

Tehno-ekonomska analiza zamene električnog kotla toplotnom pumpom vazduh voda za zagrevanje stambenog prostora

Techno-Economic Analysis of Replacing an Electric Boiler with an Air-Water Heat Pump for Heating Residential Space

Mladen Josijević, Dušan Gordić, Vladimir Vukašinović, Jelena Nikolić, Dubravka Živković

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - U radu je razmatrana implementacija toplotne pumpe tipa vazduh-voda za zagrevanje domaćinstva kao zamena za električni kotao. Predložena je metodologija za utvrđivanje potrošnje energije za zagrevanje objekta na osnovu prikupljenih podataka sa računa za električnu energiju i simulacija softverom za proračun gubitaka toplote na osnovu građevinske fizike objekta. Razvijena metodologija je analizirana na studiji slučaja. Rezultati su pokazali da je u slučaju analiziranog objekta moguće ostvariti uštedu u potrošnji električne energije od oko 60%. U finansijskom smislu, uzimajući u obzir tarifni sistem naplate moguće je očekivati smanjenje računa za električnu energiju i do 3 puta. Prost period povraćaja investicije je za analizirani slučaj oko 4 godine.

Ključne reči - toplotna pumpa, energija, energetska efikasnost, električni kotao, panelno grejanje

Abstract - This paper focuses on the implementation of air-water heat pumps used to provide heating for households instead of electric boilers. The paper proposes a methodology for determining the quantity of energy used for heating based on the data collected from electricity bills. In addition, the simulations conducted in a selected software can provide insight into the amount of energy loss based on the constructional characteristics of an object. The proposed methodology was tested through a case study. The results indicate that the selected household can save about 60% of electricity currently consumed. Financially speaking, it is reasonable to expect that the electricity costs can be reduced by three times and that the payback period of the investment would be about four years for this household.

Index Terms - Heat pump, Energy, Energy efficiency, Electric boiler, Panel heating

I UVOD

Potrošnja energije u zgradama uopšteno ima udeo od 23% u ukupnoj potrošnji primarne energije u svetu i oko 30% udela u potrošnji električne energije [1]. U Evropi, oko 28% finalne energije troši se u sektoru domaćinstava, pritom, najveći udeo u potrošnji energije u domaćinstvima čak 63% je za zagrevanje objekata [2]. Od ukupne potrošnje finalne energije u zgradama čak 33% se troši na zagrevanje [3]. Shodno tome, u

ovom sektoru postoji veliki potencijal za implementaciju mera energetske efikasnosti sa ciljem smanjenja potrošnje energije i smanjenjem emisija ugljen-dioksida u atmosferu [4-6]. Kao jedno od potencijalnih rešenja sve češće se razmatra primena toplotnih pumpi (TP) kao zamena za konvencionalne sisteme.

Pored toga, predviđeni globalni rast potražnje za klimatizacijom, pre svega hlađenjem, uslovljava veću potražnju za uređajima koji mogu da greju i hlade istovremeno, pa su projekcije da će u budućem periodu tržište toplotnih pumpi značajno da se poveća [7]. Na primer, prema trenutnoj nacionalnoj strategiji, Irska planira da do 2030. godine subvencionise zamenu oko 400.000 kotlova na fosilna goriva toplotnim pumpama [8]. Takođe, Evropska komisija je usvojila plan da do 2030. godine udeo obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije bude najmanje 40%, pa je prema akcionom planu u narednih pet godina neophodna zamena kotlova na fosilna goriva toplotnim pumpama sa udelom od 40% i 60% kod stambenih i komercijalnih objekata, respektivno [9, 10]. Da bi se ostvarili ovi ciljevi neophodno je da se broj instaliranih toplotnih pumpi u zemljama članicama Evropske unije u narednih deset godina poveća čak četiri puta [11].

Prema procenama, 2020. godine je na globalnom nivou za potrebe zagrevanja objekata bilo korišćeno oko 180 miliona različitih tipova toplotnih pumpi, sa udelom od čak 30% u Kini [12]. Prosečna godišnja stopa rasta broja instaliranih T je oko 10% u periodu od 2014. do 2020. godine [13]. U Evropi, prema procenama, broj instaliranih TP je 2020. godine iznosio oko 22 miliona, što predstavlja porast od 7,5% u odnosu na 2019. godinu, sa udelom od 1,8 miliona TP u domaćinstvima. Udeo TP u grejnim uređajima 2021. godine je bio čak 21,5% [14].

Postoji nekoliko tipova toplotnih pumpi, a klasifikacija se uglavnom odnosi na oblik izvora energije i toplotnog ponora kada je u pitanju režim grejanja. Tako se one mogu podeliti na: TP vazduh-voda, kada je izvor energije okolni vazduh, a toplotni ponor topla voda koja se predaje sistemu grejanja; TP voda-voda i TP zemlja voda [15, 16]. U osnovi, princip rada TP se zasniva na Karnoovom ciklusu. One preuzimaju toplotu od toplotnog izvora na nižoj temperaturi i predaju je toplotnom ponoru na višoj temperaturi. Efikasnost toplotnih pumpi se obično kvantifikuje koeficijentom performansi (COP) koji predstavlja

odnos dobijene toplotne energije i najčešće uložene električne energije u rad kompresora. Obzirom na to da efikasnost toplotne pumpe direktno zavisi od temperaturne razlike toplotnog ponora i izvora toplote, najčešća primena TP je kod niskotemperaturnih sistemima grejanja.

Iako na performanse TP tipa vazduh-voda značajno utiču spoljašnji uslovi, posebno u krajevima sa niskom prosečnom godišnjom temperaturom, u Evropi, je od trenutno instaliranih 42 miliona TP, čak 38 miliona TP ovog tipa [17]. Najveći broj instaliranih jedinica je u Italiji, Francuskoj i Španiji, 18 miliona, 9 miliona i 5 miliona, respektivno [18,19].

U poređenju sa toplotnim pumpama tipa vazduh-voda, toplotne pumpe zemlja-voda su u većini slučajeva efikasnije, ali su zbog značajno većih investicionih ulaganja često ekonomski neisplative [20-23].

U mnogim radovima, razmatrane su finansijska ušteda i ušteda u emisijama CO₂ koje se ostvaruju zamenom tradicionalnih sistema grejanja toplotnom pompom [24-27]. Procenjeno je potencijalno smanjenje emisija CO₂ za 35-65%, zamenom kotla na gas toplotnom pompom [28] i ušteda energije od 40% [29].

Pregledom literature utvrđeno je da ne postoji dovoljan broj radova koji se bave efektima koji se ostvaruju zamenom elektro kotlova toplotnom pompom u Srbiji, posebno kada su efekti smanjenja emisija CO₂ u pitanju. Takođe, tarifni sistem naplate električne energije u Srbiji je takav da zahtevi za toplotom a time i za električnom energijom mogu značajno da utiču na prosečnu cenu toplotne energije koja se dobija iz toplotne pumpe.

Uzimajući u obzir sve prethodno navedene činjenice, u ovom radu će biti izvršena tehno-ekonomska analiza zamene elektro kotla toplotnom pompom tipa vazduh-voda, sa posebnim akcentom na sistem naplate el. energije i potencijalne uštede u emisijama ugljen-dioksida.

II METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE POTREBNE KOLIČINE TOPLOTNE ENERGIJE ZA ZAGREVANJE OBJEKTA

Predložena metodologija se sastoji iz tri faze prikazane na slici 1. U okviru prve faze, u zavisnosti od sistema grejanja, tj. u zavisnosti od toga koji se energent primarno koristio za zagrevanje objekta, moguće je na više načina utvrditi potrošnju toplotne energije.



Slika 1. Šematski prikaz predložene metodologije

S obzirom na to da je predložena metodologija opšta, a da je predmet rada zamena električnog kotla toplotnom pompom u

ovom radu biće više reči samo o tom vidu zamene sistema grejanja.

Kada je u pitanju potrošnja toplotne energije električnog kotla, ako se on koristi samo za potrebe zagrevanja objekta, a ne i za grejanje sanitarne tople vode, relativno je lako utvrditi potrošnju. Potrebno je izvršiti prikupljanje podataka o potrošnji električne energije za period od najmanje godinu dana. Detaljnom analizom mesečne potrošnje uz pretpostavku da se osim za sistem grejanja ništa značajno ne menja po mesecima kada je potrošnja električne energije u pitanju, može se odrediti udeo potrošnje električnog kotla u ukupnoj potrošnji električne energije. Pritom, neophodno je imati informacije o tome kada je počela i kada se završila sezona grejanja i da li je analizirana godina adekvatna, tj. da li letnje i zimske dnevne temperature odgovaraju prosečnim vrednostima temperature za tu geografsku lokaciju.

Ako se analizirani objekat leti hladi, ako se zagreva bazen ili ako postoji bilo kakvih promena u potrošnji el. energije po mesecima, ili sezonski, utvrđivanje potrošnje toplotne energije na prethodno opisan način je neadekvatno. U tom slučaju neophodno je izvršiti merenje potrošnje električnog kotla tokom cele grejne sezone, koja mora da bude prosečna sezona, sa prosečnim temperaturama, ili analitički utvrditi kolika je potrebna količina toplote za zagrevanje objekta.

Obzirom na to da je merenje potrošnje električnog kotla vremenski zahtevan posao, procena potrošnje toplotne energije se obično obavlja uporednom analizom prikupljenih računa za električnu energiju i analitički, proračunom potrebne količine toplotne energije za zagrevanje objekta.

Metodologija proračuna energetskog bilansa definisana je Direktivom Evropske unije o energetskoj efikasnosti zgrada. Pri proračunu se uzimaju u obzir uticaj karakteristika omotača zgrade, orijentacija, klimatski uslovi, zadate temperature prostora, osvetljenje i sistem grejanja, hlađenje i ventilacija [30, 31]. Proračun se najčešće obavlja prema standardu SRPS EN 12831-1:2017, koji je inkorporiran u mnoge komercijalno dostupne softvere za proračun toplotnog opterećenja objekata.

Nakon proračuna godišnjih potreba za zagrevanjem objekta i maksimalnog toplotnog opterećenja pristupa se odabiru TP čija bi grejna snaga mogla da zadovolji maksimalno toplotno opterećenje. U praksi, obično se usvaja nešto viša snaga (do 20%) od proračunom dobijene vrednosti, kako bi se i pri nižim temperaturama od projektnih temperatura za datu lokaciju objekat nesmetano zagrevao. Pri odabiru TP treba voditi računa o minimalnim spoljnim temperaturama za koje proizvođač garantuje nesmetani rad kao i o vrednostima koeficijenta performansi pri različitim spoljnim temperaturama. Takođe, cena TP iste snage može značajno da varira u zavisnosti od proizvođača, pa je bitno izvršiti pažljiv izbor i sagledati sve faktore koji utiču na odluku o izboru toplotne pumpe (COP, kvalitet, garantni rok, servisna podrška, cena, itd.). Ovo je značajno jer je poslednji korak predložene metodologije sprovođenje tehno-ekonomske analize, pri čemu je funkcija cilja najčešće minimizacija perioda otplate investicije, na koju utiče visina investicionih ulaganja (cena TP, troškovi montaže i puštanja u rad TP i dr.).

Pri sprovođenju tehno-ekonomske analize kada su domaćinstva u pitanju obično se vrši proračun prostog perioda povraćaja investicije (PB), koji prema jednačini 1. predstavlja odnos uložene investicije i ostvarene godišnje dobiti.

$$PB = Inv / NGD \quad (1)$$

gde su:

Inv [€] - vrednost investicije,

NGD [€/god.] - neto godišnja dobit.

Kada je u pitanju neto godišnja dobit ona se računa kao razlika potrošnje električne energije pre i posle zamene električnog kotla toplotnom pumpom. Pri proračunu potrošnje treba uzeti obzir tarifni sistem naplate električne energije, jer postoji mogućnost da će smanjenje potrošnje električne energije usloviti prelazak u niži tarifnu zonu i obrnuto, što direktno može uticati da smanjenje računa ne bude linearno sa smanjenjem potrošnje el. energije. U Srbiji, tarifni sistem je takav da se cena koju plaćaju domaćinstva menja u zavisnosti od mesečne potrošnje, pa je do 350 kWh mesečno, cena po isporučenom kWh za višu tarifu 7,584 RSD. Cena svakog potrošenog kWh u višoj tarifnoj zoni (plava zona) je 11,376 RSD, a u najvišoj crvenoj zoni 22,752 RSD/kWh [32]. Samim tim, zahtevi za toplotnom energijom koji direktno zavise od grejne zapremine i termičkih svojstava objekta mogu značajno uticati na period otplate investicije, jer prelazak u nižu tarifnu zonu može usloviti znatno kraći period otplate investicije.

III STUDIJA SLUČAJA

Predmet analize je prizemna kuća u kojoj stanuje četvoročlano domaćinstvo. Ukupna površina objekta je 190 m², dok je grejna površina 130 m². Objekat se nalazi u gradu Kragujevcu u normalno vetrovitom i izrazito otvorenom predelu. Projektna temperatura za tu lokaciju je -15 °C, a srednja temperatura grejnog period 5,5 °C [31]. Objekat je novoizgrađen i građevinska fizika objekata zadovoljava standarde energetske razreda „C“. Prema elaboratu energetske efikasnosti izrađenom u fazi dobijanja građevinske dozvole, koeficijenti prolaza toplote svih konstrukcija koje čine omotač objekta kao i međukonstrukcija između grejanih i negrejanih prostorija su zadovoljavajući, tj. niži od najvećih dozvoljenih vrednosti za nove objekte. Objekat je izgrađen 2018. godine, a prema zahtevima investitora predviđeno je zagrevanje objekta pomoću električnog kotla. Iskustveno je usvojen el. kotao nominalne snage 18 kW proizvođača Vaillant.

Sistem grejanja je izveden tako da se preko hidraulične skretnice vrši razmena toplote između primarnog i sekundarnog kruga grejanja. Bakarnim cevima se od hidraulične skretnice fluid vodi do dve razdelne kasete, svake sa po šest krugova grejanja iz kojih se preko balansnih ventila topla voda plastičnim cevima distribuira preko cevni zmijsa do svake od prostorija koje se greju (Slika 2).

Obzirom na to da je objekat izolovan polistirenom debljine 12 cm, da je ploča koja deli negrejani tavan od grejanog stambenog prostora izolovana mineralnom vunom debljine 20cm i da su prozori sa PVC ramovima zastakljeni troslojnim staklom ispunjenim argonom, toplotno opterećenje objekta je u svim

prostorijama manje od 60 W/m², pa je podno grejanje opravdano izabran sistem. Regulacija temperature se vrši pomoću jednog sobnog termostata, pozicioniranog u najvećoj prostoriji u centralnom delu kuće.



Slika 2. Prikaz sistema grejanja sa električnim kotlom i podnim razvodom

Prethodno opisan sistem grejanja korišćen je dve grejne sezone a potrošnja električne energije i cena po mesecima prikazani su u tabeli 1.

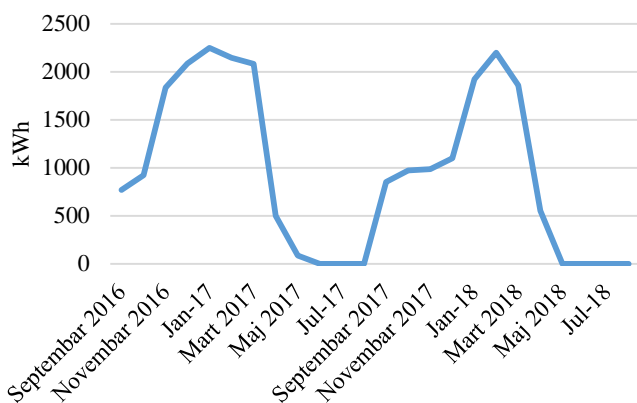
Tabela 1. Potrošnja električne energije i cena po mesecima za period septembar 2016. - avgust 2018. godine

	Mesec	Mesečna potrošnja el. energije [kWh]	Mesečna cena el. energije [RSD]
2016.	Septembar	1.207	11.085,54
	Oktobar	1.359	12.125,76
	Novembar	2.272	25.605,94
	Decembar	2.524	28.698,26
2017.	Januar	2.686	31.451,38
	Februar	2.584	30.469,06
	Mart	2.521	29.979,53
	April	938	8.467,42
	Maj	523	4.348,33
	Jun	359	2.970,2
	Jul	413	3.793,54
	Avgust	455	3.733,43
	Septembar	1.204	11.073,13
	Oktobar	1.325	11.926,22
	Novembar	1.337	12.019,6
	Decembar	1.450	12.791,81
2018.	Januar	2.272	23.369,86
	Februar	2.550	29.544,16
	Mart	2.211	24.971
	April	905	8.339,36
	Maj	520	4.314,94
	Jun	229	1.920,43
	Jul	245	2.304,84
	Avgust	261	2.404,97

Iz table se može zaključiti da je početak grejne sezone u obe analizirane godine septembar, a kraj u aprilu. U proseku, godišnja potrošnja električne energije analiziranog objekta je oko 16.000 kWh, a prosečna cena električne energije oko 10 RSD/kWh. U letnjim mesecima potrošnja električne energije je u

proseku oko 400 kWh, dok je u zimskim mesecima (decembar, januar i februar) potrošnja u proseku oko 2.500 kWh. Obavljen je intervju sa korisnicima objekta i utvrđeno je da ne postoji značajna razlika u potrošnji električne energije po mesecima kada su ostali električni aparati i uređaji u pitanju, pa je shodno tome utvrđeno da je razlika u potrošnji u zimskim i letnjim mesecima posledica potrošnje električnog kotla.

Na slici 3, prikazan je dijagram potrošnje električne energije po mesecima dobijen kao razlika stvarne mesečne potrošnje i prosečne potrošnje u letnjim mesecima.



Slika 3. Potrošnja električne energije elektro kotla



Slika 4. Prikaz toplotne pumpe i električnog kotla u kaskadi

Sa slike se može videti da je u najhladnijim zimskim mesecima potrošnja električnog kotla veća od 2.000 kWh, što nije slučaj u prelaznom periodu (oktobar, novembar, april i maj) kada je potrošnja elektro kotla i više od dvostruko manja. Kao što je već bilo reči, uzimajući u obzir tarifni sistem naplate električne energije u Srbiji, potrošnja iznad 1.600 kWh mesečno značajno utiče na srednju cenu električne energije, pa je tako na primer srednja cena električne energije u letnjim mesecima u proseku oko 7 RSD/kWh, dok je u zimskim mesecima i do 12 RSD/kWh. Shodno tome, investiranje u sistem grejanja kojim bi se

omogućilo da mesečna potrošnja električne energije bude ispod ove granice je često isplativa investicija.

Zbog svega navedenog, izvršena je zamena električnog kotla toplotnom pumpom tipa vazduh-voda. Na osnovu podataka iz elaborata energetske efikasnosti proračunata je i dimenzionisana je toplotna pumpa. Usvojena je toplotna pumpa proizvođača Viessman, model Vitocal 100S, nominalne toplotne snage 8kW. Toplotna pumpa ima integrisan električni grejač koji u ekstremnim spoljašnjim uslovima (temperature niže od -25 °C), služi kao alternativni sistem grejanja. Toplotna pumpa je kaskadno spregnuta sa postojećim električnim kotlom koji u novom sistemu grejanja treba da predstavlja rezervu. Na slici 4 prikazana je kaskadna veza toplotne pumpe i električnog kotla.

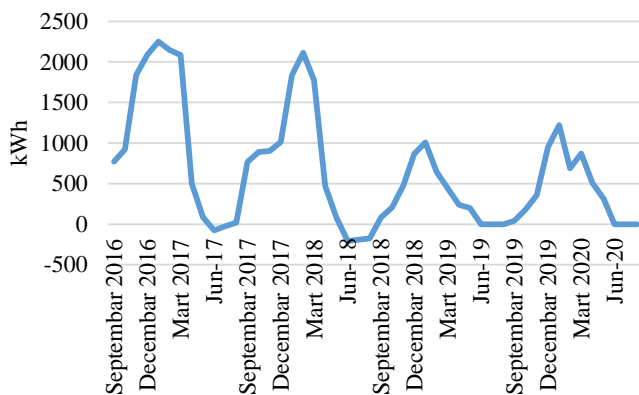
U tabeli 2, prikazani su podaci o potrošnji električne energije nakon ugradnje toplotne pumpe takođe za period od dve godine.

Tabela 2. Potrošnja električne energije i cena po mesecima za period od dve godine nakon ugradnje toplotne pumpe

	Mesec	Mesečna potrošnja el. energije [kWh]	Mesečna cena el. energije [din]
2018.	Septembar	452	3.711,74
	Oktobar	576	4.760,4
	Novembar	844	6.018,35
	Decembar	1.237	8.450,54
2019.	Januar	1.378	8.492,34
	Februar	1.014	7.314,45
	Mart	810	4.965,3
	April	610	4.121,98
	Maj	568	4.345,46
	Jun	375	2.961,51
	Jul	303	2.318
	Avgust	430	3.202,52
	Septembar	392	2.783,61
	Oktobar	528	3.608,54
	Novembar	709	4.719,23
	Decembar	1.300	7.886,27
2020.	Januar	1.571	10.328,66
	Februar	1.037	7.698,34
	Mart	1.221	8.788,56
	April	859	5.797,67
	Maj	664	5.088
	Jun	526	4.461,76
	Jul	548	4.561
	Avgust	435	3.673

Iz tabele se može zaključiti da je nakon zamene električnog kotla toplotnom pumpom potrošnja električne energije u zimskim mesecima niža u proseku za 30%, što je posebno izraženo u prelaznim mesecima (septembar, oktobar i april) kada se beleži smanjenje potrošnje električne energije od 50-70%. Zamenom je postignuta ušteda u potrošnji električne energije u proseku oko 7.000 kWh godišnje. Kako se sa grejanjem posredstvom toplotne pumpe potrošnja električne energije na mesečnom nivou značajno smanjila čime se izbeglo prekoračenje i ulazak u viši tarifni razred, u finansijskom smislu ostvarena je godišnja ušteda od 50 do 70%.

Na slici 5 prikazana je potrošnja električne energije pre i posle zamene kotla toplotnom pumpom. Obzirom na to da je smanjenje potrošnje električne energije dovoljno da se izbegne prekoračenje potrošnje izvan granica „plave zone“, srednja godišnja cena električne energije nakon zamene električnog kotla toplotnom pumpom je 7,32 RSD/kWh, što je u poređenju sa cenom pre zamene niže za oko 25%.



Slika 5. Potrošnja električne energije za periode pre i posle zamene električne kotla toplotnom pumpom

VIII ZAKLJUČAK

Prikupljanjem i sistematizacijom podataka o potrošnji električne energije za analizirani objekat u slučaju zagrevanja putem električnog kotla, utvrđeno je da je godišnja potrošnja električne energije oko 15.000 kWh, od čega se oko 70% troši na potrebe zagrevanja objekta. U letnjim mesecima potrošnja električne energije je oko 400 kWh mesečno, dok je zimi u decembru, januaru i februaru prosečna mesečna potrošnja el. energije preko 2.500 kWh. Zbog prelaska u viši tarifni razred (tzv. crvena zona), prosečna godišnja cena električne energije je bila 10 RSD/kWh, a u najhladnijim mesecima kada su zahtevi za grejanjem bili najveći 12 RSD/kWh.

Zamenom električnog kotla toplotnom pumpom tipa vazduh-voda postignuta je ušteda u potrošnji električne energije za potrebe zagrevanja objekta od oko 7.000 kWh godišnje, u proseku. Procenjeno je da se na zagrevanje objekta prosečno trošilo oko 11.500 kWh, dok je nakon zamene sistema grejanja potrošnja oko 4.500 kWh što predstavlja uštedu od oko 60% električne energije. Pored toga, srednja cena električne energije je znatno niža i iznosi oko 7,3 RSD/kWh.

Ako se uzme u obzir faktor emisije elektro mreže iz [33], ušteda u potrošnji električne energije je ekvivalentna uštedi u emisijama CO₂ od oko 7t godišnje.

U finansijskom smislu ostvarena je godišnja ušteda od oko 62%, u proseku oko 105.000 RSD/god, pa se investicija od oko 400.000 dinara isplati za nepunih 4 godine. Obzirom na to da je garantovani period rada toplotne pumpe preko 10 godina, investicija u sistem zamene se može smatrati prihvatljivom. Pritom, treba naglasiti važnost faktora klime na lokaciji za koju se razmatra grejanje toplotnom pumpom ovog tipa, jer spoljna temperatura značajno utiče na koeficijent performansi toplotne

pumpe. Sa tim u vezi, fokus daljih istraživanja autora će biti na uključivanju klimatskih faktora pri analizi isplativosti ovakvih sistema.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Urge-Vorsatz, D., Cabeza, L.F., Serrano, S., Barreneche, C., Petrichenko, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 85-98, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
- [2] European commission, Eurostat, https://commission.europa.eu/index_en [pristupljeno 28.09.2023]
- [3] Lin, Y., Fan, Y., Yu, M., Jiang, L., Zhang, X. Performance investigation on an air source heat pump system with latent heat thermal energy storage, *Energy*, Vol. 239, Part A, 121898, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121898>
- [4] Zheng, Z., Zhou, J., Xu, F., Zhang, R., Deng, G. Integrated operation of PV assisted ground source heat pump and air source heat pump system: Performance analysis and economic optimization, *Energy Conversion and Management*, Vol. 269, 116091, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116091>
- [5] Mohammadzadeh Bina, S., Fujii H., Tsuya, S., Kosukegawa, H. Comparative study of hybrid ground source heat pump in cooling and heating dominant climates, *Energy Conversion and Management*, Vol. 252, pp. 115122, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115122>
- [6] Zhou, K., Mao, J., Li, Y., Zhang, H., Li, C., Wang L. Effect of environmental thermal disturbance on effective thermal conductivity of ground source heat pump system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 237, 114149, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114149>
- [7] Congedo, P.M., Baglivo, C., D'Agostino, D., Mazzeo, D. The impact of climate change on air source heat pumps, *Energy Conversion and Management*, Vol. 276, 116554, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116554>
- [8] Broin, E.Ó., Andrew Kelly, J., Santos, G.S., Grythe, H., Svendby, T., Solberg, S., Kelleher L., Clinch, P.J. Hitting the hotspots - Targeted deployment of air source heat pump technology to deliver clean air communities and climate progress: a case study of Ireland, *Atmospheric Environment: X*, Vol. 13, 100155, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100155>
- [9] REPowerEU Plan. COM(2022) 230 final. [EUR-Lex - 52022DC0230 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/eur-lex-content/object/?uri=CELEX:52022DC0230-EN) [pristupljeno 28.07.2023]
- [10] Accelerating the EU's shift towards natural refrigerant domestic heat pumps. <https://iifir.org/en/fridoc/accelerating-the-eu-s-shift-towards-natural-refrigerant-domestic-heat-145955> [pristupljeno 26.11.2022]
- [11] Carroll, P., Chesser, M., Lyons, P. Air source heat pumps field studies: a systematic literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 134, 110275, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>
- [12] Ni, L., Dong, J., Yao, Y., Shen, C., Qv, D., Zhang, X. A review of heat pump systems for heating and cooling of buildings in China in the last decade, *Renewable Energy*, Vol. 84, pp. 30-45, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.043>
- [13] Louise Jeffery, M., Wilson, R., Emmrich, J., Jones, C., Fekete, H., Höhne, N., Ramalope, D., Kachi, A. *Decarbonising buildings: achieving zero carbon heating and cooling*, 2022.
- [14] EHPA. European Heat Pump Market and Statistics Report 2021. <https://www.ehpa.org/market-data/> [pristupljeno 26.05.2023]
- [15] Leonzio, G., Fennell, P.S., Shah, N. Air-source heat pumps for water heating at a high temperature: state of the art, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 54, 102866, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102866>
- [16] IEA (2021). 'Heat Pumps' <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> [pristupljeno 26.05. 2023]
- [17] Hegarty, R.O., Kinnane, O., Lennon, D., Colclough, S. The performance potential of domestic heat pumps in a temperate oceanic climate, in: Littlewood, J., Howlett, R.J., Jain, L.C. (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2020*, Springer, Singapore, pp. 29-41, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8783-2_3
- [18] Zhang, Q., Zhang, L., Nie, J., Li, Y. Techno-economic analysis of air source heat pump applied for space heating in northern China, *Applied Energy*, Vol. 207, pp. 533-542, 2017.

- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.083>
- [19] Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., Esen, M. Forecasting of a ground-coupled heat pump performance using neural networks with statistical data weighting pre-processing, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 47, No. 4, pp. 431-441, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.03.004>
- [20] Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., Esen, M. Performance prediction of a ground-coupled heat pump system using artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, No. 4, pp. 1940-1948, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.081>
- [21] Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., Esen, M. Predicting performance of a ground-source heat pump system using fuzzy weighted pre-processing-based ANFIS, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 12, pp. 2178-2187, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.01.002>
- [22] Živković, D., Končalović, D., Vukašinović, V., Josijević, M., Gordić, D. Integracija toplotnih pumpi u postojeći energetska sistem u malim i srednjim preduzećima, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 32-38, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.32Z>
- [23] Savić, A., Šušteršič, V., Josijević, M., Nešović, A., Jurišević, N., Vukašinović, V. Numerička analiza toplotnih performansi geotermalne toplotne pumpe za potrebe grejanja i hlađenja stambene zgrade, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 60-64, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.60S>
- [24] Zhang, Y., Zhang, G., Zhang, A., Jin, Y., Ru, R., Tian, M. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: an analysis and review, *Energies*, Vol. 11, No. 10, pp. 2642, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11102642>
- [25] Le, K.X., Huang, M.J., Shah, N., Wilson, C., Artain, P.M., Byrne, R., Hewitt, N.J. High temperature air source heat pump coupled with thermal energy storage: comparative performances and retrofit analysis, *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 3878-3885, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.857>
- [26] Simendić, Z., Švenda, G., Latas, T., Mraović, D. Energetska efikasnost domaćinstva sa toplotnom pumpom i solarnom elektranom, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 30-38, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.30S>
- [27] Ma, G., Chai, Q., Jiang, Y. Experimental investigation of air-source heat pump for cold regions, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 26, No. 1, pp. 12-18, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00083-X)
- [28] Chen, Y.M., Lan, L.L. A fault detection technique for air-source heat pump water chiller/heaters, *Energy Buildings*, Vol. 41, No. 8, pp. 881-887, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.007>
- [29] Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union L 153/13*, 18/06/2010. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0031> [pristupljeno 23.10.2023]
- [30] Ružić S., Opačić B. Metodologija za proračun korisne toplotne energije potrebne za intermitentno i parcijalno grejanje objekata, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 20, No. 1-2, pp. 222-235, 2018.
- [31] Pravilnik o energetska efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011). https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetska_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 15.03.2023]
- [32] Elektroprivreda Srbije, <https://www.eps.rs/lat/snabdevanje/Stranice/cene.aspx> [pristupljeno 15.03.2023]
- [33] Gordic, D., Nikolic, J., Vukasinovic, V., Josijevic, M., Aleksic, A.D. Offsetting carbon emissions from household electricity consumption in Europe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 175, 113154, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113154>

AUTORI/AUTHORS

dr Mladen Josijević - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

dr Dušan Gordić - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)

dr Vladimir Vukašinović - vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)

msr Jelena Nikolić - istraživač saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, jelena.nikolic@fink.rs, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)

dr Dubravka Živković - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, dubravka@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0266-456X](https://orcid.org/0000-0002-0266-456X)