

ANALIZA POTROŠNJE ENERGIJE STAMBENOG OBJEKTA KORIŠĆENJEM ČASOVNIH SIMULACIJA

ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF A RESIDENTIAL BUILDING USING HOURLY SIMULATIONS

Jaško TAMINDŽIĆ,

Fabrika kartona Umka, Srbija, jasko.tamindzic@gmail.com

Milica TUCOVIĆ,

Ateko d.o.o, Beograd, Srbija, milica.tucovic98@gmail.com

Aleksandra SRETENOVIĆ DOBRIĆ,

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, asretenovic@mas.bg.ac.rs

Uroš MILOVANČEVIĆ

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, umilovancevic@mas.bg.ac.rs

Vladimir ČERNICIN

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, vcernicin@mas.bg.ac.rs

S obzirom na to da se u domaćinstvima u Srbiji najveća količina energije troši na zadovoljavanje toplotnih potreba, cilj ovog rada je poređenje troškova grejanja različitih izvora toplote na primeru porodične kuće u Beogradu. Analizirani su kotao na električnu energiju, gasni kondenzacioni kotao i toplotna pumpa vazduh-voda. Za određivanje troškova grejanja su korišćene trenutno važeće cene električne energije i gasa u Srbiji. Prikazano je i poređenje potrošnje primarne energije, kao i emisije CO₂ za izabrane slučajeve.

Ključne reči: električni kotao, gasni kondenzacioni kotao, toplotna pumpa, energetska efikasnost

The largest amount of energy in households in Serbia is being spent for heating needs. Therefore, the main idea of this paper is to compare the heating bills for a residential building in Belgrade using various energy sources. Electric boiler, gas fired condensing boiler and air to water heat pump are analyzed. For calculating expences, the current electricity and gas rates in Serbia have been used. For selected cases, both primary energy use and CO₂ emission have been compared.

Key words: electric boiler, gas condensing boiler, heat pump, energy efficiency

I. Uvod

Tokom poslednjih godina svedoci smo dva velika energetska problema koji pogađaju planetu. Prvi je nedostatak energije i nesigurnost u njenom snabdevanju, a drugi se odnosi na zagađenje okoline, kao i klimatske promene koje su uzrokovane neracionalnom i često prekomernom potrošnjom energije. Ono što se može zaključiti iz brojnih istraživanja i projekcija je to da će potrebe za energijom i u narednom periodu biti u usponu. Raspoloživost tradicionalnih tj. fosilnih goriva iz godine u godinu će se smanjivati, a njihova cena će rasti, što jasno upućuje na to da bi udeo obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji energije morao da se poveća. Smanjenje emisije CO₂, i pored toga što je rast emisije donekle usporen u poslednjih 20 godina unapređenjem energetske efikasnosti i npr. promenom goriva koja se koriste, mora ostati imperativ. Takođe, smanjenje emisije CO₂ je ključno kako bi se ispoštovao dogovor iz Pariskog sporazuma i da bi se izbegli pogubni efekti po životnu sredinu koji prate klimatske promene.

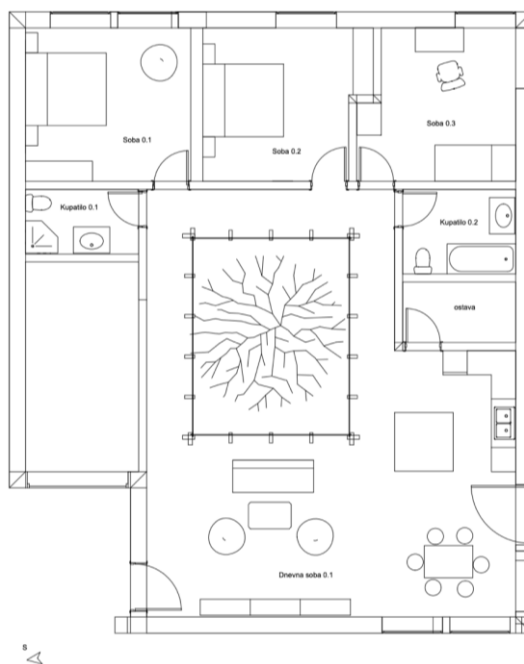
S obzirom da se najveći deo potrošnje energije u stambenim zgradama u Srbiji odnosi na „pokrivanje“ potreba za grejanjem (oko 60%), u ovom radu su analizirani troškovi jednog porodičnog objekta u Beogradu za grejanje. Uzimajući u obzir da je prosečna potrošnja toplote za stambene objekte u Srbiji oko 170 kWh/m² [1] jasno je da u ovoj oblasti postoji značajan potencijal za ostvarivanje ušteta. Pre svega je potrebno smanjenje potreba za grejanjem, a zatim i korišćenje efikasnih sistema, čime bi se potrošnja energije značajno smanjila. Za postojeći objekat u Beogradu ispitana je mogućnost korišćenja tri izvora toplote: gasni kondenzacioni kotao, električni kotao (tj. kotao sa elektro-otporničkim grejačima) i toplotna pumpa vazduh-voda. U zgradama u Srbiji se kao izvor toplote najčešće koriste lokalne peći na

čvrsta goriva (50%), zatim daljinsko grejanje (14%), električna energija (14%), lokalne kotlarnice (12%) i prirodni gas (10%) [1].

Za nove objekte, ili objekte za koje je planirana rekonstrukcija, često se kao moguća rešenja sistema za grejanje razmatraju kotlovi na gas, električnu energiju ili toplotne pumpe. Upravo zbog toga je na ovom objektu sprovedena detaljna analiza troškova, primenom časovnih simulacija potrošnje energije. Određivanje potrošnje energije je ključno kako bi se adekvatno mogla porediti različita rešenja. Modeli za određivanje potrošnje energije se mogu podeliti u tri grupe: „white box” modeli, „black box” i „grey box” modeli [1]. „Black box” modeli, odnosno modeli „crne kutije” se primenjuju kada je dostupna značajna baza podataka dobijena merenjem. Ovi modeli se zasnivaju na statističkim metoda, koje često podrazumevaju i primenu veštačke inteligencije. Iako se oni odlikuju visokom tačnošću u predviđanju potrošnje, neophodno je poznavanje (i merenje) ulaznih (meteorološki podaci, karakteristike objekta, itd.) i izlaznih veličina (potrošnja energije), što nije uvek moguće. Pritom, fizikalnost procesa nije vidljiva, zbog čega su i dobili naziv „crne kutije”. „White box” modeli se svode na numeričko rešavanje jednačina, pri čemu tačnost rezultata zavisi od tačnosti unetih podataka. Njihov nedostatak je to što je za razvoj ovih modela neophodno detaljno poznavanje svih karakteristika objekta, sistema, kao i ponašanje korisnika. Za određivanje potrošnje ovim pristupom na tržištu je dostupan veliki broj programskih paketa kao što su EnergyPlus, IES, Trnsys, HAP, itd. U ovom radu je korišćen softver Hourly Analysis Program (HAP) koji je razvio Carrier [2]. Modeli „sivih kutija” predstavljaju kombinaciju „white box” i „black box” modela kao pokušaj prevazilaženja njihovih nedostataka.

II. Analizirani objekat

Za analizu potrošnje energije za grejanje izabrana je porodična kuća u Beogradu koja se sastoji iz prizemlja i jednog sprata sa kosim krovom. Na svakom spratu se nalaze dnevna soba, kuhinja, tri spavaće sobe, dva kupatila i ostave, dok je mašinska sala smeštena u prizemlju.



Slika 1. Osnova prizemlja analiziranog objekta

Sastav spoljašnjeg zida postojećeg objekta dat je u tabeli 1. Koeficijent prolaza toplote spoljašnjeg zida iznosi $U=0,325 \text{ W/m}^2\text{K}$, što je u skladu sa zahtevima Pravilnika o energetske efikasnosti zgrada [3], pri čemu je maksimalna dozvoljena vrednost za postojeće objekte $U_{max}=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. [3]

Tabela 1. Sastav spoljašnjeg zida objekta

Sastav zida	Debljina sloja (mm)	Gustina ρ (kg/m ³)	Otpor prolaza toplote R (m ² K/W)
Gipsana ploča	16	800,9	0,0986
Betonski blok	203	977,1	0,1957
Izolacija	50	32,0	2,4459

Koeficijent prolaza toplote unutrašnjeg zida iznosi $U=1,396 \text{ W/m}^2\text{K}$. Postojeći prozori na analiziranom stambenom objektu su PVC sa dvostrukim staklom, dimenzija $1,7 \times 1,2 \text{ m}$, čiji koeficijent prolaza toplote iznosi $U=2,59 \text{ W/m}^2\text{K}$. Prema [xx] prozori na postojećim objektima moraju imati koeficijent prolaza toplote jednak ili niži od maksimalno dozvoljenog $U_{max}=1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, pa bi prilikom naredne rekonstrukcije, sanacije ili adaptacije objekta bilo neophodno i zameniti prozore [3]. Koeficijent prolaza toplote krova je $U=0,518 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabela 2. Sastav krova objekta

Sastav zida	Debljina sloja (mm)	Gustina ρ (kg/m ³)	Otpor prolaza toplote R (m ² K/W)
Akustična ploča	19	480,6	0,315
Betonski blok	51	2242,6	0,029
Izolacija	51	91,3	1,173
Paropropusna folija	10	1121,3	0,050
Crep	13	881,0	0,008

A. Proračun gubitaka toplote i toplotnog opterećenja

Proračun gubitaka toplote i toplotnog opterećenja sproveden je prema ASHRAE standardu, korišćenjem softvera HAP [2]. Za dimenzionisanje elemenata sistema korišćeni su projektni klimatski parametri, pri čemu je spoljna projektna temperatura u zimskom periodu -12,1°C, dok je temperatura po vlažnom termometru -13°C, za letnji period spoljna projektna temperatura iznosi 33 °C, a po vlažnom 21,7°C. S obzirom da u drugom delu rada analizirana i mogućnost primene toplotne pumpe vazduh-voda za hlađenje objekta u letnjem periodu, izabran je vodeni sistem sa ventilator konvektorima. Primena niskotemperaturskih režima za grejanje omogućava korišćenje efikasnijih izvora toplote, kao što su toplotna pumpa i gasni kondenzacioni kotao. Predviđeno je da sistem za grejanje radi (postizuje unutrašnje projektne temperature, tabela 3) u periodu 08-22 h, dok su unutrašnje temperature u noćnom režimu nešto niže (18 °C). Gubici toplote i toplotno opterećenje su prikazani u tabeli 3. S obzirom da je u drugom delu rada određena potrošnja energije za hlađenje, izračunato je i toplotno opterećenje objekta. Ukupni toplotni gubici za posmatrani objekat površine 173 m² iznose 16 kW.

Tabela 3. Toplotni gubici i toplotno opterećenje po prostorijama

Naziv Prostorije	Površina prostorije (m ²)	Zapremina prostorije (m ³)	Unutrašnja projektna temperatura za zimske/letnje uslove (°C)	Toplotni gubici (kW)	Ukupno toplotno opterećenje (kW)
0.1 dnevna soba	52,6	142,0	20/26	4,5	3,6
0.1 kupatilo	2,9	7,8	22/-	0,3	-
0.2 kupatilo	3,5	9,5	22-	0,3	-
0.1 soba	9	24,3	20/26	0,9	0,9
0.2 soba	9	24,3	20/26	0,8	0,6
0.3 soba	9,6	25,9	20/26	1,0	1,3
1.1 dnevna soba	52,6	142,0	20/26	4,2	3,8
1.1 kupatilo	2,9	7,8	22/-	0,3	-
1.2 kupatilo	3,5	9,5	22/-	0,3	-
1.1 soba	9	24,3	20/26	0,8	1,2
1.2 soba	9	24,3	20/26	0,7	0,8
1.3 soba	9,6	25,9	20/26	0,9	1,6

III. Analizirani toplotni izvori i cene energenata

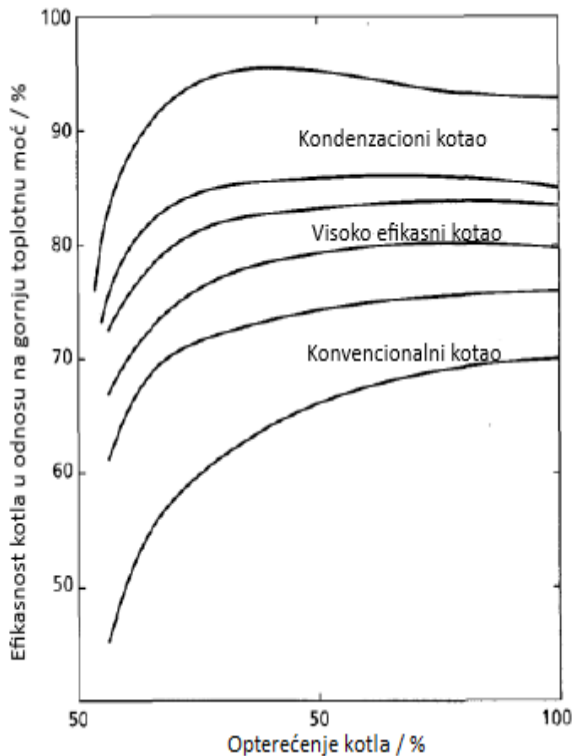
U okviru ovog rada analizirana je potrošnja energije porodične kuće za različite toplotne izvore. Iako se investitori radije odlučuju za sistem koji ima najniže investicione troškove, često takva rešenja rezultuju tokom eksploatacije značajnim troškovima za energiju. To se uglavnom odnosi na primenu električnih kotlova. Sprovođenje detaljne tehnno-ekonomske analize, uzimajući u obzir i investicione i eksploatacione troškove, je važno prilikom odlučivanja o ugradnji određenog sistema. Kao što je već napomenuto, u nastavku ovog rada biće prikazane razlike u troškovima za grejanje pri korišćenju tri različita izvora toplote, sprovođenjem detaljnih časovnih simulacija.

A. Električni kotao

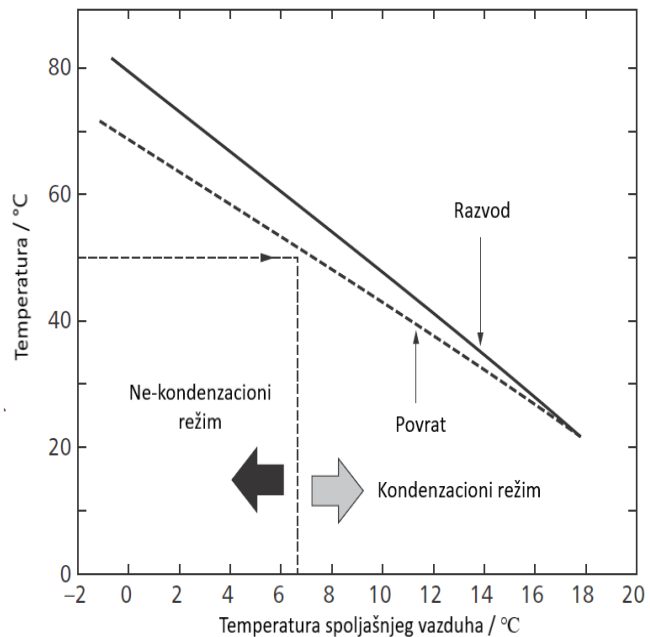
Kao prvi izvor toplote, zbog svoje zastupljenosti u značajnom broju domaćinstava u Srbiji, analiziran je električni kotao. Električni kotlovi su namenjeni za zagrevanje manjih stambenih i poslovnih objekata, pri čemu su to češće stanovi i manje porodične kuće, a snage za ovakve sisteme se najčešće kreću od 6 do 24 kW. Izabrani kotao ima stalni stepen korisnosti. Za njegov pogon koristi se električna energija, a dobijena topla voda temperature 50 °C u projektnim uslovima se vodi ka grejnim telima (u ovom slučaju ventilator konvektorima).

B. Gasni kondenzacioni kotao

S obzirom na to da se projektni parametri javljaju retko, sistem za grejanje će uglavnom raditi u periodu kada je opterećenje kotla manje, pa se kao efikasna opcija nameću kondenzacioni gasni kotlovi, koji imaju odlične performanse (stepen korisnosti) pri delimičnom opterećenju (slika 2).



Slika 2. Efikasnost kotlova pri različitim opterećenju [4]

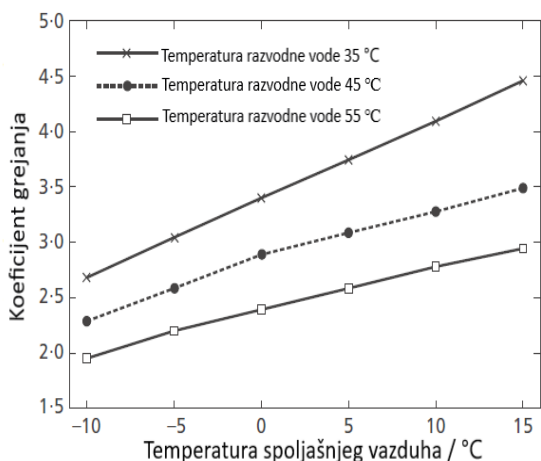


Slika 3. Režimi rada kondenzacionog kotla [4]

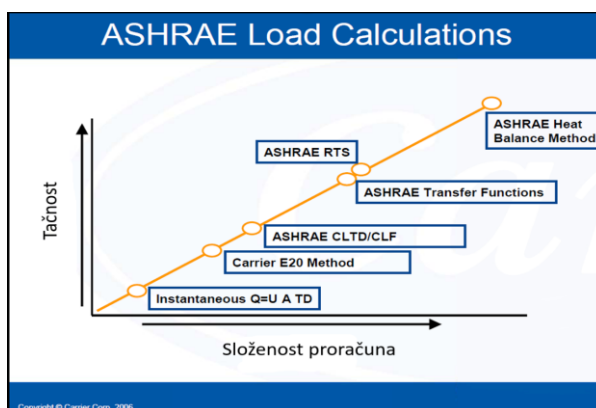
Dotadna prednost ovog izvora toplote postiže se iskorišćenjem toplote kondenzacije iz vlažnih produkata sagorevanja. Stepenn korisnosti kondenzacionih kotlova je obično preko 90%, pri čemu efikasnost može biti čak i veća pri delimičnom opterećenju nego na maksimalnom (slika 2). Da bi mogao da kondenzuje vodenu paru iz dimnih gasova, kondenzacioni kotao treba da radi sa nižim temperaturama povratne vode, jer se proces kondenzacije javlja na približno 54°C. (slika 3). Čak i kada su u hladnijem periodu potrebni viši temperaturni režim, u značajnom delu grejnog perioda kotao će raditi u kondenzacionim režimu (kada je moguće raditi sa nižim temperaturama razvodne vode) pa sezonska efikasnost iznosi 88-92%.

C. Toplotna pumpa vazduh-voda

Treći izvor koji se analizira u ovom radu je toplotna pumpa vazduh-voda. Iako toplotna pumpa koja koristi vazduh kao toplotni izvor ima lošije performanse od zemlja-voda ili voda-voda toplotnih pumpi, njena primena je česta. Razlog za to su najniži investicioni troškovi (u odnosu na druge toplotne pumpe), kao i neograničena dostupnost izvora toplote (okolni vazduh). Iako vazduh kao toplotni izvor ima veliku prednost zbog dostupnosti, ono što je osnovni nedostatak je činjenica da je pri vrlo niskim spoljnim temperaturama (kada su i najveće toplotne potrebe objekta), grejni učinak toplotne pumpe najmanji, takođe jedan od većih problema kod toplotnih pumpi koje kao izvor toplote koriste spoljašnji vazduh jeste da sa sniženjem temperature vazduha može doći do pojave stvaranja inja na površini isparivača, posebno kod starijih uređaja kod kojih se ova pojava dešavala već kod temperature okolnog vazduha od oko 3°C. Sloj inja na dva načina snižava temperaturu isparavanja: deluje kao izolator na površini cevi i rebara i, smanjujući poprečni presek, guši protok vazduha i snižava njegovu srednju temperaturu duž površine isparivača; to sve, uzrokujući pad temperature isparavanja, ima za posledicu smanjivanje, kako koeficijenta grejanja toplotne pumpe, tako i njenog grejnog učinka. Tako je često potrebno predvideti i rezervni izvor toplote (najčešće elektrootporni grejač, valjda električni kotao?) kako bi se zadovoljile potrebe objekta i pri niskim spoljašnjim temp. vazduha. Ovaj problem se sve više ublažava primenom novih tehnoloških rešenja (npr. inoviranih kompresora sa poboljšanom regulacijom učinka promenom broja obrtaja).



Slika 4. Zavisnost koefficienta grejanja toplotne pumpe vazduh-voda od spoljašnje temperature i temperature razvodne vode [4]



Slika 5. Zavisnost tačnosti od složenosti proračuna [2]

Osim grejnog učinka, sa snižavanjem temperature spoljašnjeg vazduha dolazi i do sniženja koefficienta grejanja (slika 4), zbog čega je i potrošnja električne energije veća. Za područja u kojima nisu česte spoljašnje temperature niže od -10 °C, toplotne pumpe vazduh-voda mogu biti vrlo efikasno rešenje. Izabrana toplotna pumpa na temperaturi spoljašnjeg vazduha od -5 °C, temperaturi razvodne vode $t_{raz} = 50$ °C i pri punom opterećenju ima koefficient grejanja $COP = 2,5$, koji predstavlja odnos između grejnog učinka i snage elektromotora za pogon kompresora.

D. Cene energenata

Za proračun je usvojena cena gasa od 0,36 €/m³ [8]. U okviru tarifnog sistema u Srbiji razlikuju se dnevna i noćna tarifa, pri čemu je period važenja dnevne tarife u Beogradu od 08 h do 23 h. Definisane su tri karakteristične zone potrošnje, i to zelena zona (mesečna potrošnja električne energije do 350 kWh), plava (350 do 1.600 kWh) i crvena zona, sa potrošnjom većom od 1.600 kWh mesečno po domaćinstvu. Za zelenu zonu cena električne energije tokom dana za 1 kWh iznosi 0,051 €, dok je noćna cena kilovat-časa 0,013 € (tabela 4). Za plavu zonu jedinična dnevna cena električne energije je 0,077 €, a tokom noći 0,019 €. U crvenoj zoni, za svaki utrošeni kilovat-sat nakon 1.600 kWh, cena je čak tri puta veća nego u zelenoj zoni i iznosi 0,15 € danju i 0,038 € noću [5]. Uvođenjem jeftinije, „noćne” tarife se korisnici stimulišu da bar deo uređaja koriste noću, čime bi se ublažili izraziti pikovi potrošnje električne energije koji se javljaju u toku dana. Značajno viša cena u crvenoj zoni takođe treba da navodi korisnike da racionalno koriste električnu energiju.

Tabela 4. Cene električne energije [5]

Zone	Potrošnja električne energije	Dnevna tarifa	Noćna tarifa
Zelena zona	<350	0,051	0,013
Plava zona	350-1.600	0,077	0,019
Crvena zona	>1600	0,15	0,038

IV. Potrošnja energije analiziranih izvora

Iako se računarski alat HAP može koristiti kao pomoć pri projektovanju za proračun gubitaka toplote i toplotnog opterećenja i zatim dimenzionisanje sistema, njegova ključna prednost se ogleda upravo u određivanju potrošnje energije korišćenjem časovnih simulacija. Za proračune opterećenja se koristi metoda transfer funkcija, koja daje zadovoljavajuću tačnost (slika 5). Iako je preciznija, metoda „Heat balance” zahteva postavljanje toplotnog bilansa za svaki element objekta, pa često zbog složenosti proračuna prevazilazi potrebe rešavanja inženjerskih problema.

Za određivanje troškova energije za grejanje analizirani su zimski meseci, i to od oktobra do aprila tokom cele grejne sezone. Prvi korak prilikom određivanja potrošnje je određivanje gubitaka toplote, čiji su rezultati prikazani u tabeli 3. U narednom koraku dimenzionisani su elementi sistema, tj. određen je kapacitet izvora toplote i lokalnih uređaja za grejanje u prostorijama (ventilator konvektori). Za ovaj deo proračuna, korišćeni su „projektni” klimatski parametri, odnosno spoljna projektna temperatura za zimski period i letnji projektni dan za svaki mesec letnjeg perioda. Kada su definisani potrebni kapaciteti i elementi sistema, prelazi se na simulaciju potrošnje energije. U ovom delu proračuna se koriste „simulacioni” meteorološki parametri, odnosno „tipična meteorološka godina” (*Typical Meteorological Year – TMY*). U ovom radu korišćena je TMY3 za Beograd, dostupna u HAP programskom paketu. Ova baza podataka se sastoji iz 8.760 časovnih vrednosti meteoroloških parametara (spoljašnja temperatura, relativna

vlažnost, intenzitet sunčevog zračenja, itd). Meteorološki podaci su analizirani tokom dužeg vremenskog perioda (najčešće 20-30 godina) i tipična meteorološka godina se sastoji se iz merenih vrednosti za odabrane mesece koji se smatraju „tipičnim” za određenu lokaciju [6].

Jedan od najvećih izazova prilikom procene potrošnje energije korišćenjem simulacionih softvera je određivanje ponašanja korisnika (period uključenja svetla, korišćenje električnih uređaja, zauzetost prostora, itd.). Zato je važno nakon sprovođenja simulacije, izvršiti „korekciju”, odnosno kalibraciju modela, kako bi rezultati što više odgovarali realnim uslovima i dali pravu sliku potrošnje energije. Tako su, za potrebu ovog rada, analizirane potrošnje električne energije uređaja u stanu za objekte slične kvadrature i namene. Model je kalibrisan i za dalju analizu su korišćeni rezultati kalibrisanog modela. Rasporedi prisustva ljudi, kao i korišćenja električnih uređaja tokom radnih dana i vikenda su izabrani tako da prikazuju realnu potrošnju električne energije domaćinstva slične kvadrature i stila života.

Potrebna količina toplote po mesecima određena je sabiranjem časovnih vrednosti i rezultati su prikazani u tabeli 5. Za postojeći objekat, za sva tri izvora toplote, potrebe za grejanjem će biti iste. U daljem istraživanju može se ispitati mogućnost zamene prozora, čime će se potrebna količina toplote smanjiti.

Tabela 5. Potrebna količina toplote po mesecima

Meseci	Potrebna količina toplote (kWh)
Oktobar	956
Novembar	2.351
Decembar	3.743
Januar	3.979
Februar	2.997
Mart	1.918
April	983
UKUPNO:	16.927

Ukupna godišnja potrebna količina toplote iznosi 16.927 kWh. Ove vrednosti su upoređene sa vrednostima koje se dobijaju primenom metode stepen-dana, pri čemu je dobijena vrednost 16.160 kWh/ god.

Zatim je sprovedena analiza potrošnje energenata za različite izvore toplote. Električni kotao koristi električnu energiju, koju direktno pretvara u toplotu. Sa energetskog stanovišta, to je najnepovoljniji vid iskorišćenja električne energije, pri čemu se za utrošenih 1 kWh električne energije dobija približno 1 kWh toplote. U termoelektrani se sa niskim stepenom korisnosti hemijska energija goriva pretvara u toplotu, zatim u električnu energiju, koja se u elektro kotlu pretvara ponovo u toplotu.

Za gasni kondenzacioni kotao definisana je kriva zavisnosti stepena korisnosti kotla od opterećenja i temperature razvodne vode, pri čemu je temperatura razvodne vode u projektnim uslovima 50 °C.

Za simulaciju potrošnje električne energije toplotne pumpe, potrebno je poznavati koeficijent grejanja (*COP*) pri različitim opterećenjima i različitim vrednostima spoljašnje temperature. Ove vrednosti je moguće uneti u softver kroz tabelu koja predstavlja „mapu performansi” toplotne pumpe. Ukoliko su ovi podaci dostupni (od strane proizvođača), moguće je porediti toplotne pumpe različitih performansi, kako bi se kvantifikovale uštede koje se ostvaruju primenom efikasnijih toplotnih pumpi. Korišćenjem tačnih vrednosti *COP* (u zavisnosti od spoljne temperature i opterećenja uređaja), umesto uprošćenih vrednosti (kao što je sezonski *COP*) moguće je realnije odrediti potrošnju električne energije toplotne pumpe.

A. Poređenje troškova za grejanje korišćenjem različitih izvora toplote

U tabeli 6 prikazani su troškovi grejanja za različite izvore toplote. Smatra se da se unutrašnja projektna temperatura održava u svim prostorijama. I električni kotao i toplotna pumpa koriste električnu energiju za zagrevanje prostora. Nekoliko je razloga za značajnu razliku u troškovima ova dva sistema. Izabrana toplotna pumpa vazduh-voda ima znatno veći stepen korisnosti u odnosu na električni kotao. Tako se korišćenjem električnog kotla, u zbiru sa potrošnjom ostalih električnih uređaja u domaćinstvu, često ulazi u „crvenu zonu” potrošnje, u kojoj je vrednost utrošenog kilovat-sata u toku dana čak i tri puta veća nego u zelenoj zoni. To je posebno vidljivo u stambenim objektima veće površine, kao što je slučaj sa analiziranom kućom površine 173 m². Rezultati pokazuju da su troškovi za grejanje objekta u decembru i januaru korišćenjem elektro kotla 272 € i 298 € respektivno. Ukoliko se kao izvor koristi toplotna pumpa vazduh-voda, troškovi za iste mesece su značajno manji i znose 87 € za januar i 94€ za februar (slika 6). Primenom toplotne pumpe, kod koje se električna energija koristi za pogon kompresora, a zagrevanje vode vrši u posebnom razmenjivaču tj. kondenzatoru, vidljive su znatne uštede i mesečni računi su u proseku 3,5 puta manji u odnosu na električni kotao.

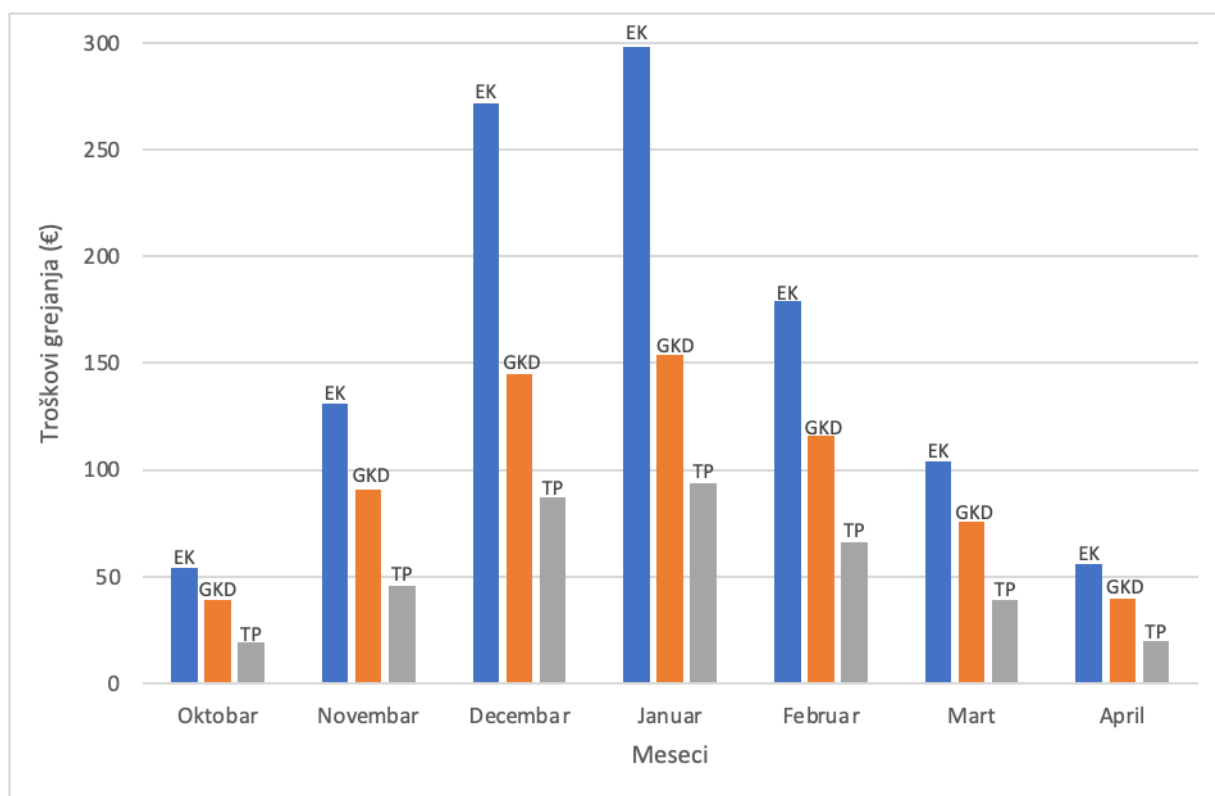
Sa trenutno važećim cenama gasa u Srbiji, godišnji troškovi za grejanje iznose 661 €, što je manje od troškova električnog kotla za koji je potrebno 1.094 € godišnje, a više od toplotne pumpe čiji su troškovi za grejanje 371 €. Prilikom razmatranja gasnog kotla za grejanje objekta od presudnog značaja je postojanje gasovoda u blizini objekta, kako bi bilo moguće priključenje. Osim toga, ono što nije moguće finansijski kvantifikovati je povećanje komfora korisnika, odnosno mogućnost korišćenja toplotne pumpe u režimu hlađenja. Ono što je zajedničko za sva tri izvora

toplote je to da su najveći troškovi za potrebe grejanja tokom decembra i januara, kada su temperature spoljašnjeg vazduha ustvari i najbliže spoljnoj projektnoj temperaturi koja za Beograd iznosi -12,1 °C, pri čemu sa porastom temperature spoljašnjeg vazduha dolazi i do smanjenja toplotnih gubitaka.

Iako su investicioni troškovi toplotne pumpe najveći, radove i nabavku opreme je moguće izvesti fazno. Ukoliko su dodavanjem izolacije i zamenom prozora smanjene potrebe objekta za grejanjem, u prvoj fazi se korisnik može odlučiti za kupovinu toplotne pumpe. Nakon provere kapaciteta radijatora, uz smanjene gubitke toplote, često je moguće i povezivanje na postojeći sistem radijatorskog grejanja (koji bi sa smanjenom potrebom za grejanjem mogao da radi sa niskotemperaturskim režimom vode i postojećim radijatorima). U narednom koraku se radijatori i postojeća cevna mreža mogu zameniti ventilator konvektorima (uz postavljanje nove cevne mreže), kako bi se toplotna pumpa koristila i u letnjem periodu za hlađenje prostora, čime bi se značajno povećao komfor korisnika.

Tabela 6. Troškovi grejanja za različite toplotne izvore: električni kotao, gasni kotao, toplotna pumpa

Meseci	Električni kotao (€)	Gasni kotao (€)	Toplotna pumpa (€)
Oktobar	54	39	19
Novembar	131	91	46
Decembar	272	145	87
Januar	298	154	94
Februar	179	116	66
Mart	104	76	39
April	56	40	20
UKUPNO:	1.094	661	371

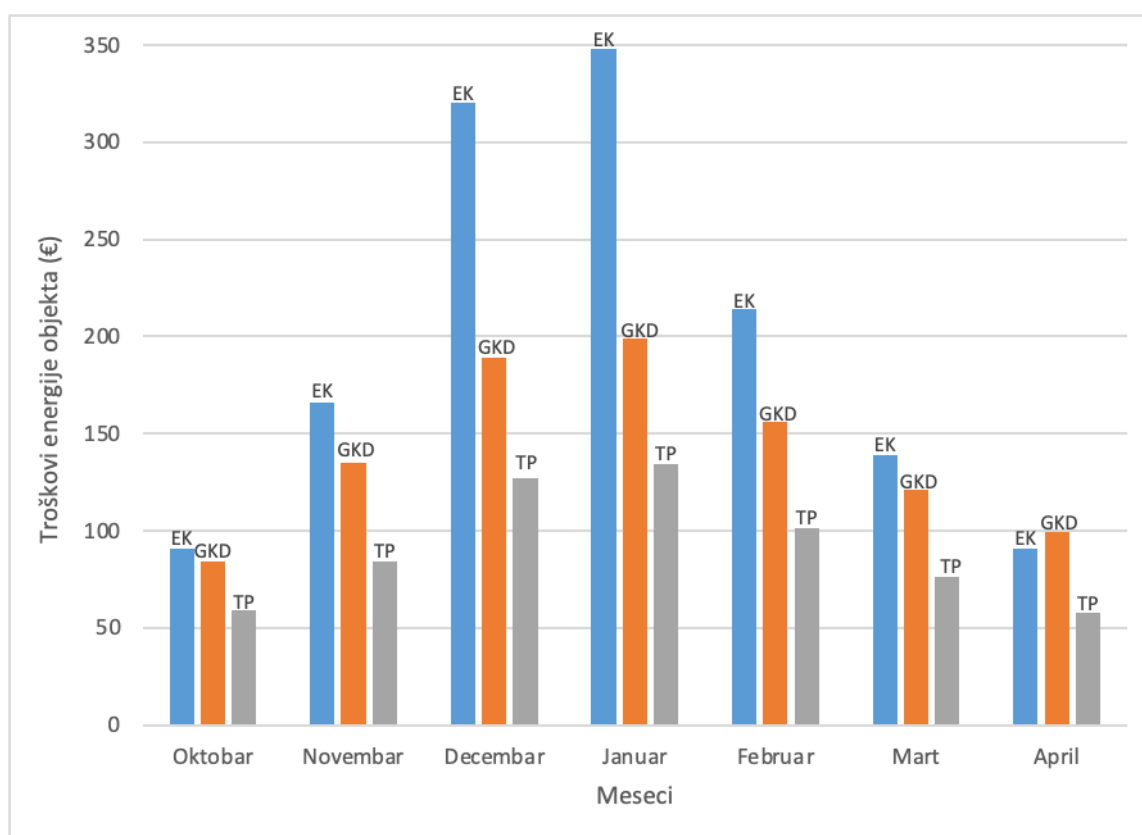


Slika 6. Troškovi grejanja za različite toplotne izvore: električni kotao (EK), gasni kotao (GKD), toplotna pumpa (TP)

U tabeli 7 prikazani su ukupni troškovi stambenog objekta na mesečnom nivou. Ovde su uključeni troškovi energije za grejanje (gas ili električna energija), kao i troškovi električne energije za pogon ostalih elektro-potrošača u domaćinstvu. Utrošak električne energije kućnih uređaja se tokom godine relativno malo menja, pa na razliku u troškovima najviše utiče izabrani sistem za grejanje. Primenom električnog kotla za grejanje na visoke račune značajan uticaj ima i čest „ulazak u crvenu zonu”, kada je i električna energija najskuplja.

Tabela 7. Ukupni troškovi objekta za različite toplotne izvore

Meseci	Električni kotao (€)	Gasni kotao (€)	Toplotna pumpa (€)
Oktobar	91	84	59
Novembar	166	135	84
Decembar	320	189	127
Januar	348	199	134
Februar	214	156	101
Mart	139	121	76
April	91	88	58



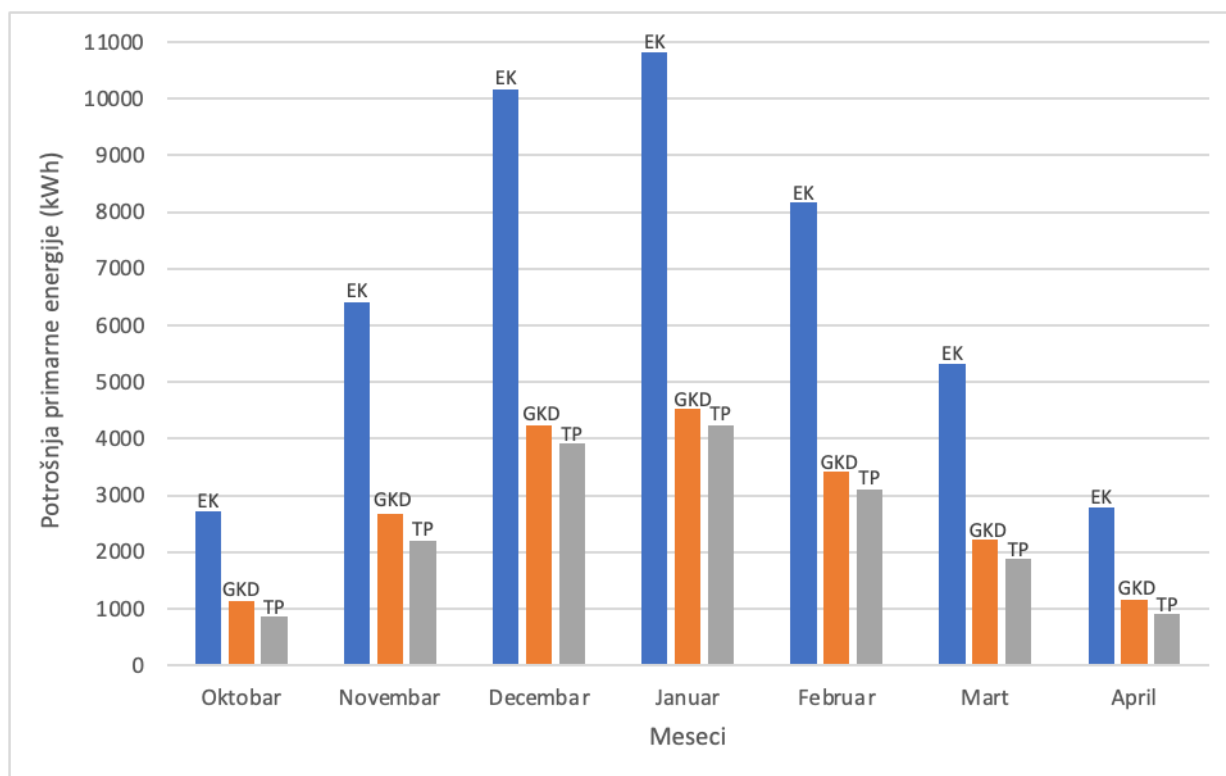
Slika 7. Ukupni troškovi energije za objekat za različite toplotne izvore

B. Poređenje potrošnje primarne energije različitih izvora toplote

Poređenje različitih izvora toplote moguće je tek kada se svi vidovi energije svedu na primarnu energiju, uz poznavanje iz kog je izvora dobijena finalna energija i kakvi su gubici nastali prilikom transformacije i distribucije. Primarna energija je ona energija koja je sadržana u energentu (hemijska energija goriva), sekundarna energija je dobijena energetsom transformacijom iz primarne energije, a finalna energija je oblik energije koji stiže do korisnika. Korisna energija predstavlja onu koja se troši na zadovoljavanje potreba krajnjih korisnika, što je za analizirani objekat toplota koja se koristi za nadoknađivanje gubitaka toplote, odnosno održavanje željene temperature u prostoru. Za konverziju finalne energije u primarnu koriste se faktori pretvaranja za pojedine izvore toplote primenjene u sistemima grejanja. Faktor pretvaranja, odnosno faktor primarne energije za električnu energiju u Srbiji iznosi 2,5, dok za prirodni gas iznosi 1,1 [1]. U tabeli 8 prikazana je potrošnja primarne energije za različite izvore toplote u zimskom periodu. Mala razlika u potrošnji primarne energije između gasnog kotla i toplotne pumpe posledica je načina dobijanja električne energije u našoj zemlji, gde se značajan udeo (oko 2/3 ukupno proizvedene električne energije) dobija sagorevanjem uglja u termoelektranama [2].

Tabela 8. Poređenje potrošnje primarne energije između električnog kotla, gasnog kotla i toplotne pumpe

Meseci	Električni kotao (kWh)	Gasni kotao (kWh)	Toplotna pumpa (kWh)
Oktobar	2.713	1.138	863
Novembar	6.413	2.681	2.190
Decembar	10.165	4.245	3.908
Januar	10.823	4.524	4.240
Februar	8.180	3.416	3.100
Mart	5.313	2.224	1.875
April	2.778	1.159	905
UKUPNO:	46.385	19.387	17.081



Slika 8. Poređenje potrošnje primarne energije za različite toplotne izvore

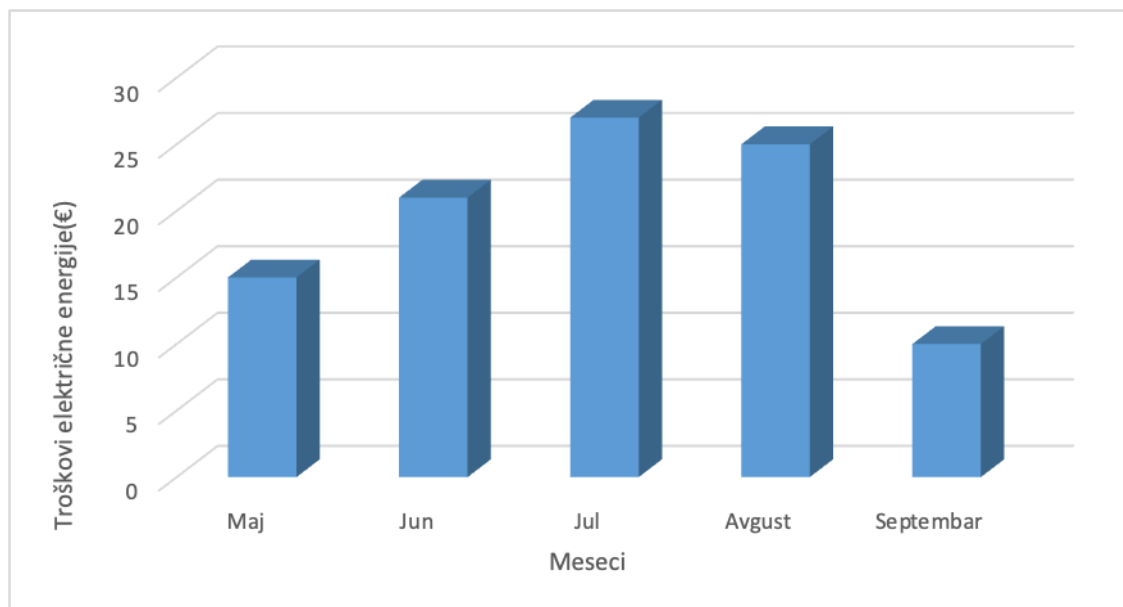
C. Potrošnja toplotne pumpe u režimu hlađenja

Prednost toplotnih pumpi u odnosu na ostale izvore toplote jeste u tome što tokom letnjeg perioda mogu da rade i u režimu hlađenja. Kada toplotne pumpe rade u režimu grejanja, okolina ima nižu temperaturu od prostorije i u tim uslovima potrebno je „dovoditi“ toplotu prostoriji. Dok u režimu hlađenja, okolina ima višu temperaturu od posmatrane prostorije, pa u tom slučaju toplotu treba „odvoditi“ iz prostorije. Iako je potrošnja energije za grejanje i dalje značajno veća, sa projekcijama povišenja temperatura tokom letnjih perioda očekivano je da će potrošnja energije za hlađenje biti sve veća.

Za Beograd letnja projektna temperatura iznosi 33 °C, koja je ujedno i maksimalna temperatura koja se javlja u toku letnjeg projektnog dana. Kao unutrašnja projektna temperatura usvojena je $t_{in} = 26$ °C. Posmatrana toplotna pumpa pri temperaturi spoljašnjeg vazduha od 33 °C (temperatura razvodne vode koja se transportuje ka razmenjivaču toplote koji se nalazi u fan coil-u tada iznosi 7 °C) i pri maksimalnom opterećenju iznosi $EER = 2,5$. Određivanje potrošnje energije u letnjem periodu je složenije nego za zimski režim zbog izraženije promene spoljašnje temperature i sunčevog zračenja, kao i efekta akumulacije toplote. U tabeli 9 prikazana je potrošnja električne energije toplotne pumpe za potrebe hlađenja, kao i mesečni troškovi izabranog sistema.

Tabela 9. Mesečni troškovi za potrebe hlađenja i potrošnja električne energije za posmatrani objekat

Meseci	Troškovi hlađenja (€)	Potrošnja električne energije toplotne pumpe (kWh)
Maj	15	230
Jun	21	329
Jul	27	416
Avgust	25	376
Septembar	10	141



Slika 9. Troškovi hlađenja za posmatrani objekat

Svakako je potrošnja energije za grejanje stambenih objekata u Srbiji i dalje dosta veća u odnosu na potrošnju energije za hlađenje. To je posebno izraženo kod zgrada koje imaju nedovoljnu debljinu izolacije omotača i/ili prozore lošijih termičkih karakteristika, loša arhitektonska rešenja objekta u celini ili nekog njegovog dela, postojanje velikog broja spoljašnjih neizolovanih terasa, itd . Projekcije klimatskih promena ukazuju na dalje povišenje temperature, pri čemu je područje Balkana označeno kao posebno osetljivo [1]. Ako se uzme u obzir i stalno povećanje broja ljudi na Zemlji, kao i sve veće potrebe za komforom, jasno je da će se i potrošnja energije za hlađenje objekata povećati, pa je neophodno analizirati i učinak uređaja i njegovu potrošnju u režimu hlađenja.

D. Poređenje emisije CO₂ različitih izvora toplote

Ugljen-dioksid (CO₂) je hemijsko jedinjenje sastavljeno od jednog atoma ugljenika i dva atoma kiseonika. Prisutan je u Zemljinoj atmosferi u maloj koncentraciji (oko 0,035%) i označen je kao gas sa najvećim uticajem na efekat staklene bašte. Novija istraživanja pokazuju je da je koncentracija CO₂ u atmosferi sa 250 ppm, u poslednjih stotina godina, porasla na čak 400 ppm [1]. Intenzivna potrošnja energije, dobijena pre svega sagorevanjem fosilnih goriva je jedan od glavnih krivaca za ovo povećanje. Zbog toga je, osim investicionih i eksploatacionih troškova sistema, važno analizirati i količinu CO₂ koja se radom sistema emituje, uzimajući tako u obzir i nepovoljan uticaj na životnu sredinu. Specifične emisije CO₂ po jedinici energije goriva, najveće su pri sagorevanju uglja, zatim slede lož ulje i prirodni gas. Kod izvora toplote koji kao pogonsko gorivo koriste fosilna goriva (u ovom slučaju gas), nakon procesa sagorevanja nastaju produkti sagorevanja, koji se preko dimnjaka izbacuju u atmosferu. Tu se govori o lokalnim emisijama. Specifične emisije CO₂ po jedinici goriva za gas iznosi 1,9 kg/m³ [7]. Za razliku od njih, električni kotlovi i toplotne pumpe lokalno ne emituju CO₂, ali s obzirom na to da za svoj rad koriste određenu količinu električne energije, pod emisijom CO₂ koja potiče od toplotne pumpe i električnog kotla smatra se količina CO₂ koja se emitovala pri proizvodnji električne energije za njihovo pokretanje (tzv. indirektni uticaj ovih sistema). Emisije CO₂ za električni kotao, toplotnu pumpu i gasni kondenzacioni kotao u zimskom periodu za izabrani objekat su prikazane u tabeli 10.

Tabela 10. Emisija CO₂ tokom zimskog perioda za različite toplotne izvore

Toplotni izvori	Godišnja emisija CO ₂ (kg)
Električni kotao	9.443
Gasni kotao	3.325
Toplotna pumpa	3.488

Kao što se može videti iz tabele 10, ne postoji velika razlika u emisiji između gasnog kotla i toplotne pumpe za grejni period, a razlog u tome leži u činjenici da se najveća količina električne energije u Srbiji i dalje dobija iz termoelektrana na uglj. Kada bi se povećao udeo električne energije koja se dobija iz obnovljivih izvora, došlo bi do smanjenja specifične emisije CO₂ za električnu energiju, a ona u Srbiji trenutno iznosi po nekim procenama 0,53 kg/kWh [7]. Od svih fosilnih goriva, prirodni gas se, sa ekološkog stanovišta, smatra najprijhvatljivijim.

V. Zaključak

S obzirom da potrošnja energije za grejanje objekta u Srbiji predstavlja najveći udeo u ukupnoj potrošnji zgrada, u ovom radu je analizirana potrošnja energije za grejanje porodične kuće u Beogradu. Izabrana su tri različita izvora toplote, i to električni kotao, gasni kondenzacioni kotao i pomoću toplotne pumpe vazduh-voda. U dostupnom softverskom paketu HAP izvršene su časovne simulacije potrošnje energije za grejanje objekta. Za određivanje troškova sistema korišćene su trenutno važeće cene gasa i električne energije u Srbiji, uzimajući u obzir tarifni sistem i zone potrošnje. Iako su cene električne energije u Srbiji dosta niže u odnosu na cene u drugim zemljama u Evropi, troškovi grejanja su daleko veći za slučaj kada se kao toplotni izvor koristi električni kotao (1.094 €) nego toplotna pumpa (371 €). Na značajnu razliku u troškovima ova dva sistema utiče i činjenica da se korišćenjem elektro kotla često ulazi u „crvenu zonu” potrošnje (više od 1.600 kWh mesečno), kada je i cena utrošenog kilovat-časa veća čak 4,5 puta nego u „zelenoj zoni” (do 350 kWh). Potrošnja električne energije ostalih elektro-potrošača je takođe simulirana, nakon čega je model kalibrisan, analizirajući objekte slične površine i ponašanja korisnika. Za određivanje potrošnje energije za grejanje smatra se da se sve prostorije održavaju na unutrašnjoj projektnoj temperaturi u periodu boravka ljudi (8-22 h). Ukupni godišnji troškovi za grejanje objekta kada se kao izvor koristi gasni kondenzacioni kotao su 661 €. Tokom simulacione, tipične meteorološke godine, kotao će raditi tokom značajnog broja sati u kondenzacionom režimu, kada je i njegov stepen korisnosti najveći. Sprovedena je i analiza potrošnje primarne energije i emisije CO₂ za posmatrane slučajeve. Godišnja potrošnja primarne energije korišćenjem elektro kotla je najveća i iznosi 46.385 kWh, zatim sledi gasni kondenzacioni kotao sa 19.387 kWh i toplotna pumpa vazduh-voda sa 17.081 kWh. S obzirom da se oko 2/3 električne energije u Srbiji dobija sagorevanjem uglja u termoelektranama, specifična emisija CO₂ za električnu energiju dovodi do toga je u grejnom periodu emisija CO₂ za slučaj toplotne pumpe (3.488 kg) slična, čak i nešto veća u odnosu na gasni kondenzacioni kotao (3.325 kg), koji ima lokalnu emisiju. Za slučaj električnog kotla, ova vrednost je dosta veća i iznosi 9.443 kg godišnje. Ono što je teško kvantifikovati posmatranjem samo troškova sistema je povećanje komfora korisnika koje se postiže korišćenjem toplotne pumpe u letnjem periodu za hlađenje objekta, uz napomenu da povećanje komfora značajno (duplo) utiče na povećanje potrošnje električne energije, a posledično i troškova i emisije ekvivalentnog CO₂. U radu su prikazani i mesečni troškovi sistema za hlađenje. Sa porastom spoljne temperature, kao i sve višim zahtevima za komforom, očekivano je da će potrošnja energije za hlađenje rasti, pa je prilikom odabira sistema važno uzeti u obzir i ove vrednosti.

VI. Literatura

- [1] Aleksandra Sretenović Dobrić, Pisana predavanja iz predmeta Energetska efikasnost u zgradama M
- [2] Carrier Hourly Analysis Program,
<https://www.carrier.com/commercial/en/us/software/hvac-system-design/hourly-analysis-program/>
- [3] ***, Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada, Sl. glasnik RS, br. 61/2011
- [4] The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) Guide F, Energy efficiency in buildings, London, 2012
- [5] ***, Cene električne energije, preuzeto sa sajta Elektroprivrede Srbije:
<https://www.eps.rs/lat/snabdevanje/Stranice/cene.aspx>
- [6] S. Wilcox, W. Marion, Users Manual for TMY3 Data Sets, NREL REPORT/PROJECT NUMBER: TP-581-43156, 2008
- [7] Priručnik za energetske menadžere za oblast energetike zgrada, program Ujedinjenih nacija za razvoj (UNDP), Beograd, Srbija
- [8] ***, Cena prirodnog gasa, preuzeto iz računa BeoGasa za domaćinstva