applied. Finally, a techno-economic analysis of total expenses, was done, including investment for house building and HVAC equipment, and operating costs for all the three house types.*

**Ključne reči:** pasivna kuća; Trombeov zid; energetske potrebe; klimatski uslovi Beograda; ekonomska isplativost

**Key words:** passive house; Trombe wall; energy demands; Belgrade weather data; profitability

## Uvod

U vremenu kada je potrošnja energije sve veća, a količina fosilnih goriva ograničena, potrebno je konvencionalne sisteme grejanja i hlađenja zameniti sistemima koji koriste obnovljive izvore energije i koji, u poređenju sa fosilnim gorivima, ne zagađuju životnu sredinu.

Cilj ovog rada je analiza isplativosti pasivne gradnje, sa Trombeovim zidom, za klimatsko područje Beograda. Posmatrana su tri objekta (pojedinačna, stambena kuća) – iste površine  $170 \text{ m}^2$ : jedan je standardne gradnje, prosečno izolovan, sa sistemom dvocevnog grejanja na gas; drugi je pasivna gradnja, sa omotačem konstrukcije kao za objekat korišćen u radu, pri čemu je južni zid iste konstrukcije kao i ostali spoljni zidovi i sa grejačem za nadoknađivanje gubitaka toplote; treći objekat je pasivna kuća sa Trombeovim zidom, na južnoj strani.

Za zimski i prelazni period izračunati su gubici toplote za pasivnu kuću sa Trombeovim zidom, pri čemu su korišćene časovne vrednosti spoljašnje temperature vazduha. Korišćenjem simulacionog programa za dinamičko praćenje termičkog ponašanja prostorija, razvijenog na Katedri za termotehniku Mašinskog fakulteta u Beogradu, dobijeni su rezultati toplotnog opterećenja od Trombeovog zida za zimski i prelazni period. Takođe je dobijeno temperatursko polje unutar Trombeovog zida, kao i tok temperature vazduha u sloju između stakla i spoljašnje površine Trombeovog zida. Na osnovu dobijenih podataka o toplotnom efektu Trombeovog zida, računat je tok gubitaka toplote za tri različita karakteristična dana: zimski projektni, prosečan januarski dan i prosečan martovski dan. Takođe je izračunato toplotno opterećenje za letnje projektne uslove.

Na osnovu dobijenih rezultata, urađena je analiza investicionih i eksploatacionih troškova za navedena tri objekta.

### Koncept “pasivne kuće” i Trombeov zid

Koncept savremene pasivne kuće, po definiciji, podrazumeve građevine bez sistema za grejanje i hlađenje konvencionalnim izvorima energije. Da bi se stambena kuća mogla izgraditi bez konvencionalnog sistema grejanja, potrebno je gubitke toplote svesti na manje od 10 do  $20 \text{ kWh/m}^2$  godišnje. To je moguće postići korišćenjem materijala sa prosečnim koeficijentom prolaženja toplote nižim od 0,1 do  $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , a za staklene površine nižim od  $0,80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

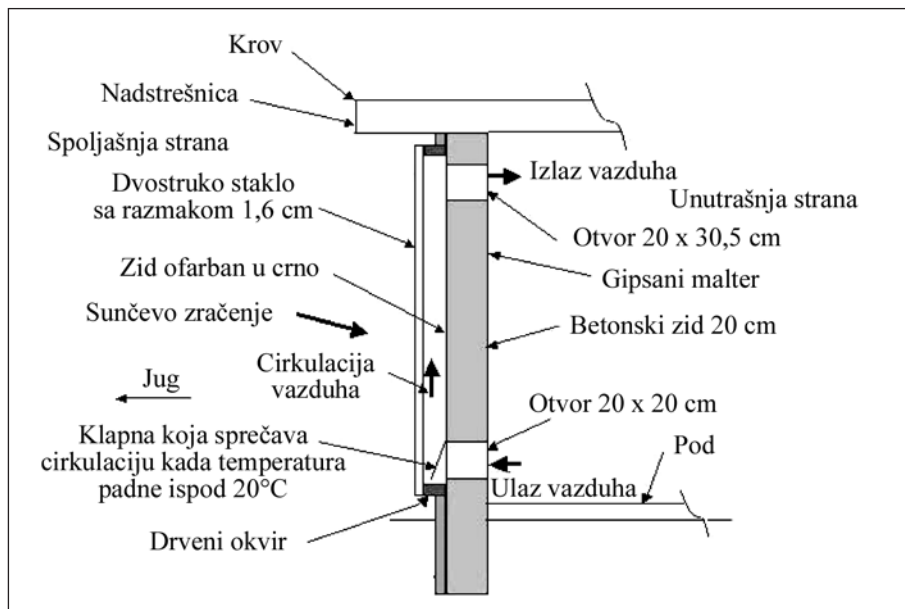
Projekat pasivne kuće se svodi na: izolovanje objekta, gradnju bez toplotnih mostova, zaptivenost procepa od prodiranja spoljašnjeg vazduha, ventilaciju sa rekupeacijom toplote, specijalno trostruko staklo i korišćenje obnovljivih izvora energije za nadoknadu toplotnih gubitaka.

Koeficijenti prolaženja toplote za spoljne zidove, podove i tavanice kreću se oko  $0,1$  do  $0,15 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  za centralnoevropsku klimu. Tako su transmisioni gubici toplote praktično zanemarljivi, a unutrašnja površina zidova ima temperaturu koja je približno jednaka temperaturi vazduha u prostoriji, čime se postižu izvrsni uslovi ugodnosti. Da bi se postigla vazдушna nepropusnost, koristi se polietilenska folija, koja se stavlja preko ploča pre njihovog spajanja, a onda se naknadno spaja, tako da formira nepropustan sloj. Prozori su od trostrukog stakla, male emisivnosti, sa rastojanjem 2 puta po  $15 \text{ mm}$  između stakala u kome se nalazi argon. Tako se, za ovakav prozor, dobija prosečan koeficijent prolaženja toplote  $0,83 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  [8]. Da bi se postigla konstrukcija

bez toplotnih mostova, između pretfabrikovanih, drvenih, elemenata zida i okvira prozora postavljen je sloj izolacije. Za razumnu debljinu konstrukcije potrebno je koristiti prilično dobre izolacione materijale. Ako se koriste klasični izolacioni materijali (mineralna vuna, polistirol, celuloza), debljina konstrukcije je oko 30 cm, a korišćenjem poliuretanske pene on se može smanjiti na 20 cm, ali je takva konstrukcija skuplja.

Za standarde pasivne gradnje nije važno samo dobro izolovati, već je potrebno da izolacija bude bez toplotnih mostova, odnosno da je nepropusna za vazduh na svim spojevima.

Trombeov zid je zid na sunčanoj strani, južni zid, koji je sagrađen od materijala koji se ponašaju kao termoakumulacioni, sa vazдушnim prostorom između stakla i zida, specijalnim staklom i otvorima, sa klapnama, u zidu i staklu (slika 1). Sastoji se od vertikalnog zida koji je izgrađen od materijala kao što su kamen, beton, nepečena cigla, debljine 10 cm do 41 cm, koji je sa spoljašnje strane ofarban tamnom bojom ili je na njega nalepljena specijalna crna obloga; apsorbuje toplotu i zastakljen je. Između apsorpcionog materijala i stakla je razmak (5–20 cm) u kome cirkuliše vazduh. Na vrhu i dnu zida su ventilacioni otvori, tako da sobni vazduh cirkuliše između zida i stakla danju, odnosno kada je temperatura vazduha u tom prostoru dovoljno visoka da zagreva prostoriju. Sunčevi zraci prolaze kroz staklo i zagrevaju zid i vazdušni sloj između stakla i zida. Hladniji vazduh iz prostorije struji kroz otvore, zagreva se i vraća, kroz gornje otvore u zidu, u prostoriju. Otvori imaju jednosmerne klapne koje služe da onemogućće strujanje sobnog vazduha noću, ili u periodu kada je temperatura u prostoru između stakla i zida niža od unutrašnje projektne temperature.



Slika 1. Konstrukcija Trombeovog zida

U radu je razmatrana konstrukcija Trombeovog zida, koja pored svega što je do sada navedeno, ima i otvore u staklu, sa klapnama koje služe da se zid hladi u perio-



Grejanje pasivne kuće se ostvaruje Trombeovim zidom. Detaljnim proračunom došlo se do podataka na osnovu kojih se vidi da su gubici toplote u zimskom periodu toliko mali, zahvaljujući odličnoj izolaciji objekta i visoko kvalitetnim prozorima, da su dobici toplote od sunčevog zračenja koje apsorbuje Trombeov zid dovoljni da se nadoknade gubici toplote.

### Proračun energetske potrebe

Za detaljan proračun dobitaka toplote od Trombeovog zida u zimskom periodu, korišćen je program za dinamičko praćenje termičkog ponašanja prostorije [6], koji je razvijen na Katedri za termotehniku Mašinskog fakulteta u Beogradu i napisan u programskom jeziku C; i radi pod operativnim sistemom "Windows". Program se zasniva na bilansnim jednačinama za svaki element prostorije. Program je modifikovan za potrebe proračuna Trombeovog zida u zimskom periodu.

U glavnom programu vrši se izračunavanje temperaturnog polja u Trombeovom zidu: temperature vazduha između stakla i jezgra kao i kroz akumulaciono jezgro. Na osnovu bilansnih jednačina i izračunatih i usvojenih koeficijenata i zadatih početnih uslova, računaju se ukupne količine toplote.

Pri proračunu su usvojene sledeće pretpostavke:

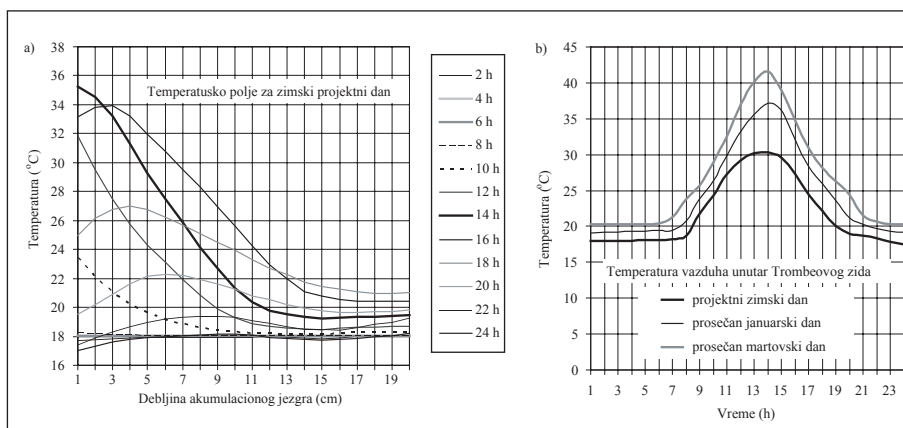
- položaj kuće je otvoren: nema objekata u blizini koji bi pravili senku i zaklanjali kuću od direktnog sunčevog zračenja;
- objekat pripada lakom tipu gradnje  $M < 300 \text{ kg/m}^2$  poda;
- temperatura vazduha u svakoj tački zapremine prostorije je jednaka (osim temperature u graničnim slojevima, gde se odvija konvekcija);
- zanemaruje se razmena toplote kroz okvir staklenog dela Trombeovog zida;
- emisivnost spoljašnje površine Trombeovog zida je visoka i iznosi 0,98;
- strujanje vazduha kroz otvore na Trombeovom zidu odvija se prirodnom konvekcijom, pri čemu brzina strujanja vazduha ne prelazi 0,5 m/s, odnosno ostvareni protok ne prelazi 100 m<sup>3</sup>/h;
- sa spoljašnje strane akumulacionog jezgra nalazi se 15 cm vazdušnog prostora, pa se sa te strane razmenjuje toplota konvekcijom i sunčevim zračenjem kroz staklo, a sa unutrašnje strane konvekcijom na sobni vazduh i zračenjem akumulisane toplote iz zida.

Za analizu termičkog ponašanja pasivne kuće sa Trombeovim zidom korišćeni su meteorološki podaci za 4 karakteristična dana: zimski projektni, prosečan januar-ski, prosečan martovski i letnji projektni dan.

Na slici 3 prikazani su dijagrami promene temperaturnog polja unutar akumulacionog jezgra Trombeovog zida za zimski projektni dan (sl. 3a) i promena temperature vazduha u sloju između stakla i akumulacionog jezgra za 3 različita dana (sl. 3b).

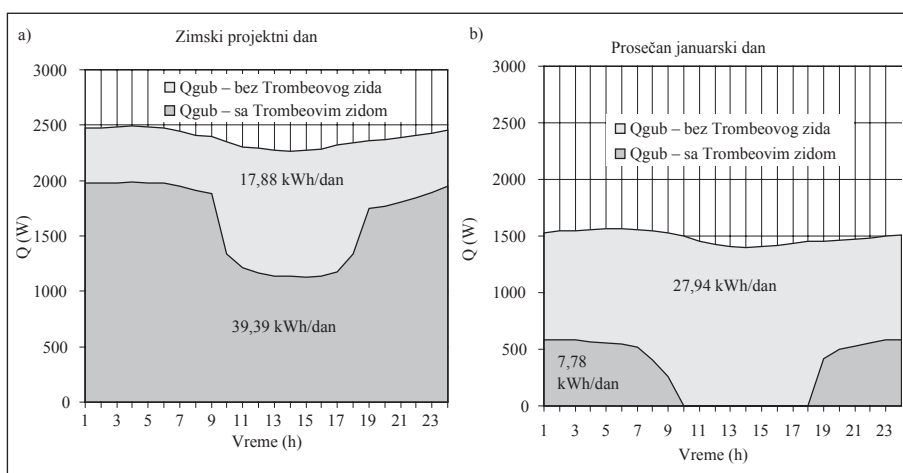
Temperatura na spoljašnjoj strani jezgra zavisi direktno od sunčevog zračenja i vidi se da je najviša upravo u satu u kom je intenzitet sunčevog zračenja najveći (14 h). Kako debljina jezgra raste, od spoljašnje ka unutrašnjoj strani, tako temperatura unutar jezgra opada, dostižući vrednosti koje se kreću od 18°C do 21°C na unutrašnjoj strani zida.

Na osnovu temperature vazduha unutar Trombeovog zida, koja je prikazana na slici 3b, vrši se otvaranje i zatvaranje klapni K1, kojima se reguliše temperatura vazduha u prostoriji.



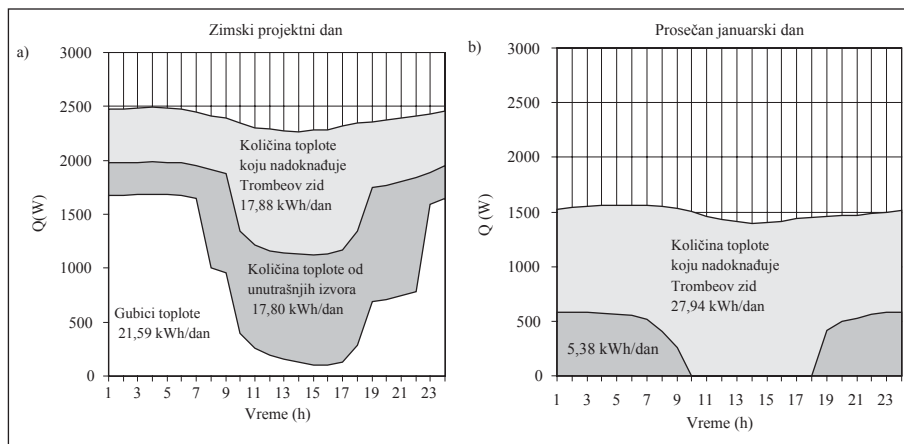
Slika 3. Temperatursko polje u akumulacionom jezgru (a) i promena temperature vazduha u sloju između stakla i akumulacionog jezgra (b)

Dijagramima na slici 4 prikazani su dnevni gubici toplote za pasivnu kuću bez Trombeovog zida i sa njim, gde se jasno može uočiti efekat toga zida. Za zimске projektne uslove, uz pravilan rad klapni K1, Trombeov zid “neutrališe” 31,2% gubitaka toplote, dok je za prosečan januarski dan taj rezultat čak 78,2%. Za prelazni period, odnosno prosečan martovski dan, Trombeov zid u potpunosti nadoknađuje gubitke toplote. Klapne K1 omogućavaju strujanje vazduha između prostora unutar Trombeovog zida i prostorije. Stujanje se sprečava tokom noći, kada nema sunčevog zračenja i kada je temperatura vazduha unutar Trombeovog zida niža od temperatura u prostoriji, ali takođe i tokom dana, kada su najmanji gubici toplote, a izraženo sunčevom zračenjem. Zatvaranjem klapni K1 tokom dana može se sprečiti pregrevanje prostorije i ujedno smanjiti hlađenje akumulacionog jezgra.



Slika 4. Gubici toplote i efekat Trombeovog zida za zimski projektni dan (a) i prosečan januarski dan (b)

Međutim, ako bi se u razmatranje uvelo i toplotno opterećenje od unutrašnjih izvora, od ljudi i osvetljenja, koji realno postoje, onda je gubitak toplote u zimskom periodu sveden na minimum, odnosno tokom prosečnog januarskog dana nema gubitaka toplote, što se vidi na dijagramu na slici 5.



Slika 5. Gubici toplote i efekat Trombeovog zida uzimajući u obzir toplotno opterećenje od unutrašnjih izvora: za zimski projektni dan (a) i prosečan januarski dan (b)

Proračunom toplotnog opterećenja za letnje projektne uslove, utvrđeno je da najveće toplotno opterećenje potiče upravo od Trombeovog zida, i predstavlja cca 60% ukupnog toplotnog opterećenja, a ostatak se odnosi na unutrašnje i spoljne toplotne izvore.

Dobici toplote kroz omotač (ne računajući južni zid) veoma su mali zbog pasivne gradnje i niskih vrednosti koeficijenata prolaženja toplote. Južni zid (Trombeov zid) je masivan betonski zid debljine 20 cm, sa premazom crne boje na spoljašnjoj strani, velike akumulacione moći i bez izolacije, pa je u letnjem periodu on uzrok najvećeg dela toplotnog opterećenja objekta od spoljašnjih izvora toplote.

Da bi se u letnjem periodu sprečilo pregrevanje zida, klapne K2, u staklu, na spoljašnjoj strani Trombeovog zida, moraju biti uvek otvorene, a klapne K1 na unutrašnjoj strani zida, uvek zatvorene. Time se postiže cirkulacija spoljašnjeg vazduha u prostoru između stakla i akumulacionog jezgra i sprečava pregrevanje zida. U toku dana, temperatura u tom prostoru će biti nešto viša od spoljašnje temperature (za proračun je usvojena temperatura vazduha za 2°C viša od spoljne projektne temperature), a u toku noći, spoljašnja temperatura će biti za koji stepen niža, pa će spoljašnji vazduh hladiti zid.

Regulacija klapnama nije dovoljna da se objekat zaštiti od pregrevanja leti, jer je Trombeov zid velike akumulacione moći i bez izolacije. Zato je neophodno štiti zid od direktnog sunčevog zračenja i nadstrešnicom i specijalnim zastorima, koji sa spoljašnje strane štite zid duž čitave njegove površine.

### Analiza investicionih i eksploatacionih troškova

Na osnovu cene građevinskog materijala na tržištu, došlo se do podatka da je za jednu pasivnu kuću, površine 170 m<sup>2</sup>, potrebno oko 20 000 € više nego za standar-

dnu kuću u Beogradu, iste površine i to samo za građevinski deo, a za centralni sistem vazdušnog grejanja i ventilacije je potrebno oko 5000 €. Za pasivnu kuću sa Trombeovim zidom, iste površine, potrebno je oko 20 000 € više nego za standardnu kuću u Beogradu, za celokupan omotač, bez Trombeovog zida, za koji je potrebno uložiti oko 9 000 €, za materijal i gradnju, računajući celokupan zid, nadstrešnicu i zastore.

Za pasivnu kuću bez Trombeovog zida, kao i pasivnu kuću sa njim, potrebe za hlađenjem tokom leta mogu zadovoljiti rashladni uređaji tipa „split sistema“ ukupnog rashladnog učinka od oko 5 kW (2 unutrašnje jedinice  $Q_{hl} = 2,5$  kW,  $Q_{gr} = 3,2$  kW). Za kuću standardnog tipa gradnje toplotno opterećenje tokom leta je znatno veće, pa potreban rashladni učinak iznosi oko 20 kW (6 unutrašnjih jedinica  $Q_{hl} = 3,5$  kW,  $Q_{gr} = 4,2$  kW).

Ali za standardnu gradnju je potrebno uložiti dodatno za sistem dvocevnog toplovodnog grejanja na gas, s obzirom da split sistemi koji rade u režimu toplotne pumpe mogu zadovoljiti potrebe za grejanjem u prelaznim periodima, ali ne i u zimskim uslovima, pogotovo onim koji su bliski projektnim. Investicioni troškovi uvođenja sistema toplovodnog grejanja na gas iznose: 1 200 € priključak na gas, 300 € unutrašnja gasna instalacija do gasnog bojlera, 750 € kombinovani gasni bojler, 150 € montaža i puštanje u rad, 4 450 € grejna tela i cevna mreža sa armaturom, 160 € dimnjak – što je ukupno 7 000 €.

Za standardnu gradnju i područje Beograda, korišćeni su podaci JP „Srbijagas“, za potrošnju gasa po  $m^2$  površine poda kuće, za period od 2000. do 2004. godine i dobijena je prosečna potrošnja  $3630 (m^3 \text{ gasa})/m^2$ , odnosno za  $170 m^2$  dobija se vrednost od 1320 €/god [7]. Za sistem ventilacije sa grejačem, za pasivnu kuću bez Trombeovog zida, potrebno je utrošiti oko 80 €/god. za električnu energiju.

Trombeov zid nadoknađuje sve gubitke toplote u prelaznom periodu, a u zimskom režimu nadoknađuje oko 78% za prosečan januarski dan, odnosno oko 30% za projektni dan, ne računajući dobitke toplote od unutrašnjih izvora. Ali u letnjem periodu Trombeov zid pravi 60% ukupnog toplotnog opterećenja objekta, pa je u časovima maksimalnog sunčevog zračenja objekat potrebno hladiti. Ako koristimo split sistem, nekih 4–5 h dnevno, za tri meseca ćemo utrošiti oko 53 €, odnosno imamo dodatni trošak od 53 €/god. za hlađenje objekta.

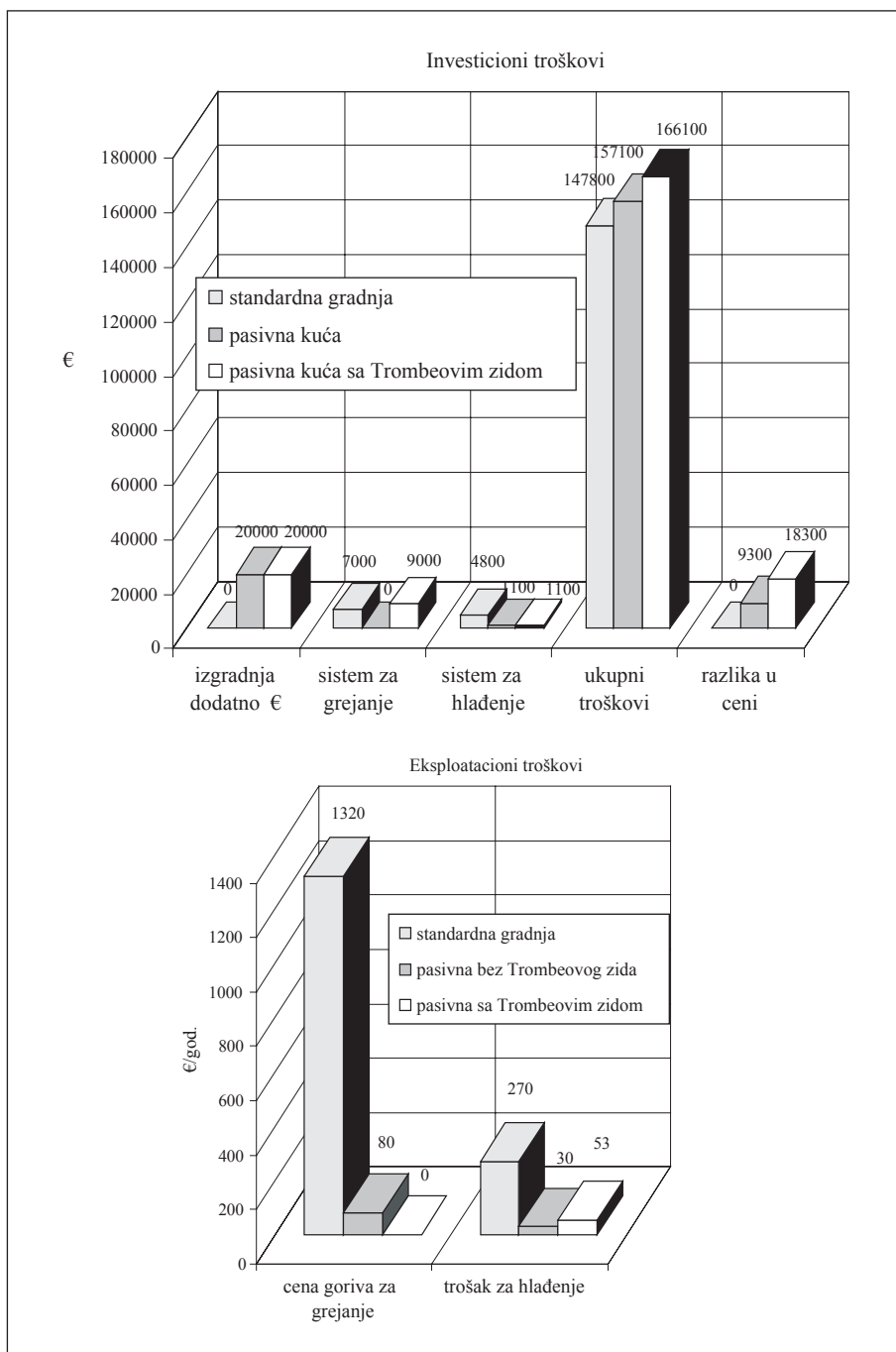
Na slici 6 su uporedni dijagrami investicionih i eksploatacionih troškova.

Vidi se da je za pasivnu kuću sa Trombeovim zidom potrebno uložiti najviše novca, ukupno oko 18.300 € više nego što je potrebno za standardnu gradnju, ali je ušteda 1320 €/god. za grejanje; takođe nije potrebno nikakvo dodatno održavanje sistema za grejanje, a 217 €/god. se uštedi za hlađenje, tako da se ovakva kuća isplati za cca *dvanaest godina*. Zbog toga što Trombeov zid predstavlja dodatno toplotno opterećenje u letnjem periodu, kuću je potrebno hladiti, ali pošto je kuća pasivna, dobici toplote kroz omotač, ne računajući Trombeov zid, veoma su mali, pa se za hlađenje ove kuće utroši znatno manje novca nego što je potrebno za običnu kuću, standardno izolovanu, u području Beograda.

## Zaključak

Uporedna analiza investicionih i eksploatacionih troškova za pasivnu kuću sa Trombeovim zidom koja je poređena sa pasivnom kućom bez Trombeovog zida, kao i sa standardnom kućom u Beogradu, pokazala je da će se pasivna kuća sa Trombeovim zidom isplatiti za cca dvanaest godina. Potreba za hlađenjem je računata poseb-





*Slika 6. Uporedni dijagram investicionih i eksploatacionih troškova*

no; upoređivana su ova tri objekta sa split sistemima i pokazalo se da kuća standardne gradnje troši najviše energije za hlađenje jer je najslabije izolovana. Pasivna kuća bez Trombeovog zida troši najmanje električne energije zbog najbolje izolacije i pasivne gradnje. Pasivna kuća sa Trombeovim zidom troši 53 €/god. na električnu energiju za rad split sistema, pri čemu nije razmatran uticaj pasivne noćne ventilacije kuće.

Zaključak rada je da Trombeov zid nije najbolje rešenje za klimatsko područje Beograda, zbog velikog broja sunčanih časova i visoke spoljne temperature u letnjem periodu, ali pasivna gradnja predstavlja značajan doprinos uštedi energije i očuvanju životne sredine, posebno ako se kombinuje sa korišćenjem obnovljivih izvora energije. Korišćenje obnovljivih izvora energije je od velikog značaja u vremenu kada su zalihe fosilnih goriva u svetu sve manje, a sa druge strane korišćenje fosilnih goriva je jedan od glavnih izazivača efekta staklene bašte i zagađenja životne sredine.

### Literatura

- [1] **Đorović, B.**, *Projektovanje postrojenja za centralno grejanje*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2005.
- [2] **Đorović, B.**, *Klimatizacija*, SMEITS, Beograd, 2005.
- [3] **Reknagel, H., E. Šprenger, E. Šramek, Čeperković,** *Grejanje i klimatizacija*, Interklima, Vrnjačka Banja, 2004.
- [4] **Kozić, Đ., B. Vasiljević, V. Bekavac,** *Priručnik za termodinamiku*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2005.
- [5] **Đorović, M.**, *Dinamičko modeliranje termičkog ponašanja model-prostorije sa aspekta uticaja nameštaja*, magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [6] **Đorović, M.**, *Optimizacija potrošnje energije klimatizacionog postrojenja primenom noćne ventilacije*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007.
- [7] **Bajc, T.**, *Energetske potrebe pasivne kuće sa Trombeovim zidom za klimatsko područje Beograda*, diplomski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2009.
- [8] <http://www.passivhaustagung.de>
- [9] <http://earth-www.larc.nasa.gov>
- [10] <http://ourworld.compuserve.com/homepages/dacPc/solacalc.htm>
- [11] <http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Trombe-wall>
- [12] <http://www.scanhome.ie>
- [13] <http://www.topic-doors.com>
- [14] [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE\\_trombe\\_wall](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_trombe_wall)
- [15] <http://www.gaisma.com>
- [16] **Psarompas, A.**, *Solarwall energy performance assessment*, Department of Mechanical Engineering, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, 2001.
- [17] **Feist, W., S. Peper, O. Kah, M. Oesen,** *Climate Neutral Passive House Estate in Hannover-Kronsberg: Construction and Measurement Results*, Passivhaus Institut, Hannover, 2001.

kgH