

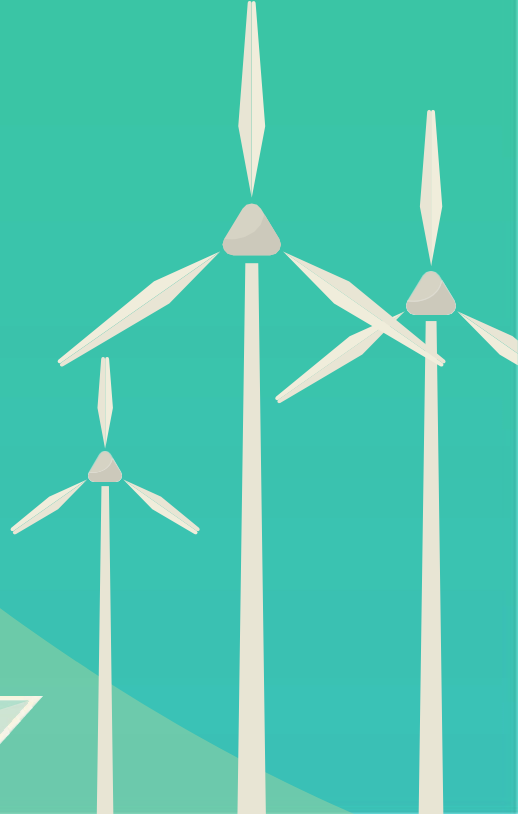
ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 1 / Godina XXVIII / Mart 2026.

energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 1, Mart 2026

Izdavač:

Savez energetičara
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd
e-mail: info@savezenergeticara.org
<http://www.savezenergeticara.org>

Suizdavači:

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Predsednik Saveza energetičara:

prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:

prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograda
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
prof. dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Miloš Banjac, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Popović, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Stevanović, Mašinski fakultet, Beogradu
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin, Beograd
prof. dr Vanja Šušteršić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
v. prof. dr Vladimir Vukašinović, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
docent dr Tomislav Rajić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
dr Iva Batić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Velika Britanija
prof. Vladimir Terzija, Humboldt Fellow, IEEE Fellow, EiC Elsevier IJEPES
prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica University Timisoara, Rumunija
prof. dr Neven Duić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
prof. dr Rade Čirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza Kušljagić, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BiH
prof. dr Peter Vrtič, Univerzitet u Mariboru, Slovenija
prof. dr Predrag Popovski, Mašinski fakultet Skopje, Severna Makedonija
dr Ilija Batas-Bijelić, Generalni sekretar Saveza, Institut tehničkih nauka SANU

Priprema, tehnička i jezička obrada:

Savez energetičara

Štamparija:

Mašinac, Kragujevac

Tiraž:

100

UDK

620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

*Radovi su recenzirani uz tehničku obradu.
Nijedan deo ove publikacije ne može biti
reprodukovano, presnimavano ili prenošeno bez
prethodne saglasnosti Izdavača.*

Sadržaj

- [01] Dejan IVEZIĆ, Dejan STOJANOVIĆ, Branislava LEPOTIĆ KOVAČEVIĆ, Marija ŽIVKOVIĆ
Mapa puta dekarbonizacije sektora daljinskog grejanja u Republici Srbiji / Policy Roadmap for Decarbonisation of the District Heating Sector in the Republic of Serbia
- [08] Luka ZOROJE, Doroteja ZAREV, Balša ĆERANIĆ, Predrag STEFANOV, Jelena STOJKOVIĆ TERZIĆ, Leposava RISTIĆ, Andrea BONFIGLIO
Metode optimizacije i primene veštačke inteligencije u efikasnoj integraciji vehicle-to-grid sistema / Optimization Frameworks and Artificial Intelligence Applications for Efficient Vehicle-To-Grid Integration
- [16] Aleksej ZILOVIC, Luka STREZOSKI, Chad ABBEY
Adaptive Overcurrent Protection in Inverter-Dominated Microgrids Considering Fault Ride-Through and Dynamic Operating Modes / Adaptivna prekostrujna zaštita u mikromrežama sa dominantnim inverterskim izvorima uz razmatranje Fault Ride-Through i dinamičkih režima rada
- [24] Mahir HAFIZOVIĆ, Muhamed HADŽIABDIĆ, Bojan NIČENO
Simulations of Contaminant Dispersion from Accidental Releases in Cities: A CFD Approach / Simulacije širenja zagađujućih materija uslijed nenamjernih ispuštanja u gradovima: CFD pristup
- [31] Branislav PETROVIĆ, Sandra KOVAČEVIĆ, Miloš BANJAC
Određivanje količine toplote akumulisane u zidu pri nestacionarnim promenama temperature spoljašnjeg vazduh / Determination of the Amount of Heat Accumulated in the Wall in Conditions of Changeable outside Temperature

energija

- [38] Davor KONČALOVIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Dušan GORDIĆ, Mladen JOSIJEVIĆ, Filip NASTIĆ, Dubravka ŽIVKOVIĆ
Shallow Geothermal in the Danube Region: Serbia's Priorities and Actions / Plitka geotermalna energija u Dunavskom regionu - Prioriteti i mere za Srbiju
- [46] Sandra KOVAČEVIĆ, Branislav PETROVIĆ, Miloš BANJAC
Poređenje i analiza vrednosti koeficijenta transmisionih gubitaka toplote prema tlu određenog prema EN ISO 13790:2010 i EN ISO 13370:2017 / Comparison and Analysis of the Total Heat Transfer Coefficient to the Ground Determined According to EN ISO 13790:2010 and EN ISO 13370:2017
- [55] Miloš KUZMAN
Accelerating Energy Transition through the Introduction of Alternative Fuels Infrastructure / Ubrzanje energetske reforme uvođenjem infrastrukture za alternativna goriva
- [61] Jelena BALŠIĆ, Mileta ŽARKOVIĆ
Napredna dijagnostika stanja vetroparkova / Advanced Condition Diagnostics of Wind Farms
- [67] Željko V. Despotović, Uroš Ilić
Off-grid solarno napajanje rezonantnog vibracionog dozatora sa elektromagnetnom pobudom / Off-Grid Solar Power Supply for a Resonant Vibratory Feeder with Electromagnetic Excitation

Mapa puta dekarbonizacije sektora daljinskog grejanja u Republici Srbiji

Dejan Ivezić*, Dejan Stojanović**, Branislava Lepotić Kovačević***, Marija Živković*

* Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet

** Poslovno udruženje „Toplane Srbije“, Šabac

*** Udruženje za pravo energetike Srbije, Beograd

Rezime - Sektor daljinskog grejanja ima značajnu ulogu u energetskekom sistemu Republike Srbije i obuhvata 60 sistema daljinskog grejanja. Međutim, sektor se suočava sa ozbiljnim strukturnim i finansijskim izazovima, uključujući zastarelu infrastrukturu, visoku zavisnost od fosilnih goriva — posebno prirodnog gasa — i ograničenu integraciju obnovljivih izvora energije. S obzirom na to da se proizvodnja toplote pretežno zasniva na sagorevanju, sistemi daljinskog grejanja značajno doprinose emisijama gasova sa efektom staklene bašte i lokalnom zagađenju vazduha. Pored toga, analize poslovnih performansi ukazuju na izražene razlike među komunalnim preduzećima u pogledu efikasnosti, produktivnosti i profitabilnosti, dok ukupna finansijska nestabilnost ostaje sistemski problem u celom sektoru. Institucionalne nadležnosti za daljinsko grejanje u velikoj meri su decentralizovane i nalaze se na nivou lokalnih samouprava, što dodatno otežava koordinisane napore u procesu dekarbonizacije. U ovom radu predstavlja se Mapa puta (engl. „Policy Roadmap“) za dekarbonizaciju sektora daljinskog grejanja u Srbiji, razvijena u skladu sa nacionalnim strateškim dokumentima - Nacionalnim energetskekim i klimatskim planom i Strategijom energetike. Mapa puta je strukturirana oko šest ključnih stubova: koordinacije zainteresovanih strana, definisanja ciljeva za smanjenje emisija, finansijskih mehanizama podrške, lokalnog planiranja snabdevanja toplotom, obezbeđivanja konkurentnih i transparentnih cena, kao i diverzifikacije energetskekom miksa kroz dinamičku optimizaciju snabdevanja. Razmatraju se dva pristupa implementaciji: Osnovni pristup, usklađen sa postojećim regulatornim okvirom, i Decentralizovani pristup, koji podstiče pristup trećih strana mrežama i uključivanje novih proizvođača toplote. Mapa puta predviđa faznu primenu u periodu do 2040. godine, koja obuhvata pravne reforme, jačanje institucionalnih kapaciteta, finansijske mehanizme i uvođenje novih tehnologija.

Ključne reči – daljinsko grejanje, dekarbonizacija, mapa puta

I UVOD

Sektor daljinskog grejanja (DG) u Srbiji sastoji se od 60 sistema daljinskog grejanja u istom broju gradova. Usluga daljinskog hlađenja trenutno nije prisutna na tržištu energije. Sektor DG u Srbiji suočava se sa značajnim izazovima, uključujući zastarelu infrastrukturu, visoku zavisnost od fosilnih goriva (posebno prirodnog gasa) i nisku integraciju obnovljivih izvora energije (OIE). Udeo biomase, kao jedinog OIE koji se

koristi, u energetskekom miksu proizvodnje toplote bio je 2,87% u 2024. godini [1]. Posledica proizvodnje toplote isključivo zasnovane na procesima sagorevanja su relativno visoke emisije gasova staklene bašte (GSG) i zagađenje vazduha u gradovima.

Dva usvojena nacionalna strateška dokumenta definišu energetskeku politiku Republike Srbije - Integrisani nacionalni energetskeki i klimatskeki plan Republike Srbije za period 2030. sa projekcijama do 2050. (INEKP) [2] i Strategija razvoja energetskekog sektora Republike Srbije do 2040. sa projekcijama do 2050. godine (Strategija) [3]. Oba dokumenta predviđaju niz mera i aktivnosti vezanih za dekarbonizaciju sektora.

U radu se prikazuje postojeće stanje u sektoru daljinskog grejanja uzimajući u obzir regulatorne, institucionalne, finansijske i tehničke aspekte, kao i uticaj sektora daljinskog grejanja na životnu sredinu. Na osnovu urađene SWOT analize za dekarbonizaciju sektora daljinskog grejanja (i hlađenja), predložena je dalja razrada i proširenje mera i aktivnosti navedenih u INEKP-u i Strategiji [4].

Uz pretpostavku implementacije predloženih mera i aktivnosti u prikazana su dva usaglašena pristupa razvoju sektora DG. Osnovni pristup podrazumeva finansijskeku i organizacionu konsolidaciju sistema i dekarbonizaciju sektora u skladu sa postojećim nacionalnim planskekim dokumentima (INEKP i Strategija) i trenutnim pravnekim okvirom. Napredni pristup je ambiciozniji, a njegova ključna tačka je decentralizacija u smislu podsticanja pristupa trećih strana mrežama DG. Ovaj pristup ima za cilj da podstakne i motiviše „nove“ proizvođače toplote, intenziviranje primene visokoefikasne kogeneracije, uključujući integraciju viškova toplote iz industrijskekog i komercijalnog sektora, inovativnih tehnologija (toplote iz proizvodnje vodonika) i sl.

II TRENUTNO STANJE SEKTORA DALJINSKOG GREJANJA

Zakon o energetici predstavlja osnovnu pravneog okvira za energetskeke delatnosti u vezi sa proizvodnjeom, distribucijeom i snabdevanjeom toplotneom energijeom, kao i sa kombinovanom proizvodnjeom toplote i električne energije (kogeneracijeom). Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije se bavi toplotneom energijeom u delu podsticaja za proizvodnje iz obnovljivih izvora, dok Zakon o energetskekoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije uređuje politiku i primenu mera energetskeke efikasnosti u oblasti toplotne energije. Zakon o javnim preduzećima reguliše komunalne delatnosti vezane za toplotnu energiju, ali je

delimično neusklađen sa Zakonom o energetici i Zakonom o energetske efikasnosti

Institucije nadležne za sektor daljinskog grejanja i hlađenja su administrativne institucije na državnom i lokalnom nivou, regulatorna tela, preduzeća za daljinsko grejanje i civilni sektor. Lokalna samouprava izdaje energetske dozvole i licence, vodi registre licenci, postavlja uslove isporuke, reguliše raspodelu troškova, odobrava cene toplote i obezbeđuje pouzdanu isporuku toplote. Takođe, lokalne samouprave su te koje treba da promovišu i obezbede podsticaje za korišćenje obnovljivih izvora energije u sektoru.

Analiza efikasnosti, produktivnosti, ekonomičnosti i profitabilnosti urađena na osnovu Izveštaja o radu sistema daljinskog grejanja u Republici Srbiji u 2023. godini [1], pokazuje značajne razlike među preduzećima za daljinsko grejanje, sa jednim pravilom: veća preduzeća ostvaruju bolje rezultate. Međutim, mnoga preduzeća se suočavaju sa finansijskom nestabilnošću: 12 preduzeća ima gubitke veće od kapitala, 18 ima dugove veće od kapitala, a 32 imaju negativan neto radni kapital, što ukazuje na ozbiljne probleme sa likvidnošću.

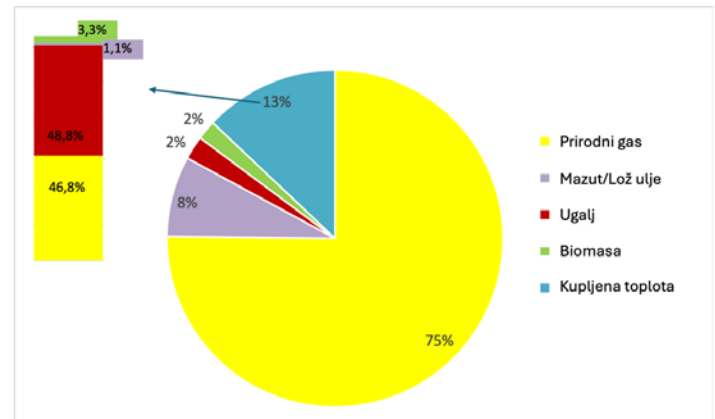
Ukupna nominalna snaga toplana u vlasništvu toplana u sistemu DG, smeštenih na 258 lokacija, iznosi 5.910 MW. Takođe, toplane koriste i 789 MW kapaciteta za proizvodnju toplotne energije koji su u vlasništvu drugih pravnih lica. Pored postrojenja za proizvodnju samo toplotne energije, u okviru sistema DG postoje četiri gasna kogeneracijska postrojenja u Beogradu (10 MWe), Novom Sadu (10+4 MWe) i Novom Pazaru (1 MWe). Prosečna starost toplana za proizvodnju samo toplotne energije je preko 28 godina. Najveći sistem DG u zemlji sa toplotnom snagom od 2.856 MW nalazi se u Beogradu. Još 7 sistema ima instalisanu snagu veću od 100 MW. U ovoj grupi, najveći je sistem u Novom Sadu sa snagom od 705 MW. Najveći broj sistema DG-a ima toplotnu snagu između 20 MW i 100 MW (21) i manju od 20 MW (23).

Iako se u evropskoj uniji sektor DG posmatra zajedno sa sektorom daljinskog hlađenja, posebno uzimajući u obzir prisutne klimatske promene, u Republici Srbiji za sada ne postoje u funkciji sistemi za daljinsko hlađenje.

Proizvodnja toplotne energije u toplanama potpuno se zasniva na procesu sagorevanja. Izvori energije su fosilna goriva (prirodni gas, ugalj i derivati nafte) i biomasa. Jedini proces koji nije sagorevanje, za sada, predstavlja relativno mali objekat za proizvodnju tople vode u Pančevu pomoću termalnih solarnih kolektora snage 1 MW. Energetska vrednost goriva korišćenih 2023. godine za proizvodnju toplote iznosila je 7.144 GWh. Sa strukturom goriva koja je prikazana na Slici 1. Biomasa je jedini OIE koji se koristi (manje od 3% ukupne potrošnje goriva).

Ukupna direktna godišnja emisija ugljen-dioksida za 2023. godinu procenjena je na 1,16 miliona tona, metana na 39 hiljada tona, a azot suboksida 5,4 hiljada tona. Glavni izvor emisije svih gasova sa efektom staklene bašte je sagorevanje prirodnog gasa (koji se dominantno koristi kao gorivo). U slučaju metana i azot-suboksida, značajne izvore predstavljaju drvena biomasa i mazut.

Prosečna relativna emisija CO_{2eqv.} iznosi 0,230 kg po proizvedenom kWh toplotne energije. Ova vrednost odgovara odgovara relativnoj emisiji efikasnih sistema u kojima se dominantno koristi prirodni gas. Najveće vrednosti emisije zabeležene su kod sistema daljinskog grejanja koji koriste ugalj (>0,4 kg CO_{2eqv.}/kWh), dok su najniže emisije karakteristične za sisteme koji koriste biomasu (<0,02 kg CO_{2eqv.}/kWh).



Slika 1. Struktura korišćenja energenata u 2023. godini [1]

S obzirom da je proizvodnje toplotne energije zasnovana isključivo na procesima sagorevanja, značajne su i emisije klasičnih polutanata: 7.746 kg NO_x, 3.215 t SO₂, 303 t čestica, 60,06 t CO tokom 2023. godine.

U odnosu na ukupan broj domaćinstava u Srbiji (2.625.711), procenat domaćinstava povezanih na daljinsko grejanje iznosi 25,3% (popis). Taj procenat varira, od 2,38% u Kikindi, do 76% u Novom Sadu i 85% u Boru, U Beogradu, kao najvećem sistemu DG, 56,5% od ukupnog broja domaćinstava koriste DG. Sa stanovišta priuštivosti, uporedna analiza pokazuje da su troškovi grejanja iz SDG sa naplatom prema potrošnji približni troškovima grejanja korišćenjem peleta i ogrevnog drveta (Beograd), dok je DG sa naplatom prema jedinici grejane površine skuplje [5].

II KLJUČNI IZAZOVI I PRILIKE U PROCESU DEKARBONIZACIJE SDG

Fragmentirane odgovornosti između nacionalnih i lokalnih vlasti, nesaglasnosti u pravnom okviru i relativno spora implementacija politika predstavljaju glavne izazove u regulatorno-institucionalnom okviru vezanom za proces dekarbonizacije daljinskog grejanja. Neophodna je harmonizacija propisa, dalje usklađivanje sa EU direktivama, naročito u oblasti integracije obnovljivih izvora, energetske efikasnosti i pristupa trećih strana mrežama daljinskog grejanja. Potrebno je jačanje kapaciteta na nacionalnom i lokalnom nivou (lokalne samouprave, preduzeća za daljinsko grejanje i dr.). Razmotriti mogućnost uključivanja i daljinskog hlađenja.

Nepovoljna finansijska situacija dodatno otežava napore za modernizaciju i dekarbonizaciju sistema daljinskog grejanja. Značajne razlike u karakteristikama postojećih sistema zahtevaju prilagođene pristupe i strategije za efikasno rešavanje problema. Potrebni su novi finansijski modeli i podsticaji za intenzivniju dekarbonizaciju. Pre značajnijih ulaganja u dekarbonizaciju,

sektor daljinskog grejanja mora proći kroz finansijsku konsolidaciju i steći kreditnu sposobnost kroz proces restrukturiranja koji obuhvata sledeće elemente:

- Analiza solventnosti: Procena preduzeća sa gubicima većim od kapitala radi ocene potencijala za oporavak. Za održiva preduzeća može biti neophodno državno podržano finansiranje kapitala, moguće putem specijalnog fonda.
- Analiza likvidnosti: Analiza preduzeća sa dugovima ili nedostatkom radnog kapitala. Rešenja zavise od lokalnih vlasti, državnih institucija i banaka.
- Finansijski podsticaji: Usmereni na modernizaciju sistema, unapređenje energetske efikasnosti u proizvodnji, distribuciji i potrošnji, dekarbonizaciju proizvodnje itd. Podsticaji mogu uključivati fiskalne mere, povraćaje sredstava i dr.
- Nefinansijske mere: Profesionalno upravljanje sistemima daljinskog grejanja, participativni pristup u odlučivanju i planiranju i sl.
- Međunarodna podrška: Podrška međunarodnih institucija, banaka i fondova je ključna za ubrzanje neophodnih reformi.

Dekarbonizacija sistema daljinskog grejanja mora biti sistematski strukturirana i pažljivo planirana [6]. Da bi se obezbedio prelaz na održivi sektor grejanja i hlađenja, neophodno je delovati na:

- Stranu potražnje kako bi se povećala energetska efikasnost i smanjila ukupna potražnja,
- Stranu snabdevanja zamenom fosilnih goriva održivijim, niskougljeničnim izvorima energije.

Dostupne mere za dekarbonizaciju mogu se grupisati u sledeće kategorije:

- Zamenjena fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije i otpadnom toplotom [7-8],
- Elektrifikacija snabdevanja toplotom kroz povećanu upotrebu toplotnih pumpi, električnih kotlova (koji koriste električnu energiju proizvedenu iz OIE) i korišćenje toplotnih skladišta,
- Uvođenje zelenog vodonika,
- Povećanje upotrebe visokoeffikasne kogeneracije.

SWOT analiza, kao okvir za identifikaciju i analizu snaga, slabosti, prilika i pretnji za dekarbonizaciju sektora daljinskog grejanja i hlađenja, prikazana je u Tabeli 1.

Tabela 1. SWOT analiza dekarbonizacije sektora daljinskog grejanja i hlađenja

Snage	Slabosti
• Razvijena mreža daljinskog grejanja • Značajan deo gradskih domaćinstava u Srbiji povezan je na SDG • Reputacija pouzdanog tehnološkog provajdera: Sistemi daljinskog grejanja uživaju ugled kao stabilan i pouzdan izvor grejanja. • Uvođenje statusa energetski ugroženog kupca i popusta za grejanje za kvalifikovana domaćinstva pruža finansijsko olakšanje onima koji se suočavaju sa visokim troškovima daljinskog grejanja.	• Nepotpuna usklađenost regulatornog okvira. • Značajan nedostatak obrtnih sredstava i naglašena nelikvidnost toplana • Uprkos merama za povećanje priuštivosti, mnogi građani i dalje smatraju daljinsko grejanje skupim. • Nedostatak mogućnosti upravljanja potrošnjom • Ograničena pokrivenost na nacionalnom nivou • Otpor ključnog kadra prema novim tehničkim konceptima i projektima OIE zbog nedovoljne uključenosti u ranim fazama razvoja projekata. • Nedostatak informacija i edukacije o održivosti i isplativosti obnovljivih izvora energije.
Prilike	Pretnje
• Dostupnost obnovljivih izvora energije i/ili otpadne toplote za većinu SDG. • Usvajanje nove regulative, uključujući poseban Zakon o grejanju i hlađenju (Zakon o toplotnoj energiji). • Povećanje broja domaćinstava priključenih na daljinsko grejanje poboljšalo bi dostupnost usluge. • Mere energetske efikasnosti i neto obračun isporučene energije smanjuju troškove daljinskog grejanja za potrošače. • Bolja regulacija emisija u poređenju sa individualnim sistemima omogućava poboljšanje kvaliteta vazduha • Nova radna mesta u sektoru vezana za korišćenje OIE i primenu mera energetske efikasnosti: • Primena OIE podstiče obrazovne i istraživačke aktivnosti.	• Pravna nesigurnost zbog nedovoljno jasnog pravnog okvira. • Tenderske procedure za projekte obnovljive energije su previše složene, netransparentne i vremenski zahtevne. • Rastuća popularnost i opadajući troškovi toplotnih pumpi i drugih individualnih rešenja mogu ugroziti konkurentnost daljinskog grejanja. • Porast troškova grejanja posebno pogađa osetljive grupe (penzionere sa niskim prihodima, samohrane majke), koje mogu biti ugrožene zbog nemogućnosti plaćanja. • Mogući otpor lokalnih zajednica prema velikim projektima OIE zbog zabrinutosti za korišćenje zemljišta i očuvanje kulturnih vrednosti • Nedostatak poverenja u sposobnost efikasnog sprovođenja politike obnovljive energije u interesu svih društvenih grupa.

III PLAN POLITIKE ZA DEKARBONIZACIJU SISTEMA GREJANJA I HLAĐENJA U SRBIJI

Plan politike dekarbonizacije zasniva se na merama koje su se pokazale uspešnim u praksi u zemljama EU [9-12]:

- Usklađivanje interesa kroz saradnju i efikasnu komunikaciju između nacionalnih i lokalnih aktera (lokalne samouprave, preduzeća za daljinsko grejanje, krajnji korisnici);
- Usvajanje konkretnih ciljeva za smanjenje emisije gasova sa

efektom staklene bašte (dekarbonizacija) za sektor daljinskog grejanja i hlađenja;

- Finansijska podrška – Uvođenje direktnih ili indirektnih subvencija (npr. investicioni grantovi, programi podrške za proizvodnju toplote iz OIE ili otpadne toplote, pristup konkurentnom zaduživanju, poreski podsticaji, porezi na fosilna goriva...) i/ili uvođenje posebnih finansijskih instrumenata koji mogu poboljšati konkurentnost sistema daljinskog grejanja (SDG);

D. Planiranje snabdevanja toplotnom energijom na nivou lokalnih zajednica, uz promociju sistema daljinskog grejanja kao dela lokalnih klimatskih i energetske strategije – Integracija planova snabdevanja toplotnom energijom u urbanističke planove;

E. Postizanje konkurentnih i transparentnih cena grejanja u poređenju sa alternativnim energetske rešenjima dostupnim na tržištu;

F. Diversifikacija energetske miksa i poboljšanje isplativosti kroz dinamičku optimizaciju snabdevanja.

Ove mere mogu uključivati različite skupove aktivnosti, u zavisnosti od nivoa dekarbonizacije sektora koji se želi postići. Iz

tog razloga, razmatrana su dva pristupa u određivanju Plana politike, pri čemu oba pristupa predviđaju faznu implementaciju u periodu od 2025. do 2040. godine, koja obuhvata pravne reforme, jačanje institucionalnih kapaciteta, mehanizme finansiranja i uvođenje tehnologija.

Prvi pristup je takozvani Osnovni pristup, koji podrazumeva finansijsku i organizacionu konsolidaciju sistema daljinskog grejanja i hlađenja (SDG) i dekarbonizaciju sektora u skladu sa postojećim nacionalnim planskim dokumentima (INEKP i Strategija) i pravnim okvirom. U Tabeli 2, prikazana je razrada mera i aktivnosti u ovom pristupu.

Tabela 2. Mere i aktivnosti u Osnovnom pristupu dekarbonizaciji sektora daljinskog grejanja i hlađenja

A. Usklađivanje interesa kroz saradnju i efikasnu komunikaciju između nacionalnih i lokalnih aktera	1. Donošenje posebnog Zakona o grejanju i hlađenju (alternativni naziv Zakon o toplotnoj energiji)
	2. Donošenje podzakonskih akata Zakona o grejanju i hlađenju
	3. Izmene drugih zakona
	4. Unapređenje rada institucija (engl. <i>Capacity building</i>)
	5. Redakcija postojećih propisa u smislu doslednog uvođenja principa „energetska efikasnost na prvom mestu“
B. Konkretni ciljevi za smanjenje emisije gasova staklene bašte (dekarbonizaciju) za sektor daljinskog grejanja i hlađenja	1. Donošenje planova dekarbonizacije SDG za period 2030 – 2035 – 2040. godina sa eksplicitno navedenim ciljevima smanjenja emisije gasova s efektom staklene bašte, povećanje energetske efikasnosti sistema i kvotama za korišćenje OIE i otpadne toplote u proizvodnji energije
	2. Obaveza izrade posebnog separata vezanog za daljinsko grejanje u okviru „Programa razvoja proizvodnje i upotrebe toplotne energije“ (prema č. 8v Zakona o energetici) sa ciljanim vrednostima za dekarbonizaciju, povećanje EE, udela OIE i otpadne toplote
	3. Revizija INECP-a tako da se uspostave konkretni ciljevi dekarbonizacije SDG na nacionalnom nivou
	4. Revizija Programa ostvarivanja Strategije energetike tako da se uspostave konkretni ciljevi dekarbonizacije SDG na nacionalnom nivou
C. Finansijska podrška	1. Donošenje plana finansijske konsolidacije nelikvidnih SDG
	2. Donošenje propisa o podsticajnim merama za dekarbonizaciju SDG
	3. Primena MRVA sistema u sektoru daljinskog grejanja i hlađenja
D. Planiranje snabdevanja toplotnom energijom na nivou lokalnih zajednica	1. Revizija planova unapređenja energetske sistema komunalnih usluga (sistem daljinskog grejanja, sistem daljinskog hlađenja)
	2. Izmene lokalnih urbanističkih propisa
	3. Donošenje propisa o zabrani korišćenja uglja i derivata nafte u urbanim sredinama u postrojenjima sa toplotnom snagom većom od 1 MW
E. Konkurentne i transparentne cene grejanja	1. Revizija Uredbe o utvrđivanju metodologije za određivanje cene snabdevanja krajnjeg kupca toplotnom energijom
F. Diversifikacija energetske miksa	1. Donošenje propisa (pravilnika) o sertifikaciji i kvalitetu drvne sečke

Tabela 3. Mere i aktivnosti u Naprednom pristupu dekarbonizaciji sektora daljinskog grejanja i hlađenja

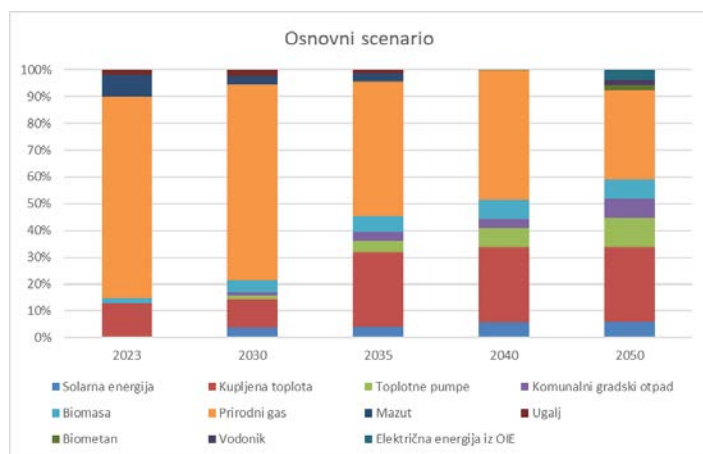
A. Usklađivanje interesa kroz saradnju i efikasnu komunikaciju između nacionalnih i lokalnih aktera	1A. Donošenje propisa koji definiše uslove i način pristupa treće strane mreži daljinskog grejanja
B. Konkretni ciljevi za smanjenje emisije gasova staklene bašte (dekarbonizaciju) za sektor daljinskog grejanja i hlađenja	1A. Donošenje posebnog plana razvoja sistema daljinskog hlađenja
C. Finansijska podrška	1A. Uspostavljanje dodatnih finansijskih mehanizama za podršku korišćenja OIE i otpadne toplote u sistemima daljinskog grejanja i hlađenja
D. Planiranje snabdevanja toplotnom energijom na nivou lokalnih zajednica	1A. Izrada GIS modela potencijala otpadne toplote i visokoefikasne kogeneracije iz industrijskih postrojenja, postrojenja za proizvodnju energije i sektora usluga za korišćenje u SDG
	2A. Uvođenje obaveze izrade posebnog dokumenta posvećenog mogućnosti korišćenja otpadne toplote u SDG za industrijska i komercijalna preduzeća
F. Diversifikacija energetske miksa	1A. Harmonizacija propisa vezanih za korišćenje vodonika u SDG
	2A. Donošenje propisa koji se tiče garancije porekla biometana i, kao i održivosti proizvodnje biometana

Drugi pristup je takozvani Napredni pristup. To je ambiciozniji pristup, koji, pored skupa mera i aktivnosti iz Osnovnog pristupa, predviđa njihovu dodatnu razradu i unapređenje, tako da se, uz uvođenje nekih novih mera, proces dekarbonizacije dodatno ubrza. Ključna tačka ovog pristupa je decentralizacija u smislu podsticanja pristupa trećih strana mrežama. Ovaj pristup ima za cilj da podstakne i motiviše „nove“ proizvođače toplote, uključujući integraciju viškova toplote iz industrijskog i komercijalnog sektora, toplote iz proizvodnje vodonika i sl. U Tabeli 3, prikazana je razrada mera i aktivnosti u ovom pristupu

IV SCENARIJI DALJEG RAZVOJA SISTEMA DALJINSKOG GREJANJA I HLAĐENJA

Primena mera i instrumenata politika predloženih kroz Osnovni i Napredni pristup, za posledicu bi trebalo da ima dekarbonizaciju sistema u smislu manje proizvodnje toplotne energije korišćenjem fosilnih goriva. Očekivani rezultati transformacije (dekarbonizacije) sistema daljinskog grejanja prikazani su kroz analizu dva scenarija: osnovnog i naprednog.

Osnovni scenario je razvijen uzimajući u obzir razvoj sistema daljinskog grejanja koji je prikazan u Strategiji razvoja energetike, uz dodatno uvođenje biometana, direktnog korišćenja obnovljive električne energije i vodonika (kroz mešanje sa prirodnim gasom kao i otpadne topote koja se generiše u procesu elektrolize. Načelno, ovaj scenario odgovara implementaciji paketa mera energetske politike prikazanog u Osnovnom pristupu. Projekcija promene strukture proizvodnje toplotne energije za Osnovni scenario prikazana je na Slici 2.



Slika 2. Promena strukture proizvodnje toplotne energije prema Osnovnom scenariju [4]

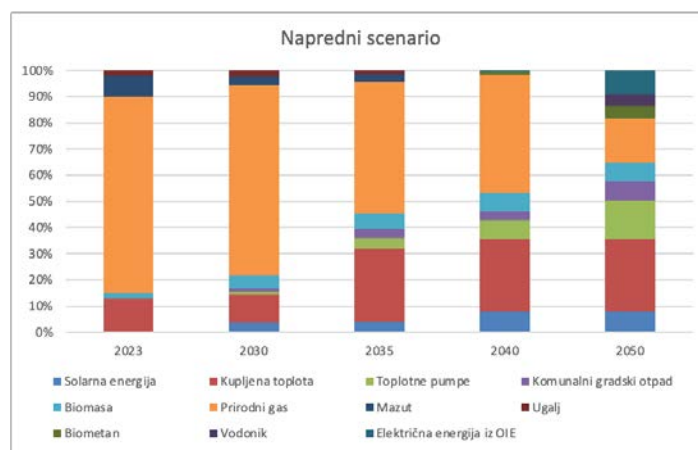
Ovakva promena energetske miksa u proizvodnji toplotne energije imaće za posledicu i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte. Projekcije emisija gasova sa efektom staklene bašte i emisijih faktora za period do 2050. godine prikazane u Tabeli 4. U odnosu na 2023. godinu, emisija $\text{CO}_{2\text{eqv}}$ iz sistema daljinskog grejanja opada za oko 13% do 2035. godine, a za dodatnih 36% do 2050. godine. U istom periodu emisijni faktor – specifična emisija iz SDG opada sa 0,231 $\text{kgCO}_{2\text{eqv}}$, na 0,1 $\text{kg CO}_{2\text{eqv}}$ po kWh proizvedene toplotne energije. U odnosu na 2023. godinu kada je emisijni faktor

iznosio za ugljendioksid 0.230 kg/kWh , očekivana vrednost 2050. iznosi 0.097 kg/kWh , što je 42% od početne vrednosti.

Tabela 4. Emisije GHG gasova, Osnovni scenario, [4]

Emisije	2023.	2030.	2035.	2040.	2050.
CO_2 , (1,000 t)	1.163,33	1.184,81	1.000,50	866,23	577,96
CH_4 , t	39,07	94,84	126,26	129,74	165,13
N_2O , t	5,42	85,63	71,18	72,34	52,14
$\text{CO}_{2\text{ekv}}$, (1,000 t)	1.165,87	1.250,98	1.018,73	884,38	595,53
Specifična emisija $\text{kg CO}_2/\text{kWh}$	0,230	0,192	0,169	0,142	0,097
Specifična emisija $\text{kgCO}_{2\text{ekv}}/\text{kWh}$	0,231	0,195	0,172	0,146	0,100

Napredni scenario je ambiciozniji u odnosu na Osnovni scenario i pretpostavlja primenu punog kapaciteta mera i instrumenata energetske politike predloženih u Naprednom pristupu. Do 2035. godine nema razlike između Osnovnog i Naprednog scenarija. Ovakva pretpostavka je usvojena na osnovu relativno kratkog razmatranog perioda (10 godina) i vrlo ambicioznih ciljeva i planova čija je realizacija predviđena do 2035. godine. U odnosu na Osnovni scenario, u periodu posle 2035. godine predviđeno je intenzivnije korišćenje biometana, vodonika, električne energije iz OIE, toplotnih pumpi i solarne energije. Struktura korišćenih izvora energije za proizvodnju toplotne energije u periodu do 2050. godine prikazana je na Slici 3.



Slika 3. Promena strukture proizvodnje toplotne energije prema Naprednom scenariju [4]

Tabela 5. Emisije GHG gasova, Napredni scenario, [4]

Emisije	2023.	2030.	2035.	2040.	2050.
CO_2 , (1,000 t)	1.163,33	1.184,81	1.000,50	832,10	294,78
CH_4 , t	39,07	94,84	126,26	129,13	160,08
N_2O , t	5,42	85,63	71,18	69,90	32,44
$\text{CO}_{2\text{ekv}}$, (1,000 t)	1.165,87	1.250,98	1.018,73	854,67	307,96
Specifična emisija $\text{kg CO}_2/\text{kWh}$	0,230	0,192	0,169	0,133	0,050
Specifična emisija $\text{kgCO}_{2\text{ekv}}/\text{kWh}$	0,231	0,195	0,172	0,136	0,052

Projekcije emisije gasova sa efektom staklene bašte i emisijom faktora prema Naprednom scenariju prikazane su Tabeli 5. Očekivana vrednost emisijonog faktora 2050. godine u naprednom scenariju dekarbonizacije iznosi 0.05 kgCO₂/kWh, što je manje od jedne četvrtine u odnosu na trenutnu vrednost.

V ZAKLJUČAK

Sektor daljinskog grejanja u Republici Srbiji suočava se sa izraženim strukturnim, finansijskim i regulatornim izazovima koji značajno utiču na njegovu održivost i sposobnost dekarbonizacije. Predložena Mapa puta dekarbonizacije, zasnovana na šest ključnih stubova politike i usklađena sa nacionalnim strateškim dokumentima, definiše sistemski i fazni pristup transformaciji sektora do 2050. godine.

Razmatrana dva scenarija pokazuju da je moguće ostvariti značajno smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, pri čemu Napredni pristup omogućava ubrzaniju i dublju dekarbonizaciju kroz decentralizaciju, pristup trećih strana mrežama i intenzivniju integraciju OIE, otpadne toplote i novih tehnologija. Ostvarenje projektovanih ciljeva zahteva pravnu harmonizaciju, finansijsku konsolidaciju sistema, jačanje institucionalnih kapaciteta i aktivno uključivanje lokalnih zajednica i privatnog sektora. Dekarbonizacija sektora daljinskog grejanja predstavlja i razvojnu priliku za unapređenje energetske bezbednosti, kvaliteta vazduha i dugoročne konkurentnosti energetskog sistema Republike Srbije.

ZAHVALNICA

The authors are grateful to the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) and the State Secretariat for Economic Affairs (SECO) of the Swiss Confederation allowing the use of the results of the ReDE Serbia: Renewable District Energy in Serbia Projects, Project A: Policy Roadmap for Decarbonization of the District Heating and Cooling Sector in the Republic of Serbia.

The authors acknowledge the support of the Science Fund of the Republic of Serbia, Grant No. 4344, "Forward-Looking Framework for Accelerating Households" Green Energy Transition – FF GreEN.

LITERATURA

- [1] Poslovno udruženje "Toplane Srbije", Izveštaj o radu sistema daljinskog grejanja u Republici Srbiji u 2023. godini, Šabac, 2024, https://www.toplanesrbije.org.rs/uploads/ck_editor/files/Godisnji%20izvestaj%202024.pdf [pristupljeno 16.01.2026]
- [2] Integrisani nacionalni energetski i klimatski plan Republike Srbije za period do 2030. sa vizijom do 2050. godine, Sl. glasnik RS, 70/2024, http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2024_08/SG_070_2024_002.htm [pristupljeno 16.01.2026]

- [3] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine, Sl. glasnik RS, broj 94/2024, <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/strategija/2024/94/1/reg> [pristupljeno 16.01.2026]
- [4] SESS, ReDE Serbia: Renewable District Energy in Serbia Projects, Project A: Policy Roadmap for Decarbonization of the District Heating and Cooling Sector in the Republic of Serbia, Final Report, Belgrade, 2025, <https://ffgreen.rgf.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2025/11/Elektrane-2025-DHS-decarbonization-.pdf> [pristupljeno 16.01.2026]
- [5] Agencija za energetiku Republike Srbije, Troškovi energije za grejanje stambenog prostora, <https://aers.rs/media/g/vesti/file/Dokumenti/2025-09-19-Grejanje%20CENE%20Sep-2025.pdf> [pristupljeno 20.01.2026]
- [6] Shesho, I., Uler-Zefikj, M., Filkoski, R., Tashevski, D. The Importance of District Heating Systems in Periods of Energy Crisis: Case Study for the City of Skopje, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 2, pp. 40-45, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.40S>
- [7] Latinović, A., Đorđević, M., Surudžić, D., Šiljkut, V. Povećanje učešća obnovljivih izvora energije u sistemima za daljinsko grejanje, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 2, pp. 61-67, 2022. <https://doi.org/10.46793/eee22-2.61>
- [8] Ivezić, D., Živković, M., Madžarević, A., Pavlović, B. Mogućnost korišćenja toplotnih pumpi sa otpadnom toplotom iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda kao toplotnim izvorom, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 23, No. 1, pp. 11-15, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-1.11>
- [9] JASPERS team, Guide to decarbonization of district heating systems, EIB, EC, 2024, <https://jaspers.eib.org/knowledge/publications/jaspers-guide-to-decarbonisation-of-district-heating-systems> [pristupljeno 20.02.2026]
- [10] Engelmann, K., Čavar, M., Buganova, J., Martinkrista, S., Čizman, J., Mladenović, M., Tomliak, K., Shlapak, M. Improving the performance of District Heating Systems in Central and Eastern Europe, Development of Multi-level policy Plans – Action plans for retrofitting of District Heating Systems, Horizon 2020 (H2020-EE-2017-PP1) - Project N°784966, 2020. https://keepwarmeuropa.eu/fileadmin/user_upload/Resources/Deliverables/KeepWarm_D5.2_Development_of_Multi-level_policy_Plans.pdf [pristupljeno 20.01.2026]
- [11] European Commission, District heating and cooling in the European Union: Overview of markets and regulatory frameworks under the revised Renewable Energy Directive, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/962525> [pristupljeno 20.01.2026]
- [12] Billerbeck, A., Breitschopf, B., Winkler, J., Bürgers, V., Kohler, B., Bacquet, A., Popovskij, E., Fallahnejad, M., Kranz, L., Ragwitz, M. Policy frameworks for district heating: A comprehensive overview and analysis of regulations and support measures across Europe, Energy Policy, Vol. 173, 113377, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113377>

AUTORI

dr Dejan Ivezić – redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, dejan.ivezic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2659-0662](https://orcid.org/0000-0003-2659-0662)

Dejan Stojanović - direktor, Poslovno udruženje „Toplane Srbije“, dstojanovic@toplanesrbije.org.rs

dr Branislava Lepotić Kovačević - predsednica, Udruženje za pravo energetike Srbije, branislava.lepotickovacevic@upes.rs, ORCID [0000-0003-3284-1333](https://orcid.org/0000-0003-3284-1333)

dr Marija Živković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, marija.zivkovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-3534-5271](https://orcid.org/0000-0003-3534-5271)

Policy Roadmap for Decarbonisation of the District Heating Sector in the Republic of Serbia

Abstract – The district heating (DH) sector plays a significant role in Serbia's energy system, comprising 60 DH systems and serving a large share of the population. However, the sector faces substantial structural and financial

challenges, including aging infrastructure, high dependence on fossil fuels—particularly natural gas—and limited integration of renewable energy sources. As heat production is predominantly based on fuel combustion, DH systems contribute notably to GHG emissions and local air pollution. In addition, performance assessments reveal significant disparities among utilities in terms of efficiency, productivity, and profitability, while overall financial instability remains a systemic issue across the sector. Institutional responsibilities for district heating are largely decentralized and lie at the local government level, further complicating coordinated decarbonisation efforts. This paper presents a Policy Roadmap for the decarbonisation of Serbia's DH sector, developed in alignment with national strategic documents - the National Energy and Climate Plan and the Energy Strategy. The policy framework is structured around six key pillars: stakeholder coordination, GHG reduction targets, financial support mechanisms, local heat planning, competitive and transparent pricing, and diversification of the energy mix through dynamic supply optimization. Two implementation approaches are considered: a Basic Approach aligned with existing regulatory frameworks, and a Decentralized approach promoting third-party access and new heat producers. The roadmap foresees phased implementation until 2040, encompassing legal reforms, institutional capacity building, financing mechanisms, and technological deployment.

Index terms – District heating, Decarbonisation, Policy roadmap

Metode optimizacije i primene veštačke inteligencije u efikasnoj integraciji vehicle-to-grid sistema

Luka Zoroje*, Doroteja Zarev*, Balša Čeranić*, Predrag Stefanov*, Jelena Stojković Terzić*, Leposava Ristić*,
Andrea Bonfiglio**

* Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

** Univerzitet u Đenovi, Fakultet za elektrotehniku, elektroniku, telekomunikacije i brodogradnju

Rezime - Tehnologija Vehicle-to-Grid (V2G) pojavila se kao perspektivno rešenje za unapređenje fleksibilnosti, pouzdanosti i održivosti savremenih elektroenergetskih sistema u uslovima brzog rasta broja električnih vozila i distribuiranih energetskih resursa. Efikasna primena V2G koncepta zahteva razvoj i primenu optimizacionih algoritama koji su u stanju da istovremeno obuhvate tehničke, ekonomske, ekološke i korisnički orijentisane ciljeve. Rezultati mnogih studija pokazuju da čak i primena jednostavnih algoritama može značajno smanjiti operativne troškove mreže u poređenju sa scenarijima bez ikakve intervencije. Ovaj rad pruža kratak pregled optimizacionih strategija za integraciju V2G sistema, sa fokusom na ključne ciljeve kao što su minimizacija gubitaka energije, upravljanje naponskim i tehničkim ograničenjima, smanjenje troškova punjenja, maksimizacija prihoda, ublažavanje emisija štetnih gasova i očuvanje stanja baterija. Determinističke, metaheurističke, višekriterijumske i tržišno orijentisane metode sistematski su razmotrene, uz isticanje njihove primenljivosti, prednosti i ograničenja u različitim operativnim uslovima. Posebna pažnja posvećena je sve većoj primeni veštačke inteligencije u V2G sistemima koja nudi moćne alate za upravljanje složenim interakcijama između električnih vozila, infrastrukture za punjenje i elektroenergetske mreže. Najzad, identifikovani su ključni izazovi optimizacije i upotrebe veštačke inteligencije, čime se ukazuju glavni pravci budućih istraživanja za primenu inteligentnih V2G sistema u velikom obimu.

Ključne reči - električna vozila, vehicle-to-grid, optimizacija, veštačka inteligencija, inteligentne mreže

I UVOD

Globalni energetski sektor prolazi kroz intenzivnu transformaciju uslovljenu dekarbonizacijom, digitalizacijom i decentralizacijom proizvodnje električne energije. Jedan od najznačajnijih pokretača ovih promena jeste ubrzana elektrifikacija transporta koja poslednjih godina rezultira eksponencijalnim rastom broja električnih vozila (EV). Prema podacima Međunarodne agencije za energiju, ukupan broj električnih automobila u svetu premašio je 40 miliona u 2023. godini, dok je samo te godine prodato skoro 14 miliona vozila [1]. Istovremeno infrastruktura za punjenje električnih vozila beleži snažan rast sa više od 5 miliona javnih punjača širom sveta.

Povećana upotreba električnih vozila ima značajne posledice po

elektroenergetski sistem, životnu sredinu i ekonomiju. Sa energetskog aspekta, električna vozila su u 2024. godini zamenila više od 1,3 miliona barela nafte dnevno, uz projekciju da će ta vrednost dostići 5,4 miliona barela dnevno do 2030. godine [1]. Sa stanovišta zaštite životne sredine baterijska električna vozila pokazuju najveći potencijal za smanjenje emisija gasova staklene bašte u sektoru drumskog saobraćaja [2]. Pored toga, razvoj industrije električnih vozila utiče na globalnu konkurentnost i geopolitičke odnose, posebno u kontekstu dominacije Kine u proizvodnji baterija i kritičnih minerala [3, 4].

U uslovima rasta broja električnih vozila, njihova nekoordinisana integracija može dovesti do značajnih problema u distributivnim mrežama, kao što su povećani gubici, preopterećenje transformatora i naponske nestabilnosti. V2G tehnologija se nameće kao rešenje koje omogućava fleksibilno upravljanje opterećenjem i bolju integraciju obnovljivih izvora energije. Brojne studije ukazuju na tehničke, ekonomske i ekološke koristi V2G koncepta [5-7].

Cilj ovog rada je da pruži sveobuhvatan pregled kontrolnih optimizacionih strategija za V2G sisteme, sa akcentom na metode optimizacije i primenu veštačke inteligencije u savremenim elektroenergetskim mrežama.

II OPTIMIZACIONI OKVIRI ZA EFIKASNU INTEGRACIJU V2G SISTEMA

Integracija V2G tehnologije u distributivne elektroenergetske sisteme zahteva razvoj kompleksnih optimizacionih okvira koji moraju da obuhvate veliki broj tehničkih ograničenja, ekonomskih parametara i ponašanje korisnika. Kako broj električnih vozila raste, uloga optimizacije postaje ključna za očuvanje pouzdanosti i efikasnosti sistema.

Značaj optimizacije u V2G sistemima jasno je ilustrovan u radu [8], gde je pokazano da čak i pojednostavljeni algoritmi mogu značajno smanjiti troškove rada sistema u odnosu na scenario bez upravljanja punjenjem i pražnjenjem. Ovi rezultati ukazuju na to da je optimizacija neophodan preduslov za praktičnu primenu V2G koncepta.

II-1 Ciljne funkcije i kriterijumi optimizacije

Optimizacioni problemi u V2G sistemima su po pravilu višeciljni jer uključuju interese različitih aktera, kao što su operatori distributivnih mreža, agregatori, vlasnici električnih vozila i kreatori energetskih politika [9, 10].

Sa tehničkog stanovišta ciljevi optimizacije obuhvataju minimizaciju gubitaka aktivne snage u mreži, sprečavanje termičkih preopterećenja elemenata mreže, održavanje napona u dozvoljenim granicama i poboljšanje kvaliteta električne energije. Ovi ciljevi su posebno značajni u niskonaponskim distributivnim mrežama, gde je uticaj električnih vozila najizraženiji.

Ekonomski ciljevi usmereni su na smanjenje troškova punjenja električnih vozila, maksimizaciju prihoda od učešća pomoćnim uslugama sistema i optimalno korišćenje dinamičkih tarifnih sistema.

Sa ekološkog aspekta, značajno je minimizovati emisije ugljen-dioksida kroz optimalno vremensko usaglašavanje punjenja sa periodima visoke proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, kao i očuvati zadovoljavajuće stanje baterija kroz modelovanje degradacije [11-13].

Brojna istraživanja kombinuju navedene ciljeve u jednokriterijumske ili višekriterijumske optimizacione probleme, pokazujući da je moguće istovremeno unaprediti stabilnost mreže, ekonomsku isplativost i održivost sistema [14-16].

Mnogi optimizacioni algoritmi razmatraju stabilnost elektroenergetskog sistema, troškove punjenja i životni vek baterije zajedno kako bi se pronašla najbolja radna tačka sistema [17]. Rad [18] predstavlja zanimljivu korisnički orijentisanu i potpuno personalizovanu metodu optimizacije koja omogućava svakom vlasniku električnog vozila da sam odredi željeni balans između finansijske dobiti ostvarene prodajom električne energije mreži i degradacije baterije izazvane V2G ciklusima. U radu [19] autori nastoje da optimizuju tokove snaga u V2G sistemima, uz balansiranje troškova, stabilnosti mreže, prihoda, varijabilnosti obnovljivih izvora energije i stanja baterije. Njihov implementirani algoritam u poređenju sa postojećim kontrolerom BEIC (*Brain Emotional Intelligence Controller*) poboljšava optimizaciju reaktivne snage za 64,5 %.

III METODE OPTIMIZACIJE ZA UPRAVLJANJE V2G SISTEMIMA

Raznolikost ciljeva i ograničenja u V2G sistemima uslovlja je primenu širokog spektra optimizacionih metoda, koje se mogu klasifikovati u nekoliko osnovnih grupa.

III-1 Determinističke metode optimizacije

Determinističke metode optimizacije predstavljaju teorijsku i praktičnu osnovu velikog broja istraživanja u oblasti upravljanja i planiranja V2G sistema. Ove metode polaze od pretpostavke da su svi relevantni parametri sistema, kao što su cene električne energije, opterećenja i dostupnost električnog vozila i stanje napunjenosti baterija poznati ili pouzdano prognozirani u trenutku optimizacije. Iako ova pretpostavka ne odražava u potpunosti realne uslove rada, deterministički pristupi su izuzetno korisni za analizu sistema, dugoročno planiranje i procenu potencijalnih koristi V2G koncepta.

Linearno programiranje predstavlja jedan od najčešće korišćenih determinističkih pristupa u V2G optimizaciji, posebno u slučajevima kada se odnosi između promenljivih mogu adekvatno aproksimirati linearnim modelima. Modeli linearnog programiranja se uspešno koriste za optimizaciju rasporeda

punjenja i pražnjenja električnih vozila uz poštovanje ograničenja snage, energetskog bilansa i stanja napunjenosti baterija [20, 21]. Zahvaljujuću svojoj računarskoj efikasnosti, ovi modeli omogućavaju optimizaciju velikih flota električnih vozila.

Mešovito celobrojno linearno programiranje proširuje formulacije linearnog programiranja uvođenjem diskretnih promenljivih, što omogućava realističnije modelovanje V2G sistema. Na ovaj način mogu se opisati binarne odluke, kao što su uključanje ili isključenje punjača, izbor režima rada (punjenje, pražnjenje ili mirovanje), kao i učešće na tržištu pomoćnih usluga. Pristupi mešovitog celobrojnog linearnog programiranja su široko primenjeni u optimalnom upravljanju flotama električnih vozila, kao i u modelovanju degradacije baterija i ciklusnog starenja [22-24, 14].

U slučajevima kada ciljne funkcije ili ograničenja sadrže kvadratne članove, ko što su gubici u mreži, odstupanja napona ili aproksimacije degradacije baterija, koriste se kvadratno programiranje i mešovito celobrojno kvadratno programiranje. Ovi pristupi omogućavaju veću tačnost modela, ali uz povećanu računarsku složenost. Često se primenjuju u kombinaciji sa linearizovanim modelima distributivnih mreža ili konveksnim relaksacijama kako bi se obezbedila izvodljivost rešenja [25, 26].

Glavna prednost determinističkih metoda leži u njihovoj matematičkoj jasnoći, ponovljivosti, reproduktivnosti i mogućnosti dobijanja globalno optimalnih rešenja u okviru definisanog modela. Međutim, njihova osetljivost na neizvesnosti i ograničena sposobnost adaptacije u realnom vremenu predstavljaju značajan izazov za primenu u dinamičnim V2G sistemima.

III-2 Stohastičke metode

Stohastička optimizacija predstavlja značajni omogućavajući faktor za pouzdan i ekonomski efikasan rad V2G sistema jer su glavni ulazni parametri koji upravljaju planiranjem po svojoj prirodi neizvesti, uključujući vreme priključenja i isključenja sa mreže, početno stanje napunjenosti baterije pri dolasku, energetske potrebe vozača u trenutku polaska, aktivaciju regulacije i cene električne energije.

Modelovanjem ovih veličina kao slučajnih promenljivih V2G upravljački uređaji i agregatori mogu zajednički optimizovati odluke o punjenju i pražnjenju, kao i učešće na tržištu, uz eksplicitno balansiranje očekivanog priroda i rizika od neizvodljivosti ili kazni zbog neispunjenja obaveza.

Uobičajene formulacije uključuju dvostepene stohastičke algoritme u kojima se, najpre, donose planovi za rad sistema dan unapred, pre nego što se neizvesnost dogodi, dok se naknadne korekcije u realnom vremenu koriste za prilagođavanje sistema nakon nastanka neizvesnosti [27, 28].

Takođe se koriste modeli sa ograničenjima verovatnoće (*chance-constrained*) koji obezbeđuju probabilističke garancije za određena ograničenja, uključujući frekvencijsku sigurnost [29]. Pored toga, primenjuju se i ciljne funkcije koje izbegavaju rizik (na primer CVaR), kako bi se ograničila izloženost događajima male verovatnoće i visokih troškova [29].

U poređenju sa determinističkim pristupima, stohastičke metode povećavaju otpornost na greške u prognozama, omogućavaju

sistematično kvantifikovanje pouzdanosti i podržavaju skalabilne strategije agregiranja koje obezbeđuju usluge mreži bez narušavanja potreba korisnika u pogledu mobilnosti.

III-3 Metaheurističke metode

Metaheurističke metode optimizacije razvijene su kao odgovor na ograničenja klasičnih determinističkih pristupa, posebno u slučajevima kada su V2G problemi vrlo nelinearni, nekonveksni ili uključuju veliki broj diskretnih promenljivih. Za razliku od determinističkih metoda, metaheurističke ne zahtevaju eksplicitnu matematičku formulu problema niti poznavanje gradijenta, što ih čini izuzetno fleksibilnim za primenu u realnim V2G scenarijima.

Jedan od najčešće korišćenih metaheurističkih metoda u V2G optimizaciji jeste optimizacija rojem čestica. Algoritmi bazirani na optimizaciji rojem čestica se široko primenjuju za optimizaciju rasporeda punjenja i pražnjenja električnih vozila u uslovima promenljivih cena, ograničenja mreže i integracije obnovljivih izvora energije. Njihova sposobnost da efikasno pretražuju prostor rešenja čini ih pogodnim za primenu u kompleksnim distributivnim sistemima [30-32].

Genetički algoritam predstavlja još jednu značajnu klasu metaheurističkih metoda, koji koriste principe prirodne selekcije, ukrštanja i mutacije kako bi postepeno unapređivali kvalitet rešenja. Genetički algoritmi su posebno pogodni za rešavanje problema koji uključuju veliki broj diskretnih odluka, kao što su izbor strategija učešća električnih vozila u V2G programima, raspoređivanje punjača ili optimizacija rada agregatora [33, 34].

Pored optimizacije rojem čestica i genetičkog algoritma u literaturi su zastupljene i druge metaheurističke tehnike, kao što su harmonijska pretraga, optimizacija kolonijama mrava i diferencijalna evolucija. Ovi algoritmi omogućavaju efikasno rešavanje višeciljnih problema i lako se kombinuju sa fazi logikom ili drugim inteligentnim tehnikama radi poboljšanja performansi sistema [35-37].

Ključna prednost metaheurističkih metoda leži u njihovoj sposobnosti da pronađu kvalitetna rešenja u složenim, realističnim uslovima rada, čak i u prisustvu neizvesnosti i nelinearnosti. Sa druge strane, ovi algoritmi ne garantuju globalni optimum i često zahtevaju pažljivo podešavanje parametara, što može uticati na stabilnost i reproduktivnost rezultata.

Tabela 1. Glavni ciljevi optimizacije i korišćene metode u V2G sistemima

Kategorija pristupa	Glavni cilj optimizacije	Glavne metode korišćene u literaturi	Literatura
Deterministička optimizacija	- Minimizacija troškova - Maksimizacija profita - Upravljanje vršnim opterećenjem - Minimizacija varijanse opterećenja - Maksimizacija prihoda agregatora	- Linearno programiranje - Mešovito celobrojno linearno programiranje - Mešovito celobrojno programiranje - Kvadratno programiranje	[14], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]
Stohastička optimizacija	- Upravljanje neizvesnostima - Maksimizacija profita	- Dvostepeno stohastičko programiranje - Distribuciono-robustna optimizacija - Dvostepena distribuciono-robustna optimizacija	[27],[28],[29]
Metaheuristička jednokriterijumska optimizacija	- Minimizacija troškova - Optimizacija punjenja - Koordinacija EV	- Optimizacija rojem čestica - Genetički algoritam - Diferencijalna evolucija - Optimizacija kolonijom mrava <i>Harmony Search</i> algoritam - Algoritam kita - Algoritam sivog vuka	[30],[32], [33], [34], [35], [36], [37]
Metaheuristička višekriterijumska optimizacija	Istovremena minimizacija troškova / emisija / opterećenja i maksimizacija profita / zadovoljstva korisnika	- Nedominirajuće sortiranje genetičkim algoritmom II - Binarna optimizacija - Kooperativna koevolucija - TOPSIS	[31], [38], [39], [40]
Teorija igara	- Optimalno formiranje V2G cena - Maksimizacija koristi agregatora i korisnika	<i>Stackelberg</i>-ova igra - Kooperativna igra	[42], [43], [44]

III-4 Višekriterijumska optimizacija

Višekriterijumska optimizacija ima centralnu ulogu u V2G sistemima jer se u njima istovremeno javljaju konflikti ciljevi različitih učesnika. Tipični primeri takvih sukoba uključuju minimizaciju troškova punjenja nasuprot očuvanju stanja baterije ili smanjenje gubitaka u mreži nasuprot maksimizaciji prihoda u pružanju pomoćnih usluga mreži. Upravo iz tog razloga višekriterijumski pristupi omogućavaju realističnije modelovanje

V2G sistema u odnosu na jednokriterijumske optimizacione formulacije.

Jedan od najčešće korišćenih algoritama u ovoj oblasti je NSGA-II (*Non dominated Sorting Genetic Algorithm II*), koji omogućava generisanje skupa Pareto-fronta sa optimalnim rešenjima. U literaturi je NSGA-II algoritam uspešno primenjen za analizu kompromisa između troškova i emisije ugljen-dioksida, gubitaka u mreži i degradacije baterija, kao i profita

agregatora i zadovoljstva korisnika [38-40].

Pored evolucionih algoritama, višekriterijumska optimizacija često se kombinuje sa fazi logikom, posebno u slučajevima kada ciljevi ili ograničenja ne mogu biti precizno kvantifikovani. Fazi pristupi omogućavaju modelovanje subjektivnih preferencija korisnika, kao što su tolerancija na degradaciju baterije ili sklonost ka finansijskoj dobiti, što je posebno važno u rezidencijalnim V2G primenama [41].

Višekriterijumski pristupi su od ključnog značaja za projektovanje V2G sistema koji su tehnički izvodljivi, ekonomski održivi i društveno prihvatljivi jer omogućavaju transparentan uvid u posledice različitih strategija upravljanja.

III-5 Tržišno orijentisane metode i metode teorije igara

Kako V2G sistemi sve češće učestvuju u tržištima električne energije i pomoćnih usluga, neophodno je eksplicitno modelovati ekonomske interakcije između različitih aktera. Tržišno orijentisani pristupi imaju za cilj da optimizuju ponašanje V2G učesnika u uslovima dinamičkih cena, ograničenih resursa i konkurentnog okruženja.

Teorija igara predstavlja jedan od najznačajnijih alata za analizu ovih interakcija. Kroz konkurentne, kooperativne i hijerarhijske modele moguće je opisati ponašanje električnih vozila, agregatora i operatora sistema. Posebno su značajni *Stackelberg* modeli u kojima agregator deluje kao lider koji definiše cenovne signale ili strategije, dok električna vozila reaguju u skladu sa svojim ograničenjima i preferencijama [42-44].

Ovi modeli omogućavaju dizajn efikasnih tarifnih mehanizama i podsticaja koji podstiču aktivno učešće korisnika u V2G programima, istovremeno obezbeđujući ekonomsku isplativost i stabilnost elektroenergetskog sistema.

U tabeli 1 prikazan je pregled glavnih ciljeva optimizacije i glavnih optimizacionih metoda korišćenim u V2G sistemima.

IV PRIMENA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U V2G SISTEMIMA

Integracija veštačke inteligencije u V2G sisteme predstavlja jedan od najznačajnijih savremenih trendova u oblasti inteligentnih elektroenergetskih mreža. Zbog visoke dinamičnosti, decentralizovane prirode i prisustva neizvesnosti, klasični algoritmi često nisu dovoljni za efikasno upravljanje V2G sistemima u realnom vremenu. Pristupi koji uključuju korišćenje veštačke inteligencije omogućavaju adaptivno donošenje odluka, učenje iz podataka i poboljšavanje performansi sistema tokom vremena.

IV-1 Prognoza potrošnje i ponašanje korisnika

Precizna prognoza potrošnje električne energije predstavlja osnovu za efikasno upravljanje elektroenergetskim sistemima. U V2G kontekstu, ovaj zadatak je dodatno usložen zbog varijabilnosti ponašanja korisnika, vremena dolaska i odlaska vozila, kao i stanja napunjenosti baterija. Modeli mašinskog dubokog učenja, kao što su veštačke neuralne mreže, rekurentne neuralne mreže i arhitekture duge kratkoročne memorije, omogućavaju znatno tačnije prognoze u poređenju sa klasičnim statističkim metodama [45-47].

IV-2 Stabilnost mreže i pomoćne usluge

Algoritmi veštačke inteligencije igraju značajnu ulogu u procedurama obezbeđivanja stabilnosti elektroenergetskog sistema kroz pružanje pomoćnih usluga. Njihovom primenom moguće je dinamički prilagođavati snagu punjenja i pražnjenja električnih vozila radi regulacije frekvencije i napona [48-50].

Pored toga, veštačka inteligencija omogućava realizaciju naprednih programa upravljanja potrošnjom i odgovora na potražnju, gde električna vozila kolektivno deluju kao fleksibilan resurs za ublažavanje vršnih opterećenja [51].

IV-3 Optimalan dispečering energije

Optimalan dispečering energije u V2G sistemima podrazumeva određivanje trenutka i količine energije koju električna vozila treba da razmenjuju sa mrežom. Algoritmi veštačke inteligencije omogućavaju kontinuirano prilagođavanje strategija na osnovu dinamičkih cena, stanja mreže i stanja baterija [52-54].

IV-4 Minimizacija troškova i ekonomska optimizacija

Sistemi veštačke inteligencije omogućavaju inteligentno donošenje odluka koje minimizuju troškove rada sistema i korisnika. Integracija podataka o cenama električne energije, stanju mreže i dostupnosti električnih vozila omogućeno je punjenje u periodima niskih cena i pražnjenje u periodima povećane potražnje energije [55, 56].

IV-5 Upravljanje stanja baterija

Očuvanje stanja baterija predstavlja jedan od ključnih izazova V2G sistema. Modeli veštačke inteligencije koriste se za predikciju degradacije baterija i integraciju ovih informacija u optimizacione algoritme, čime se obezbeđuje dugoročna održivost sistema [57-60].

IV-6 Prediktivna podrška upravljanju flotom i infrastrukturom za punjenje

Sa porastom penetracije električnih vozila, upravljanje velikim brojem korisnika infrastrukturom za punjenje postaje sve složenije i zahteva napredne prediktivne metode. Veštačka inteligencija omogućava preciznu procenu vremena dolaska i odlaska vozila, trajanja punjenja i potrebne energije, čime se smanjuje neizvesnost u planiranju opterećenja i unapređuje efikasnost *scheduling* strategija. Prediktivni modeli zasnovani na nadgledanom učenju doprinose boljoj koordinaciji između vozila i mreže, pružajući pouzdane ulazne podatke za buduće V2G optimizacione algoritme [61, 62].

U Tabeli 2 za svaku oblast primene veštačke inteligencije prikazane su glavne metode koje se koriste, tip učenja i njihova integracija sa optimizacijom u V2G sistemima.

IV-7 Izazovi primene veštačke inteligencije u V2G sistemima

Uprkos brojnim prednostima, primena veštačke inteligencije u V2G sistemima suočava se sa značajnim izazovima. Nedostatak standardizovanih i kvalitetnih podataka, visoki računarski zahtevi, problem interpretabilnosti modela, kao i pitanja sajber bezbednosti i regulatornih okvira predstavljaju ključne prepreke široj primeni ovih tehnologija.

Tabela 2. Glavne oblasti primene veštačke inteligencije, metode koje koriste, njihov tip učenja i integracija sa optimizacijom

Oblast primene	AI metode korišćene u literaturi	Tip učenja	Integracija sa optimizacijom	Literatura
Proгноza opterećenja i potrošnje energije	• Veštačke neuralne mreže • Random Forest • XGBoost • Linearna i polinomijalna regresija • Wavelet neuralna mreža	Nadgledano učenje	Ulaz u optimizacioni problem (podrška prognozi)	[45], [46], [47], [55], [56]
Regulacija frekvencije	• Veštačka neuralna mreža • Duga kratkoročna memorija • Veštačke neuralne mreže zasnovane na optimizaciji rojem čestica • Mreže tipa akter-kritičar	Nadgledano učenje i učenje podsticanjem	Hibridni AI-optimizacioni model ili direktna optimalna kontrola	[48], [49], [50]
Pametno punjenje i V2G raspored	• Duboke neuralne mreže • Duboko učenje podsticanjem • Višeagentsko duboko učenje podsticanjem	Nadgledano učenje i duboko učenje podsticanjem	Direktna optimalna kontrola ili raspored zasnovan na dubokom učenju podsticanjem	[52], [53], [54]
Procena stanja baterije (SOH) i integracija sistema za upravljanje baterijom	• Veštačke neuralne mreže • Duga kratkoročna memorija • Transfer učenje	Nadgledano učenje	Indirektna integracija (ulaz za sistem upravljanja baterijom i V2G optimizaciju)	[57], [58], [59], [60]
Predikcija ponašanja korisnika i obrazaca punjenja	• Random Forest • Metoda nosećih vektora • XGBoost • Duboke veštačke neuralne mreže + ansambl modeli	Nadgledano učenje	Indirektna - model kao ulaz za buduće optimizacione probleme	[61], [62]

V ZAKLJUČAK

V2G tehnologija predstavlja jedan od ključnih kocepata budućih inteligentnih elektroenergetskih sistema, omogućavajući aktivnu ulogu električnih vozila u upravljanju mrežom. U radu je dat detaljan pregled upravljačkih i optimizacionih strategija V2G sistema, sa posebnim osvrtom na različite klase optimizacionih metoda i primenu veštačke inteligencije.

Analiza pokazuje da uspešna implementacija V2G koncepta zahteva integrisani pristup koji obuhvata tehničke, ekonomske i regulatorne aspekte, kao i aktivno učešće svih relevantnih aktera. Buduća istraživanja treba usmeriti ka razvoju robusnih, interpretabilnih i skalabilnih rešenja koja će omogućiti široku primenu V2G tehnologije u realnim distributivnim elektroenergetskim sistemima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je deo projekta E-COSMOS koji predstavlja bilateralnu saradnju izmedju Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu i Fakulteta za elektrotehniku, elektroniku, telekomunikacije i brodogradnju Univerziteta u Đenovi.

LITERATURA

[1] IEA (2024), Global EV Outlook 2024, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> [pristupljeno 15.01.2026]

[2] Negri, M., Bieker, G. Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: a 2025 update and key factors to consider, The International Council on clean transportation, 2025, <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/> [pristupljeno 15.01.2026]

[3] BloombergNEF, Electric Vehicle Outlook 2026, <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/> [pristupljeno 15.01.2026]

[4] IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025, <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025> [pristupljeno 15.01.2026]

[5] Kumar, P., Channi, H.K., Kumar, R., Rajiv, A., Kumari, B., Singh, G., Singh, S., Dyab, I.F., Lozanović, J. A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future, Energy Conversion and Management: X, Vol. 25, 100864, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>

[6] Chen, G., Zhang, Z. Control strategies, economic benefits, and challenges of vehicle-to-grid applications: recent trends research, World Electric Vehicles Journals, Vol. 15, No. 5, pp. 190, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15050190>

[7] Biswas, P., Rashid, A., Habib, A.K.M.A., Mahmud, M., Motakabber, S.M.A., Hossain, S., Rokonzaman, M., Molla, A.H., Harun, Z., Khan, M.M.H., Cheng, W., Lei, T.M.T. Vehicle to grid: technology, charging station, power transmission, communication standards, techno-economic analysis, challenges, and recommendations. World Electric Vehicle Journal, Vol. 16, No. 3, pp. 142, 2025. <https://doi.org/10.3390/wevj16030142>

[8] Escoto, M., Guerrero, A., Ghorbani, E., Juan, A.A. Optimization challenges in vehicle-to-grid (v2g) systems and artificial intelligence solving methods,

- Applied Sciences, Vol. 14, No. 12, 5211, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14125211>
- [9] Huang, Z., Fang, B., Deng, J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system, *Protection and Control of Modern Power Systems*, Vol. 5, No.7, 2020. <https://doi.org/10.1186/s41601-020-0154-0>
- [10] Habib, H.U.R., Subramaniam, U., Waqar, A., Farhan, B.S., Kotb, K.M., Wang, S. Energy Cost Optimization of Hybrid Renewables Based V2G Microgrid Considering Multi Objective Function by Using Artificial Bee Colony Optimization, in *Proc. IEEE Access*, Vol. 8, pp. 62076-62093, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984537>
- [11] Xu, J., Chen, J., Wei, H., Zhao, Y., Tian, B., Wen, Y., Jiang, H., Zhang, N., Zhang, S., Wu, Y. Emissions reduction potential and feasibility of vehicle-to-grid for Beijing's future electric vehicles, *Cell Reports Physical Science*, Vol. 6, No. 6, 102616, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102616>
- [12] Yu, B., Lei, X., Shao, Z., Jian, L. V2G Carbon Accounting and Revenue Allocation: Balancing EV Contributions in Distribution Systems, *Electronics*, Vol. 13, No. 6, 1063, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13061063>
- [13] Lee, C.F., Bjurek, K., Hagman, V., Li, Y., Zou, C. Vehicle-to-Grid Optimization Considering Battery Aging, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 56, No. 2, pp. 6624-6629, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.362>
- [14] Principe, L.P., van Essen, J.T., Caggiani, L., Ottomanelli, M., Correia, G.H. A mathematical programming model for optimal fleet management of electric car-sharing systems with Vehicle-to-Grid operations, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 368, 133147, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133147>
- [15] Jadoun, V.K., Sharma, N., Jha, P., Jayalakshimi, S.N., Malik, H., Garcia Márquez, F.P. Optimal Scheduling of Dynamic Pricing Based V2G and G2V Operation in Microgrid Using Improved Elephant Herding Optimization, *Sustainability*, Vol. 13, No. 14, pp. 7551, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13147551>
- [16] Aurangzeb, M., Wang, Y., Iqbal, S., Shafiullah, M., Alghamdi, S., Ullah, Z. A Novel Multiobjective Optimization Approach for EV Charging and Vehicle-to-Grid Scheduling Strategy, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 1192925, 2025. <https://doi.org/10.1155/etep/1192925>
- [17] He, C., Peng, J., Jiang, W., Wang, J., Du, L., Zhang, J. Vehicle-To-Grid (V2G) Charging and Discharging Strategies of an Integrated Supply-Demand Mechanism and User Behavior: A Recurrent Proximal Policy Optimization Approach, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 15, No. 11, pp. 514, 2024. <https://doi.org/10.3390/wevj15110514>
- [18] Mallick, A., Pantazis, G., Khosravi, M., Esfahani, P.M., Grammatico, S. User-centric Vehicle-to-Grid Optimization with an Input Convex Neural Network-based Battery Degradation Model, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.11047>
- [19] Finecomess, S.A., Gebresenbet, G., Zada, W.Y., Mulugeta, Y., Addisie, A. Optimization of Vehicle-to-Grid, Grid-to-Vehicle, and Vehicle-to-Everything Systems Using Artificial Bee Colony Optimization, *Energies*, Vol. 18, No. 8, pp. 2046, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18082046>
- [20] Sortomme, E., El-Sharkawi, M.A. Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 351-359, 2012. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2164099>
- [21] Luo, T., Huang, F., Zhou, H., Xie, G. Multi-Objective Rolling Linear-Programming-Model-Based Predictive Control for V2G-Enabled Electric Vehicle Scheduling in Industrial Park Microgrids, *Processes*, Vol. 13, No. 11, pp. 3421, 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13113421>
- [22] Rafique, S., Nizami, M.S.H., Irshad, U.B., Hossain, M.J., Mukhopadhyay, S.C. EV Scheduling Framework for Peak Demand Management in LV Residential Networks, *IEEE System Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 1520-1528, 2022. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3068004>
- [23] Triviño-Cabrera, A., Aguado, J.A., de la Torre, S. Joint routing and scheduling for electric vehicles in smart grids with V2G, *Energy*, Vol. 175, pp. 113-122, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.184>
- [24] Khezri, R., Steen, D., Wikner, E., Tuan, L.A. Optimal V2G Scheduling of an EV With Calendar and Cycle Aging of Battery: An MILP Approach, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 10, No. 4, pp. 10497-10507, 2024. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3384293>
- [25] Secchi, M., Barchi, G., Macii, D., Petri, D. Smart electric vehicles charging with centralised vehicle-to-grid capability for net-load variance minimisation under increasing EV and PV penetration levels, *Sustainable Energy Grids Network*, Vol. 35, 101120, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101120>
- [26] Han, S., Han, S., Sezaki, K. Optimal control of the plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation using quadratic programming, in *Proc. ISGT 2011*, Anaheim, CA, USA, pp. 1-6, 2011. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2011.5759172>
- [27] Lu, S., Han, B., Xue, F., Jiang, L., Feng, X. Stochastic bidding strategy of electric vehicles and energy storage systems in uncertain reserve market, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 14, No. 18, pp. 3653-3661, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0121>
- [28] Zhan, S., Zhou, Y., Feng, D., Fang, C., Wang, H., Dou, S., Chen, L. V2G-enhanced operation optimization strategy for EV charging station with photovoltaic and energy storage integration, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 171, 111002, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111002>
- [29] Liu, Y., Zeng, W., Chen, M., He, Z., Yuan, Y., Ding, T. Chance-constrained scheduling considering frequency support from electric vehicles under multiple uncertainties, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 18, No. S1, pp. 4348-4359, 2024. <https://doi.org/10.1049/rpg2.13171>
- [30] Saber, A.Y., Venayagamoorthy, G.K. V2G Scheduling - A Modern Approach to Unit Commitment with Vehicle-to-Grid using Particle Swarm Optimization, *IFAC Proceeding Volumes*, Vol. 42, No. 9, pp. 261-266, 2009. <https://doi.org/10.3182/20090705-4-SF-2005.00047>
- [31] Liu, L., Xie, F., Huang, Z., Wang, M. Multi-Objective Coordinated Optimal Allocation of DG and EVCs Based on the V2G Mode, *Processes*, Vol. 9, No. 1, pp. 18, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9010018>
- [32] Shaheen, H.I., Rashed, G.I., Yang, B., Yang, J. Optimal electric vehicle charging and discharging scheduling using metaheuristic algorithms: V2G approach for cost reduction and grid support, *Journal of Energy Storage*, Vol. 90, Part A, 111816, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111816>
- [33] Elkholy, A.M., Rozhkov, A.N., Badalyan, A.V., Cherdintsev, I.A. Adaptive genetic algorithms enhance EV charging infrastructure resilience through multi-constraint optimization of grid resources and traffic dynamics, *Electric Power Systems Research*, Vol. 250, 112045, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2025.112045>
- [34] Jordán, J., Palanca, J., Martí, P., Julian, V. Electric vehicle charging stations emplacement using genetic algorithms and agent-based simulation, *Expert Systems with Applications*, Vol. 197, 116739, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116739>
- [35] Kamarposhti, M., Shokouhandeh, H., Ahmed, E., Zaki, Z., Colak, I., Barhoumi, E.M., Eguchi, K. Cost-Effective Optimization of Sizing and Charging Profiles for PHEV Parking Lots in Smart Microgrids Using Harmony Search Algorithm, *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 79053-79069, 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3564841>
- [36] Shindhuja, M., Mary, S.M.J., Punitha, K. Ant Colony Optimization of Charging Coordination of Electric Vehicles Considering Vehicle-to-Grid (V2G) Technology in Multi Micro Grid Power System, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 6, No. S1, 2017. https://www.ijareeie.com/upload/2017/ncirest/4_Ant%20Colony%20Optimization%20Of%20Charging%20Coordination%20of%20Electric%20Vehicle%20Considering%20Vehicle%20to%20Grid%20V2G%20Technology%20in%20Multi%20Micro%20Grid%20Power%20System.pdf [pristupljeno 16.01.2026]
- [37] da Silva, L.G., de Andrade, N.D., Godoy, R.B., de Brito, M.A.G., Maddalena, E.T. Differential Evolution and Fuzzy-Logic-Based Predictive Algorithm for V2G Charging Stations, *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 10, pp. 5921, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13105921>
- [38] Niu, M., Yang, D., Ji, R., Miah, M.S. A Two-stage Optimal Dispatch Strategy of Microgrid Considering Electric Vehicles in V2G Mode, in *Proc. 2025 7th International Conference on Energy Systems and Electrical Power (ICESEP)*, Wuhan, China, pp. 806-810, 2025. <https://doi.org/10.1109/ICESEP66633.2025.11155769>
- [39] Blazek, V., Vantuch, T., Slanina, Z., Vysocky, J., Prokop, L., Misak, S., Piecha, M., Walendziuk, W. A novel approach to utilization vehicle to grid technology in microgrid environment, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 158, 109921, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109921>
- [40] Alden, R.E., Timilsina, A., Silvestri, S., Ionel, D.M. V2G Optimization for Dispatchable Residential Load Operation and Minimal Utility Cost, in *Proc. 2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*,

- Detroit, MI, USA, pp. 1-4, 2023, <https://doi.org/10.1109/ITEC55900.2023.10186955>
- [41] Faddel, S., Aldeek, A., Al-Awami, A.T., Sortomme, E., Al-Hamouz, Z. Ancillary Services Bidding for Uncertain Bidirectional V2G Using Fuzzy Linear Programming, *Energy*, Vol. 160, pp. 986-995, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.091>
- [42] Chen, P., Han, L., Xin, G., Zhang, A., Ren, H., Wang, F. Game Theory Based Optimal Pricing Strategy for V2G Participating in Demand Response, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 59, No. 4, pp. 4673-4683, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3273209>
- [43] Ma, Y., Lu, Y., Yin, Y., Lei, Y. Pricing strategy of V2G demand response for industrial and commercial enterprises based on cooperative game, *International Journal of Electric Power Energy Systems*, Vol. 160, 110051, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110051>
- [44] Wang, Z., Yue, D., Liu, J., Xu, Z. A Stackelberg Game Modelling Approach for Aggregator Pricing and Electric Vehicle Charging, in *Proc. 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 2209-2213, 2019. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2019.8781294>
- [45] Román-Portabales, A., López-Nores, M., Pazos-Arias, J.J. Systematic Review of Electricity Demand Forecast Using ANN-Based Machine Learning Algorithms, *Sensors*, Vol. 21, No. 13, pp. 4544, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21134544>
- [46] Salem, K.M., Rey-Martínez, F.J., Elgharib, A.O., Rey-Hernández, J.M. Energy Demand Forecasting Scenarios for Buildings Using Six AI Models, *Applied Science*, Vol. 15, No. 15, pp. 8238, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15158238>
- [47] Kamoona, A., Song, H., Keshavarzian, K., Levy, K., Jalili, M., Wilkinson, R., Yu, X., McGrath, B., Meegahapola, L. Machine learning based energy demand prediction, *Energy Reports*, Vol. 9, No. S12, pp. 171-176, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.151>
- [48] Safari, A., Babaei, F., Farrokhifar, M. A load frequency control using a PSO-based ANN for micro-grids in the presence of electric vehicles, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 42, No. 6, pp. 688-700, 2019. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1563811>
- [49] Sundararajan, G., Sivakumar, P., LSTM Recurrent Neural Network-Based Frequency Control Enhancement of the Power System with Electric Vehicles and Demand Management, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 1281248, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1281248>
- [50] Song, X., Sun, J., Tan, S., Ling, R., Chai, Y., Guerrero, J.M. Cooperative grid frequency control under asymmetric V2G capacity via switched integral reinforcement learning, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 155, Part B, 109679, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109679>
- [51] Mahmud, K., Morsalin, S., Hossain, M.J., Town, G.E. Domestic peak-load management including vehicle-to-grid and battery storage unit using an artificial neural network, in *Proc. 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, Canada, pp. 586-591, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2017.7915424>
- [52] Xiao, Q., Zhang, R., Wang, Y., Shi, P., Wang, X., Chen, B., Fan, C., Chen, G. A deep reinforcement learning based charging and discharging scheduling strategy for electric vehicles, *Energy Reports*, Vol. 12, pp. 4854-4863, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.10.056>
- [53] Wang, Y., Qiu, D., He, Y., Zhou, Q., Strbac, G. Multi-agent reinforcement learning for electric vehicle decarbonized routing and scheduling, *Energy*, Vol. 284, 129335, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129335>
- [54] Alfaverh, F., Denai, M., Sun, Y. Electrical vehicle grid integration for demand response in distribution networks using reinforcement learning, *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 11, No. 4, pp. 348-361, 2021. <https://doi.org/10.1049/els2.12030>
- [55] López, K.L., Gagné, C., Gardner, M.-A. Demand-Side Management Using Deep Learning for Smart Charging of Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 3, pp. 2683-2691, 2019. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2808247>
- [56] Gao, Y., Guo, S., Ren, J., Zhao, Z., Ehsan, A., Zheng, Y. An Electric Bus Power Consumption Model and Optimization of Charging Scheduling Concerning Multi-External Factors, *Energies*, Vol. 11, No. 8, pp. 2060, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11082060>
- [57] Naha, A., Han, S., Agarwal, S. et al. An Incremental Voltage Difference Based Technique for Online State of Health Estimation of Li-ion Batteries. *Scientific Report*, Vol.10, pp. 9526, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66424-9>
- [58] Li, W., Sengupta, N., Dechent, P., Howey, D., Annaswamy, A., Sauer, D.U. Online capacity estimation of lithium-ion batteries with deep long short-term memory networks, *Journal of Power Sources*, Vol. 482, 228863, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228863>
- [59] Tan, Y., Zhao, G. Transfer Learning With Long Short-Term Memory Network for State-of-Health Prediction of Lithium-Ion Batteries, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 10, pp. 8723-8731, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2946551>
- [60] Wu, Y., Xue, Q., Shen, J., Lei, Z., Chen, Z., Liu, Y. State of Health Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on Healthy Features and Long Short-Term Memory, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 28533-28547, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972344>
- [61] Boulakhbar, M., Farag, M., Benabdelaziz, K., Zazi, M., Maaroufi, M., Kousksou, T. Electric Vehicles Arrival and Departure Time Prediction Based on Deep Learning: The Case of Morocco, in *Proc. 2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, Meknes, Morocco, pp. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1109/IRASET52964.2022.9738115>
- [62] Shahriar, S., Al-Ali, A.R., Osman, A. H., Dhou, S., Nijim, M. Prediction of EV Charging Behavior Using Machine Learning, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 111576-111586, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103119>

AUTORI

Luka Zoroje - asistent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, zoroje@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0005-9163-765X](https://orcid.org/0009-0005-9163-765X)

Doroteja Zarev - asistent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, doroteja.zarev@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0005-4066-9344](https://orcid.org/0009-0005-4066-9344)

Balša Čeranić - asistent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, ceranic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0004-6649-6632](https://orcid.org/0009-0004-6649-6632)

Predrag Stefanov - redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, stefanov@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4054-2202](https://orcid.org/0000-0003-4054-2202)

Jelena Stojković Terzić - docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, jstojkovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-6948-3755](https://orcid.org/0000-0002-6948-3755)

Leposava Ristić - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, lela@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4474-8486](https://orcid.org/0000-0003-4474-8486)

Andrea Bonfiglio - vanredni profesor, Univerzitet u Đenovi, Fakultet za elektrotehniku, elektroniku, telekomunikacije i brodogradnju, a.bonfiglio@unige.it, ORCID [0000-0003-3142-8598](https://orcid.org/0000-0003-3142-8598)

Optimization Frameworks and Artificial Intelligence Applications for Efficient Vehicle-To-Grid Integration

Abstract – Vehicle-to-Grid (V2G) technology has emerged as a promising solution for enhancing the flexibility, reliability, and sustainability of modern power systems in the context of the rapid growth of electric vehicles and distributed energy resources. Effective implementation of the V2G concept requires advanced optimization algorithms capable of simultaneously addressing technical, economic, environmental, and user-oriented objectives. The results of numerous studies indicate that even the application of simple algorithms can significantly reduce grid operating costs

compared to scenarios without any intervention. This paper provides a brief overview of optimization strategies for the integration of V2G systems, focusing on key objectives such as minimizing power losses, managing voltage and technical constraints, reducing charging costs, maximizing revenue, mitigating gas emissions, and preserving battery health. Deterministic, metaheuristic, multi-objective, and market-oriented methods are systematically reviewed, highlighting their applicability, advantages, and limitations under different operating conditions. Special attention is devoted to the increasing use of artificial intelligence in V2G systems, which offers powerful tools for managing complex interactions between electric vehicles, charging infrastructure, and the power grid. Finally, key challenges related to optimization and the use of artificial intelligence are identified, outlining the main directions for future research toward the large-scale deployment of intelligent V2G systems.

Index terms – *Electric vehicles, Vehicle-To-Grid, Optimization, Artificial intelligence, Smart grids*

Adaptive Overcurrent Protection in Inverter-Dominated Microgrids Considering Fault Ride-Through and Dynamic Operating Modes

Aleksej Zilovic*, Luka Strezoski**, Chad Abbey***

* Department for Power, Electronics, and Telecommunication Engineering, Faculty of Technical Sciences, University

** DerMag Consulting LLC, USA

*** Quanta Technology, USA

Abstract - The increasing penetration of inverter-based distributed energy resources (IBDERs) in microgrids significantly alters short-circuit behavior, often resulting in fault currents that are comparable to nominal load levels. Combined with frequent transitions between grid-connected and islanded modes, this renders conventional overcurrent protection (OCP) schemes unreliable, leading to mis-operations, loss of selectivity, and delayed fault clearing. Additionally, Fault Ride – Through (FRT) requirements allow IBDERs to sustain limited current contribution for a defined time window before tripping, which further complicates protection settings.

This paper introduces an adaptive OCP framework that dynamically adjusts protection thresholds based on both the microgrid operating mode and time intervals aligned with expected IBDER current response. By incorporating FRT-driven time segmentation, the proposed approach allows reliable discrimination between transient and permanent faults, while preserving system stability. Preliminary simulation case studies demonstrate promising improvements in detection sensitivity and coordination when compared to fixed OCP settings, suggesting a viable foundation for implementation in future real-time microgrid protection schemes.

Index Terms – Overcurrent protection, IBDER, Microgrids, FRT requirements, Adaptive protection in microgrids

I INTRODUCTION

The increasing penetration of IBDERs is fundamentally altering short-circuit behavior and protection coordination principles in modern distribution networks. Unlike traditional radial systems with high short-circuit strength and unidirectional power flow, microgrids with high DER penetration exhibit bidirectional currents and significantly reduced fault levels, particularly during islanded operation. Furthermore, Grid Code requirements such as FRT mandate that DER units remain connected during voltage disturbances for a specified duration, causing short-circuit currents to vary dynamically over time.

To address these challenges, adaptive relay protection methods have been developed. Time-segmented coordination approaches based on DER disconnection intervals have demonstrated improved selectivity in grid-connected networks with high DER penetration. However, their applicability in islanded microgrids remains limited due to reduced short-circuit magnitudes and

altered inverter dynamics. Additionally, transitions between grid-connected and islanded modes require real-time adaptation of protection parameters.

This paper proposes an enhanced adaptive relay protection framework for microgrids that integrates operating-mode detection at the point of common coupling (PCC) with dynamic switching of relay protection setting groups. In grid-connected mode, established adaptive short-circuit and FRT-based coordination methods are applied. In islanded mode, relay parameters are adjusted through predefined setting groups to maintain sensitivity under reduced fault current conditions.

Simulation results obtained on the Case Western Reserve University campus microgrid demonstrate that the proposed framework preserves selectivity and improves protection reliability across both operating modes.

II GRID CODE STANDARD

Traditional distribution networks were historically designed with radial topology, where a slack bus supplied downstream feeders and power flowed unidirectionally toward end consumers. Relay protection coordination in such systems was performed according to IEC 60909 and other established conventional methods.

With the increasing integration of DERs, distribution networks are evolving into microgrids. A microgrid is defined as a group of interconnected loads and DERs within clearly defined electrical boundaries that can operate both in grid-connected and islanded modes. As DER penetration grows, their influence on short-circuit behavior becomes increasingly significant.

DERs are typically connected through power electronic interfaces, most commonly inverters. Two dominant types are used: Doubly Fed Induction Machines (DFIMs), which are partially interfaced through converters, and Inverter-Based DERs (IBDERs), which are fully converter-interfaced. According to IEC 60909, DFIMs are modeled as induction machines if the fault is electrically close, while IBDERs are represented as constant current sources limited by inverter capability. These assumptions are acceptable in networks with low DER penetration. However, in microgrids with high shares of IBDERs, such simplified representations may lead to significant deviations from actual short-circuit currents [1,2]. Consequently, conventional IEC 60909-based coordination becomes insufficient

for accurate protection design.

To address these challenges, modern Grid Code requirements have been introduced. Among them, FRT and Reactive Current Injection (RCI) are particularly relevant [3].

During short-circuit events, voltage magnitudes at network nodes drop significantly, especially near the fault location. The FRT requirement specifies the duration for which a DER must remain connected during voltage dips. This duration is inversely proportional to the voltage drop—deeper voltage sags correspond to shorter permitted connection times. In earlier systems, DERs were typically disconnected immediately after disturbances. However, in highly penetrated networks, widespread disconnection of IBDERs during faults could threaten system stability. Therefore, FRT requirements are essential to ensure grid resilience [4, 5]. Among existing standards, the German Grid Code is considered one of the most stringent [1, 6-11].

In addition to FRT, the RCI requirement defines the amount of reactive current that must be injected based on the voltage deviation at the point of common coupling. The larger the voltage drop, the higher the reactive current component that must be provided. These requirements are especially critical in islanded microgrids, where DERs are the primary generation sources and their dynamic response directly affects system stability.

The FRT and RCI standards are illustrated in the figures below.

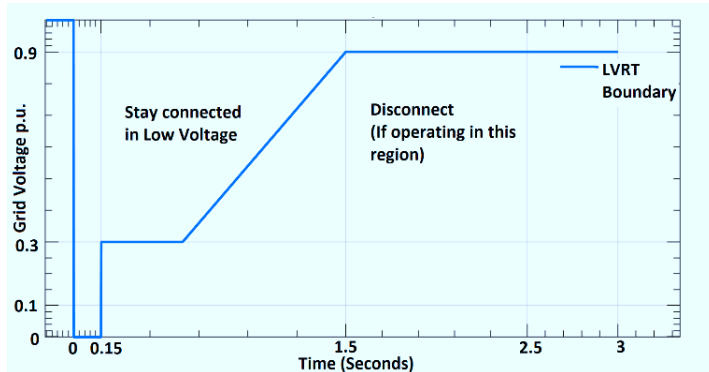


Figure 1. FRT requirement [12]

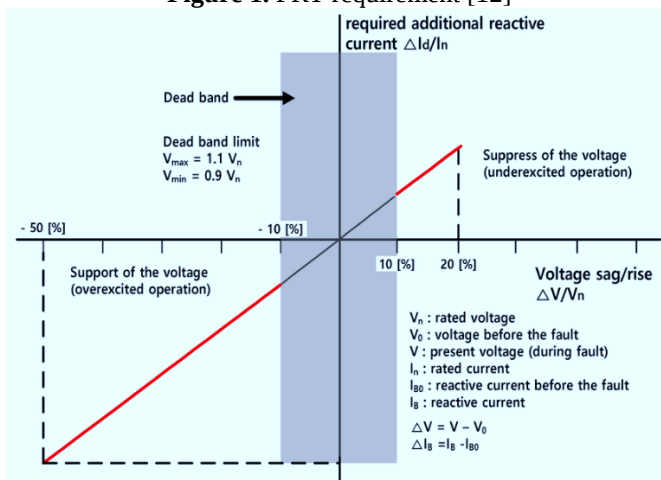


Figure 2. RCI requirement [13]

The increasing penetration of converter-interfaced DERs, combined with FRT and RCI requirements, significantly alters short-circuit current characteristics and protection coordination principles. As a result, traditional relay protection approaches based on fixed settings and IEC 60909 assumptions face serious limitations in modern microgrids. The following section analyzes these challenges in detail and reviews an adaptive relay protection method that serves as the foundation for the enhancements proposed later in this paper.

III PROTECTION CHALLENGES AND ADAPTIVE RELAY PROTECTION METHOD

This Section will be displayed in two separate subsections. The first one will address the challenges when integrating DERs into the radial distribution network, while the second subsection will analyze existing method for adaptive relay protection, resolving those challenges.

III-1 Protection challenges in DER – integrated distribution networks

The integration of DERs introduces fundamental changes in fault behavior and protection performance within distribution networks. Unlike traditional radial systems, where short-circuit currents originate from a single upstream source, DER-connected feeders may experience fault currents supplied from multiple locations. This effectively creates double-fed fault conditions, altering both the magnitude and distribution of fault currents.

In feeders containing DERs, fault current may consist of contributions from both the upstream grid and locally connected generation. Such additional current contributions can lead to unintended relay operation, reduced selectivity, or improper sensitivity margins. In contrast, certain fault scenarios may result in reduced current levels at upstream protection devices compared to conventional systems, potentially leading to insufficient pickup and loss of sensitivity. Therefore, relay coordination must account for variable fault contributions and different operating configurations.

Another critical challenge is the impact of DERs on protection selectivity in parallel feeder configurations. A fault on one feeder may receive current contribution from a DER located on an adjacent feeder. If this contribution exceeds the pickup setting of protection devices on the healthy feeder, non-selective tripping may occur, often requiring the implementation of directional overcurrent protection schemes [4].

DER integration also affects coordination between reclosers and fuses. In conventional radial systems, coordination is arranged so that reclosers operate before downstream fuses during transient faults. However, when DERs are present upstream of a fuse, their fault contribution may cause the fuse to operate before the recloser, disrupting the intended protection hierarchy and leading to unnecessary outages.

Overall, DER integration significantly alters protection behavior and may compromise the reliability, selectivity, and coordination of traditional overcurrent protection schemes. While DERs improve supply reliability from a generation perspective, their influence on fault currents and relay operation requires careful

reassessment of protection philosophy and coordination principles.

The following subsection presents an adaptive relay protection method designed to address the identified challenges. The method is analyzed in detail, and its advantages and limitations are critically evaluated.

3.2. Adaptive relay protection method

In the previous subsection, the conventional overcurrent relay protection method and its main limitations were discussed. In what follows, an adaptive relay protection approach intended for DER-dominated distribution networks is described in detail.

First, it should be emphasized that this method relies on a generalized Δ -circuit algorithm for calculating short-circuit current values. The approach is absolute in nature and has been proven reliable for both grid-connected and islanded operating modes, as well as for all types of short circuits. A comprehensive presentation of this algorithm can be found in [2, 6, 11].

Due to the shortcomings of traditional protection schemes in networks with a high penetration of DERs, a relatively new adaptive relay protection method has been proposed in [14, 15]. Unlike the conventional approach, the adaptive method introduces a set of time intervals defined from the instant of fault occurrence up to the relay tripping time. These intervals are determined according to the DER disconnection times specified by applying FRT requirement, as shown in Figure 3. Although the method can be implemented using the FRT requirements of any country, the German FRT is often considered since it represents one of the most stringent criteria.

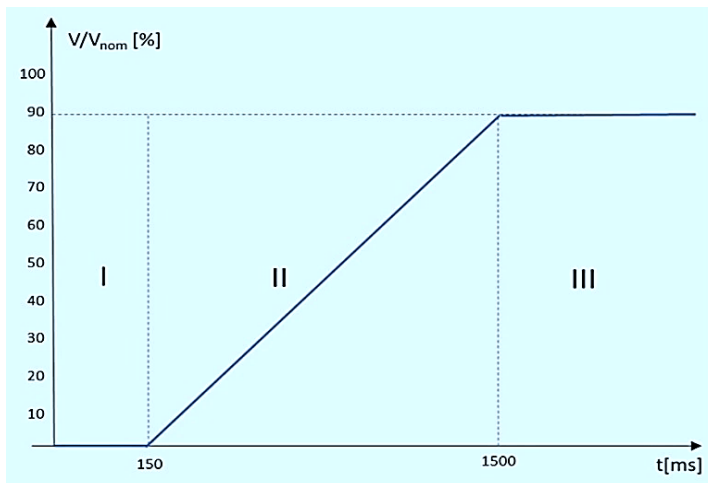


Figure 3. German FRT requirement presented in three time intervals [15]

From Figure 4, it can be observed that for a fault at Bus 2, the operating time of relay R2, acting as the primary protection, is shorter than the operating time of relay R1, which serves as backup protection. In this case, proper selectivity between the relays is achieved.

However, the presence of DER significantly alters fault behavior. When a short circuit occurs, DER units also contribute to the fault current, affecting both its magnitude and direction. This

bidirectional current flow contradicts the traditional assumption of unidirectional fault current in radial distribution systems and directly impacts relay coordination and selectivity.

For example, in the case of a fault at the transformer bus, both the main transformer and the DER inject fault current from opposite directions. Under such conditions, relays may not detect the fault accurately or may fail to operate in the intended sequence, which can lead to reduced sensitivity and compromised selectivity. In the event of a downstream fault, the current measured by relay R1 may be significantly lower than expected because part of the fault current is supplied upstream by the DER. This changes the current distribution in the network and disrupts the originally designed coordination margins based on predefined current ratios.

To overcome these challenges, the adaptive method described in [14] proposes a modified procedure for relay setting and coordination in distribution systems with high DER penetration. Instead of assuming constant short-circuit conditions, the method accounts for the dynamic behavior of DER units during fault events. The defined time intervals correspond to the periods in which different numbers of DER units remain connected to the grid, in accordance with the selected FRT requirement (Figure 3).

Within each interval, the sensitivity and coordination of the protection system are evaluated using short-circuit current values calculated for the specific network configuration at that moment. As DER units disconnect in compliance with FRT requirement, the short-circuit current level changes over time. Consequently, the relay operating time is recalculated for every interval to ensure that protection performance—both in terms of sensitivity and selectivity—remains satisfactory under varying system conditions.

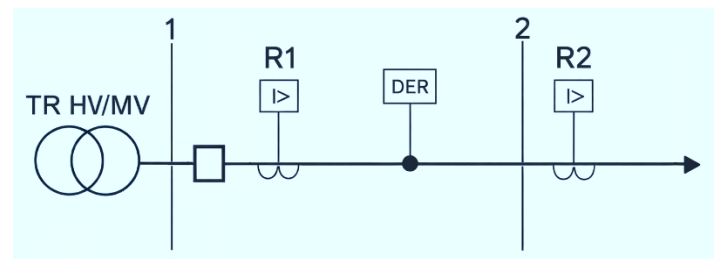


Figure 4. Single line diagram of main – backup relay pairs

As shown in Figure 3, after the fault occurs, all DERs must stay connected to the grid at least 150 ms, which is labeled as Interval I. The same approach is used to determine time intervals for any FRT requirement. Within this interval, the complete short-circuit current calculation [2,6,11] is performed.

The fault current through relay R2 in this interval is $\hat{I}_{R2}^1$, and through R1 is $\hat{I}_{R1}^1$. Their tripping times are t_{R2}^1 and t_{R1}^1 , respectively.

If t_{R2}^1 is less than 150 ms, R2 trips before DER disconnection, and the calculation ends. If t_{R2}^1 exceeds 150 ms, a second time interval is defined—from 150 ms to t_{R2}^1 (Interval II in Figure 3). During this period, DER disconnection times are calculated based on the voltage profile using equation below which is based

on the FRT characteristic:

$$t_i^h = 150 + \frac{1500-150}{0.9} r_{VTi}^h [ms], i = 1, \dots, N_{DER}. \quad (1)$$

Where r_{VTi}^h represents the relative voltage deviation and is calculated as the ratio of the positive-sequence voltage component at the DER connection node to the nominal voltage value of that node using the equation:

$$r_{VTi}^h = \frac{V_{Ti}^{+h}}{V_{Tnomi}^+}, i = 1, \dots, N_{DER}. \quad (2)$$

If at least one DER disconnects during this interval, a second short-circuit calculation is carried out, excluding those DERs.

New short-circuit currents $\hat{I}_{R1}^2$ and $\hat{I}_{R2}^2$ are determined, and corresponding relay operating times $t(\hat{I}_{R1}^2)$ and $t(\hat{I}_{R2}^2)$ are calculated. Since relays were already exposed to current during the first interval, corrected relay times are calculated using the following equations:

$$t_{R2}^2 = 150ms + t(\hat{I}_{R2}^2) - 150ms \frac{t(\hat{I}_{R2}^2)}{t(\hat{I}_{R1}^2)} \quad (3)$$

$$t_{R1}^2 = 150ms + t(\hat{I}_{R1}^2) - 150ms \frac{t(\hat{I}_{R1}^2)}{t(\hat{I}_{R2}^2)} \quad (4)$$

This calculation must be repeated for each main-backup relay pair in the network and is also applicable for recloser-fuse coordination [14].

This is where the calculation ends. In [14], the robust method was tested on the IEEE 37 and verified on the real-life distribution network. Based on the results obtained in the research, it was concluded that the method is useful and applicable for real-life distribution networks with high DER penetration.

As for the applicability to microgrids, the next section will present the calculation results obtained from the short – circuit and relay protection coordination study conducted in ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) software.

IV CALCULATION RESULTS

This section presents and discusses the results obtained from the research reported in [11]. The original study comprised two main parts: a short-circuit analysis and a relay protection analysis.

The short-circuit study focused on validating the generalized Δ -circuit calculation method under different operating conditions. In parallel, the relay protection study was conducted to verify the practical applicability and effectiveness of the proposed adaptive relay protection method in distribution networks with a high penetration of DERs, only now, on the real-time microgrid.

The microgrid in question is the Case Western Reserve University (CWRU) campus microgrid, located in Cleveland, Ohio [16]. Single line diagram of the CWRU campus microgrid is presented in Figure 5.

Two yellow lightnings indicate that on those Buses (2 and 5) three – phase short circuit was simulated.

The microgrid consists of 28 three-phase nodes, and Bus 1 being the source node which is connected to the Utility grid at the PCC.

Three voltage levels exist within the microgrid, and these are: 11.2 kV, 0.48 kV and 0.207 kV.

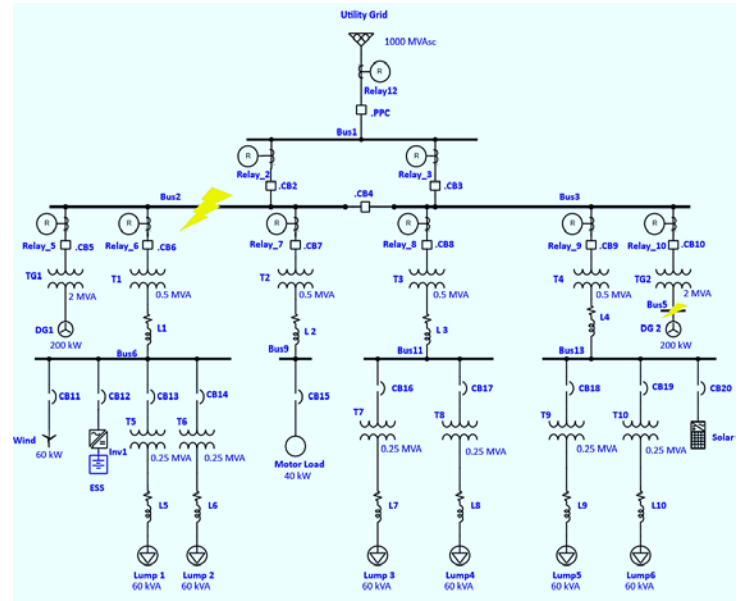


Figure 5. CWRU campus microgrid

The Utility grid has a three-phase short-circuit power of 1000MVA and X/R=22. Two identical diesel generators are connected in Bus 4 and 5. Their rated power is 200 kVA.

Wind turbine with rated power and the Energy Storage System, with rated powers of 60 and 40 kVA, respectively are connected to the Bus 6. PV Array with the rated power of 40 kVA is connected to the Bus 13.

Line impedance of cables L1, L2, L3, and L4 is $(0.049 + j0.027)\Omega/kft$, while L1 and L2 being 150 ft long and L3 and L4 200 ft. Line impedance of L5, L6, L7, L8, L9, and L10 is $(0.06 + j0.03)\Omega/kft$. The length of these cables is 400 ft. At the end of these cables Lump loads are located, each having a rated power of 60 kVA. Single Motor load is connected to the Bus 9 with the rated power of 40 kW.

Transformers TG1 and TG2 have parameters: 0.48/11.2 kV, Δ/Y , 2 MVA, $Z=5.75\%$, $X/R=6$.

Transformers T1-T4 have parameters: 11.2/0.48 kV, Δ/Y , 0.5 MVA, $Z=5.75\%$, $X/R=6$.

Transformers T5-T10 have parameters: 0.48/0.207 kV, Δ/Y , 0.25 MVA, $Z=5.75\%$, $X/R=3$.

For the purpose of this paper, short – circuit study, as well as the results will not be discussed. They are thoroughly displayed and discussed in [11]. However, applicability of the adaptive relay protection method will be addressed in the following text.

The study was conducted in ETAP software using the Star-Protection and Coordination mode, which is specialized in relay protection coordination. In this case, three-phase faults were simulated at Buses 2 and 5. However, this study was conducted only in grid-connected mode, due to certain limitations of the method used for relay protection settings and coordination. These limitations will be discussed after presenting the results.

It is very important to note that ETAP Star does not have an option to integrate certain mathematical functions and perform the calculations based on them. Instead, an official standard is chosen (IEC, ANSI, IEEE, etc.), and relay protection coordination is conducted accordingly. In Tables 1 and 2, relay reaction times were listed for a three-phase fault in Buses 2 and 5, respectively. These reaction times were calculated using the IEC standard and the traditional relay protection method for radial distribution networks, where selectivity is set solely based on the relay location in the network and the short-circuit current magnitude at that location. In this method, relays are set according to their time-current characteristic curves, which determine operating time as a function of the fault current magnitude. The closer a relay to the slack bus, the later should it operate (serving as backup protection for relays in the lower network layers) in order to avoid immediate disconnection of larger parts of the network that are not affected by the fault. On the other hand, the chosen method for relay protection coordination in distribution networks with high DER penetration takes into account DERs' disconnection times according to the FRT standard and calculates relay reaction times in separate time intervals, based on those disconnection times. Discussion will be carried out in the following text and a comparison will be made regarding those two approaches.

Tables 1 and 2 present the results for three-phase faults at Buses 2 and 5, respectively, showing the sequence and timing of relay and associated circuit breaker operations. The relevant data are marked with a green rectangle. The left column shows the reaction time (ms), while the right column identifies the device that operated at that instant.

From Table 1 and the relay positions in Figure 5, the results demonstrate proper selectivity. For a fault at Bus 2, Relay 2 operates first and trips HVCB2, which is the closest breaker to the fault location. If HVCB2 fails, Relay 12 provides backup protection by tripping the breaker at the PPC and isolating the faulty section. The remaining breakers are LVCBs on the 0.48 kV side, supplying DERs and local loads, and their later operation is consistent with their downstream position.

Table 1. Result table generated by ETAP for a three-phase short-circuit in grid-connected mode simulated on Bus 2.

Protection device	Reaction time [ms]
Relay_2	20.1
CB2	70.1
Relay_3	227
CB3	277
Relay12	680
PPC	780
CB11	3350
CB15	6074
CB16	9506
CB17	9506
CB18	9562
CB19	9562
CB13	10536
CB14	10536

A similar pattern is observed for the fault at Bus 5, shown in

Table 2. Relay 10 operates first and trips HVCB10, as expected due to its proximity to the fault. In case of failure, Relay 3 acts as backup by tripping HVCB3, followed by Relay 12 as the final backup at the PPC.

Overall, the results for the grid-connected mode confirm correct operation of the traditional relay protection scheme, with primary and backup devices operating selectively and in the intended sequence for both fault locations.

Table 2. Result table generated by ETAP for a three-phase short-circuit in grid-connected mode simulated on Bus 5.

Protection device	Reaction time [ms]
Relay_10	390
CB10	400
Relay_3	1837
CB3	1887
Relay12	2451
PPC	2551
Relay_2	4467
CB2	4517

Unlike the previous method, this approach takes into account the FRT standard, displayed in Figure 3, thereby considering the period of time during which all DERs must remain connected to the grid depending on the relative voltage drop at the point of connection. Based on these time intervals, the relay operating times are calculated accordingly. DER disconnection times are calculated using equation (1).

Calculated disconnection times are displayed in Tables 3 and 4. In the left columns, Buses with associated DER, and in the right disconnection times in ms are displayed.

Firstly, the results of the three-phase fault at Bus 2 will be discussed, followed by a discussion of the results on Bus 5.

According to the adaptive relay protection method and based on the FRT requirement shown in Figure 3, if the relay protecting the bus operates during the first interval, meaning it trips while all DERs are still connected to the network, the calculation process stops at that point. In this case, as shown in Table 1, Relay_2 operates at 20 ms, which falls within the first interval while all DERs are still connected. Therefore, no further calculation is required.

Table 3. DER disconnection times for a three-phase short-circuit simulated on Bus 2 in grid-connected mode.

Buses with connected DERs	Disconnection time [ms]
Bus 2 (DG1)	150
Bus 5 (DG2)	212.55
Bus 6 (Wind + ESS)	334.95
Bus 13 (Solar)	262.05

In contrast to the previous scenario, a three-phase short circuit was simulated at Bus 5. Relay_10, which provides protection for this bus, operates at 390 ms (see Table 2). As this operating time exceeds 150 ms, additional calculations are necessary. Table 2 summarizes the DER disconnection times, while the same table also presents the relay response times within the first time

interval. To proceed with the analysis, the corrected relay time equations are applied again, corresponding to Equations (3) and (4).

Both equations are required, as the method is implemented for a coordinated main-backup relay pair. In the considered case of a fault at Bus 5, Relay_10 operates as the primary protection device, while Relay_3 provides backup protection.

Following the application of the adaptive relay protection scheme and the recalculation using the two referenced equations, revised operating times were obtained for the main-backup pair. The original operating time of 390 ms for Relay_10 was adjusted to 508 ms, whereas the backup relay, Relay_3, exhibited a corrected operating time of 1280 ms instead of the initial 1837 ms reported in Table 2.

Both updated operating times are positioned within Interval II of the FRT requirement. This confirms that the adaptive relay protection approach yields a more precise assessment of relay response times compared to the conventional method, as it incorporates FRT constraints together with real-time network conditions, enabling dynamic and more realistic coordination of protection devices.

Table 4. DER disconnection times for a three-phase short-circuit simulated on Bus 5 in grid-connected mode.

Buses with connected DERs	Disconnection time [ms]
Bus 5 (DG2)	150
Bus 1 (DG1)	1671.45
Bus 6 (Wind + ESS)	1672.05
Bus 13 (Solar)	1672.65

As presented above, the adaptive relay protection method operates in the grid – connected environment with ease. Moreover, the method has a clear limitation when it comes to coordinating relay protection in the islanded microgrids, due to the low short – circuit current magnitudes and different dynamic DER behavior. These limitations are especially visible in the more complex scenarios such as transitioning between two operating modes of the microgrid, where whole protection scheme must adapt in real – time to achieve selectivity and proper relay tripping.

Consequently, next section will propose the enhanced method for adaptive relay protection in microgrids based on the foundation of methods for short – circuit calculation [2,6,11] and adaptive relay protection [14,15].

V PROPOSITION OF ENHANCED ADAPTIVE RELAY PROTECTION FRAMEWORK IN MICROGRIDS

Since the previous section pointed out technical drawbacks regarding the applicability of the method in islanded mode of operation as well as in transitioning between two operating modes, this section will introduce enhanced adaptive relay protection framework for microgrids.

Let us consider the microgrid with DERs and loads and one PCC connecting it to the wider distribution grid. This microgrid can operate in both, grid – connected and islanded mode. In the event

of short – circuit the proposed algorithm should operate as follows:

Firstly, it must be determined whether the microgrid operates in grid – connected or in islanded mode, via the sensor on the PCC indicating the state of the circuit breaker (opened / closed). Secondly, whether the circuit breaker is closed, meaning the microgrid operates in grid – connected mode, methods for adaptive relay protection [14,15] and short – circuit calculation [2,6,11] should be used. The reason for that is, topologically speaking, grid – connected microgrid acts like a part of the radial distribution network with high DER penetration, in which those two algorithms work efficiently.

On the other hand, whether the circuit breaker is opened, and the microgrid operates in the islanded mode, algorithm for relay protection coordination should be different.

Before discussing the algorithm for islanded mode of operation, it is necessary to introduce the concept of relay protection setting groups in numerical relays [17,18].

Modern microprocessor-based relays allow the implementation of multiple predefined setting groups. Each setting group represents a complete and independent set of protection parameters, including pickup current tripping values, time delays, directional elements, voltage and frequency limits, and logic coordination settings. Only one setting group is active at a given time (or change in topology of the system), while others remain stored and can be activated either manually or automatically. In the case of a microgrid, manual would consider SCADA surveillance and manual setting from the control room, while automatic activation would happen when the relay receives an input indicating a change in the circuit breaker state at PCC, changing the setting group of the relay.

The primary purpose of setting groups is to enable adaptive protection behavior under different system operating conditions. In microgrids with high DER penetration, system characteristics such as short-circuit level, fault current contribution, and power flow direction may significantly vary depending on whether the microgrid operates in grid-connected or islanded mode [7,10,11]. Consequently, a single fixed set of protection parameters may not ensure proper sensitivity and selectivity in all operating scenarios.

In grid-connected operation, fault currents are typically supported by the upstream distribution network, resulting in higher short-circuit levels. Therefore, higher pickup thresholds and conventional coordination settings can be applied. However, during islanded operation, IBDERs often limit fault current contribution, leading to substantially reduced short-circuit currents. Under such conditions, conventional overcurrent settings may become insufficiently sensitive, potentially preventing correct fault detection.

By utilizing protection setting groups, relay parameters can be dynamically adjusted according to the detected operating mode of the microgrid. This enables the proposed framework to maintain adequate protection performance in both grid-connected and islanded states.

Development of the entire methodology, that would be able to

adaptively adjust and protect the microgrid regardless of operating condition and location and type of the fault, based on the above discussion, will be the subject of authors' future research.

VI CONCLUSION

The increasing penetration of IBDERs significantly alters short-circuit characteristics and protection coordination principles in modern microgrids. Conventional overcurrent protection schemes based on fixed settings and IEC 60909 assumptions are no longer sufficient, particularly under conditions of bidirectional power flow, current-limited inverter behavior, and mandatory Fault Ride-Through requirements.

The adaptive relay protection method analyzed in this paper, based on time-segmented coordination aligned with DER disconnection intervals, demonstrates improved accuracy in grid-connected microgrids. Simulation results obtained using the CWRU campus microgrid model confirm that the method enhances selectivity and provides more realistic relay operating times compared to traditional coordination approaches.

However, the study also highlights a critical limitation: reduced short-circuit levels and dynamic inverter behavior in islanded operation restrict the direct applicability of existing adaptive methods. Furthermore, transitions between operating modes require real-time modification of protection parameters to ensure reliable fault detection.

To overcome these limitations, an enhanced adaptive relay protection framework has been proposed. The approach integrates operating-mode detection at the PCC with dynamic switching of relay protection setting groups.

Development of the entire methodology, that would be able to adaptively adjust and protect the microgrid regardless of operating condition and location and type of the fault, based on the above discussion, will be the subject of authors' future research.

ACKNOWLEDGEMENT

Artificial intelligence tools, specifically ChatGPT and Grammarly, were used to improve the English language and grammar of this manuscript.

REFERENCES

- [1] Strezoski, L., Prica, M., Loparo, K.A. Sequence Domain Calculation of Active Unbalanced Distribution Systems Affected by Complex Short Circuits, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 2, pp. 1891-1902, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2742019>
- [2] Simić, N. *Short-circuit calculation in renewable energy resources-based microgrids*, Faculty of Technical Sciences, 2024.
- [3] Pompodakis, E.E., Strezoski, L., Simić, N., Paspatis, A.G., Alexiadis, M.C., Tsikalakis, A.G., Katsigiannis, Y.A., Karapidakis, E.C. Short-circuit calculation of droop-controlled islanded AC microgrids with virtual impedance current limiters, *Electric Power Systems Research*, Vol. 218, 109184, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109184>

- [4] Jabr, R.A., Dzafic, I.A. Fortescue approach for real-time short circuit computation in multiphase distribution networks, *IEEE Transactions Power System*, Vol. 30, No. 6, pp. 3276-3285, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2376198>
- [5] Ghanaatian, M., Lotfifard, S. Sparsity-based short-circuit analysis of power distribution systems with inverter-interfaced distributed generators, *IEEE Transactions Power System*, Vol. 34, No. 6, pp. 4857-4868, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2920382>
- [6] Strezoski, L.V., Simic, N.G., Loparo, K.A. A Robust Short-circuit Calculation Method for Islanded, Grid-connected, and Utility Microgrids, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 13, No. 1, pp. 325-337, 2025. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2023.001041>
- [7] Strezoski, L. *Complex short-circuit calculation in unbalanced distribution networks with distributed energy resources*. Ph.D. Thesis, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia, 2017.
- [8] Strezoski, V., Bekut, D. A canonical model for the study of faults in power systems, *IEEE Transactions Power System*, Vol. 6, No. 4, pp. 1493-1499, 1991. <https://doi.org/10.1109/59.116995>
- [9] Žilović, A., Strezoski, L., Abbey, C. Microgrids - Current developments and challenges, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 27, No. 2, pp. 25-33, 2025. <https://doi.org/10.46793/EEE25-2.25Z>
- [10] Žilović, A. *Short circuit calculations in microgrid*, Faculty of Technical Sciences, 2024.
- [11] Žilović, A. *Short circuit calculation and overcurrent relay protection in microgrids*, Faculty of Technical Sciences, 2025.
- [12] Talha, M., Raihan, S.R.S., Rahim, N.A. PV Inverter with Decoupled Active and Reactive Power Control to Mitigate Grid Faults, in *Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1127, International Scientific Forum (ISF 2019) Malacca, Malaysia, pp. 1127, 16-17 December 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1127/1/012036>
- [13] Lee, H.-J., Lim, S.-H., Kim, J.-C. Application of a Superconducting Fault Current Limiter to Enhance the Low-Voltage Ride-Through Capability of Wind Turbine Generators, *Energies*, Vol. 12, No. 8, pp. 1478, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12081478>
- [14] Strezoski, L., Stefani, I., Bekut, D. Novel method for adaptive relay protection in distribution systems with electronically-coupled DERs, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 116, 105551, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105551>
- [15] Stefani, I. *Calculation of Settings and Coordination of Relay Protection in Distribution Systems with Distributed Energy Resources Based on Power Electronics Devices*, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, 2021.
- [16] Hong, M. The Case Western Reserve University campus microgrid, 2014. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f18/CaseWesternReserveUniversityCampusGrid.pdf> [pristupljeno 25.01.2026]
- [17] Nagpal, M. Empowering Energy Evolution: The Rise of Microgrid Autonomy, *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 12, No. 2, pp. 6-11, 2024. <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3385948>
- [18] Nagpal, M., Hadzimahovic, K., Bimbhra, A. Enhancing Distributed Energy Resource Integration and Supply Reliability: The Two-to-One Rule, *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 12, No. 2, pp. 12-21, 2024. <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3385949>

AUTHORS

Aleksej Žilović - MSc, teaching assistant, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, aleksej.zilovic@uns.ac.rs, ORCID [0009-0009-4826-0999](https://orcid.org/0009-0009-4826-0999)

Luka Strezoski - PhD, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, lukastrezoski@uns.ac.rs, ORCID [0000-0003-0109-4320](https://orcid.org/0000-0003-0109-4320)

Chad Abbey - PhD, Quanta Technology, cabbey@quanta-technology.com

Adaptivna prekostrujna zaštita u mikromrežama sa dominantnim inverterskim izvorima uz razmatranje Fault Ride-Through i dinamičkih režima rada

Rezime - Sve veći udeo distribuiranih energetske resursa (DER) zasnovanih na invertorima (IBDER) u mikromrežama značajno menja prirodu i ponašanje sistema tokom trajanja kratkog spoja, pri čemu su struje kvara bliske nominalnim vrednostima. Pored toga, česti prelazi između režima povezanog na mrežu i ostrvskog režima rada, to čini tradicionalne šeme prekostrujne zaštite (Over Current Protection – OCP) nepouzdanim, što dovodi do nepravilnog delovanja zaštite, gubitka selektivnosti i kasnom uklanjanju kvarova. Dodatno, Fault Ride – Through (FRT) zahtevi omogućavaju IBDER jedinicama da tokom tačno definisanog vremenskog intervala održavaju ograničen doprinos struji kvara pre isključenja sa mreže, što dodatno komplikuje podešavanje zaštite.

U ovom radu se predstavlja adaptivna struktura prekostrujne zaštite koja dinamički prilagođava vrednosti za koje će zaštita da reaguje u zavisnosti od radnog režima mikromreže, kao i vremenskih intervala usklađenih sa očekivanim strujnim odzivom IBDER jedinica. Uvođenjem vremenskih intervala zasnovanih na FRT zahtevima, predloženi pristup omogućava pouzdano razlikovanje prolaznih i trajnih kvarova, uz očuvanje stabilnosti sistema. Preliminarne simulacione studije pokazuju značajna poboljšanja u osetljivosti detekcije i koordinaciji u poređenju sa fiksnim podešavanjem prekostrujne zaštite, što ukazuje na održivu osnovu za primenu u budućim šemama zaštite mikromreža u stvarnom životu.

Ključne reči - prekostrujna zaštita, IBDER, mikromreže, FRT zahtevi, adaptivna zaštita u mikromrežama

Simulations of Contaminant Dispersion from Accidental Releases in Cities: A CFD Approach

Mahir Hafizović*, Muhamed Hadžiabdić**, Bojan Ničeno***

* Enova LLC Consultants and Engineers Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

** International University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

*** Paul Scherrer Institute, Switzerland

Abstract - Accidental releases of hazardous airborne contaminants in urban environments present a significant challenge for emergency response, risk assessment, and public safety, particularly in scenarios involving toxic or radiological substances. Accurate prediction of contaminant transport in densely built areas requires numerical tools capable of capturing the complex flow structures induced by urban geometry. Computational Fluid Dynamics (CFD) is widely used for this purpose, but its predictive accuracy depends strongly on the choice of turbulence modelling approach. This study evaluates hybrid RANS–LES (HRL) approach, for simulating contaminant dispersion from ground-level accidental releases in a realistic urban layout based on the wind tunnel experiment. Pollutant transport is analysed using mean and instantaneous flow and concentration fields, as well as experimental profiles, with particular emphasis on lateral spreading into adjacent streets, courtyards, and recirculation zones. Results show that HRL resolves unsteady vortex structures, producing pollutant transport patterns that closely match experimental observations. These findings underscore the importance of scale-resolving turbulence models for reliable prediction of accidental contaminant dispersion in urban areas and highlight the critical role of CFD in urban air quality assessment, emergency preparedness, and risk-informed decision-making.

Index Terms - Contaminant dispersion, Accidental releases, Urban air quality, Turbulence modelling, Computational Fluid Dynamics (CFD)

I INTRODUCTION

Urban areas present some of the most challenging environments for predicting airborne contaminant dispersion due to the complex interaction between atmospheric flow and three-dimensional building geometries. Accurate assessment of contaminant transport is essential for urban air quality management, risk assessment, and emergency preparedness, particularly in scenarios involving accidental releases of hazardous substances or radiological contaminants [1,2]. Traditional empirical or simplified dispersion models often lack the fidelity needed to capture the strong spatial variability in wind patterns and turbulent mixing induced by urban morphology [3,4]. This limitation has motivated increasing use of Computational Fluid Dynamics (CFD) in both research and practice of accidental hazardous releases in complex urban configurations [5,6,7,8].

CFD solves the governing equations of fluid motion and scalar transport with spatial resolution, enabling the prediction of localized flow features that control dispersion. Over the past decade, numerous studies have demonstrated its potential for urban applications. While early work focused on isolated structures, contemporary research highlights the ability of CFD to resolve airflow within complex street canyons and real-city geometries. [9,10]. Nonetheless, the reliability of CFD predictions remains highly dependent on the choice of turbulence modelling.

Steady Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) models remain common in industry due to their low computational cost, but they often struggle to represent the unsteady turbulent structures that govern mixing near sharp edges and variable building arrangements [9,11]. Large-eddy simulation (LES), conversely, explicitly resolves larger energy-containing turbulent motions and has shown excellent agreement with wind-tunnel and field measurements [12,13]. However, pure LES remains computationally demanding for urban-scale applications. Hybrid approaches that combine RANS and LES offer a pragmatic compromise. These frameworks resolve key unsteady structures in the urban canopy while retaining numerical efficiency in the far-field.

The relevance of high-fidelity urban dispersion modelling is particularly pronounced in the context of nuclear energy systems. While large-scale regional dispersion is typically addressed using mesoscale atmospheric models, near-field and neighbourhood-scale transport within the first few kilometres of a release remains strongly influenced by local geometry, surface roughness, and built structures. In such cases, simplified Gaussian or integral plume models may not adequately capture the spatial variability of exposure within complex environments.

This challenge becomes increasingly important with the anticipated deployment of Small Modular Reactors (SMRs). Unlike traditional large nuclear power plants, which are typically located in remote or low-density areas, SMRs are being designed for greater siting flexibility, including potential installation near industrial zones, district heating networks, or even peri-urban and urban environments. In these contexts, accidental releases, however unlikely, would interact directly with surrounding buildings, transportation corridors, and densely populated districts. Accurate prediction of short-range dispersion, recirculation, and pollutant accumulation zones becomes

essential for emergency preparedness, evacuation planning, and shelter-in-place strategies.

In this context, the present study applies a hybrid RANS-LES methodology to simulate atmospheric flow and pollutant dispersion within a semi-idealized urban layout. Beyond model validation, the study emphasizes the practical value of CFD for urban risk assessment and emergency planning. By identifying areas prone to pollutant accumulation and pathways that facilitate flushing, CFD provides actionable insight for designing evacuation routes and supporting real-time operational decisions in accidental release scenarios.

II METHODOLOGY

The analysis of contaminant dispersion is conducted using the CFD methodology. This approach solves the full set of Navier-Stokes equations governing the three-dimensional motion of fluid, together with transport equations for gas tracer concentration and turbulence properties. By employing numerical techniques, detailed distributions of velocity, pressure, concentration, and turbulent variables are obtained throughout the computational domain.

The simulations adopt a field-based approach, in which velocity, concentration and turbulent variables are computed simultaneously and interactively within a time-dependent, three-dimensional framework. A computational mesh with appropriate spatial and temporal resolution is utilized to capture the time evolution of flow patterns and tracer gas dispersion across the entire solution domain.

The Navier-Stokes and the concentration transport equations in the RANS framework read:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{DU_i}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right) + g_i \\ \frac{DC}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Sc} \frac{\partial C}{\partial x_j} - \overline{c u_j} \right) + S_c\end{aligned}$$

where U_i is velocity vector, ρ is fluid density, g_i is gravity vector, ν is kinematic viscosity, C is concentration, and Sc is Schmidt number.

The momentum and concentration equations are closed by the linear eddy-viscosity/diffusivity formulation:

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t S_{ij} + 2k\delta_{ij}/3, \quad \overline{c u_j} = -\frac{\nu_t}{Sc_t} \frac{\partial C}{\partial x_j}$$

Where ν_t is turbulent (eddy) viscosity, and Sc_t turbulent Schmidt number set to its standard value of 0.9.

Turbulence modelling is based on the elliptic-relaxation hybrid RANS-LES approach (ER-HRL) by [14], employing the k - ε - ζ - f (or simply ζ - f) by [15] in the RANS region and the dynamic Smagorinsky model [16] in the LES region. This turbulence model has been extensively validated against numerous benchmark cases, ensuring its reliability and predictive accuracy [9, 17-20].

The ζ - f model in its original form consists of the following equations, applied also in the ensemble-averaged framework:

$$\begin{aligned}\frac{Dk}{Dt} &= \mathcal{D}_k + P_k - \varepsilon \\ \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \mathcal{D}_\varepsilon + \frac{c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \varepsilon}{\tau} \\ \frac{D\zeta}{Dt} &= \mathcal{D}_\zeta + f - \frac{\zeta}{k} P_k \\ L^2 \nabla^2 f - f &= \frac{1}{\tau} \left(c_1 + c'_2 \frac{P_k}{\varepsilon} \right) \left(\zeta - \frac{2}{3} \right) \\ \tau &= \max \left[\min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{0.6}{\sqrt{6} c_\mu^\nu |S| \zeta} \right), c_\tau \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \\ L &= C_L \max \left[\min \left(\frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}, \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{6} c_\mu^\nu |S| \zeta} \right), c_\eta \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \\ v_t &= c_\mu^\nu \zeta k \tau\end{aligned}$$

where k is the RANS ensemble modelled turbulent kinetic energy, ε its dissipation rate, $P_k = \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ is the production rate of turbulent kinetic energy, $\zeta = \nu^2/k$ is the velocity scale ratio, f is an elliptic relaxation function and $\mathcal{D}$ denotes the total (molecular plus turbulent) diffusion:

$$\mathcal{D}_\phi = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\frac{\nu}{\sigma_\phi} + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right]$$

The details on the switching between the RANS and LES region for the ER-HRL model can be found in [14].

Wall boundary conditions for all variables are prescribed within the grid cells nearest to solid surfaces, positioned beyond the viscous sub-layer. This is achieved through the application of semi-empirical wall functions, which are derived by pre-integrating the governing equations over near-wall grid cells.

The computations were conducted using the in-house finite-volume unstructured T-Flows CFD code (<https://github.com/DelNov/T-Flows>), developed at TU Delft by [21,22]. T-Flows has been extensively tested and validated against multiple benchmark cases relevant to the present configurations by [9,17-20, 23-26].

III REFERENCE EXPERIMENT AND APPROACH FLOW SIMULATION

The numerical study is based on the Michelstadt wind-tunnel experiment conducted at the University of Hamburg within COST Action ES1006 [27,28]. The experiment represents a semi-idealized Central European urban layout and provides a well-documented dataset for validating urban flow and pollutant dispersion models.

The physical model consists of 60 flat-roof buildings with internal courtyards and three representative heights (15 m, 18 m, and 24 m at full scale), Fig. 1a. A continuous point source of tracer gas is located in an open area within the domain. The experimental database includes detailed measurements of mean streamwise and spanwise velocity components and turbulence

intensity at 40 locations, and tracer gas concentration at multiple vertical and horizontal profiles across the urban canopy.

In the wind tunnel, an atmospheric boundary layer was generated using vertical spires and rows of roughness elements to reproduce realistic urban inflow conditions, Fig. 1b. To replicate these conditions numerically, a periodic precursor channel simulation was performed to generate a representative turbulent inflow profile, Fig. 3a. Instead of explicitly modelling all roughness elements, a simplified resistance-based approach [17] was adopted to reproduce their overall flow effects while maintaining reasonable computational cost. The total cell count of the precursor simulation was approximately 300,000, Fig. 2.

The bottom boundary was treated as a no-slip wall, while a symmetry boundary condition was imposed at the top. The mass flow rate was adjusted to match the experimental reference velocity of $U_{\text{ref}} = 6 \text{ m/s}$ at a reference height of 100 m.

The ER-HRL turbulence model was applied, and statistics were collected over 10,000 time-steps after reaching a statistically stationary state, with a physical time step of 0.5 s.

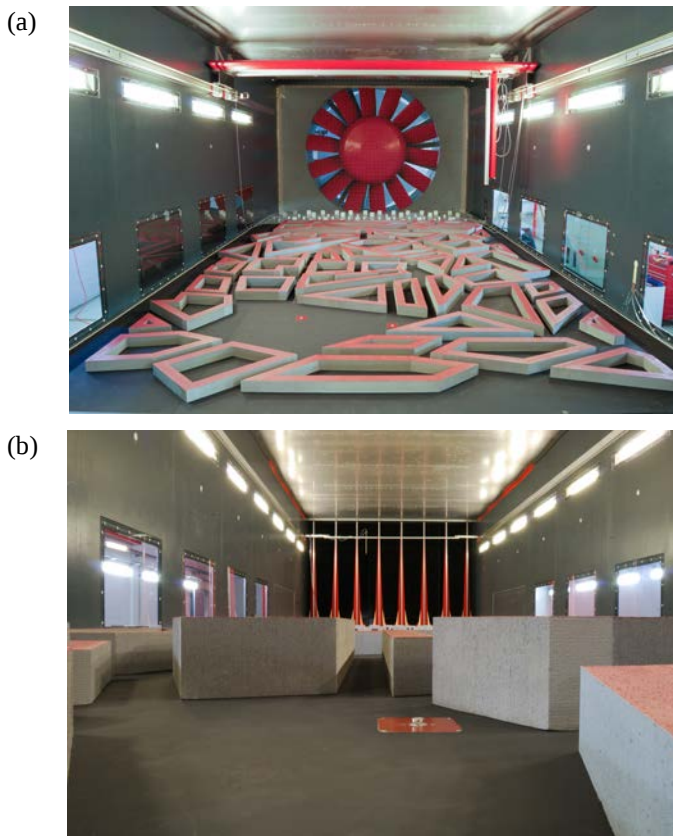


Figure 1. Wind tunnel configuration. (a) Test section with buildings and white rectangular obstacles placed downstream of the inflow. (b) Plan view showing the tracer gas inlet (red square); eight upstream vertical spires generate the turbulent boundary layer

Comparison with measurements shows very good agreement for the mean wind profile, Fig. 3b. Turbulence levels were moderately underestimated, which is expected given the simplified representation of complex wind-tunnel roughness

elements. A higher-resolution simulation using 1.3 million cells improved turbulence prediction but at significantly higher computational cost. Since the objective of this study is to develop a practical and transferable approach for urban-scale applications, a balanced configuration was retained.

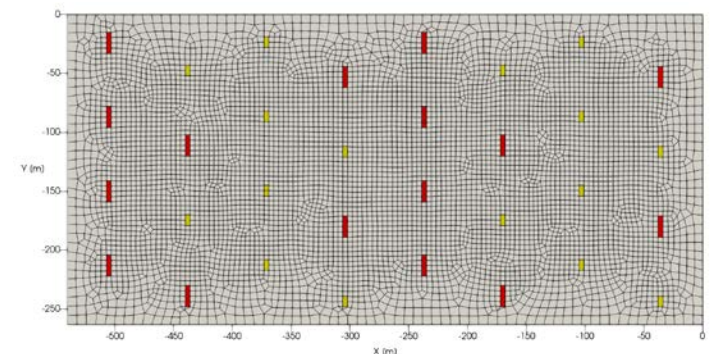


Figure 2. Numerical mesh employed for the precursor simulation (red squares indicate high obstacles (18 m), while yellow squares denote short obstacles (9 m))

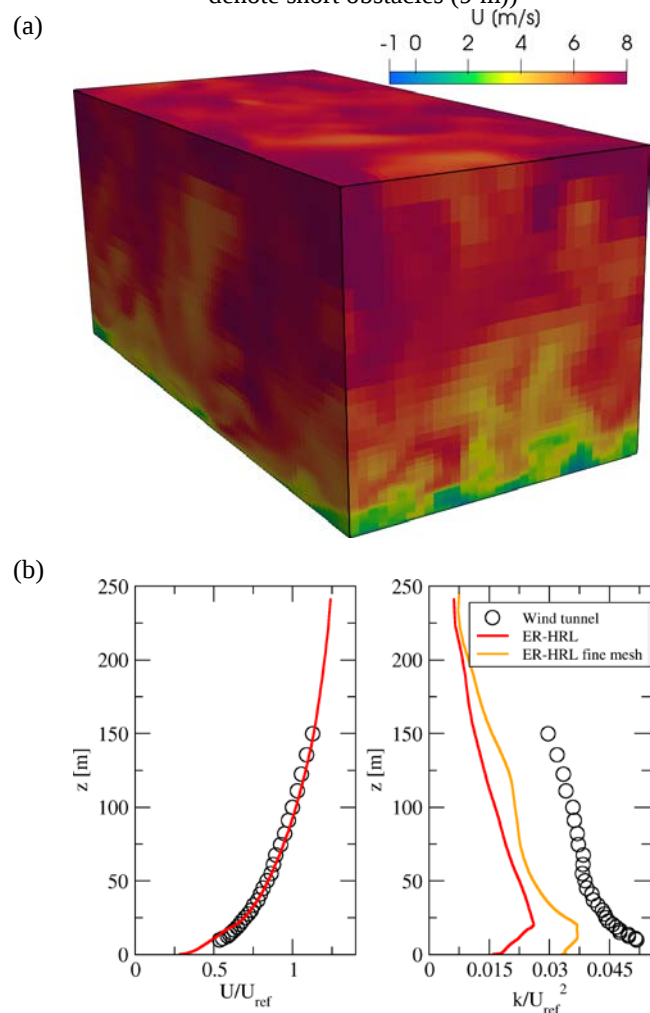


Figure 3. Precursor simulation results: (a) instantaneous streamwise velocity field within the precursor domain; (b) mean inlet profiles of normalized streamwise velocity and turbulent kinetic energy extracted from the precursor simulation compared to experimental data

To compensate for lower inflow turbulence, additional upstream roughness elements were introduced in the main domain, as presented in the following section. Previous studies [29, 30] indicate that urban flows rapidly adjust within the first building rows, and that simplified inflow treatments can provide comparable accuracy for predicting building-scale wind patterns and pollutant dispersion.

IV COMPUTATIONAL DOMAIN AND NUMERICAL DETAILS

The computational domain representing the urban area has overall dimensions of $85H \times 37.5H \times 10H$ (H = maximum building height), Fig. 4. Building colours indicate height (white: 15 m, orange: 18 m, red: 24 m). Green elements represent porosity-modelled obstacles. Red dot represents a pollution source. The inlet is positioned sufficiently upstream of the first building row to allow additional roughness elements to sustain turbulence, while adequate spacing is also provided downstream and laterally, consistent with the original wind-tunnel configuration. The vertical extent of the domain exceeds standard steady-state recommendations [31] in order to accommodate large turbulent structures typical of scale-resolving simulations and to minimize artificial boundary effects.

The mesh was designed to provide enhanced resolution in regions where strong gradients and mixing processes occur, Fig. 5. The red square represents the pollution source. Around the pollutant source, a horizontal resolution of approximately 1 m was applied to accurately capture near-source concentration fields.

Within street canyons, the typical horizontal cell size is about 3 m, while in courtyards it is approximately 4-5 m. In the vertical direction, the near-ground region was refined using stretched layers to better resolve shear and turbulence generation close to surfaces, with progressively coarser spacing toward the top of the domain. The total grid consists of approximately 3.25 million cells.

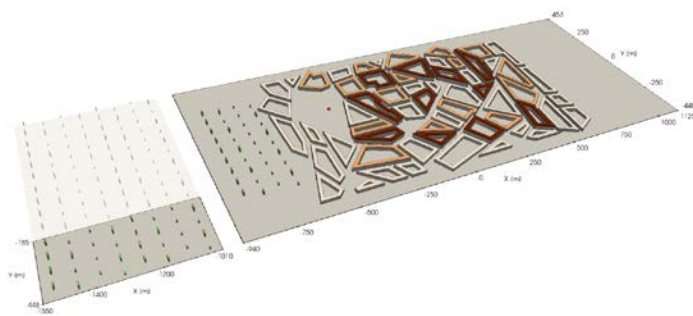


Figure 4. Precursor and computational domains

A simultaneous precursor-main domain strategy was employed. Turbulent inflow data generated in the precursor simulation were transferred dynamically to the inlet of the urban domain, ensuring realistic and time-varying boundary conditions.

After an initial spin-up period to allow the flow to fully develop across the domain, statistical averages were collected over an extended simulation period. The pollutant release was modelled as a continuous vertical emission corresponding to the experimental flow rate. Standard no-slip conditions were applied

at solid surfaces, and air properties representative of typical ambient conditions were assumed. A physical time step of 0.2 s was used. Pressure-velocity coupling was handled using the SIMPLE algorithm.

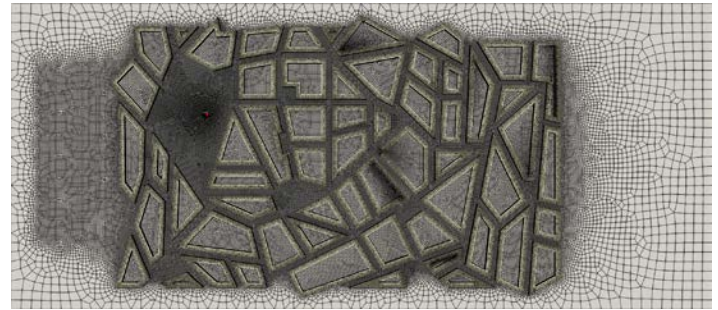


Figure 5. Computational mesh used in simulations

V RESULTS AND DISCUSSION

The simulated pedestrian-level flow field clearly reflects the influence of urban morphology, Fig. 6a. High wind speeds are mainly confined to large open areas and elongated passages aligned with the prevailing wind, which act as natural ventilation corridors. In contrast, dense building clusters and enclosed courtyards exhibit pronounced velocity deficits, including stagnation zones and recirculation regions. The strongest recirculation occurs in deep street canyons oriented perpendicular to the approaching wind and within small courtyards surrounded by taller buildings. Overall, the near-ground flow is highly heterogeneous, characterized by alternating well-ventilated pathways and sheltered low-momentum zones.

(a)



(b)



Figure 6. Fields of instantaneous (a) streamwise velocity and (b) concentration in horizontal slice at 1.8 m

The concentration field strongly follows these flow patterns, Fig. 6b. A pronounced hotspot forms near the emission source within a semi-enclosed courtyard, where weak ventilation allows pollutants to accumulate. Rather than dispersing uniformly, the plume spreads preferentially along wind-aligned corridors and

gradually penetrates adjacent streets through localized high-velocity gaps. A clear inverse relationship is observed between mean wind speed and pollutant concentration: areas with near-zero velocities exhibit the highest concentrations, while well-ventilated zones experience substantial dilution.

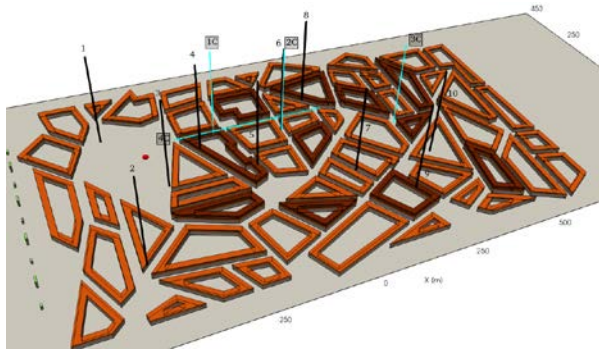


Figure 7. Location of the selected profiles for comparison with experimental results

Figure 7 shows locations of ten selected vertical and horizontal profiles where streamwise and spanwise velocity, turbulent kinetic energy, and concentration measurements within the urban canopy are available. The black lines represent available vertical profiles for velocity components and turbulent kinetic energy (1-10), while blue lines represent vertical and horizontal profiles for pollutant concentration (1C-4C).

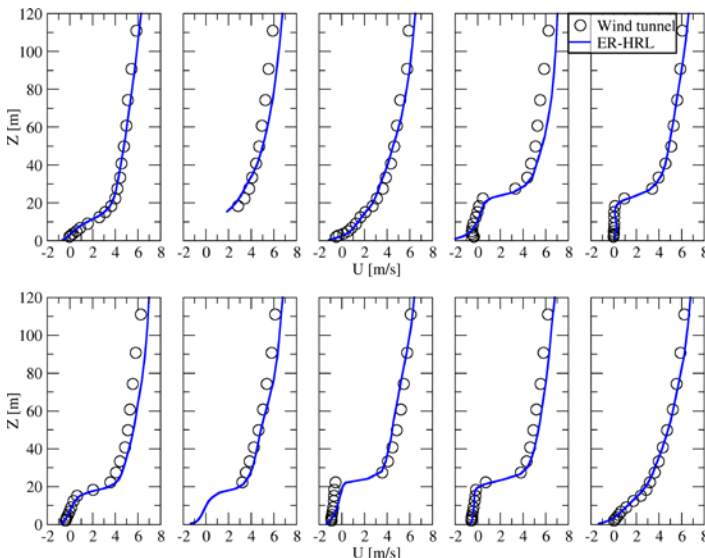


Figure 8. Comparison of predicted and experimental streamwise velocity profiles at ten selected measurement locations within the domain

Within the canopy layer, the streamwise velocity exhibits strong spatial variability, Fig. 8. In dense building clusters and leeward zones, near-ground velocities are close to zero and may become slightly negative, indicating recirculation and shielding effects. In contrast, more open locations show a smoother increase of velocity with height, reflecting better exposure to the approaching flow and improved vertical connectivity. A clear inflection point appears around roof level, marking the transition from the geometry-dominated canopy flow to the more uniform

atmospheric boundary layer above, where the direct influence of individual buildings rapidly diminishes.

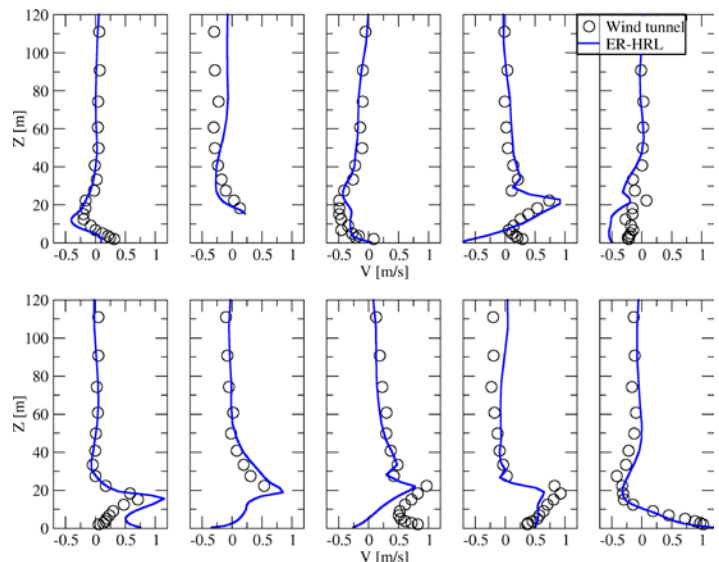


Figure 9. Comparison of predicted and experimental spanwise velocity profiles at ten selected measurement locations within the domain

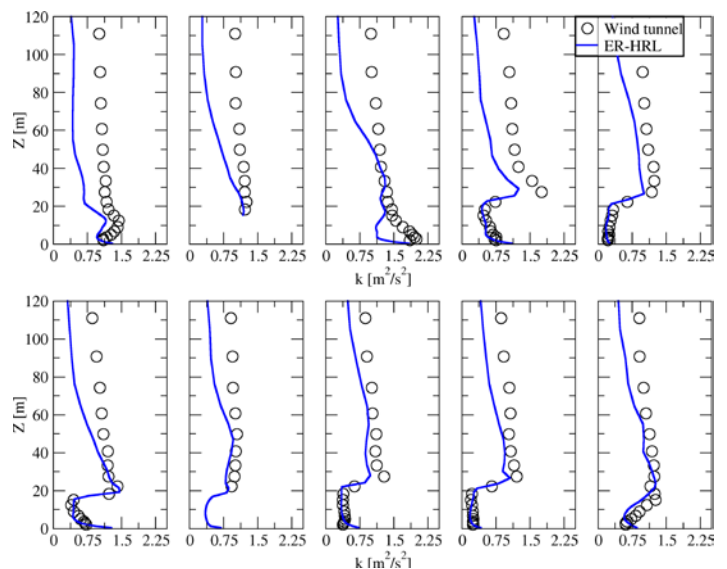


Figure 10. Comparison of predicted and experimental turbulent kinetic energy profiles at ten selected measurement locations within the domain

The spanwise (lateral) velocity component highlights the inherently three-dimensional character of urban ventilation, Fig. 9. While mean lateral velocities tend to approach zero above roof height, significant deviations occur within the canopy, particularly in areas with staggered or irregular building arrangements. These cross-flows enable exchange between adjacent streets and courtyards, demonstrating that pollutant redistribution depends not only on streamwise transport but also on lateral mixing pathways within the urban fabric.

Profiles of turbulent kinetic energy (TKE), Fig. 10, consistently

show maxima near roof level. This peak corresponds to the shear layer formed by flow separation at building tops and the interaction between slow canopy air and the faster overlying flow. Below roof height, especially within deep or narrow street canyons, turbulence intensity decreases substantially toward the ground. The reduced turbulence limits vertical exchange and weakens mixing at pedestrian level, increasing the likelihood of pollutant accumulation in sheltered zones.

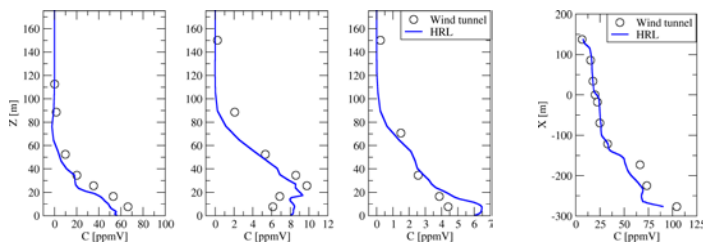


Figure 11. Comparison of predicted and experimental concentration profiles along three vertical transects and one horizontal transect within the measurement domain

The concentration profiles reflect this vertical structure, Fig. 11. Elevated pollutant levels persist throughout the canopy and decay gradually with height, indicating limited dilution within the built environment. Above roof level, concentrations decrease sharply as the plume enters the more energetic outer flow, where higher wind speeds and turbulence enhance dispersion. The roof-shear layer therefore acts as the primary ventilation interface controlling vertical pollutant removal from the urban canopy.

VI CONCLUSIONS

This study demonstrates that CFD, when coupled with appropriate turbulence modelling, is a powerful and essential tool for predicting contaminant dispersion in complex urban environments. The hybrid RANS-LES approach used here provides reliable predictions of pollutant transport, capturing the effects of urban geometry on both horizontal and vertical dispersion while remaining computationally feasible for realistic city-scale applications.

From a practical standpoint, the findings are highly relevant for emergency preparedness and response planning. In accidental release scenarios, whether involving hazardous industrial chemicals, transportation-related spills, or radiological contaminants as observed in major nuclear accidents, exposure patterns are governed by the interaction between atmospheric flow and urban morphology. This aspect becomes particularly important in the context of next-generation nuclear technologies, such as SMRs, which are expected to offer greater siting flexibility and may be deployed closer to industrial hubs or urban infrastructure networks. In such settings, accurate near-field dispersion modelling is critical. CFD-based simulations enable identification of stagnation zones, ventilation corridors, and high-risk accumulation areas at pedestrian height, thereby supporting evacuation planning, definition of exclusion zones, placement of monitoring systems, and real-time operational decision-making.

Overall, the study confirms that advanced CFD approaches, supported by validated turbulence models, should be considered

a core component of modern urban risk assessment and resilience planning. As cities grow denser and infrastructure systems become more interconnected, predictive, physics-based tools will play an increasingly central role in safeguarding public health and guiding evidence-based emergency management strategies.

REFERENCES

- [1] Bartzis, J. G., Sakellaris, I. A., Efthimiou, G. On exposure uncertainty quantification from accidental airborne point releases, *Journal of Hazardous Materials Advances*, Vol. 6, 100080, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100080>
- [2] Bartzis, J. G., Sakellaris, I. A., Andronopoulos, S., Venetsanos, A., Triantafyllou, A. Towards new simplified methodologies on source term estimation and associated uncertainties from accidental airborne releases, *Building and Environment*, Vol. 251, 111222, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111222>
- [3] Miao, Y., Liu, S., Zheng, H., Zheng, Y., Chen, B., Wang, S. A multi-scale urban atmospheric dispersion model for emergency management, *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 31, No. 6, pp. 1353-1365, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-3254-9>
- [4] Rentai, Y.A.O. Atmospheric dispersion of radioactive material in radiological risk assessment and emergency response, *Progress in Nuclear Science and Technology*, Vol. 1, pp. 7-13, 2011. <https://www.aesj.net/document/pnst001/7.pdf> [pristupljeno 12.01.2026]
- [5] Pontiggia, M., Derudi, M., Alba, M., Scaioni, M., Rota, R. Hazardous gas releases in urban areas: Assessment of consequences through CFD modelling, *Journal of hazardous materials*, Vol. 176, No. 1-3, pp. 589-596, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.070>
- [6] Sanchez, E.Y., Lerner, J.C., Porta, A., Jacovkis, P. M. Accidental release of chlorine in Chicago: Coupling of an exposure model with a Computational Fluid Dynamics model, *Atmospheric environment*, Vol. 64, pp. 47-55, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.037>
- [7] Armand, P., Oldrini, O., Duchenne, C., Perdiel, S. Topical 3D modelling and simulation of air dispersion hazards as a new paradigm to support emergency preparedness and response, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 143, 105129, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105129>
- [8] Mendil, M., Leirens, S., Armand, P., Duchenne, C. Hazardous atmospheric dispersion in urban areas: A Deep Learning approach for emergency pollution forecast, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 152, 105387, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105387>
- [9] Hadžiabdić, M., Hafizović, M., Ničeno, B., Hanjalić, K. A rational hybrid RANS-LES model for CFD predictions of microclimate and environmental quality in real urban structures, *Building and Environment*, Vol. 217, 109042, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109042>
- [10] Zhang, Y., Ye, X., Wang, S., He, X., Dong, L., Zhang, N., Xiao, Y. Large-eddy simulation of traffic-related air pollution at a very high resolution in a mega-city: evaluation against mobile sensors and insights for influencing factors, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 21, No. 4, pp. 2917-2929, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2917-2021>
- [11] Liu, J., Niu, J. CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building: An evaluation of SRANS, LES and DES models, *Building and Environment*, Vol.96, pp. 91-106, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.007>
- [12] Ono, A., Nozu, T. Comparison between wind tunnel experiment and large-eddy simulation of concentration fluctuations in pollutant dispersion in a realistic urban area, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 253, 105832, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105832>
- [13] García-Sánchez, C., Van Beeck, J., Gorié, C. Predictive large eddy simulations for urban flows: Challenges and opportunities, *Building and Environment*, Vol. 139, pp. 146-156, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.007>
- [14] Hadziabdic, M. LES, RANS and combined simulation of impinging flows and heat transfer, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2005.
- [15] Hanjalic, K., Popovac, M., Hadziabdic, M. A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD, *International journal of heat and fluid flow*, Vol. 25, No. 6, pp. 1047-1051, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.005>

- [16] Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Physics of fluids a: Fluid dynamics*, Vol. 3, No. 7, pp. 1760-1765, 1991. <https://doi.org/10.1063/1.857955>
- [17] Hadziabdic, M., Hodza, A., Niceno, B. Modelling urban canopy with object-based porosity model, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 107, 109394, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109394>
- [18] Hadziabdic, M., Niceno, B. Reconstruction of Nusselt number in RANS computations with wall function approach, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 412, 112461, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112461>
- [19] Hanjalić, K., Laurence, D., Popovac, M., Uribe, J. $u^2/k - f$ Turbulence model and its application to forced and natural convection. In: Rodi, W., Mulas, M. (Eds.), *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, Vol. 6. Elsevier Science B.V., pp. 67-76, 2005. <https://doi.org/10.1016/b978-008044544-1/50005-4>
- [20] Delibra, G., Hanjalic, K., Borello, D., Rispoli, F. Vortex structures and heat transfer in a wall bounded pin matrix: LES with a RANS wall treatment, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol 31, No. 5, pp. 740-753, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.03.004>
- [21] Niceno, B. *An Unstructured Parallel Algorithm for Large Eddy and Conjugate Heat Transfer Simulations*, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2001.
- [22] Niceno, B., Hanjalic, K. Unstructured large-eddy and conjugate heat transfer simulations of wall-bounded flows, in: S. Sundén, M. Faghri (Eds.), *Modelling and Simulation of Turbulent Heat Transfer*, WIT Press, USA, pp. 35-76, 2005.
- [23] Palkin, E., Hadziabdic, M., Mullyadzhonov, R., Hanjalic, K. Control of flow around a cylinder by rotary oscillations at a high subcritical Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 855, pp. 236-266, 2018. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.639>
- [24] Van Reeuwijk, M., Hadziabdic, M. Modelling high Schmidt number turbulent mass transfer, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 51, pp. 42-49, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.10.025>
- [25] Temmerman, L., Hadziabdic, M., Leschziner, M.A., Hanjalic, K. A hybrid two-layer URANS-LES approach for large eddy simulation at high Reynolds numbers, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 26, No. 2, pp. 173-190, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.006>
- [26] Hafizović, M., Hadžiabdić, M., Ničeno, B. Numerical Simulations of Heat Transfer in Underground Thermal Energy Storage (UTES) System: CFD Approach, *Energetika, Ekonomija, Ekologija*, Vol. 27, No. 1, pp. 24-31, 2005. <https://doi.org/10.46793/EEE25-1.24H>
- [27] COST, ES1006 - Evaluation, improvement and guidance for the use of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments. <https://www.cost.eu/actions/ES1006/> [pristupljeno 28.01.2026]
- [28] Berbekar, E., Harms, F., Leidl, B. Wind-tunnel measurements of accidental gas releases in a simplified urban environment, in *Proc. HARMO, 16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Varna, Bulgaria, 8-11 September, 2014.
- [29] Ricci, A., Kalkman, I., Blocken, B., Burlando, M., Freda, A., Repetto, M. P. Large-scale forcing effects on wind flows in the urban canopy: Impact of inflow conditions, *Sustainable cities and Society*, Vol. 42, pp. 593-610, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.012>
- [30] An, K., Fung, J. C. H., Yim, S. H. L. Sensitivity of inflow boundary conditions on downstream wind and turbulence profiles through building obstacles using a CFD approach, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 115, pp. 137-149, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.004>
- [31] Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A. G., Krüs, H. W., Schatzmann, M., Westbury, P. S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N. G. Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment, *Cost action C*, Vol. 14, pp. 1-12, 2004.

AUTHORS

Mahir Hafizović – MSc., Enova LLC / International University of Sarajevo – Mechanical Eng. Department, mahir.hafizovic@enova.ba, ORCID [0000-0002-9319-6932](https://orcid.org/0000-0002-9319-6932)

Muhamed Hadžiabdić – Prof. Dr., International University of Sarajevo – Mechanical Eng. Department, mhadziabdic@ius.edu.ba, ORCID [0000-0002-2726-3914](https://orcid.org/0000-0002-2726-3914)

Bojan Ničeno – Dr., Senior Scientist, Paul Scherrer Institute – Nuclear Energy and Safety Department, bojan.niceno@psi.ch, ORCID [0000-0002-8583-1684](https://orcid.org/0000-0002-8583-1684)

Simulacije širenja zagađujućih materija uslijed nenamjernih ispuštanja u gradovima: CFD pristup

Rezime - Slučajna ispuštanja opasnih zagađujućih materija u urbanim sredinama predstavljaju značajan izazov za hitne službe, procjenu rizika i javnu sigurnost, posebno u scenarijima koji uključuju toksične ili radioaktivne materije. Precizno predviđanje transporta zagađujućih materija u gusto izgrađenim područjima zahtijeva numeričke alate sposobne da reproduciraju složene tokove uzrokovane urbanom geometrijom. Za ovu svrhu se široko koristi računaska dinamika fluida (eng. Computational Fluid Dynamics, CFD), ali njena tačnost uveliko zavisi od izbora pristupa modeliranju turbulencije.

Ova studija ispituje hibridni RANS-LES (HRL) pristup za simulaciju širenja zagađujućih materija u realnom gradskom okruženju, zasnovanom na eksperimentu u zračnom tunelu. Transport zagađujućih materija analiziran je korištenjem srednjih i trenutnih polja brzine i koncentracije, kao i eksperimentalnih profila, s posebnim naglaskom na lateralno širenje u susjedne ulice, dvorišta i zone recirkulacije.

Rezultati pokazuju da HRL može predvidjeti nestacionarne vrtložne strukture, stvarajući obrasce širenja zagađujućih materija koji se vrlo dobro poklapaju s eksperimentalnim rezultatima. Ovi rezultati naglašavaju važnost modela turbulencije sposobnih da reproduciraju nestacionarne strukture toka za pouzdano predviđanje širenja zagađujućih materija u gradovima i naglašavaju ključnu ulogu CFD-a u procjeni kvaliteta zraka, pripremi za hitne situacije i donošenju odluka zasnovanih na riziku.

Ključne reči - Disperzija zagađujućih materija, slučajna ispuštanja, kvalitet zraka, modeliranje turbulencije, računaska dinamika fluida

Određivanje količine toplote akumulisane u zidu pri nestacionarnim promenama temperature spoljašnjeg vazduha

Branislav Petrović*, Sandra Kovačević*, Miloš Banjac*

*Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

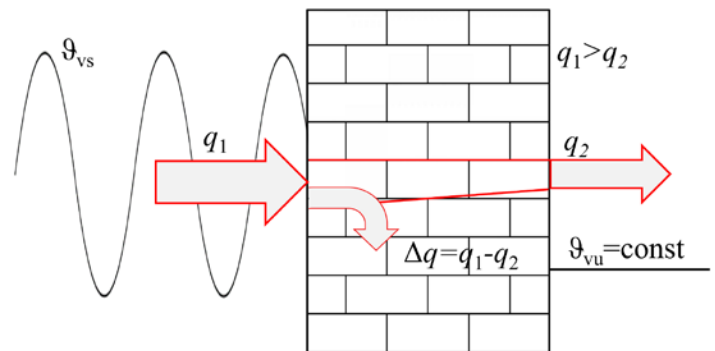
Rezime - Iako standard EN ISO 13790:2010 „Energetske performanse zgrada - Proračun energije koja se koristi za grejanje i hlađenje“ definiše tri metode proračuna (kvazi-stacionarni mesečni metod i dva dinamička – jednostavan i detaljan časovni metod), trenutno važeći Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada (Sl. glasnik RS, br. 61/2011) i dalje propisuje primenu najjednostavnijeg i najnepouzdanijeg kvazi-stacionarnog mesečnog metoda za određivanje godišnje potrebne količine toplote potrebne za grejanje zgrada. Ovaj pristup se zasniva na pretpostavci stacionarnog prolaženja toplote, pri čemu se zanemaruju vremenske promene temperature spoljašnjeg vazduha i efekti akumulacije toplote u građevinskim elementima, što može dovesti do značajnih odstupanja u proceni toplotnih gubitaka. Sa ciljem utvrđivanja greške koja nastaje primenom ova dva pristupa, u radu je izvršeno poređenje vrednosti toplotnih protoka dobijenih stacionarnim i nestacionarnim, odnosno dinamičkim pristupom proračunu prolaženja toplote kroz spoljašnji zid tokom zimskog perioda. Analizirana su dva karakteristična slučaja: zid od pune opeke debljine 25 cm i zid od opeke sa dodatnim termoizolacionim slojem debljine 10 cm sa spoljašnje strane. Nestacionarno harmonijsko prolaženje toplote modelirano je numeričkim rešavanjem Furijeove jednačine metodom konačnih razlika, uz potpuno implicitnu vremensku diskretizaciju, primenom simulacija razvijenih u programskom jeziku Python. Dobijeni rezultati pokazuju da stacionarni proračun nije u stanju da opiše razliku između ulaznog i izlaznog toplotnog protoka, niti da kvantifikuje količinu toplote akumulisane u zidu, dok nestacionarni, odnosno dinamički pristup, koji obuhvata vremenske promene temperature spoljašnjeg vazduha i efekte akumulacije toplote u građevinskim elementima, omogućava znatno realniji opis termičkog ponašanja konstrukcije.

Ključne reči - nestacionarno prolaženje toplote, akumulacija toplote, numerička simulacija, energetske performanse zgrada, toplotni gubici

I UVOD

Trenutno važeći Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada Republike Srbije (Sl. glasnik RS, br. 61/2011) propisuje primenu najjednostavnijeg i najnepouzdanijeg kvazi-stacionarnog mesečnog metoda za izračunavanje godišnje količine toplote potrebne za grejanje zgrada [1]. Ovaj metod se zasniva na pretpostavci stacionarnog prolaženja toplote kroz građevinske konstrukcije, pri čemu se temperature spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha posmatraju kao vremenski nepromenljive

veliçine. Iako je ovaj stacionarni pristup, zbog svoje jednostavnosti, tradicionalno prihvaćen u inženjerskoj praksi, on ne može adekvatno obuhvatiti uticaj dinamičkih promena spoljašnjih uticaja koje se javljaju u stvarnim, neustaljenim termičkim uslovima tokom dana.



Slika 1. Prikaz provođenja toplote kroz ravan zid tokom nestacionarnim uslovima

Za razliku od stacionarnog proračuna, proračun neustaljenog prenošenja toplote kroz građevinske elemente uzima u obzir vremenski promenljivo temperaturno polje, kao i sposobnost građevinskih materijala da akumuliraju i oslobađaju toplotu. Time se omogućava realnija procena toplotnih gubitaka i toplotnog protoka sa obe strane zida. Zanemarivanje ovih efekata u okviru stacionarnog pristupa može dovesti do značajnih odstupanja između proračunatih vrednosti i stvarnog termičkog ponašanja konstrukcije, posebno u uslovima promenljive temperature spoljašnjeg vazduha.

Prepoznavanje ograničenja kvazi-stacionarnog pristupa na evropskom nivou dovelo je do povlačenja standarda EN ISO 13790:2010 [2] i uvođenja standarda EN ISO 52016-1:2017, kojim su definisane savremene časovne proračunske metode za realniji opis nestacionarnog prenošenja toplote kroz građevinske konstrukcije [3,4].

Za razliku od pojednostavljene časovne metode sa tri čvora propisane povučenim standardom EN ISO 13790, nova metodologija ne zasniva se na grupisanju građevinskih elemenata i njihovih slojeva, već podrazumeva formiranje energetskih bilansa za svaki sloj pojedinačnih elemenata termičkog omotača. Na taj način, termička masa konstrukcije i procesi akumulacije toplote eksplicitno su obuhvaćeni kroz sistem spregnutih jednačina koje se rešavaju na časovnom nivou, uz uvođenje vremenski promenljivih graničnih uslova. Rezultati prikazani u

radu [5] pokazuju da ovakav pristup omogućava znatno realniji opis dinamičkog termičkog ponašanja zgrade, naročito u pogledu časovnih promena unutrašnjih temperatura i toplotnih protoka, čime se prevazilaze ograničenja prethodnog kvazi-stacionarnog i pojednostavljenog časovnog proračuna. U okviru metodologije propisane standardom EN ISO 52016-1 primenjuju se dinamički modeli zasnovani na toplotno-električnoj analogiji tipa R-C, kojima se vremenski promenljiva razmena toplote između građevinskih elemenata i spoljašnjeg okruženja opisuje uz eksplicitno razmatranje procesa akumulacije i oslobađanja toplote u konstrukciji. Iako ovi modeli podrazumevaju pojednostavljenja u odnosu na detaljne numeričke metode zasnovane na direktnom rešavanju Furijeove jednačine, brojna istraživanja su pokazala da RC-modeli mogu sa visokom tačnošću da opišu dinamičku razmenu toplote i časovne promene temperatura unutrašnjeg vazduha. Poređenjem sa referentnim testnim slučajevima definisanim EPB standardima potvrđena je njihova primenljivost za analizu nestacionarnih termičkih procesa, čime se opravdava upotreba ovakvog pristupa [6].

Međutim, i pored navedenih unapređenja u okviru časovnih proračunskih procedura, neustaljeni procesi prenošenja toplote i dalje su povezani sa složenim matematičkim formulacijama, čija se kompleksnost dodatno povećava u uslovima periodičnih oscilacija temperature i toplotnog protoka izazvanih dnevnim promenama spoljašnje temperature vazduha i uticajem sunčevog zračenja (Slika 1). Zbog toga primena detaljnih nestacionarnih modela može biti ograničena u inženjerskoj praksi, naročito u pogledu obima proračuna, potrebnih ulaznih podataka i računarske složenosti.

Savremeni softverski alati za simulaciju energetskih performansi zgrada zasnivaju se na različitim pristupima za rešavanje Furijeove jednačine jednodimenzionalnog nestacionarnog provođenja toplote kroz građevinske elemente, koji se mogu grupisati u numeričke i poluanaličke metode [7,8].

Među numeričkim metodama najčešće se primenjuju metoda konačnih razlika (eng. *Finite Difference Method - FDM*) i metoda konačnih zapremina (eng. *Finite Volume Method - FVM*), pri čemu se konstrukcija diskretizuje na konačan broj elemenata, a temperaturno polje se određuje u diskretnim vremenskim koracima rešavanjem sistema algebraskih jednačina. Pored toga, u pojedinim softverskim alatima primenjuje se i metoda konačnih elemenata (eng. *Finite Element Method - FEM*), koja omogućava fleksibilniju diskretizaciju složenijih geometrija.

Pored numeričkih metoda u prostorno-vremenskom domenu, u praksi se koriste i metode u frekventnom domenu, koje se zasnivaju na analizi odziva građevinskih elemenata na periodične temperaturne pobude, najčešće sa periodom od 24 h. Ovaj pristup koristi kompleksne brojeve i Fourier-ovu analizu kako bi se temperaturno polje i toplotni protok predstavili u obliku talasnih funkcija. Široku primenu imaju i metode u vremenskom domenu, koje opisuju odziv zida na vremenski promenljive pobude u diskretnim vremenskim intervalima, najčešće od jednog sata. Ove metode koriste faktore odziva (eng. *response factors*) i koeficijente prenosa toplote (eng. *transfer coefficients*) za proračun toplotnog protoka, čime se omogućava modeliranje nestacionarnog ponašanja građevinskih elemenata uz manju

računarsku složenost u poređenju sa potpunim numeričkim pristupima.

Ipak, primena simulacionih softvera za analizu dinamičkog prenošenja toplote zahteva detaljno poznavanje termodinamičkih procesa u objektu, kao i veliki broj ulaznih parametara, dok dodatne prepreke u inženjerskoj praksi predstavljaju visoki troškovi softverskih paketa, složenost modeliranja i potreba za naprednim znanjem u interpretaciji rezultata. Zbog toga se, naročito u inženjerskim proračunima i analizama, često pribegava pojednostavljenim pristupima za procenu uticaja toplotne inercije na energetske performanse zgrada, koji se zasnivaju na kvantitativnim parametrima dinamičkog termičkog odziva konstrukcija. U tom kontekstu, najčešće korišćena dinamička termička svojstva su faktor prigušenja amplitude temperaturnih oscilacija γ [-] i vremensko kašnjenje temperaturnih oscilacija η [h], koji omogućavaju jednostavnu, ali informativnu procenu efekata akumulacije i oslobađanja toplote u građevinskim elementima. Pravilnik o energetskoj efikasnosti zgrada Republike Srbije propisuje minimalno dozvoljene vrednosti faktora prigušenja amplitude oscilacije temperature i kašnjenje temperaturnih oscilacija prilikom proračuna toplotne stabilnosti građevinskih konstrukcija. Iako se ovi kvantitativni parametri široko koriste za opisivanje uticaja akumulacije toplote, oni nisu dovoljni da precizno odrede nivo greške pri poređenju stacionarnog i nestacionarnog procesa prenošenja toplote, uzimajući u obzir količinu toplote akumulisanu u zidu.

II METEMATIČKI MODEL HARMONIJSKOG PROVOĐENJA TOPLOTE KROZ ZID

Jednačina koja opisuje vremenski promenljivo temperaturno polje unutar zida debljine δ [m], sa konstantnim termofizičkim svojstvima i bez pojave unutrašnjih izvora toplote, formulisana je pomoću Furijeove parcijalne diferencijalne jednačine za jednodimenzionalno provođenje toplote:

$$\frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Tokom analize neustaljenog provođenja toplote kroz zid, uvodi se parametar koji opisuje dinamiku nestacionarnog procesa – toplotna difuzivnost ili temperaturna provodnost materijala, a [m²/s], koja definiše odnos između sposobnosti materijala da efikasno provodi toplotu u odnosu na njegovu sposobnost da je skladišti:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

gde su:

λ [W/mK] – toplotna provodljivost materijala – opisuje sposobnost materijala da provodi toplotu,
 ρ [kg/m³] – gustina materijala,
 c_p [J/m³K] – toplotni kapacitet materijala sveden na jedinicu zapremine – „kapacitet“ skladištenja toplote.

Za rešavanje jednačine (1) koristi se početni uslov (3) i dva granična uslova sa spoljašnje i unutrašnje strane zida (4) i (5):

$$\vartheta(x, 0) = \vartheta_0(x) \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} = h_s (\vartheta_{vs} - \vartheta_{zs}) \quad (x = 0) \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} = h_u (\vartheta_{zu} - \vartheta_{vu}) \quad (x = \delta) \quad (5)$$

gde h_s i h_u predstavljaju koeficijente prelaženja toplote sa spoljašnje i unutrašnje strane zida, dok ϑ_{vs} , ϑ_{zs} , ϑ_{zu} , ϑ_{vu} označavaju temperaturu spoljašnjeg vazduha, spoljašnje površi zida, unutrašnje površi zida i unutrašnjeg vazduha, redom.

III FIZIČKI MODEL

Za poređenje stacionarnog i nestacionarnog procesa prenošenja toplote kroz zid, u ovom radu analizirana su dva slučaja spoljašnjeg zida:

1. spoljašnji zid od cigle debilje 25 cm;
2. spoljašnji zid od cigle debljine 25 cm sa termoizolacionim slojem postavljenim sa njegove spoljašnje strane debljine 10 cm.

Tabela 1 prikazuje termofizička svojstva materijala razmatranih zidova, uključujući gustinu, specifičnu toplotu i toplotnu provodljivost.

Tabela 1. Termofizička svojstva razmatranog spoljašnjeg zida

Vrsta materijala	Debljina δ [m]	Gustina ρ [kg/m ³]	Specifična toplota c [J/kgK]	Toplotna provodljivost λ [W/mK]
1. Puna cigla	0,25	1400	920	0,58
2. Izolacija	0,10	180	840	0,039

Definisani su sledeći proračunski parametri:

- maksimalna dnevna temperatura spoljašnjeg vazduha: 15°C,
- minimalna dnevna temperatura spoljašnjeg vazduha: 5°C,
- srednja dnevna temperatura spoljašnjeg vazduha: 10°C,
- projektna temperatura unutrašnjeg vazduha (zimski režim): 20 °C,
- toplotni otpor prelaženju toplote sa unutrašnjeg vazduha na unutrašnju površ zida: $R_u = 0,13$ (m²K)/W,
- toplotni otpor prelaženju toplote sa spoljašnje površi zida na spoljašnji vazduh: $R_s = 0,04$ (m²K)/W.

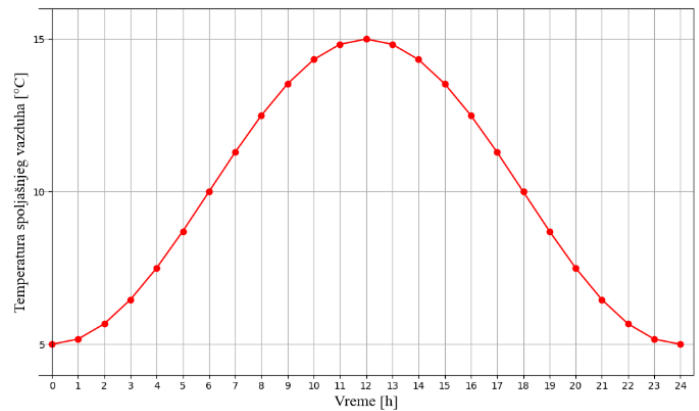
Toplotni otpori prelaženja toplote sa unutrašnje i spoljašnje površi zida usvojeni su na snovu tabele iz Pravilnika o energetske efikasnosti zgrada.

U stvarnim uslovima periodični termički uticaji na spoljašnje zidove stalno se ponavljaju sa istim periodom od jednog dana. Iako ovi fenomeni u velikoj meri podsećaju na stacionarne, oni se karakterišu kao kvazistacionarni. Najjednostavniji slučaj periodičnih oscilacija su harmonijske oscilacije, a predstavljaju termičke uticaje koji se menjaju tokom vremena prema sinusnom ili kosinusnom zakonu. Jednodimenzionalni harmonijski termički uticaji usmereni su normalno na površ jednoslojnih i višeslojnih zidova, pri čemu se termički uticaji na spoljašnje zidove prenose od spoljašnje ka unutrašnjoj strani zida. Prolaskom harmonijskih termičkih uticaja kroz spoljašnji zid, harmonijske oscilacije temperature i toplotnog protoka sa unutrašnje strane zida postepeno se smanjuju (prigušuju).

U analizi nestacionarnog procesa prenošenja toplote, pretpostavljeno je da se temperatura spoljašnjeg vazduha menja sinusoidalno tokom perioda od 24 sata. Ova promena se može opisati odgovarajućom jednačinom [9]:

$$\vartheta_{vs}(\tau) = \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi\tau}{P} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\vartheta_{\max} + \vartheta_{\min}}{2} \quad (6)$$

Na osnovu jednačine (6) i zadatu maksimalnu i minimalnu temperaturu spoljašnjeg vazduha tokom zimskog dana, na slici 2 grafički je prikazana sinusoidalna oscilacija temperature spoljašnjeg vazduha tokom dana.

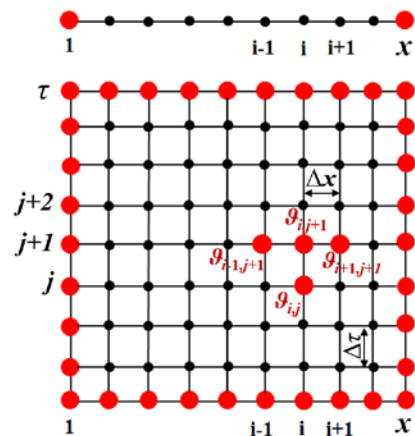


Slika 2. Sinusoidalna oscilacija temperature spoljašnjeg vazduha u toku jednog dana

IV NUMERIČKA ANALIZA (METODA KONAČNIH RAZLIKA)

Metoda konačnih razlika (FDM – *finite difference method*) zasnovana je na aproksimaciji funkcije Tejlorovim redom i zanemarivanju članova višeg reda, koji se tretiraju kao ostatak. Numerička mreža strukturisana je tako da se pozicija svakog čvora može lako definisati pomoću klasičnog pristupa, koji je osnova Dekartovog koordinatnog sistema (slika 3).

Svaki od čvorova određen je uređenim parom (i, j) u 2D geometriji, na primer, susedni čvorovi se lako mogu odrediti promenom indeksa i ili j za po jedan čvor unapred ili unazad. Granični čvorovi u kojima je definisana vrednost funkcije kroz granični uslov (Dirihlet-ov uslov) ne zahtevaju pisanje jednačina.

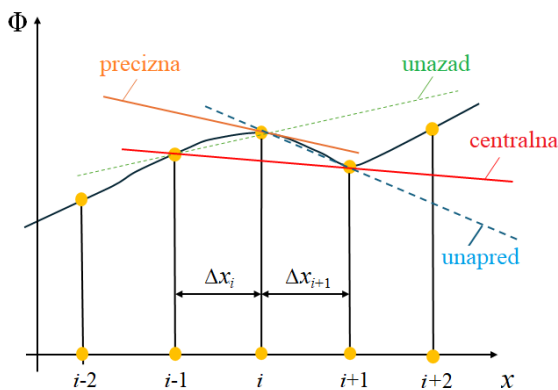


Slika 3. Numerička mreža za metodu konačnih razlika

Osnovna ideja metode konačnih razlika je u definisanju prvog izvoda funkcije u tački x_i :

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_{x_i} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Phi(x_i + \Delta x) - \Phi(x_i)}{\Delta x} \quad (7)$$

Geometrijska interpretacija prvog izvoda prikazana je na slici 4. Prvi izvod u tački x_i predstavlja nagib tangente u tački sa apscisom x_i i može se aproksimirati u odnosu na postojeću tačku na tri načina: „unapred”, „unazad” i pomoću „centralne” šeme. Sa slike 4 se može zaključiti da neke šeme bolje predstavljaju prvi izvod od drugih. Konkretno, „centralna” šema daje najprecizniju vrednost prvom izvodu u tački x_i , dok je šema „unazad” najudaljenija od tačnog rešenja.



Slika 4. Aproximacija prvog izvoda na tri načina

Svaka kontinualna funkcija $\Phi(x)$ može se razviti u Tejlorov red u okolini tačke x_i na sledeći način:

$$\begin{aligned} \Phi(x) = & \Phi(x_i) + (x - x_i) \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_i + \frac{(x - x_i)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}\right)_i + \\ & + \frac{(x - x_i)^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 \Phi}{\partial x^3}\right)_i + \dots + \frac{(x - x_i)^n}{n!} \left(\frac{\partial^n \Phi}{\partial x^n}\right)_i + H \end{aligned} \quad (8)$$

gde H predstavlja više redove koji mogu biti manje ili više značajni.

Zamenom x sa x_{i+1} ili x_{i-1} u jednačini (8) dobija se izraz za prvi izvod u tački „ x_{ij} ” koristeći aproksimaciju „unapred” ili „unazad”. Ukoliko se primeni „centralna” aproksimacija, potrebno je u jednačini (8) zameniti Φ sa Φ_{i+1} i Φ_{i-1} i oduzeti ih. Za dovoljno usitnjenu mrežu rastojanje između čvorova je prilično malo, pa će i članovi višeg reda biti znatno manji u odnosu na prve članove na desnoj strani jednačine. Ako se zanemare članovi reda višeg od 1, tada se dolazi do sledećih aproksimativnih izraza za prvi izvod funkcije u tački x_i koristeći šeme „unapred”, „unazad” i „centralnu” respektivno:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_i \approx \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_i \approx \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_i \approx \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (11)$$

Članovi koji su zanemareni na desnim stranama jednačina (9)-(11) predstavljaju grešku višeg reda (tzv. „truncation error”) u odnosu na tačno rešenje, a koja se pravi svesno, u cilju pojednostavljenja problema. Smanjivanjem rastojanja Δx između čvorova mreže greška teži nuli, tj. aproksimativna rešenja za prve izvode teže tačnim rešenjima.

Za aproksimaciju drugog izvoda, može se koristiti isti pristup kao i za prvi izvod funkcije:

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}\right)_i \approx \frac{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_{i+1} - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (12)$$

gde se u jednačini (12) koristi šema „unapred”.

Ukoliko se podrazumeva jednako rastojanje između čvorova, dobija se uprošćeni izraz za drugi izvod funkcije, koji glasi:

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}\right)_i \approx \frac{\Phi_{i+1} + \Phi_{i-1} - 2\Phi_i}{(\Delta x)^2} \quad (13)$$

Diferencijalna jednačina provođenja toplote sa pripadajućim početnim i graničnim uslovima diskretizovana je metodom konačnih razlika (FDM). Za rešavanje diferencijalne jednačine primenjena je centralna razlika u prostornom domenu, dok se u vremenskom domenu koristi potpuno implicitna diferencija. Iako ova metoda zahteva duže vreme računanja, obezbeđuje numeričku stabilnost bez ograničenja na veličinu vremenskog koraka. Mreža za diskretizaciju prostora ($i = 1, n$) postavljena sa korakom od 0,5 mm, kako bi greška višeg reda bila jednaka nuli. Dok vremenski korak ($j = 1, v$) iznosi 20 s.

Jednačine za različite čvorove imaju sledeći oblik:

- za spoljašnji površinski čvor ($i = 1$):

$$-\lambda \cdot \frac{\vartheta_{i+1,j} - \vartheta_{i,j}}{\Delta x} = h_s \cdot (\vartheta_{vs} - \vartheta_{i,j}) \quad (14)$$

- za unutrašnji čvor ($i = 2, n-1$):

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\vartheta_{i,j} - \vartheta_{i,j-1}}{\Delta \tau} = \lambda \cdot \frac{\vartheta_{i+1,j} - 2\vartheta_{i,j} + \vartheta_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (15)$$

- za unutrašnji površinski čvor ($i = n$):

$$-\lambda \cdot \frac{\vartheta_{n,j} - \vartheta_{n-1,j}}{\Delta x} = h_u \cdot (\vartheta_{n,j} - \vartheta_{vu}) \quad (16)$$

Sistem jednačina koji se dobija ispisivanjem formula za svaki čvor u svim vremenskim koracima formira matricu, koja se rešava algoritmom za tridiagonalne matrice (TDMA).

Pod pretpostavkom da je početna raspodela temperature kroz zid linearna i odgovara raspodeli temperature tokom stacionarnih uslova:

- početni uslov za spoljašnji zid od cigle glasi:

$$\vartheta(x, 0) = \vartheta_{vs, \min} + q_{stac} \left(h_s + \frac{x}{\lambda_c} \right) \quad (17)$$

- početni uslovi za spoljašnji zid od cigle sa izolacionim slojem glase:

$$\vartheta(x, 0) = \vartheta_{vs, \min} + q_{\text{stac}} \left(h_s + \frac{x}{\lambda_{izo}} \right) \quad (18)$$

$$\vartheta(x, 0) = \vartheta_{vs, \min} + q_{\text{stac}} \left(h_s + \frac{\delta_{izo}}{\lambda_{izo}} + \frac{x}{\lambda_c} \right) \quad (19)$$

V REZULTATI

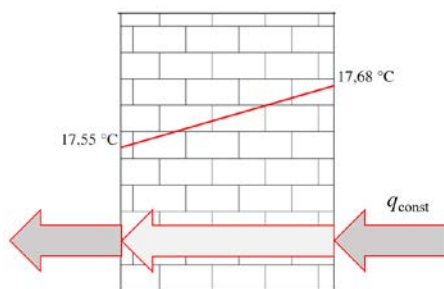
Za slučaj stacionarnog prolaženja toplote, koji ne razmatra akumulaciju toplote unutar zida (toplotni protok je konstantan) i prilikom proračuna uzima u obzir konstantnu razliku između srednje temperature spoljašnjeg vazduha za proračunski period i temperature unutrašnjeg vazduha, prikazano je temperaturno polje unutar zida od cigle (slika 5) i zida od cigle sa izolacijom (slika 6) tokom perioda od jednog dana.

Toplotni protok kroz zid od cigle za stacionarni režim:

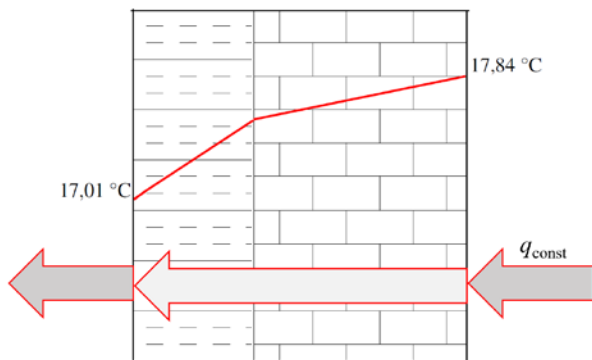
$$q_{\text{stac}} = \frac{\vartheta_{vs} - \vartheta_{vu}}{\frac{1}{h_s} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_u}} = 16,64 \text{ W/m}^2 = \text{const} \quad (20)$$

Toplotni protok kroz zid od cigle sa izolacionim slojem za stacionarni režim:

$$q_{\text{stac}} = \frac{\vartheta_{vs} - \vartheta_{vu}}{\frac{1}{h_s} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{izo}}{\lambda_{izo}} + \frac{1}{h_u}} = 3,16 \text{ W/m}^2 = \text{const} \quad (21)$$



Slika 5. Prikaz temperaturnog polja kroz razmatrani ravan zid od cigle tokom stacionarnih uslova

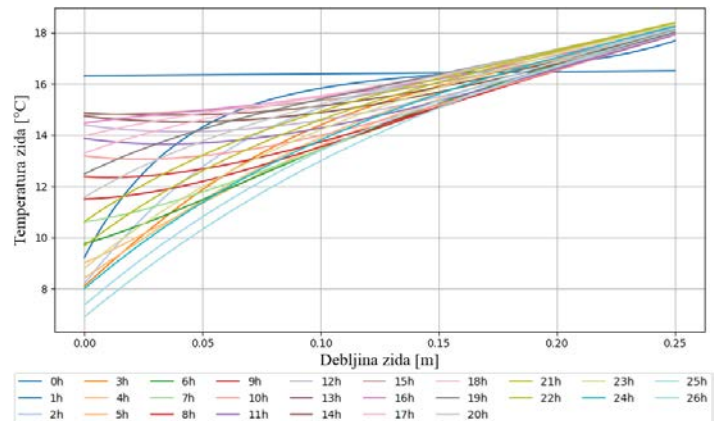


Slika 6. Prikaz temperaturnog polja kroz razmatrani ravan zid od cigle sa izolacionim slojem tokom stacionarnih uslova

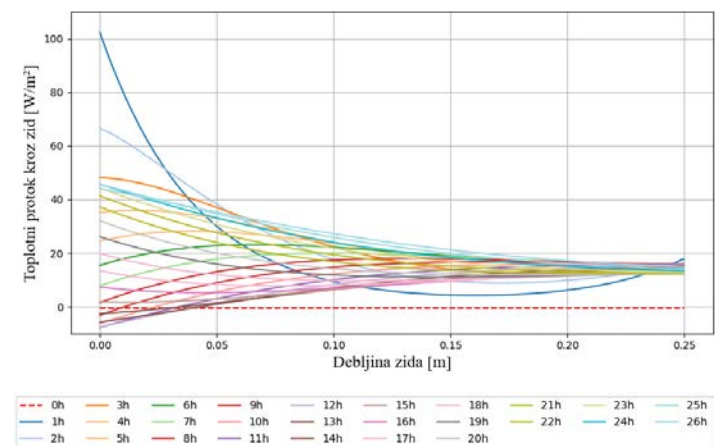
Za razliku od stacionarne metode, dinamički pristup obuhvata promene temperature spoljašnjeg vazduha i akumulaciju toplote

u građevinskim elementima. Dinamički proračun nestacionarnog harmonijskog prolaženja toplote kroz građevinske elemente sproveden je korišćenjem numeričke metode konačnih razlika u programu Python.

Raspodela temeprature i toplotnog protoka unutar zida od opeke tokom perioda od jednog dana prikazana je na slikama 7 i 8, dok je na slikama 9 i 10 prikazana raspodela temeprature i toplotnog protoka unutar zida od opeke sa izolacijom.



Slika 7. Prikaz temperaturnog polja unutar zida od cigle tokom perioda od jednog dana (I slučaj)



Slika 8. Raspodela toplotnog protoka unutar zida od cigle tokom perioda od jednog dana (I slučaj)

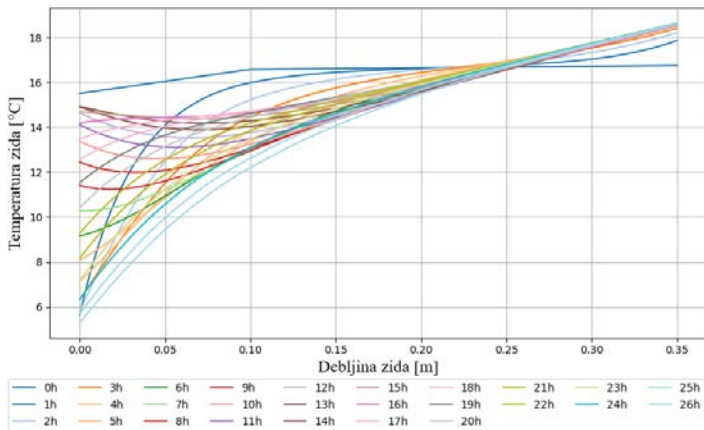
Tabela 2. Rezultati dobijeni za razmatrani zid od cigle u toku jednog dana

Režim	Toplotni protok [W/m²]		Ukupna količina toplote [Wh/m²]	
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz
Stacionarni	16,64	16,64	399,31	399,31
Nestacionarni	14,17	19,13	340,06	459,20

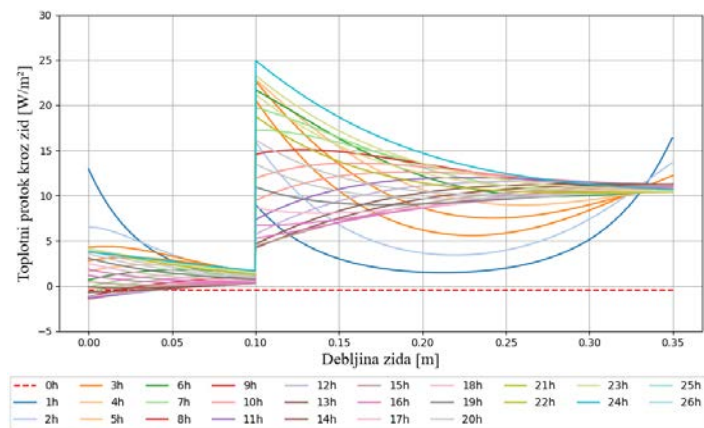
Tabela 3. Rezultati dobijeni za razmatrani zid od cigle sa izolacionim slojem u toku jednog dana

Režim	Toplotni protok [W/m²]		Ukupna količina toplote [Wh/m²]	
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz
Stacionarni	3,16	3,16	75,83	75,83
Nestacionarni	10,86	1,40	260,58	33,52

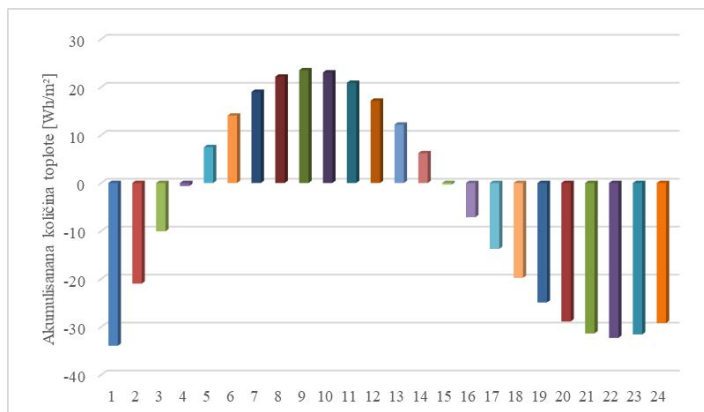
S obzirom da je za početni vremenski korak usvojena linearna raspodela temperatura kroz zid, a sa ciljem da se realno predstavi prolaženje toplote kroz zid, u obzir nisu uzete vrednosti dobijene za prva 3 vremenska koraka.



Slika 9. Prikaz temperaturnog polja unutar zida od cigle sa izolacionim slojem tokom perioda od jednog dana (II slučaj)



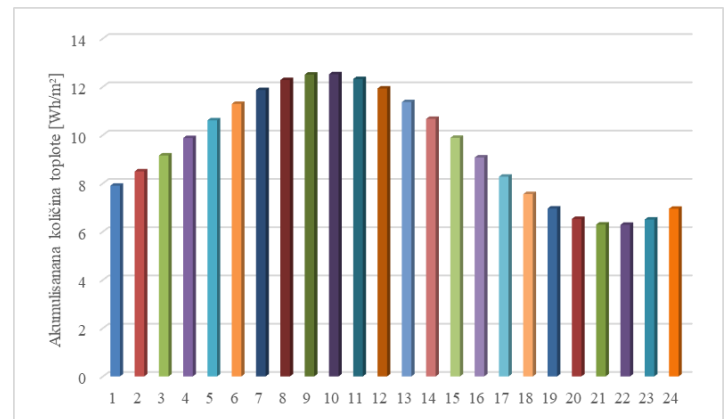
Slika 10. Raspodela toplotnog protoka unutar zida od cigle sa izolacionim slojem tokom perioda od jednog dana (II slučaj)



Slika 11. Akumulisana količina toplote u zidu od cigle za svaki sat u toku jednog dana

U cilju utvrđivanja nivoa greške koja se pravi, u sledećim tabelama su upoređene vrednosti toplotnih protoka i količine toplote, koji se dobijaju primenom stacionarnog i nestacionarnog,

tj. dinamičkog pristupa. Za nestacionarni režim data je osrednjena vrednost toplotnog protoka u toku dana.



Slika 12. Akumulisana količina toplote u zidu od cigle sa izolacionim slojem za svaki sat u toku jednog dana

Na slikama 11 i 12 prikazana je akumulisana količina toplote u zidu za svaki sat u periodu od jednog dana. U slučaju zida od cigle u periodu od 5 h do 14 h proračuna, akumulirano je 165,68 Wh/m² količine toplote. Za razliku od cigle, kada se doda 10 cm izolacionog sloja na spoljašnju stranu zida, akumulacija količine toplote odvija se tokom celog proračunskog dana i iznosi 227,06 Wh/m².

VIII ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u ovom radu ukazuju na ograničenja trenutno propisanog kvazi-stacionarnog metoda proračuna toplotnih gubitaka zgrada u Srbiji, koji se zasniva na pojednostavljenim pretpostavkama o stacionarnom prenošenju toplote kroz zid i ne uzima u obzir akumulaciju toplote u građevinskim elementima.

Numerička analiza nestacionarnog prenošenja toplote kroz zid sprovedena metodom konačnih razlika pokazala je da nestacionarni model realnije opisuje ponašanje građevinskih elemenata u promenljivim temperaturnim uslovima, uzimajući u obzir akumulaciju toplote unutar zida. Zid sa izolacijom, analiziran kroz dinamički model, ima značajno manji izlazni toplotni protok u odnosu na stacionarni proračun, što direktno rezultira smanjenjem toplotnih gubitaka u okolinu.

Rezultati pokazuju da se u nestacionarnom režimu javlja značajno odstupanje između ulaznog i izlaznog toplotnog protoka, što nije slučaj kod stacionarnog proračuna gde se pretpostavlja konstantna vrednost toplotnog protoka. Posebno se ističe razlika između zida bez izolacije i zida sa izolacionim slojem. U prvom slučaju dolazi do akumulacije količine toplote u određenom delu dana, ali i do njenog oslobađanja u ostatku dana, dok se u drugom slučaju količina toplote akumulira tokom čitavog dana.

Analiza predstavljena u ovom radu nedvosmisleno potvrđuje potrebu za revidiranjem postojećeg standarda u Srbiji i prelazak na napredniji dinamički metod proračuna, poput standarda EN ISO 52016-1:2017, koji se već primenjuje u Evropskoj uniji, a čija bi implementacija omogućila preciznije određivanje energetske potrebe zgrada.

ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-136/2025-03/ 200105 od 04.02.2025. god.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011), 2011, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskoj_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 17.01.2026]
- [2] ISO/FDIS 13790:2007 – Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling, https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/ISO_07_FDIS_13790_ApprovalDraft.pdf [pristupljeno 17.01.2026]
- [3] SRPS CEN ISO/TR 52016-2:2017 – Energetske performanse zgrada – Energija potrebna za grejanje i hlađenje, unutrašnje temperature i osetna i latentna toplotna opterećenja - Deo 2: Objašnjenje i obrazloženje za ISO 52016-1 i ISO 52017-1, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:53660 [pristupljeno 17.01.2026]
- [4] SRPS EN ISO 52016-1:2017 – Energetske performanse zgrada – Energija potrebna za grejanje i hlađenje, unutrašnje temperature i osetna i latentna toplotna opterećenja - Deo 1: Postupci proračuna, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:53649 [pristupljeno 17.01.2026]
- [5] Kovačević, S.Lj., Banjac, M.J. Postupak određivanja energetske karakteristike zgrade prema ISO 52016-1, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 26, No. 1, pp. 34-41, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.34K>
- [6] Dumonjić-Milovanović, S., Gvero, P., Milovanović, Z. Primjena RC-modela u simulaciji dinamičkih procesa razmjene toplote građevinskih objekata sa okruženjem, Energija, ekonomija, ekologija, No. 1-2, pp. 65-71, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.065DM>
- [7] Asan, H., Sancaktar, Y.S. Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, Energy and Buildings 28, pp. 159-166, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00007-3)
- [8] Urbikain, M., Davies, G. One-dimensional solutions to Fourier's equation and measures of heat transmission through walls: The role of wall decay times, Building and Environment, Vol. 37 No. 5, pp. 533-540, 2002. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.07.001>
- [9] Hahn, D.W., Ozisik, M.N. *Heat conduction*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1993.

AUTORI

Branislav Petrović – istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, bpetrovic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2429-0642](https://orcid.org/0000-0002-2429-0642)

Sandra Kovačević – istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, skovacevic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0009-0007-2567-6735](https://orcid.org/0009-0007-2567-6735)

Miloš Banjac – prof. dr, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Determination of the Amount of Heat Accumulated in the Wall in Conditions of Changeable outside Temperature

Abstract – Although the EN ISO 13790:2010 standard “Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling” defines three calculation methods (a quasi-stationary monthly method and two dynamic methods—a simplified and a detailed hourly method), the currently valid Regulation on Energy Efficiency of Buildings in the Republic of Serbia (Official Gazette of the RS, No. 61/2011) still prescribes the application of the simplest and least reliable quasi-stationary monthly method for determining the annual heat demand for space heating of buildings. This approach is based on the assumption of stationary heat transfer, neglecting temporal variations of outdoor air temperature and the effects of heat accumulation within building elements, which may lead to significant deviations in the estimation of heat losses. In order to determine the error arising from the application of these two approaches, this study compares heat flux values obtained using stationary and non-stationary, i.e. dynamic, methods for calculating heat transfer through an external wall during the winter period. Two characteristic cases are analysed: a solid brick wall with a thickness of 25 cm and a brick wall with an additional 10 cm thick thermal insulation layer applied on the external side. Non-stationary harmonic heat transfer is modelled by numerically solving Fourier's heat conduction equation using the finite difference method with fully implicit time discretization, implemented through simulations developed in the Python programming language. The obtained results indicate that the stationary calculation is unable to describe the difference between the incoming and outgoing heat fluxes, nor to quantify the amount of heat accumulated in the wall, whereas the non-stationary, i.e. dynamic, approach—which accounts for temporal variations in outdoor air temperature and heat accumulation effects in building elements—provides a significantly more realistic description of the thermal behaviour of the structure.

Index terms – Transient heat transfer, Heat accumulation, Numerical simulation, Energy performance of buildings, Heat losses

Shallow Geothermal in the Danube Region: Serbia's Priorities and Actions

Davor Končalović, Vladimir Vukašinović, Dušan Gordić, Mladen Josijević, Filip Nastić, Dubravka Živković

Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia

Abstract - Heating and cooling account for nearly half of Europe's final energy consumption, with approximately 75% still relying on fossil fuels. Decarbonisation of this sector is therefore critical for the continent's climate neutrality. This paper analyses the obstacles and possible pathways to broader implementation of shallow geothermal energy (SGE) utilisation in Danube region and in Serbia. The research was conducted for the purpose of producing a document titled Transnational Action Plan (TAP), which was developed within the framework of the Interreg Danube GeoHeCo project. Two major types of shallow geothermal energy exploitation are examined: (i) closed-loop and open-loop ground source heat pump systems exploiting shallow geological layers up to 400 m depth, and (ii) wastewater heat recovery systems using high-temperature water source heat pumps without additional drilling. Based on national geological, regulatory, and market data, the paper identifies structural barriers and proposes targeted measures for accelerating the deployment of this source of energy. All proposed measures are divided into 5 priorities: Resources and regulations; Technology and design; Education and training; Financing and Awareness raising.

Index Terms – Shallow geothermal energy, Renewable energy sources, Energy transition, Danube region

I INTRODUCTION

Heating and cooling represent approximately 50% of total final energy consumption in Europe, with fossil fuels dominating the sector [1]. Serbia reflects this European pattern, with a high share of coal and natural gas in both electricity generation and district heating systems. Cooling relies almost entirely on electricity.

Space heating in individual households with their own heat source the situation is even more carbon intensive than average. The main sources of heating energy are wood biomass (64.2%), electricity (17.3%), gaseous fuels (12.6%), and other sources (3.8%), which include coal, fuel oil, wind, solar, and geothermal energy [2]. On top of that, it is unofficially known that citizens in Serbia also use various types of solid waste, such as waste oils, textiles, etc. is illegally used as an energy source, especially in the case of low-income households [3]. Furthermore, the stoves and boilers used in the households category are often outdated, unmaintained, or inadequately maintained, with efficiency estimated under 40% [4]. It should also be noted that this combination of used fuels and combustion inefficiencies, in addition to carbon intensity, also results in a very high level of

local pollutants emitted (particles, VOCs, soot, heavy metals, etc). Correspondingly, Serbia was ranked as the 5th most polluted country in Europe in 2019 [5], whose capital city's annual mean PM2.5 concentration is almost 4 times higher than World Health Organization's limit [6].

The above leads us to the conclusion that, in the case of Serbia, the energy transition is an imperative both, from the standpoint of local pollution levels, and from the climate emergency standpoint. Furthermore, the focus, should certainly be on the combination of space heating and space cooling, since both are carbon-intensive and with adequate combination of technology and energy efficiency measures could be improved simultaneously. The mentioned Western Balkan countries (including Serbia) are making progress when it comes to policy and law framework toward energy transition, but unfortunately without significant results [7].

When considering technologies that are mature, widely available, and suitable for large-scale decarbonisation of the heating sector, heat pumps in general and especially shallow geothermal energy (SGE) are the technologies that cannot be ignored [8]. In addition to the listed, the mentioned technologies can be characterized as technologies that:

- Have potential to reduce our dependence on fossil fuels [9];
- Can reduce greenhouse gas emissions, (GS)HP combined with renewable energy sources (RES) is practically the only (non-passive) technology available on the market that can be used for the decarbonisation of cooling [10];
- Can improve energy efficiency and save on heating/cooling bills;
- Have a long life and will work well independently of daytime and weather circumstances;
- Are applicable for industry and district heating systems.
- If widely used, it will result in job creation.

There are also shortcomings or challenges of GSHP, such as:

- Relatively high upfront cost;
- Requires adequate geological circumstances (high thermal conductivity and diffusivity);
- Requires an available area for the placement/drilling of geothermal probes;
- The problems with overcooling of the ground in case of heating without cooling can arise;
- A water-sourced heat pump requires a stable, high-yield source of groundwater or surface water;

- A water-sourced heat pump may face environmental restrictions, relatively high upfront investment costs due to underground water piping, and, in the case of a cold-water-based system, drilling of production and reinjection cold-water wells.

In the framework of Interreg Danube GeoHeCo, the following two applications of this technology have been considered:

- Exploitation of geothermal energy stored in shallow geological layers requiring geothermal heat pump systems. Such shallow layers are from 1.5 m up to 400 m depth and can be utilised with closed-loop ground source heat pump (GSHP) and open-loop groundwater heat pump (GWHP) systems for heating and cooling.
- Utilisation of geothermal waste heat without additional extraction of thermal water and with no need for drilling geothermal wellbores. In this case, a special open-loop water source heat pump (high-temperature WSHP) system is necessary to exploit the heat potential.

Within the Danube region, SGE represents a locally available and technically mature renewable solution. The Transnational Action Plan (TAP) developed within the scope of the Interreg Danube GeoHeCo project provides a coordinated framework for accelerating its uptake. This paper reviews Serbia's specific geological, regulatory, and market conditions developed within the TAP, thus proposing applicable measures.

Although Serbia possesses favourable geothermal gradients and extensive hydrogeological resources, shallow geothermal energy deployment remains limited and fragmented [11], so we can look at this technology as one whose mass expansion is yet to come.

The specificity of the Republic of Serbia is the low share of renewable energy sources (excluding hydropower) in the overall energy mix and the relative delay in the energy transition compared to other countries participating in the project. On the other hand, the lack of transparency in the implementation of certain renewable energy projects in the recent past in the Republic of Serbia has repeatedly caused public distrust, resistance, and outrage. Hence, the authors believe that the wider use of geothermal energy at the state level should be approached with special caution, as transparently as possible, and with strict compliance with legal regulations. Otherwise, the sustainability of projects that are yet to come could be jeopardized.

At the level of the countries participating in the project, it was proposed that coordinated regulatory simplification, demonstration projects, financial instruments, and institutional strengthening are required to unlock its potential, while taking extensive care of (control) mechanisms that should provide transparency, compliance with legal norms, and genuine, not formal, care for the environment.

II STATE OF SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY IN SERBIA

A Geological potential

Northern Serbia lies within the Pannonian Basin, characterised by above-average geothermal gradients between 0.04 and 0.07 °C/m. Numerous hydrogeothermal wells exist, mainly drilled for balneological or agricultural purposes, with outlet temperatures

typically between 20°C and 40°C. Terrestrial heat flow map of Serbia indicates that under most of Serbia values of heat flow are higher (100-120 mW/m²) than the average of 60 mW/m² for the rest of Europe [12]

The mentioned Country Report for Serbia confirms:

- More than 60 hydrogeothermal systems are currently in use (mainly spas, greenhouses and recreational facilities);
- Significant underutilised shallow potential for heat pump-based applications;
- Absence of a comprehensive national shallow geothermal database;
- Since there is no comprehensive geothermal database, as well as possible existence of projects that were carried out without proper permits, sources on the number of installed geothermal heat pumps vary significantly, depending on publishing date and the data available to the authors. For example, number varies between 775 in 2016 of which closed loop vertical systems make up 2% and water-source units 98% according to [13] and 1005 in 2022 according to [14]. Other sources and various EU projects implemented in the previous decade are reporting different numbers of installed geothermal units in the Republic of Serbia [15–17];
- The technical potential for SGE in Serbia significantly exceeds current utilisation levels.

Shallow geothermal systems in Serbia are legally defined up to 400 m depth under the Mining and Geological Exploration Act [18]. Applications primarily rely on ground and water-sourced heat pumps, which extract stable ground or groundwater temperatures for heating and, less often, for cooling.

When observing the state of the existing market, we can notice:

- Dominance of small-scale private investments and mid- to large-scale company/corporate investments;
- Absence of large public demonstration projects;
- No SGE-based district heating network.

Compared with countries from the Danube region, such as Austria and Slovenia, where heat pump deployment is strongly supported by subsidy schemes and regulatory simplification, Serbia remains in an early development phase.

B Closed-loop systems

Within the installed SGE capacities in Serbia, the heat pump equipped with closed-loop borehole heat exchangers is the dominant technology. Typical borehole depths for residential and commercial buildings range from 80 to 150 m. Ground temperatures in shallow layers remain stable at approximately 11–13°C, enabling yearlong efficient operation.

These systems are technically well-suited for:

- Both heating and cooling for residential, public buildings (schools, healthcare facilities), and commercial/office buildings;
- Combination with (existing) district heating.

However, the combination of high upfront cost (drilling) and relatively low price of electricity and/or natural gas limits wider market uptake by giving priority to cheaper technologies with

lower efficiency and/or higher environmental footprint, such as:

- Air source heat pumps (combined with PV solar energy);
- Natural gas boilers combined with a split air conditioner (also potentially combined with PV solar energy);
- Other sources of heating energy that are often completely unacceptable from an environmental perspective, such as unsustainably harvested wooden biomass, different kinds of waste, etc.

C Open-loop and wastewater systems

Open-loop groundwater heat pumps demonstrate high efficiency, particularly in the Pannonian Basin, where hydrogeological conditions are favourable.

The Serbia Country Report, developed within the mentioned Interreg project, highlights significant but largely unused potential for wastewater heat recovery in urban centres such as Belgrade and Novi Sad, and other cities. Wastewater

temperatures in municipal systems remain sufficiently high year-round to enable efficient heat pump operation, yet no large-scale wastewater heat recovery projects are currently implemented.

III THE STRUCTURE OF THE PROPOSED TRANSNATIONAL ACTION PLAN (PRIORITIES AND INTERVENTIONS)

The TAP priorities are organised by thematic areas (Figure 1), each addressing a specific challenge with proposed solutions implemented through defined actions. These actions include both transnational and national components involving all project partner countries.

The TAP defines five strategic priorities, each directly relevant to Serbia: Resources and regulation; Technology and demonstration; Education and training; Financing mechanisms; and Awareness raising. Each strategic priority has a certain number of Areas of Intervention (AOI). Each AOI has one or more Strategic Actions (SA).

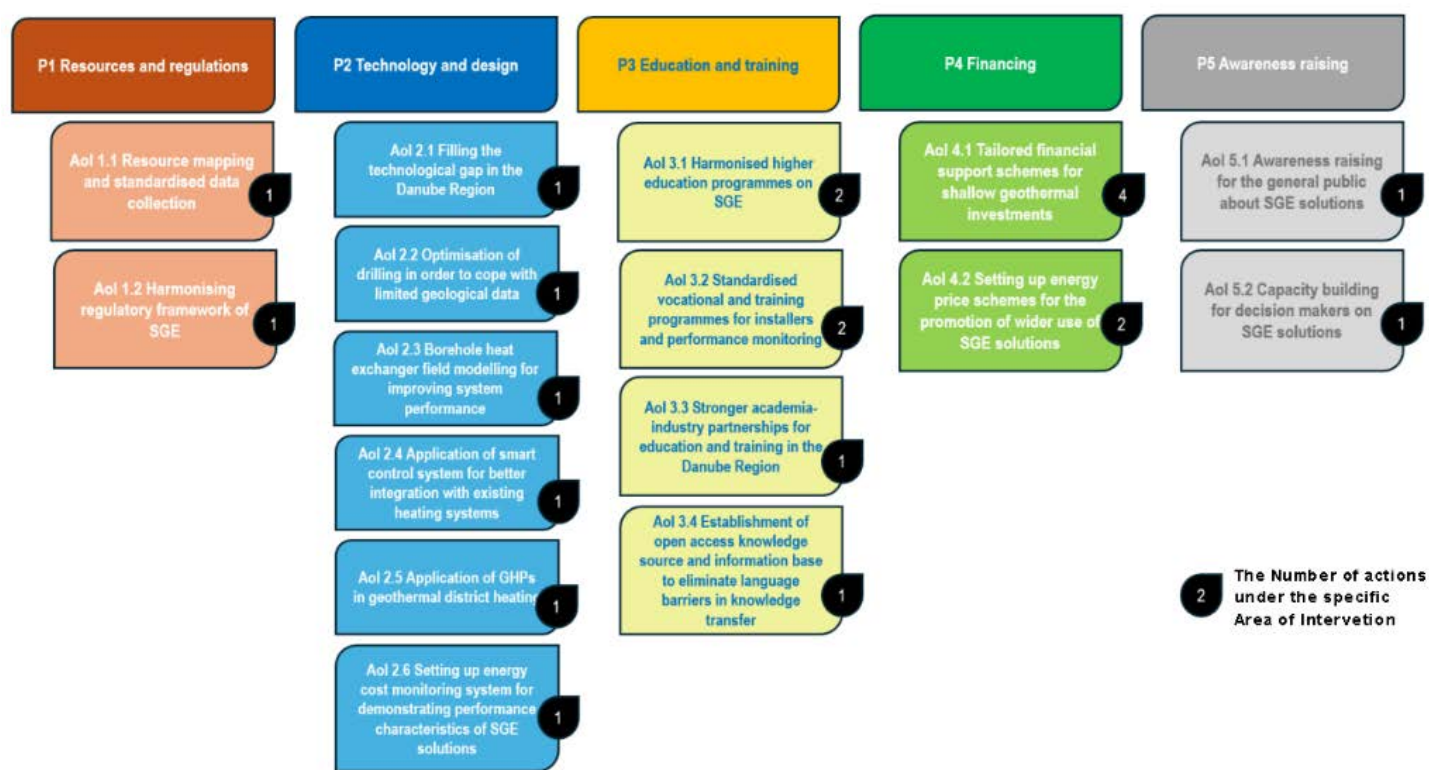


Figure 1. The structure of the proposed Transnational Action Plan

Each Strategic Action outlines activities, key stakeholders, potential funding sources, expected outputs, and an estimated budget. The implementation period runs from 2026 to 2035, with some SA starting immediately, some concluding by 2030, and others beginning in the next programming period (2028) and continuing until 2035.

In the following text, all five strategic priorities will be explained in more detail.

A. Resources and Regulation

AOI 1.1: Resource Mapping and Standardized Data Collection

One of the identified obstacles to the SGE expansion in the Danube Region is the lack of consistent, high-resolution resource data. Available data are often outdated or fragmented across different national bodies. This intervention aims to bridge this gap by implementing transnational standardization of data collection related to geological, operational, and energy performance metrics in accordance with the FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) principles. For Serbia, which is in part located within the geologically favourable Pannonian Basin, this action is particularly significant. Proposed activities include research into local hydrogeological conditions and the development of national geothermal zoning maps for the

classification of soil and rock types. By providing structured, geological data, the plan facilitates more accurate feasibility assessments for SGE development, thereby reducing the research risks related to the implementation of the SGE in the region.

AOI 1.2: Harmonising the regulatory framework of SGE

Regulatory administrative complexity and heterogeneity represent significant non-technical barriers to the adoption of SGE, often resulting in lengthy and/or non-straightforward permitting processes. This intervention focuses on harmonizing the regulatory framework by establishing a transnational working group to develop a common vocabulary and a policy document containing concrete recommendations for the standardization of licensing procedures. In the Serbian context, this intervention highlights the necessity of harmonizing national legislation with the EU regulatory framework. Such alignment has been identified as a prerequisite for Serbia to access specialized EU funds and to ensure the operationalization of cross-border energy cooperation. The proposed intervention advocates a gap analysis of the existing Serbian legislation in order to adopt missing regulations and clarify institutional responsibilities, potentially through specific bylaws for SGE.

B. Technology and Design

AOI 2.1: Filling the technological gap in the Danube Region

Despite the technical/geological potential of the region, there is a significant gap in design practice, performance monitoring, and the application of modern modelling tools. This intervention proposes a “quadruple helix” cooperation model – involving the public sector, academia, innovative enterprises, and NGOs – to launch joint research and development projects focused on tailored technical solutions, such as large-scale heat pumps and life cycle assessment (LCA) methodologies. For Serbia, the plan highlights the use of pre-accession funds to support these technological developments. Key activities include the procurement of advanced design software/tools, which will enable the universities to perform accurate simulation and planning. Furthermore, the establishment of national pilot projects, with one specifically designated for each partner country, including Serbia, will serve as a demonstration of hybrid and bivalent energy-emission systems for different building types, stimulating local innovation and technical competence.

AOI 2.2: Optimisation of drilling in order to cope with limited geological data

Suboptimal well sizing due to insufficient high-resolution geological mapping often leads to poor system performance and increased installation costs. This AOI addresses these challenges by promoting hybrid drilling techniques that combine rotary and percussive methods, particularly adapted to the heterogeneous soils – including clay, gravel, and sand – prevalent in the Danube Basin. Serbia, as a partner country, is participating in the development of a Transnational Guideline on Shallow Geothermal Drilling and the creation of a digital platform for the exchange of drilling case studies. To accomplish this, AOI is proposing the establishment of regional drilling laboratories at universities to test new materials and methodologies. What could be relevant for the Serbian market is that these efforts aim to

provide drilling companies and designers with the optimized tools necessary to improve the cost-effectiveness and long-term reliability of borehole heat exchanger systems, even in areas where subsurface data is currently limited.

AOI 2.3: Borehole heat exchanger field modelling for improving system performance

In densely populated urban areas, the risk of thermal interference between adjacent SGE systems can seriously compromise long-term efficiency. This intervention prioritizes the implementation of transnational modelling and optimization for BHE fields to ensure sustainable heat extraction and injection. The plan specifically identifies Belgrade as one of the key urban centres where high-density heating demand requires sophisticated modelling to prevent thermal depletion of the ground. Proposed activities include standardization of thermal response tests (TRT) and development of a common framework for modelling that accounts for urban heat islands and specific hydrogeological conditions. By enhancing the capacity for precise field modelling, this action ensures that large-scale SGE installations can be integrated into the urban areas without compromising the performance of existing or future geothermal infrastructures.

AOI 2.4: Application of smart control system for better integration with existing heating systems

A major technical barrier is the incompatibility of many existing building infrastructures with SGE technologies, which often leads to suboptimal hybrid operation. This AOI focuses on the application of Building Energy Management Systems (BEMS) and the technical retrofitting of internal distribution networks to lower required water temperatures, making them suitable for SGE integration. The intervention involves developing a common methodology for retrofitting existing buildings and establishing a transnational database of best practices for hybrid SGE-solar or SGE-fossil systems. In Serbia, where many public and residential buildings rely on legacy heating systems, these activities are vital for enabling geothermal retrofits. The plan supports the implementation of transnational workshops and the training of Serbian engineers in the design of “low-temperature ready” buildings, thereby facilitating the transition of existing infrastructure towards renewable-based geothermal solutions.

AOI 2.5: Application of GHPs in geothermal district heating

This intervention addresses the potential for integrating geothermal heat pumps (GSHP) into existing district heating and cooling (DHC) networks to improve overall efficiency and use of low-temperature return water. In the Danube region, existing geothermal district heating systems are often bivalent, combining fossil fuels with geothermal sources. This action promotes the use of GSHP to increase the temperature for end users while maximizing heat recovery. Serbia’s potential involvement includes participation in a transnational working group focused on the integration of SGE in DHC systems and the identification of potential pilot sites. Activities include the development of common technical guidelines for large-scale applications of heat pumps and the implementation of pilot investments in Serbian district heating plants. This strategy aims to reduce the carbon intensity of Serbian district heating networks by using shallow geothermal resources as a reliable baseload component.

AOI 2.6: Setting up an energy cost monitoring system for demonstrating performance characteristics of SGE solution

The lack of transparent data on the actual operating and maintenance costs of SGE systems often deters potential investors. This area of interest proposes the establishment of a comprehensive operational cost model based on technical performance data and economic information collected from demonstration sites. The system will enable transparent life cycle cost analysis, providing a benchmark for optimization and informed decision-making. Serbia is foreseen as a key participant in these demonstration efforts, with activities focused on collecting data at the national level and testing an online evaluation framework. By monitoring the installations of renewable energy generation in Serbia, the intervention aims to confirm the cost-effectiveness of the technology and provide a robust evidence base for Serbian investors and public authorities. This data-driven approach is essential to demonstrate (especially the long-term) economic benefits of SGE generation compared to conventional fossil fuel-based heating and cooling systems.

C. Education and Training

AOI 3.1: Harmonised higher educational programmes on SGE

The education sector has been identified as one of the weakest links in the renewable energy generation value chain due to fragmented and outdated curricula. This intervention aims to establish a harmonized regional framework for accreditation and certification for higher education, facilitating credit transfer and academic mobility through the Erasmus+ programme. A Danube Regional Curriculum Working Group will be established to jointly develop modular courses covering geology, drilling, and mechanical engineering. In Serbia, the plan foresees the integration of these modules into at least one national university, which will then become part of a transnational network of excellence in geothermal education. This network will offer joint postgraduate and Erasmus Mundus-type mobility programmes, ensuring that engineering graduates in Serbia possess the specialised competences required for the design and implementation of complex geothermal systems in line with international standards.

AOI 3.2: Standardised vocational and training programmes for installers and performance monitoring

In addition to academic education, there is a critical need for standardised vocational training for installers and operators who are the technical backbone of SGE implementation. The AOI focuses on the development of a harmonised VET framework aligned with European standards, such as GeoTrainet. Activities include the creation of a Danube working group for the joint development of modular training content and the publication of a Transnational Guide for Vocational Training in the field of SGE. For Serbia, the AOI foresees the establishment of national training centres where installers can receive certified training in the installation of borehole heat exchangers and the maintenance of heat pumps. By aligning Serbian vocational standards with those of the wider Danube region, the intervention ensures cross-border recognition of skills, which is essential for a mobile and skilled workforce capable of scaling up geothermal energy

deployment across the region.

AOI 3.3: Stronger academia-industry partnerships for education and training in the Danube Region

Effective technology transfer requires close cooperation between the education sector and the industry/companies. This intervention aims to strengthen partnerships between academia and the private sector by establishing a Regional Network of Geothermal Innovation and Training Centres. These centres should serve as demonstration sites, training grounds, and incubators for small and medium-sized enterprises (SMEs). In Serbia, the implementation of such a centre could facilitate dual vocational education programs where students can gain practical experience through internships with geothermal system integrators and equipment manufacturers. The plan also aims to develop innovative geothermal energy solutions adapted to local Serbian conditions. By bridging the gap between theoretical knowledge and practical application, these partnerships have the potential to accelerate communication and professionalization of all participants in the field of geothermal technologies.

AOI 3.4: Establishment of an open-access knowledge source and information base to eliminate the language barrier in knowledge transfer

To ensure the broad distribution of geothermal energy expertise, this AOI proposes the creation of a transnational open-access knowledge platform. This platform will contain a repository of technical documentation, design guidelines, and real-world case studies, translated into national languages to ensure accessibility for all regional stakeholders. For Serbia, this includes the introduction of technical English curricula and the translation of over 200 technical documents into Serbian. The platform will also feature Massive Open Online Courses (MOOKs) specifically designed for the Danube Region, with at least two to three modules adapted to the Serbian context. By providing a centralized, bilingual resource for geothermal energy knowledge, the plan empowers Serbian experts, students, and policymakers with the information necessary to advance the local geothermal sector, supported by gamified learning tools to engage a wider audience.

D. Financing mechanism

AOI 4.1: Tailored financial support schemes for shallow geothermal investments

The high initial drilling and installation costs remain a major deterrent for potential users of GSHP/WSHP. AOI focuses on the design and launch of national financial support programs tailored to ground-source heat pumps (GSHP) and water-source heat pumps (WSHP). The plan advocates upgrading existing Serbian renewable energy programs to include efficiency criteria that favour more complex and efficient closed and open loop solutions. Specific activities include the creation of targeted subsidies for thermal response tests (TRT) and borehole drillings up to 150 meters. Furthermore, the intervention explores the integration of GSHP/WSHP into mainstream European funding streams, such as the Just Transition Fund and the Modernization Fund. For Serbia, the goal is to establish dedicated co-financing mechanisms that could shorten long payback periods typical for

GSHP/WSHP projects.

AOI 4.2: Setting up energy price schemes for the promotion of wider use of SGE solutions

Traditional energy pricing often does not take into account the unique operational characteristics of large-scale generation (SGE) systems, such as their potential for load shifting and demand management. This intervention aims to develop a methodology for capacity-based pricing and introduce preferential electricity tariffs for SGE users. For Serbia, this includes formulating recommendations for a policy of bonuses for cogeneration when SGE is combined with solar photovoltaic systems or waste heat recovery. The plan also supports the financing of digital metering and control units to enable time-of-use incentives, which is a key for improving grid compatibility. By introducing these innovative pricing models, the efficient use of locally produced renewable energy can be incentivized, while overall operating costs for SGE system owners can be reduced. Awareness-raising actions, such as the publication of cost comparison reports and energy cost calculators, could further support end-users in understanding the financial benefits of these new tariff structures.

AOI 4.3: Innovative business models for energy as service

The adoption of SGE can be accelerated by implementing innovative business models that reduce financial risk for end-users, such as Energy as a Service (EaaS) or third-party financing through Energy Service Companies (ESCOs). This intervention focuses on developing transnational guidelines for SGE business models and establishing a network of financial intermediaries specialized in geothermal investments. Activities include the creation of standardized contract templates for performance-based contracting of SGE and training Serbian financial institutions on risk assessment of geothermal projects. By fostering a more sophisticated financial ecosystem in Serbia, these innovative models can overcome the barrier of high capital outlays, allowing Serbian users to benefit from geothermal heating and cooling through manageable operational payments.

E. Awareness raising

AOI 5.1: Awareness raising for the general public about SGE solutions

General public awareness of SGE is often limited or blurred, and misconceptions regarding drilling safety, environmental impacts, and perceived high costs exist. This intervention proposes coordinated, transnational campaigns to present SGE as an accessible, low-risk, and cost-effective solution. For Serbia, this involves adapting a transnational awareness-raising package into the local language, with real-life stories from pilot sites in Serbia. The campaign will use digital tools to illustrate long-term savings and involve local multipliers such as schools and community organizations to build trust in Serbian communities. By focusing on simple, understandable communication formats, the plan aims to work on the skepticism of local actors in order to adequately present SGE as an energy resource and a sustainable alternative to conventional energy sources. Joint promotion of pilot projects will further provide Serbian citizens with tangible

evidence of the benefits of the technology in their local environment.

AOI 5.2: Capacity building for decision-makers and institutional stakeholders on SGE solutions

Widespread scepticism among institutional stakeholders and decision-makers often hinders the integration of energy resources into local and regional planning. This AOI focuses on building knowledge and commitment through high-level briefings and transnational policy workshops. In Serbia, the plan targets at least 400 decision-makers across the region for specialized training and advocates for at least 16 bilateral policy dialogues between partner countries. A key output is the publication of transnational policy guidelines for the integration of energy resources into spatial planning, which will be used to update national and regional energy strategies in Serbia. By engaging representatives of Serbian institutions, the intervention ensures that SGE is recognized as a strategic priority in national programs for the promotion of energy efficiency and renewable energy sources. This “top-down” approach is necessary to create an enabling policy environment that facilitates the implementation of large-scale shallow geothermal energy projects throughout Serbia.

IV PROPOSED 2026-2035 ROADMAP FOR SERBIA

Despite favourable geothermal gradients and extensive hydrogeological resources, Serbia’s shallow geothermal deployment remains underdeveloped. The primary barriers are not geological but institutional, financial, and administrative.

The Serbia Country Report confirms that market stagnation results from regulatory fragmentation, the absence of financial stimuli, and the lack of coordinated policy prioritisation. As Serbia progresses towards EU integration and aligns with European Green Deal objectives, shallow geothermal energy represents a low-risk and scalable solution for heating/cooling sector decarbonisation.

Particular strategic value lies in:

- Electrification of heating;
- Lower cooling load on the distribution network;
- Hybridisation of district heating systems;
- Urban wastewater heat recovery.

Without targeted intervention, however, deployment will likely remain limited to small-scale private and corporate systems.

Based on Serbia-specific findings, the following actions are proposed:

- Establish a National Shallow Geothermal Coordination Platform to ensure institutional coherence.
- Develop a National Shallow Geothermal Atlas and Registry.
- Introduce fast-track permitting procedures for closed-loop systems below 200 m.
- Launch 2–3 large-scale public demonstration projects by 2028.
- Initiate a wastewater heat recovery pilot project(s) in conjunction with centralized wastewater treatment plant development.

- Introduce a dedicated financial incentive scheme for geothermal heat pumps.
- Create a Geothermal Competence and Training Centre within a Serbian technical university.

Estimates are that the implementation of proposed or similar measures could significantly increase SGE market penetration by 2035.

V CONCLUSION

Serbia possesses significant shallow geothermal potential, particularly in the Pannonian Basin region. However, utilisation remains modest compared to neighbouring Danube countries.

Findings from the Serbia Country Report indicate that regulatory complexity, institutional fragmentation, and insufficient financial incentives are the primary barriers. The Transnational Action Plan provides a structured framework to overcome these challenges.

Through coordinated regulatory simplification, pilot projects, financial mechanisms, and institutional capacity building, Serbia can substantially increase shallow geothermal deployment between 2026 and 2035. Such development would contribute to greenhouse gas reduction, energy security, and alignment with European climate policies.

Implementation of the TAP is a complex process that requires the coordinated action of various bodies as stakeholders on local/regional, national and transnational level. Implementation technicalities are influenced by the responsibilities and conditions laid down in the subsidy contract of the Danube GeoHeCo project and the institutions of energy policy governance in the partner countries.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (contract no. 451-03-34/2026-03/200107 from 05.02.2026.). The research was partially funded by the EU Interreg Danube Region Programme. The content of this paper is aligned with the United Nations Sustainable Development Goals: Goal 7 – Affordable and Clean Energy, and Goal 11 – Sustainable Cities and Communities.

REFERENCES

- [1] Heating and Cooling – Facts and Figures, Heat Roadmap Europe - A low-carbon heating and cooling strategy, 2017. https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/03/Brochure_Heating-and-Cooling_web.pdf [pristupljeno 14.03.2026]
- [2] Heating in occupied dwellings without central heating, Statistical Office of the Republic of Serbia, <https://www.stat.gov.rs/en-us/vesti/20231115-grejanje-u-nastanjenim-stanovima/> [pristupljeno 14.03.2026]
- [3] Tomić-Spirić, V., Kovačević, G., Marinković, J., Janković, J., Ćirković, A., Đerić Milošević, A., Relić, N., Janković, S. Evaluation of the impact of black carbon on the worsening of allergic respiratory diseases in the region of Western Serbia: A time-stratified case-crossover study, *Medicina*, Vol. 55, No.6, pp. 261-272, 2019, <https://doi.org/10.3390/medicina55060261>
- [4] Air Quality, https://www.koalicija27.org/wp-content/uploads/2023/02/Air-quality-2022.pdf?utm_source=chatgpt.com [pristupljeno 14.03.2026]
- [5] Pantović Milošević, A., Ignjatović, Z., Stevanović, V. Air quality evaluation: Insights from case studies in Belgrade, *Advanced Technologies*, Vol. 13, No. 2, pp. 67-75, 2024. <https://doi.org/10.5937/savteh2402067M>

- [6] From Coal to Traffic: The Five Biggest Air Pollution Challenges in Serbia and How to Fix Them, <https://airly.org/en/from-coal-to-traffic-the-five-biggest-air-pollution-challenges-in-serbia-and-how-to-fix-them/> [pristupljeno 14.03.2026]
- [7] Aleksić, V., Batas Bjelić, I. Da li nam treba više ambicije za tranziciju na obnovljive izvore u Srbiji? Temelji upravljanja i planiranja energije, *Energija, Ekonomija, Ekologija*, Vol. 23, No. 3, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEEE21-3.01A>
- [8] Malcher, X., Tenorio-Rodriguez, F.C., Finkbeiner, M., Gonzalez-Salazar, M. Decarbonization of district heating: A systematic review of carbon footprint and key mitigation strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 215, 115602, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115602>
- [9] Kumar, B. Fossil energy reduction for heating and cooling of buildings using shallow geothermal integrated energy systems – a comprehensive review, *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 9, No. 5, 2023. <https://doi.org/10.18186/thermal.1377257>
- [10] 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/EEEE23-3.60S>
- [11] Report on Geothermal Availability of the Locations in Serbia from Aspect of Utilization of Geothermal Waste-Discharge Water (for Energy Purposes), UNDP, 2024, <https://www.undp.org/serbia/publications/report-geothermal-availability-locations-serbia-aspect-utilization-geothermal-waste-discharge-waters> [pristupljeno 14.03.2026]
- [12] Milivojevic, M., Martinovic, M. Geothermal energy possibilities, exploration and future prospects in Serbia, *Bulletin d'hydrologie*, No. 17, pp. 49-56, 1999, <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/1999/Milivojevic.pdf> [pristupljeno 14.03.2026]
- [13] Lund, J., Boyd, T. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review, *Geothermics*, Vol. 60, pp. 66-93, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- [14] Pešić Milovanović, A., Brankov, J., Denda, S., Bjeljic, Ž., Micić, J. Geothermal energy in Serbia-current state, utilization and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 162, 112442, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112442>
- [15] Petrović Pantić, T., Atanasković Samolov, K., Štrbački, J., Tomić, M. Geothermal potential, chemical characteristics, and utilization of groundwater in Serbia, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 80, No. 736, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09985-w>
- [16] DRGIP portal, <https://www.darlinge.eu/> [pristupljeno 14.03.2026]
- [17] Hydrological processes and Geological settings over Europe controlling dissolved geogenic and anthropogenic elements in groundwater of relevance to human health and the status of dependent ecosystems (HOVER), <https://geoera.eu/projects/hover8/> [pristupljeno 14.03.2026]
- [18] Law on mining and geological explorations, http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2022_01/EN_001_2022_001.htm [pristupljeno 14.03.2026]

AUTHORS

Davor Končalović – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, davor.koncalovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-1207-2653](https://orcid.org/0000-0003-1207-2653)

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

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

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

Filip Nastić – istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, filip.nastic@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2164-6658](https://orcid.org/0000-0002-2164-6658)

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

Plitka geotermalna energija u Dunavskom regionu - Prioriteti i mere za Srbiju

Rezime - Grejanje i hlađenje čine skoro polovinu konačne potrošnje energije u Evropi, pri čemu približno 75% ove energije i dalje dolazi iz fosilnih goriva. Dekarbonizacija ovog sektora je stoga ključna za klimatsku neutralnost kontinenta. Ovaj rad analizira prepreke i moguće puteve ka široj primeni korišćenja plitke geotermalne energije zemljama Dunavskog regiona sa osvrtom na R. Srbiju. Istraživanje je rezultat izrade dokumenta pod nazivom Transnacionalni Akcioni Plan (TAP), koji je razvijen u okviru projekta Interreg Danube GeoHeCo. U fokusu se dva osnovna pristupa u korišćenju plitke geotermalne energije: (i) sistemi toplotnih pumpi zemlja-voda i to zatvorenog i otvorenog tipa, a koji koriste plitke geološke slojeve do dubine od 400 metara i (ii) sistemi za rekuperaciju toplote otpadnih voda korišćenjem toplotnih pumpi bez dodatnih bušotina. Na osnovu nacionalnih geoloških, regulatornih i tržišnih podataka, rad identifikuje strukturne barijere i predlaže ciljane mere za ubrzavanje ekspanzije ovog izvora energije. Sve predložene mere su podeljene u 5 prioriteta: Resursi i propisi, Tehnologija i dizajn, Obrazovanje i obuke, Finansiranje i Podizanje svesti.

Ključne reči - Plitka geotermalna energija, obnovljivi izvori energije, energetska tranzicija, Dunavski region

Poređenje i analiza vrednosti koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote prema tlu određenog prema EN ISO 13790:2010 i EN ISO 13370:2017

Sandra Kovačević, Branislav Petrović, Miloš Banjac

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Rezime - U nameri da se ustanovi kolike razlike nastaju pri korišćenju u Srbiji trenutno aktuelnog proračuna za određivanje koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote prema tlu prema EN ISO 13790:2010, čija je upotreba propisana Pravilnikom o energetske efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011) i proračuna prema standardu EN ISO 13370:2017, koga propisuje nova revidirana direktiva EPBD EU/2024/1275 u radu su predstavljene obe metode, a rezultati proračuna i odstupanja upoređeni i analizirani na konkretnom primeru.

Između ostalog, ustanovljeno je da za razliku od prethodne mesečne/sezonske metode, utvrđene standardom EN ISO 13790, koja ne obuhvata inerciju tla, metoda iz standarda EN ISO 13370:2017 obuhvata ne samo razlike temperature zemljišta u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha, već i inerciju, tj. kašnjenje promene temperature tla u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha, što je čini superiornijom, a rezultate dobijene njenim korišćenjem kvalitetnijim i pouzdanijim.

Ključne reči - koeficijent transmisijonih gubitaka toplote prema tlu, EN ISO 13790:2010, EN ISO 13370:2017

I UVOD

Da bi stvorili uslove za realizaciju ambicioznog Zelenog dogovora, da Evropa do 2050. godine postane prvi klimatski neutralan kontinent, Evropska komisija i Evropski parlament usvojili su čitav niz novih, ali i revidirali čitav niz postojećih pravnih dokumenata, tzv. direktiva iz oblasti energije, energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije.

Ustanovivši da je sektor zgradarstva trenutno najveći pojedinačni potrošač energije, sa udelom od 40% od energije koja se troši u EU, i da je stoga građevinski sektor ključan za postizanje energetske i klimatske ciljeve EU, Evropska komisija je u maju 2024. godine usvojila novu, drugi put revidiranu Direktivu o energetske efikasnosti zgrada (EPBD EU/2024/1275). Ova direktiva je usko povezana i dopunjuje se sa drugim evropskim politikama Zelenog dogovora kao što su sistem trgovanja emisijama goriva koja se koriste u zgradama, revidirana Direktiva o energetske efikasnosti, koja je revidirana Direktiva o obnovljivoj energiji i Uredbi o infrastrukturi za alternativna goriva [1-3].

Takođe, ustanovivši da dosadašnji način proračuna energije potrebne za zadovoljenje potreba za grejanjem i hlađenjem zgrada nema zadovoljavajući kvalitet, i da je potrebno koristiti preciznije proračune, ova direktiva za određivanje tzv. toplinskih

gubitaka propisuje upotrebu novih standarda.

Republika Srbija za potrebe određivanja godišnje potrošnje energije za grejanje i hlađenje, pripremu sanitarne tople vode, ventilaciju i osvetljenje koristi aktuelni proračun prema standardu EN ISO 13790:2010 [4], čija je upotreba propisana Pravilnikom o energetske efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011) [5]. Mesečna/sezonska metoda za određivanje koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote prema tlu koristeći navedeni standard ne obuhvata inerciju tla, za razliku od metode iz novijeg standarda EN ISO 13370:2017 [6]. Proračun obuhvata ne samo razlike temperature zemljišta u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha, već i inerciju, tj. kašnjenje promene temperature tla u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha, što je čini superiornijom, a rezultate dobijene njenim korišćenjem kvalitetnijim i pouzdanijim.

II ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA TRANSMISIJE GUBITAKA TOPLOTE KROZ TLO PREMA EN ISO 13790:2010

Prema standardu SRPS EN ISO 13790:2010, koji se primenjuje u Republici Srbiji za proračun metodom potpuno definisanog mesečnog i sezonskog modela, godišnja potrebna toplota za grejanje za sisteme koji rade bez prekida u zagrevanju, $Q_{H,nd}$ [kWh/god], određuje se kao razlika između godišnje potrebne toplote za nadoknadu gubitaka toplote, $Q_{H,ht}$ [kWh/god], i godišnje količine toplote koja potiče od unutrašnjih dobitaka toplote i dobitaka usled sunčevog zračenja, $Q_{H,gn}$ [kWh/god], pomnožene sa faktorom iskorišćenja dobitaka toplote, $\eta_{H,gn}$ [-]:

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

Godišnja potrebna toplota za nadoknadu gubitaka toplote, $Q_{H,ht}$, predstavlja zbir potrebne toplote za nadoknadu transmisijonih, $Q_{H,tr}$, i ventilacionih gubitaka toplote, $Q_{H,ve}$:

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

Za određivanje godišnje potrebne toplote za nadoknadu gubitaka toplote, $Q_{H,ht}$, u obzir se uzima zbir koeficijenta transmisijonih, H_{tr} [W/K], i ventilacionih gubitaka toplote, H_{ve} [W/K], a izražen je preko stepen dana grejanja HDD koji predstavlja zbir dnevnih razlika između referentne temperature unutrašnjeg vazduha i prosečne dnevne temperature spoljašnjeg vazduha za sve dane kada je referentna temperatura viša u odnosu na prosečnu dnevnu temperaturu spoljašnjeg vazduha:

$$Q_{H,ht} = (H_{tr} + H_{ve}) \cdot 24 \cdot HDD \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote H_{tr} [W/K] predstavlja zbir četiri tipa koeficijenata gubitka toplote:

$$H_{tr} = H_D + H_{gr} + H_U + H_A \quad (4)$$

gde su:

H_D – koeficijent transmisijonih gubitaka toplote za površine u kontaktu sa spoljašnjim vazduhom [W/K],

H_{gr} – koeficijent transmisijonih gubitaka toplote za površine u kontaktu sa tlom [W/K],

H_U – koeficijent transmisijonih gubitaka toplote transmisijom za površine u kontaktu sa negrejanom prostorijom [W/K],

H_A – koeficijent transmisijonih gubitaka toplote za površine u kontaktu sa susednom zgradom [W/K].

Za proračun koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote za svaki i -ti građevinski element u okviru termičkog omotača objekta standard EN ISO 13790:2010 koristi uprošćeni izraz:

$$H_{tr} = \sum_i (F_{xi} \cdot U_i \cdot A_i) + H_{TB} \quad (5)$$

gde su:

F_{xi} – faktor korekcije temperature za i -ti građevinski element [-],

U_i – koeficijent prolaženja toplote za i -ti građevinski element [W/m²K],

A_i – površina i -tog građevinskog elementa [m²].

Uprošćen metod uticaja toplotnih mostova obuhvaćen je ukupnim koeficijentom gubitaka toplote usled uticaja toplotnih mostova, H_{TB} [W/K], a odnosi se na gubitke toplote koji, prema pretpostavci, čine 10% ukupne površine termičkog omotača razmatranog objekta.

Faktor korekcije temperature za i -ti građevinski element, F_{xi} , koriguje temperaturnu razliku koja se javlja između građevinskih elementa koje razdvaja termički omotač objekta. Vrednosti ovog faktora usvajaju se iz tabele koju propisuje Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada.

III ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA TRANSMISIJIH GUBITAKA TOPLOTE KROZ TLO PREMA EN ISO 13370:2017

Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote prema tlu, $H_{gr,m}$, predstavlja toplotni protok prolaženjem (transmisijom) toplote kroz građevinske elemente omotača proračunske zone koji su u kontaktu sa tlom tokom jednog meseca (gr - *ground*, m - *monthly*), sveden na razliku proračunske temperature unutrašnjeg i projektna temperature spoljašnjeg vazduha.

Proračunom predviđenim ovim standardom obuhvataju se ne samo razlike temperature zemljišta u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha, već i inertnost, tj. kašnjenje promene temperature tla u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha. Proračunom su pretpostavljeni uslovi da je temperatura unutrašnjeg vazduha stalna, a promene temperature spoljašnjeg vazduha i promene temperature tla obuhvataju se korišćenjem odgovarajućih srednjih mesečnih temperatura. U odnosu na standard EN ISO 13790:2010, koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu $H_{gr,m}$ [W/K], određuje se za svaki mesec posebno, prema sledećem izrazu:

$$H_{gr,m} = \frac{\Phi_m}{\vartheta_{int,m} - \vartheta_{e,m}} \quad (6)$$

gde su:

Φ_m – toplotni protok ka tlu za proračunski mesec m [W],

$\vartheta_{int,m}$ – projektna temperatura unutrašnjeg vazduha za sezonu grejanja $\vartheta_{int,H}$ ili sezonu hlađenja $\vartheta_{int,C}$ (u zavisnosti od namene prostora i proračuna za zimski ili letnji režim) [°C],

$\vartheta_{e,m}$ – srednja temperatura spoljašnjeg vazduha za proračunski mesec m [°C].

Toplotni protok ka tlu za proračunski mesec može pojednostavljeno da se odredi pomoću izraza:

$$\Phi_m = H_{gr} \cdot (\bar{\vartheta}_{int} - \bar{\vartheta}_e) - H_{pi} \cdot (\bar{\vartheta}_{int} - \vartheta_{int,m}) + H_{pe} \cdot (\bar{\vartheta}_e - \vartheta_{e,m}) \quad (7)$$

gde su:

H_{gr} – stacionarni koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu [W/K],

H_{pi} – unutrašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom [W/K],

H_{pe} – spoljašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom [W/K],

$\bar{\vartheta}_{int}$ – srednja projektna temperatura unutrašnjeg vazduha za sezonu grejanja i hlađenja [°C],

$\bar{\vartheta}_e$ – srednja godišnja spoljašnja temperatura vazduha [°C].

Stacionarni koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu određuje se prema izrazu:

$$H_{gr} = A_{gr} \cdot U + P \cdot \psi_{gr} \quad (8)$$

gde su:

A_{gr} – površina poda [m²],

U – koeficijent prolaženja toplote između unutrašnjeg i spoljašnjeg prostora [W/m²K],

P – izložen obim poda [m],

ψ_{gr} – linijski koeficijent prolaženja toplote za spoj zida i poda [W/mK].

Koeficijent prolaženja toplote U i periodični koeficijenti gubitka toplote transmisijom H_{pi} i H_{pe} računaju se posebno za četiri različita slučaja:

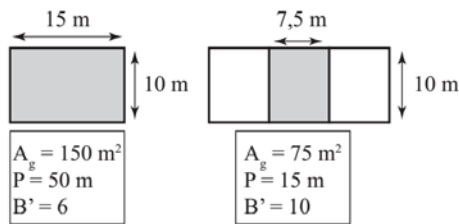
1. slučaj poda sa pločom na tlu,
2. slučaj poda sa pločom uzdignutom od tla,
3. slučaj grejanog podruma,
4. slučaj negrejanog podruma.

Pri tome, u svakom od četiri slučaja, u izrazima za određivanje periodičnih koeficijenata gubitka toplote transmisijom H_{pi} i H_{pe} , figuriše tzv. karakteristična dimenzija poda, B . Ovom veličinom obuhvata se trodimenzionalna priroda toplotnog toka unutar zemlje, odnosno uticaj promene temperature okolnog vazduha na temperaturu tla ispod zgrade. Karakteristična dimenzija poda određuje se pomoću izraza:

$$B = \frac{A_{gr}}{0,5 \cdot P} \quad (9)$$

Izloženi obim poda, P , je obim razmatrane podne ploče koji je u kontaktu sa spoljnim vazduhom. Za slobodnostojeću zgradu obim poda P predstavlja ukupan obim zgrade (slika 1, levo). Za zgradu u nizu, obim poda predstavlja dužinu pripadajućih spoljašnjih zidova zgrade koji razdvajaju grejani prostor zgrade od okoline (slika 1, desno). U slučaju da postoje negrejani delovi zgrade i da se nalaze izvan termičkog omotača objekta, kao što su garaže i skladišta, smatra se da tih prostora nema, tj. da su ti

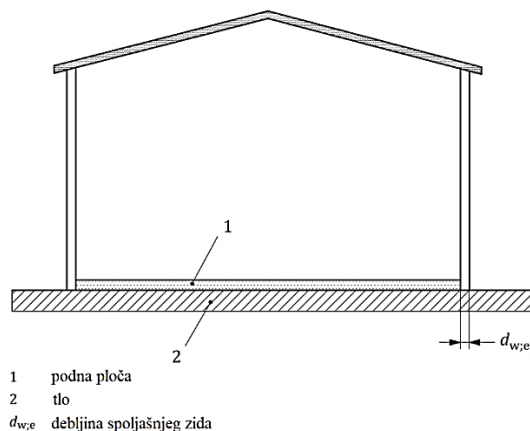
zidovi koji se graniče sa ovim prostorima spoljašnji zidovi koji razdvajaju grejani prostor od okoline [7-10].



Slika 1. Određivanje karakteristične dimenzije poda B

III-1 Slučaj poda sa pločom na tlu

Prvi slučaj predstavlja pod sa pločom na tlu, koji je prikazan na slici 2. Koeficijent prolaženja toplote kroz pod sa pločom koja je u neposrednom u kontaktu sa tlom $U \rightarrow U_{fg,sog}$ (eng. *floor ground - slab on ground*) određuje se u zavisnosti od odnosa tzv. ekvivalentne debljine poda, d_f , i karakteristične dimenzije poda, B .



Slika 2. Prikaz poda sa pločom na tlu

Ekvivalentna debljina poda, d_f , određuje se pomoću izraza:

$$d_f = d_{w,e} + \lambda_{gr} \cdot (R_{si} + R_{fg,sog} + R_{se}) \quad (10)$$

gde su:

$d_{w,e}$ – ukupna debljina zida u podrumu [m],

λ_{gr} – toplotna provodljivost tla ($\lambda_{gr}=2$ W/mK).

Pri određivanju toplotnog otpora provođenju toplote podne ploče, $R_{fg,sog}$ (m²K)/W, otpor prelaženju toplote sa donje površine poda na zemlju se zanemaruje, R_{se} (m²K)/W, jer se pretpostavlja da čvrsto sabijani materijal ispod ploče ima istu toplotnu provodljivost kao i tlo. Dok toplotni otpor prelaženju toplote sa unutrašnjeg vazduha na unutrašnju površinu poda iznosi $R_{si}=0,17$ (m²K)/W.

Koeficijent prolaženja toplote kroz pod na tlu, $U_{fg,sog}$, može se odrediti na dva načina:

– za neizolovani ili slabo izolovani pod, tj, kada je $d_f < B$:

$$U_{fg,sog} = \frac{2 \cdot \lambda_{gr}}{\pi \cdot B + d_f} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B}{d_f} + 1 \right) \quad (11)$$

– za dobro izolovani pod, tj, kada je $d_f \geq B$:

$$U_{fg,sog} = \frac{\lambda_{gr}}{0,457 \cdot B + d_f} \quad (12)$$

Unutrašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom, H_{pi} , za slučaj poda na tlu računa se prema sledećem izrazu:

$$H_{pi} = A_{gr} \cdot \frac{\lambda_{gr}}{d_f} \cdot \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{(\lambda_{gr}/d_f)}\right)^2 + 1}} \quad (13)$$

gde je δ [m] periodična dubina prodiranja toplote u tlo i može se odrediti na korišćenjem tabele u zavisnosti od vrste tla ili na osnovu izraza (14) koji zavisi od toplotne provodljivost tla, λ_{gr} [W/mK], gustine tla, ρ_{gr} [kg/m³] i specifičnog toplotnog kapaciteta tla, c_{gr} [J/kgK]:

$$\delta = \sqrt{\frac{3,15 \cdot 10^7 \cdot \lambda_{gr}}{\pi \cdot \rho_{gr} \cdot c_{gr}}} \quad (14)$$

Spoljašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom, za slučaj poda na tlu računa se prema sledećem izrazu:

$$H_{pe} = 0,37 \cdot P \cdot \lambda_{gr} \cdot \ln \left(\frac{\delta}{d_f} + 1 \right) \quad (15)$$

III-2 Slučaj poda sa pločom uzdignutom od tla

Dugi slučaj predstavlja pod sa pločom uzdignutom od tla, koji je prikazan na slici 3. Koeficijent prolaženja toplote za navedeni slučaj, $U_{fg,sus}$ [W/m²K] (*floor ground - suspended floor*) određuje se prema izrazu:

$$U_{fg,sus} = \frac{1}{\frac{1}{U_{f,sus}} + \frac{1}{U_{gr} + U_x}} \quad (16)$$

gde su:

$U_{f,sus}$ – koeficijent prolaženja toplote kroz ploču uzdignutu iznad tla [W/m²K],

U_{gr} – koeficijent prolaženja toplote građevinske konstrukcije na tlu [W/m²K],

U_x – ekvivalentni koeficijent prolaženja toplote između podnog prostora i okoline koji uzima u obzir protok toplote kroz zidove podnog prostora i ventilaciju podnog prostora [W/m²K].

Ekvivalentna debljina poda, d_f [m], određuje se pomoću izraza:

$$d_f = d_{w,e} + \lambda_{gr} \cdot (R_{si} + R_{f,ins} + R_{se}) \quad (17)$$

Za razliku od jednačine (10), u kojoj ekvivalentna debljina poda zavisi od toplotnog otpora provođenja toplote podne ploče, $R_{f,sog}$ (m²K)/W, u jednačini (17) uzima se u obzir toplotni otpor provođenju toplote bilo kog izolacionog materijala koji je postavljen u podnom prostoru $R_{f,ins}$ [m²K/W].

Koeficijent prolaženja toplote građevinske konstrukcije na tlu određuje se na dva načina:

– ukoliko je dubina ukopa podruma manja od 0,5 m, koristi se izraz:

$$U_{gr} = \frac{2 \cdot \lambda_{gr}}{\pi \cdot B + d_{gr}} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B}{d_{gr}} + 1 \right) \quad (18)$$

$d_{w,b}$, određuje prema izrazu:

$$d_{w,b} = \lambda_{gr} \cdot (R_{si} + R_{w,b} + R_{se}) \quad (26)$$

gde je $R_{w,b}$ [(m²K)/W], toplotni otpor provođenju toplote zidova u podrumskom prostoru.

Koeficijent prolaženja toplote kroz zidove podruma, $U_{wg,b}$, može se odrediti na dva načina:

– ukoliko je $d_{w,b} \geq d_f$:

$$U_{wg,b} = \frac{2 \cdot \lambda_{gr}}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_f}{d_f + z}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{d_{w,b}} + 1\right) \quad (27)$$

– ukoliko je $d_{w,b} < d_f$, u prethodnom izrazu potrebno je zameniti ekvivalentnu debljinu d_f sa $d_{w,b}$:

$$U_{wg,b} = \frac{2 \cdot \lambda_{gr}}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_{w,b}}{d_{w,b} + z}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{d_{w,b}} + 1\right) \quad (28)$$

III-3.3 Prolaženje toplote kroz ploču na tlu i zidove podruma

Ukupni koeficijent prolaženja toplote podruma kroz ploču na tlu i kroz zidove podruma, $U_{bf,eff}$, određuje se na osnovu prethodno izračunatog koeficijenta prolaženja toplote sa podne ploče grejanog podruma, $U_{fg,b}$, i koeficijenta prolaženja toplote kroz zidove podruma, $U_{wg,b}$, a prema izrazu:

$$U_{bf,eff} = \frac{A_{gr} \cdot U_{fg,b} + z \cdot P \cdot U_{wg,b}}{A_{gr} + z \cdot P} \quad (29)$$

Stacionarni koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu, određuje se pomoću izraza:

$$H_{gr} = (A_{gr} \cdot U_{fg,b}) + (z \cdot P \cdot U_{wg,b}) + (P \cdot \psi_{w,f}) \quad (30)$$

gde je $\psi_{w,f}$ linijski koeficijent prolaženja toplote toplotnog mosta zid – pod [W/mK].

Vrednosti linijskog koeficijenta $\psi_{w,f}$ za tipične slučajeve toplotnih mostova koji se javljaju kod građevinskih konstrukcija, određuju se na osnovu dvodimenzionalnih numeričkih proračuna, pod pretpostavkom vrednosti navedenih u tabelama prema standardu ISO 14683:2007 [10]. Osim toga, uticaj toplotnih mostova se umesto tačnih proračuna na osnovu tabela iz navedenog standarda može uzeti u obzir povećanjem vrednosti U za svaki građevinski element omotača grejanog dela zgrade, i to: za $\Delta U_{tb}=0,05$ W/m²K, za slučaj da su toplotni mostovi projektovani i izvedeni u skladu sa dobrom praksom ili za $\Delta U_{tb}=0,1$ W/m²K, za slučaj da su toplotni mostovi nisu projektovani i izvedeni u skladu sa dobrom praksom.

Unutrašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom, H_{pi} , za slučaj grejanog podruma računa se prema sledećem izrazu:

$$H_{pi} = A_{gr} \cdot \frac{\lambda_{gr}}{d_f} \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{d_f}\right)^2 + 1}} + z \cdot P \cdot \frac{\lambda_{gr}}{d_{w,b}} \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{d_{w,b}}\right)^2 + 1}} \quad (31)$$

Spoljašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom, H_{pe} , za slučaj grejanog podruma računa se prema sledećem izrazu:

$$H_{pe} = 0,37 \cdot P \cdot \lambda_{gr} \cdot \left[e^{\frac{z}{\delta}} \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_f} + 1\right) + 2 \cdot \left(1 - e^{\frac{z}{\delta}}\right) \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_{w,b}} + 1\right) \right] \quad (32)$$

III-4 Slučaj negrejanog podruma

Poslednji slučaj predstavlja negrejani podrum (slika 4), koji obuhvata problematiku prenošenja toplote od grejanog prostora kroz prostor negrejanog ukopanog podruma, na okolno tlo. U ovom slučaju koeficijent prolaženja toplote od unutrašnjeg vazduha na tlo oko podruma, U_{ub} , određuje se pomoću izraza:

$$U_{ub} = U_{f,sus} + \frac{(A_{gr} \cdot U_{fg,b}) + (z \cdot P \cdot U_{wg,b}) + (h \cdot P \cdot U_w) + (c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V)}{A_{gr}} \quad (33)$$

gde su:

n – broj izmena vazduha u podrumu [h⁻¹], pri nedostatku podataka koristi se vrednost 0,33 h⁻¹,

V – zapremina vazduha u podrumskom prostoru [m³].

Unutrašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom H_{pi} , za slučaj negrejanog podruma računa se prema sledećem izrazu:

$$H_{pi} = \left[\frac{1}{A_{gr} \cdot U_{f,sus}} + \frac{1}{(A_{gr} + z \cdot P) \cdot \frac{\lambda_{gr}}{\delta} + h \cdot P \cdot U_w + c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V} \right]^{-1} \quad (34)$$

Spoljašnji periodični koeficijent gubitka toplote transmisijom H_{pe} , za slučaj negrejanog podruma računa se prema sledećem izrazu:

$$H_{pe} = A \cdot U_{f,sus} \cdot \left[\frac{0,37 \cdot P \cdot \lambda_{gr} \cdot \left(2 - e^{\frac{z}{\delta}}\right) \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_f} + 1\right) + h \cdot P \cdot U_w + c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V}{(A_{gr} + z \cdot P) \cdot \frac{\lambda_{gr}}{\delta} + h \cdot P \cdot U_w + c_p \cdot \rho \cdot n \cdot V + A \cdot U_{f,sus}} \right] \quad (35)$$

IV POREĐENJE STANDARDA EN ISO 13790:2010 I EN ISO 13370:2017 NA KONKRETNOM PRIMERU

Sa ciljem da se ustanovi kolike razlike nastaju korišćenjem trenutno aktuelnog proračuna za određivanje koeficijenta transmisionih gubitaka toplote prema tlu prema EN ISO 13790:2010, čija je upotreba propisana Pravilnikom o energetske efikasnosti i proračuna prema standardu EN ISO 13370:2017, koga propisuje nova revidirana direktiva EPBD EU/2024/1275, rezultati proračuna i odstupanja upoređeni su i analizirani na konkretnom primeru zgrade Instituta za standardizaciju Srbije u Beogradu, korisne grejne površine 1717,17 m².

Poređenje oba standarda izvršeno je za tri definisana slučaja propisana navedenim standardima, koji čine termički omotač zgrade Instituta, i to:

- 1) slučaj poda sa pločom na tlu,
- 2) slučaj grejanog podruma,
- 3) slučaj negrejanog podruma.

Ukupni koeficijent gubitaka toplote transmisijom prema tlu prema standardu EN ISO 13370:2017 određuje se kao osrednjena vrednost mesečnih koeficijenata gubitaka toplote prema tlu. Na konkretnom primeru koeficijent transmisijonih gubitaka prema tlu, a na osnovu standarda EN ISO 13370:2017, biće određen tokom zimskog perioda (uzimajući u obzir sezonu grejanja od oktobra do aprila).

Meteorološki podaci za proračun mesečnih vrednosti koeficijenata gubitaka toplote prema tlu dobijeni su korišćenjem fotonaponskog geografskog informacionog sistema PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) [11]. Prosečne mesečne vrednosti temperature spoljašnjeg vazduha dobijene su na osnovu tipične meteorološke godine određene su za period od 2005. do 2023. godine na lokaciji Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Dodatno, srednja mesečna temperatura spoljašnjeg vazduha za zimski period je u proračunu određena osrednjavanjem vrednosti temperatura spoljašnjeg vazduha za period rada termotehničkih sistema tokom zimskog perioda korišćenjem programskog jezika *Python*.

U tabeli 3 prikazane su vrednosti srednje godišnje i mesečne temperature spoljašnjeg vazduha na osnovu tipične meteorološke godine za period rada termotehničkih sistema tokom zimskog perioda potrebnih za proračun po standardu EN ISO 13370:2017.

Tabela 3. Srednje mesečne temperature spoljašnjeg vazduha dobijene na osnovu perioda rada termotehničkih sistema tokom zimskog perioda

X	XI	XII	I	II	III	IV	God.
Srednja temperatura spoljašnjeg vazduha za proračunski mesec [°C]							
13,36	12,42	5,03	0,81	3,17	13,01	14,74	15,52

Definisani su sledeći proračunski parametri:

- projektna temperatura unutrašnjeg vazduha (grejanje) 20°C,
- projektna temperatura unutrašnjeg vazduha (hlađenje): 22°C,
- srednja projektna temperatura unutrašnja vazduha za sezonu grejanja i hlađenja: 21 °C,
- period korišćenja termotehničkih sistema (zimi): 5 dana nedeljno (radnim danima), od 6 do 18 sati.

Iako već postoji značajna razlika u pristupu proračunu koeficijenata gubitaka toplote transmisijom prema tlu u dva predstavljena standarda, ona se prvenstveno ogleda u tome što noviji standard uzima u obzir srednje mesečne temperature spoljašnjeg vazduha, dok standard propisan važećim Pravilnikom o energetske efikasnosti zgrada koristi jednostavniji pristup zasnovan na tabelarnim vrednostima faktora korekcije temperature za konkretne slučajeve. U nastavku su prikazana poređenja krajnjih rezultata.

IV-1 Slučaj poda sa pločom na tlu

Na osnovu sastava konstrukcije poda na tlu prikazanog u tabeli 1, koeficijent transmisijonih gubitaka toplote određen je prema standardu EN ISO 13790:2010, primenom jednačine (5).

Rezultati proračuna prema navedenom standardu prikazani su tabeli 2.

Tabela 1. Sastav konstrukcije poda na tlu

Naziv građevinskog sloja	δ [cm]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
Spolja				
1.Armirani beton	9	2,33	2500	960
2.Hidroizolacioni sloj	1	0,19	1100	30
3.Armirani beton	16	2,33	2500	960
Unutra				
Otpor prelaženja toplote sa unutrašnje strane konstrukcije: $R_{si}=0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Otpor prelaženja toplote sa spoljne strane konstrukcije: $R_{se}=0,00 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Ukupni otpor prolaženju toplote: $R=3,03 \text{ m}^2\text{K/W}$				
Koeficijent prolaženja toplote: $U=0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$				

Tabela 2. Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote (EN ISO 13790:2010)

Oznaka	Faktor korekcije temperature, F_{xi} [-]	Površina elementa, A_i [m ²]	Koeficijent prolaženja toplote, U_i [W/m ² K]
PNT – Pod na tlu	0,5	201,62	3,03
$F_{xi} \cdot U_i \cdot A_i =$			305,45
Koeficijent gubitka toplote usled uticaja toplotnih mostova, $H_{TB} = 0,1 \cdot A_i$ [W/K]			20,16
Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote H_{tr} [W/K]			325,61

Međutim, kao što je prikazano u prethodnim poglavljima, standard EN ISO 13370:2017 pruža detaljniji i složeniji pristup za određivanje koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote u slučaju poda na tlu.

U tabeli 4, prikazani su rezultati proračuna za slučaj poda sa pločom na tlu prema standardu EN ISO 13370:2017.

Tabela 4. Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote – pod sa pločom na tlu (EN ISO 13370:2017)

Oznaka	PNT
Izloženi obim poda, P [m]	100,33
Ukupna debljina zida, $d_{w,e}$ [m]	0,40
Toplotna provodljivost, λ_{gr} [W/mK]	2,00
Toplotni otpor. prelaženju toplote sa unutrašnjeg vazduha na unutrašnju površinu poda, R_{si} [m ² K/W]	0,17
Toplotni otpor. provođenju toplote podne ploče, $R_{fg,sog}$ [m ² K/W]	0,16
Toplotni otpor. prelaženju toplote sa donje površine poda na zemlju, R_{se} [m ² K/W]	0,00
Linijski koeficijent prolaženja toplote, ψ_{gr} [W/mK]	0,75
Periodična dubina prodiranja toplote, δ [m]	3,20
Koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu, H_{gr} [W/K]	170,02
Faktor korekcije temperature, F_{xi} [-]	0,26

Za konkretan slučaj poda sa pločom na tlu, koeficijent transmisijonih gubitaka toplote prema tlu, prema standardu

propisanom trenutno važećim Pravilnikom o energetskej efikasnosti, 1,9 puta je veći od vrednosti dobijene prema standardu koga propisuje nova revidirana direktiva EPBD EU/2024/1275.

Faktor korekcije temperature za *i*-ti građevinski element $F_{x,i}$ ima bitan uticaj na dobijene rezultate jer koriguje temperaturnu razliku koja se javlja između građevinskih elementa koje razdvajaju termički omotač objekta u odnosu na temperaturnu razliku koja se javlja između spoljašnjeg vazduha i prostorija unutar termičkog omotača. Prema standardu EN ISO 13370:2017, vrednost faktora korekcije temperature za tlo se usvaja iz tabele koju propisuje Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada i iznosi $F_{x,i}=0,5$, dok se prema standardu ova vrednost izračunava i u konkretnom slučaju iznosi $F_{x,i}=0,26$.

IV-2 Slučaj grejanog podruma

Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote zida u tlu, na osnovu sastava konstrukcije prikazanog u tabeli 5, određen je prema standardu EN ISO 13370:2017 primenom jednačine (5).

Tabela 5. Sastav konstrukcije zida u tlu

Naziv građevinskog sloja	δ [cm]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/jgK]
Spolja				
1.Armirani beton	20	2,33	2500	960
2.Duropor	5	0,069	380	1260
3.Hidroizolacija	1	0,19	1100	1460
4. Puna opeka	12	0,64	1600	920
Unutra				
Otpor prelaženja toplote sa unutrašnje strane konstrukcije: $R_{si}=0,13$ m ² K/W				
Otpor prelaženja toplote sa spoljne strane konstrukcije: $R_{se}=0,00$ m ² K/W				
Ukupni otpor prolaženju toplote: $R=1,18$ m ² K/W				
Koeficijent prolaženja toplote: $U=0,85$ W/m ² K				

Rezultati proračuna prema navedenom standardu prikazani su tabeli 6.

Tabela 6. Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote (EN ISO 13790:2010)

Oznaka	Faktor korekcije temperature, F_{xi} [-]	Površina elementa, A_i [m ²]	Koeficijent prolaženja toplote, U_i [W/m ² K]
ZUT – Zid u tlu	0,6	10,33	0,85
$F_{xi} \cdot U_i \cdot A_i =$			5,25
Koeficijent gubitka toplote usled uticaja toplotnih mostova, $H_{TB}=0,1 \cdot A_i$ [W/K]			1,03
Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote H_{tr} [W/K]			6,28

U odnosu na slučaj poda na tlu koji, prema standardu EN ISO 13790:2010, uzima u obzir vrednost faktora korekcije temperature $F_x=0,5$, vrednost ovog faktora za slučaj zida u tlu je veći iznosi $F_x=0,6$, što znači da će toplotni gubici zida u tlu biti veći u odnosu na pod tlu (za istu površinu i sastav konstrukcija).

Rezultati detaljnijeg proračuna koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote za konkretan slučaj grejanog podruma, prema standardu EN ISO 13370:2017, prikazani su u tabeli 7.

U odnosu na prethodni slučaj, u kom je koeficijent transmisijonih gubitaka poda na tlu veći prema standardu EN ISO 13790:2010,

vrednost koeficijenta transmisijonih gubitaka toplote za konkretan slučaj grejanog podruma je neznatno manji u odnosu na standard EN ISO 13790:2010, jer se proračunska vrednost faktora korekcije temperature ($F_x=0,66$) dobro slaže sa vrednošću faktora iz tabele koju propisuje Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada ($F_x=0,6$).

Tabela 7. Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote – grejani podrum (EN ISO 13370:2017)

Oznaka	PNT-ZUT
Izloženi obim poda, P [m]	6,33
Ukupna debljina zida, $d_{w,e}$ [m]	0,40
Koeficijent toplotne provodljivosti, λ_{gr} [W/mK]	2,00
Toplotni otpor. prelaženju toplote sa unutrašnjeg vazduha na unutrašnju površinu poda, R_{si} [m ² K/W]	0,17
Toplotni otpor. provođenju toplote podne ploče, $R_{f,b}$ [m ² K/W]	0,16
Toplotni otpor. prelaženju toplote sa donje površine poda na zemlju, R_{se} [m ² K/W]	0,00
Toplotni otpor. provođenju toplote zidova u podrumu, $R_{w,b}$ [m ² K/W]	3,33
Linijski koeficijent prolaženja toplote zid-pod, $\psi_{w,f}$ [W/mK]	0,20
Periodična dubina prodiranja toplote, δ [m]	3,20
Koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu, H_{gr} [W/K]	6,95
Faktor korekcije temperature, F_{xi} [-]	0,66

IV-3 Slučaj negrejanog podruma

Koeficijent transmisijonih gubitaka toplote međuspratne konstrukcije ka negrejanom podrumskom prostoru, na osnovu sastava konstrukcije prikazanog u tabeli 8, određen je prema standardu EN ISO 13370:2017 primenom jednačine (5).

Tabela 8. Sastav međuspratne konstrukcije ka negrejanom podrumskom prostoru

Naziv građevinskog sloja	δ [cm]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/jgK]
Unutra				
1.Lepljeni tepih	1	0,081	270	1230
2.Cementni estrih	4	1,4	2200	1050
3.Polietilenska folija	0,02	0,19	1000	1250
4.Tvrde ploče mineralne vune	2	0,041	200	840
5. Beton	12	2,33	2500	960
6. Duropor	10	0,069	380	1260
7. Krečni malter	2	0,85	1700	1050
Spolja				
Otpor prelaženja toplote sa unutrašnje strane konstrukcije: $R_{si}=0,17$ m ² K/W				
Otpor prelaženja toplote sa spoljne strane konstrukcije: $R_{se}=0,17$ m ² K/W				
Ukupni otpor prolaženju toplote: $R=2,50$ m ² K/W				
Koeficijent prolaženja toplote: $U=0,40$ W/m ² K				

Rezultati proračuna prema navedenom standardu prikazani su u tabeli 9.

Faktor korekcije temperature međuspratne konstrukcije iznad negrejanog podruma je, prema tabeli iz Pravilnika o energetskej

efikasnosti zgrada isti kao i za slučaj poda na tlu i iznosi $F_x=0,5$.

Tabela 9. Koeficijent transmisijih gubitka toplote (EN ISO 13790:2010)

Oznaka	Faktor korekcije temperature, F_{xi} [-]	Površina elementa, A_i [m ²]	Koeficijent prolaženja toplote, U_i [W/m ² K]
MKP – Međuspratna konstrukcija iznad negrejanog podruma	0,5	91,95	0,40
$F_{xi} \cdot U_i \cdot A_i =$			18,39
Koeficijent gubitka toplote usled uticaja toplotnih mostova, $H_{TB} = 0,1 \cdot A_i$ [W/K]			9,20
Koeficijent transmisijih gubitka toplote H_{tr} [W/K]			27,59

I u ovom, kao i u prethodnom slučaju, dobijeni rezultati pokazuju da se za konkretan slučaj analizirane međuspratne konstrukcije iznad negrejanog podruma ne pravi velika greška u proračunu koeficijenta gubitaka toplote transmisijom, koristeći analizirane standarde. Proračunska vrednost faktora korekcije temperature ($F_x=0,54$) dobro se slaže sa vrednošću faktora iz tabele koju propisuje Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada ($F_x=0,5$). Rezultati detaljnijeg proračuna koeficijenta transmisijih gubitaka toplote za konkretan slučaj negrejanog podruma, prema standardu EN ISO 13370:2017, prikazani su u tabeli 10.

Tabela 10. Koeficijent transmisijih gubitka toplote – negrejani podrum (EN ISO 13370:2017)

Oznaka	MKP
Izloženi obim poda, P [m]	61,51
Ukupna debljina zida, $d_{w,e}$ [m]	0,40
Koeficijent toplotne provodljivosti, λ_{gr} [W/mK]	2,00
Toplotni otpor. prelaženju toplote sa unutrašnjeg vazduha na unutrašnju površinu poda, R_{si} [m ² K/W]	0,17
Toplotni otpor. provođenju toplote podne ploče, $R_{f,b}$ [m ² K/W]	0,16
Toplotni otpor. prelaženju toplote sa donje površine poda na zemlju, R_{se} [m ² K/W]	0,00
Toplotni otpor. provođenju toplote zidova u podrumu, $R_{w,b}$ [m ² K/W]	1,05
Koeficijent prolaženja toplote kroz ploču uzdignutu od tla, U_{fsus} [W/m ² K]	0,33
Linijski koeficijent prolaženja toplote zid-pod, $\psi_{w,f}$ [W/mK]	0,20
Periodična dubina prodiranja toplote, δ [m]	3,20
Koeficijent gubitka toplote transmisijom prema tlu, H_{gr} [W/K]	29,97
Faktor korekcije temperature, F_{xi} [-]	0,54

VIII ZAKLJUČAK

Analiza i poređenje standarda EN ISO 13790:2010 i EN ISO 13370:2017 za proračun koeficijenta transmisijih gubitaka toplote kroz tlo pokazali su značajne razlike u pristupu i tačnosti dobijenih rezultata. Novi standard EN ISO 13790:2010 pruža

detaljniji i precizniji pristup jer se ukupni koeficijent transmisijih gubitaka dobija osrednjavanjem vrednosti za svaki mesec posebno u sezoni grejanja ili hlađenja, uzimajući u obzir temperaturne promene zemljišta u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha i efekat inercije tla.

Konkretni proračuni na primeru Instituta za standardizaciju Srbije pokazali su da je postojeći standard EN ISO 13790:2010 za određivanje koeficijenta gubitaka prema tlu, koji se koristi u okviru Pravilnika o energetske efikasnosti zgrada u Srbiji, potencijalno konzervativniji u proceni energetske potreba zgrada.

Najveća razlika u rezultatima primećena je u slučaju poda na tlu, gde je vrednost koeficijenta transmisijih gubitaka određena prema trenutno aktuelnom EN ISO 13790:2010 imala skoro dvostruko veću vrednost od one određene prema novom EN ISO 13370:2017. Za slučajeve grejanog i negrejanog podruma, ove razlike su bile manje izražene, pri čemu su vrednosti koeficijenta transmisijih gubitaka određene novom standardu sada imale nešto veće vrednosti. Na osnovu navedenog može se zaključiti da se primenom nove metodologije za određivanje koeficijenta transmisijih gubitaka toplote prema tlu mogu dobiti veće ili manje vrednosti ovog njegove vrednosti određene po metodologiji iz starog, sada već iz upotrebe povučenog standarda, tj. da nema jasnog pravila koji bi omogućio uopštavanje i pojednostavljivanje proračuna. Razlike u vrednostima zavisice od specifičnih uslova objekta i načina kontakta sa tlom, pa je zbog toga detaljno sagledavanje svakog pojedinačnog objekta od presudne važnosti za tačnost proračuna. Kako novi standard EN ISO 13790:2010 obuhvata značajno veći broj uticajnih faktora, on svakako daje i tačnije rezultate, te ga je neophodno primenjivati za preciznije i kvalitetnije proračune.

Uvođenje EN ISO 13370:2017 u nacionalne regulative mogla bi doprineti preciznijem proračunu energetske potreba zgrada u skladu sa ciljevima energetske i klimatske politike EU.

ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-136/2025-03/ 200105 od 04.02.2025. god.

LITERATURA

- [1] Madžarevic, A., Pavlović, B., Mojić, D., Ivezić, D., Živković, M. Energetska tranzicija u domaćinstvima: analiza usaglašenosti Srbije sa paketom „Čista energija za sve Evropljane“, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 26, No. 1, pp. 51-58, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.51P>
- [2] Kovacevic, S., Banjac, M. Postupak određivanja energetske karakteristike zgrade prema ISO 52016-1, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 26, No. 1, pp. 34-41, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.34K>
- [3] Madžarevic, A., Pavlović, B., Mojić, D., Ivezić, D., Živković, M. Domaćinstva i energetska tranzicija u Republici Srbiji: pravni okvir i stvarna praksa, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 27, No. 2, pp. 1-7, 2025. <http://dx.doi.org/10.46793/EEE25-2.01M>
- [4] SRPS EN ISO 13790:2010: Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling (ISO 13790:2008), <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:24871> [pristupljeno 12.02.2026]
- [5] Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011), https://www.paragraf.rs/propsi/pravilnik_o_energetskoj_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 12.02.2026]
- [6] SRPS EN ISO 13370:2017: Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods (ISO 13370:2017),

- <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:65407> [pristupljeno 01.04.2025]
- [7] ISO 6946:2017: Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:65445> [pristupljeno 01.04.2025]
- [8] Medved, S., Černe, S. A simplified method for calculating heat losses to the ground according to the EN ISO 13370 standard, Energy and Buildings, Vol 34, No. 5, pp. 523-528, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00138-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00138-4)
- [9] Simões, N., Serra, C. Ground contact heat losses: Simplified calculation method for residential buildings, Energy, Vol 48, No. 1, pp. 66-73, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.013>
- [10] ISO 14683:2007: Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, <https://www.iso.org/standard/40964.html> [pristupljeno 01.04.2025]
- [11] Photovoltaic geographical information system, typical meteorological year, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY [pristupljeno 01.04.2025]

AUTORI

Sandra Kovačević – istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, skovacevic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0009-0007-2567-6735](https://orcid.org/0009-0007-2567-6735)

Branislav Petrović – istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, bpetrovic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2429-0642](https://orcid.org/0000-0002-2429-0642)

Miloš Banjac – prof. dr, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Comparison and Analysis of the Total Heat Transfer Coefficient to the Ground Determined According to EN ISO 13790:2010 and EN ISO 13370:2017

Abstract – In order to establish the differences arising from the use of the currently applicable calculation method for determining the total heat transfer coefficient to the ground in Serbia, according to EN ISO 13790:2010, which is prescribed by the Rulebook on Energy Efficiency of Buildings ("Official Gazette of RS", No. 61 /2011), and the calculation according to the EN ISO 13370:2017 standard, which is prescribed by the new revised directive EPBD EU/2024/1275, both methods are presented in this study. The calculation results and deviations are compared and analysed based on a specific example.

Among other things, it was found that, unlike the previous monthly/seasonal method established by the EN ISO 13790 standard, which does not include thermal inertia of the ground, the method from the EN ISO 13370:2017 standard not only considers the temperature differences of the ground in relation to the outside air temperature, but also inertia, that is delay in the change of ground temperature in relation to the temperature of the outside air. That makes it superior, and the results obtained using this method are more accurate and reliable.

Index terms – Heat transfer coefficient to the ground; EN ISO 13790:2010; SRPS EN ISO 13370:2017

Accelerating Energy Transition through the Introduction of Alternative Fuels Infrastructure

Miloš Kuzman

Serbian Energy Law Association, Pjarona de Mondezira 30, Belgrade

Abstract - The increasingly visible consequences of climate change are a sign that urgent actions must be performed to reduce the negative effects that affect the accelerated warming of our planet. Energy reforms are moving in the direction of the increasing presence of renewable energy sources in the energy mix, in which, with certain preconditions, renewable and energy-efficient vehicles occupy an important place. A prerequisite for a more significant presence of renewable vehicles in traffic is, among other things, the guarantee of security of supply of alternative fuels. In order for alternative fuels to be available to all users, it is necessary to provide adequate infrastructure that will be present to the necessary extent throughout the geographical area of the country. This paper will discuss the possibilities, preconditions and obligations of introducing alternative fuels infrastructure in the Republic of Serbia. Special emphasis will be placed on electricity and hydrogen as fuels for which it is necessary to provide adequate infrastructure as soon as possible. Finally, conclusions and recommendations will be presented in anticipation of the adoption of regulations related to the deployment of alternative fuels infrastructure.

Key words - alternative fuels, electric vehicles, hydrogen, energy transition

I INTRODUCTION

When electric vehicles are mentioned, few interlocutors lack an opinion on the subject. While some believe that electric vehicles are the transportation means of the future, others are critical regarding the role these vehicles should play in traffic. Skepticism is particularly present when discussing the availability of these vehicles, their price, battery life, and charging speed. One of the questions raised is the source of the electricity used to power these vehicles, specifically whether these vehicles are indeed the vehicles of the future if the electricity for their charging is generated from fossil fuels [1].

In the Republic of Serbia, electric vehicles first appeared on the streets before they found their place in regulations. Moreover, charging stations for electric and hybrid vehicles began operating before amendments to the Energy Law were adopted in 2021, which introduced the charging service for electric and hybrid vehicles as a new institute. In the meantime, regulations have been enacted that provided subsidies for the purchase of electric and hybrid vehicles at a time when the number of charging stations in the Republic of Serbia could be counted on one hand.

The expert public, especially those dealing with the transition to

renewable energy sources, is interested in the speed of the transition from traditional to renewable-powered vehicles and the creation of prerequisites to achieve this transition as quickly as possible [2]. Additionally, due to the increasing prevalence of alternative fuels that can be both renewable and non-renewable, such as biogas and green hydrogen, questions arise regarding their more comprehensive regulation in domestic legislation. This expert community does not overlook the previously raised issues, but addresses their resolution along the way, with a clear goal in mind – reducing the impacts of climate change. One of the prerequisites for a greater presence of alternative fuel vehicles in traffic is the existence of adequate infrastructure for their charging.

This paper will examine the current situation regarding the development of infrastructure for alternative fuels and the creation of conditions for its improvement, especially concerning electricity and hydrogen as types of alternative fuels. Special emphasis will be placed on the regulations of the European Union (hereinafter: EU) in this area, and the need for mutual consistency of regulations related to infrastructure for alternative fuels with other regulations will be presented. The paper will also consider the appropriateness of adopting these regulations and provide recommendations that lawmakers could consider when contemplating the solutions that these regulations should bring.

II INFRASTRUCTURE FOR ALTERNATIVE FUELS IN THE REGULATION OF THE REPUBLIC OF SERBIA

Energy Law

The current Energy Law ("Official Gazette of the RS", Nos. 145/2014, 95/2018 – other law, 40/2021, 35/2023 – other law, 62/2023 and 94/2024) stipulates in Article 146a that the distribution system operator is obliged to cooperate on a non-discriminatory basis with any natural or legal person who owns, develops, or operates electric vehicle chargers, in connection with their connection to the grid, ensuring that the negative feedback impact of chargers on the distribution system is kept to a minimum [3]. It is prescribed that the connection of publicly accessible and private electric vehicle charging points to the distribution system is regulated by a Government decree and by the distribution system operating rules, and that the distribution system operator, as a rule, may not own, develop, or operate electric vehicle chargers, except in cases where it possesses chargers solely for its own needs. From the above provisions, it is clear that the Energy Law does not contain provisions related to electric vehicle charging infrastructure, but only prescribes the

obligations of the distribution system operator regarding the connection of charging stations to the power system.

Law on Planning and Construction

At the end of 2023, the legislator recognized the need to begin adopting regulations related to alternative fuel infrastructure. This was done through amendments to the Law on Planning and Construction ("Official Gazette of the RS", Nos. 72/2009, 81/2009 – corr., 64/2010 – Constitutional Court decision, 24/2011, 121/2012, 42/2013 – Constitutional Court decision, 50/2013 – Constitutional Court decision, 98/2013 – Constitutional Court decision, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 – other law, 9/2020, 52/2021 and 62/2023 – hereinafter: LPC), which in Article 2, paragraph 1, item 18 defines the concept of electromobility as a specific form of ecological transport, through the use of electric vehicles that predominantly use electric energy as their driving power [4]. Furthermore, the same article, in items 38 and 59, defines an electric vehicle charging point as a location where one or more electric vehicles can be charged or where the battery of one or more electric vehicles can be replaced, and an electric vehicle charger as a device that may be installed on land or within a facility used for public or private purposes.

Article 145, paragraph 4 of the LPC further stipulates, among other things, that requests for the issuance of a decision approving the execution of works on electric vehicle chargers located within fuel supply stations for motor vehicles on public roads are to be decided upon by the competent authority of the local self-government unit in whose territory the facility in question is situated. Article 201, paragraph 7 of the LPC provides that the competent minister shall prescribe in more detail the content, manner, and procedure for preparing spatial and urban planning documents, including the spatial plan for areas of special purpose for the construction of electric power facilities, as well as the minimum number of electric vehicle charging points.

It is particularly important to mention the independent Article 85 of the LPC, which stipulates that the owners of fuel supply stations for motor vehicles located on state roads of category Ia are obliged to align their operations with the provisions of the LPC within two years from the date of entry into force of the bylaw regulating the installation of electric vehicle chargers. The same article further prescribes that the Energy Agency of the Republic of Serbia (hereinafter: AERS) shall regulate in more detail the manner of supply and billing of the electricity delivered for the operation of electric vehicle chargers.

Although the LPC is highly significant, as it introduced for the first time into domestic legislation provisions concerning alternative fuel infrastructure, it regulates exclusively the infrastructure related to electric vehicle chargers, and not vehicles powered by other alternative fuels, such as hydrogen, for example.

Furthermore, more detailed provisions concerning electric vehicle infrastructure are expected to be established through the adoption of a bylaw, which should set out the obligations of fuel station owners. Considering the increasing diversity and development of various types of alternative fuels, it is expected

that future amendments to the LPC will include provisions addressing the infrastructure for other alternative fuels besides electricity.

III TOWARDS THE ADOPTION OF THE LAW ON THE DEPLOYMENT OF ALTERNATIVE FUEL INFRASTRUCTURE

In 2023, the EU adopted Regulation 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure (hereinafter: the Regulation), which has been in effect since 2024 [5]. The Regulation forms part of the EU's "Fit for 55" legislative package, aimed at reducing net greenhouse gas emissions by at least 55% by 2030 compared to 1990 levels, with the ultimate goal of achieving EU climate neutrality by 2050. It should be noted that the Regulation repealed the earlier Directive 2014/94 on the deployment of alternative fuels infrastructure (hereinafter: the Directive), which indicates that the EU has been addressing these issues for more than a decade [6]. The Regulation sets out the targets that EU Member States must meet when introducing publicly accessible alternative fuels infrastructure [7].

The adoption of the Regulation followed the situation in which EU Member States had been developing alternative fuel infrastructure in different ways, resulting in uneven development of charging and refuelling infrastructure across the EU, ultimately leading to infrastructure that was not adequately adapted to users' needs. Since the objectives of the Directive had been too broadly defined, the infrastructure development policies of EU Member States varied significantly in both approach and level of advancement, which led to considerable disparities, including those of a technical and pricing nature.

Given that the Republic of Serbia has yet to adopt regulations concerning alternative fuel infrastructure, it is necessary for the legislator to incorporate solutions aligned with those established by the Regulation, while also taking into account the fundamental objectives set out in the Directive. At the end of 2024, the Ministry of Construction, Transport and Infrastructure forwarded a working draft of the Law on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure to the relevant professional community and business entities, announcing its forthcoming adoption [8]. Therefore, it is important here to highlight the key concepts introduced by the Directive, and especially by the Regulation, which the future law should encompass.

The content of the Directive and the Regulation clearly indicates that the aforementioned law should include: objectives for establishing the necessary alternative fuels infrastructure in transport for road vehicles, stationary aircraft, trains, and inland waterway vessels; rules for developing a national policy concept for the establishment and development of alternative fuels infrastructure in transport; minimum requirements for the construction of alternative fuels infrastructure and charging points; common technical specifications for charging and alternative fuel supply points; requirements regarding user information; payment requirements related to alternative fuels infrastructure; and requirements for maintaining records on alternative fuels infrastructure. Such a comprehensive scope of the future regulation would indicate the legislator's intention to regulate this topic as fully as possible, although it remains to be seen how much of this matter would be governed directly by the

law and how much would be specified through subordinate regulations.

The definition of alternative fuels in the Regulation is also very comprehensive. Alternative fuels are defined as fuels or energy sources that are used, at least in part, as a substitute for fossil fuel sources in powering transport vehicles and contribute to the decarbonization of transport and the improvement of the environmental parameters of the transport sector, which include, among others: alternative fuels for road vehicles, trains, inland waterway vessels, and zero-emission aircraft (electricity, hydrogen, ammonia); renewable fuels (fuels from biomass, including biogas and biofuels, synthetic and paraffinic fuels, including ammonia, produced from renewable energy sources); and non-renewable alternative fuels and transitional fossil fuels (natural gas in gaseous form as compressed natural gas and in liquid form as liquefied natural gas, liquefied petroleum gas, and synthetic and paraffinic fuels produced from non-renewable energy sources).

From the above definition, it follows that the future law should include not only renewable energy sources in alternative fuels but also non-renewable energy sources, such as liquefied natural gas, which is both necessary and useful during the transitional period of the energy reform in which the Republic of Serbia currently finds itself. Although biofuels, such as biomethane, are still in their early stages of development in Serbia, it would be beneficial for them to be regulated by the new law in order to create the prerequisites for their further development in advance.

In general, alternative fuels infrastructure can be of a public or private nature, whereas the Regulation and the Directive do not address private alternative fuels infrastructure. Private infrastructure, in the case of electric charging, is not unfamiliar and is generally regulated under general legislation, while special attention by the legislator would need to be given to private infrastructure for other alternative fuels, if it is at all possible to establish such infrastructure under existing regulations. The Regulation defines publicly accessible alternative fuels infrastructure as infrastructure located at a site or area that is open to the general public, regardless of whether the infrastructure is on public or private land, whether restrictions or conditions apply regarding access to the site or area, and regardless of the applicable terms of use for the alternative fuels infrastructure.

It is appropriate for the future law to also address small electric vehicles, such as electric bicycles, mopeds, motorcycles, tricycles, and quadricycles, as their specific characteristics require a different regulatory approach compared to standard electric vehicles. Additionally, such legal provisions must be aligned with regulations governing road traffic safety to prevent conflicting interpretations of sectoral legislation. This would significantly open the way for the development of the electro mobility concept in the Republic of Serbia and promote small electric vehicles as an alternative means of participating in transport.

A charging point is defined in the Regulation as a fixed or mobile facility connected to the electricity system or isolated from it, used for charging the batteries of electric vehicles, which may

have one or more connectors to accommodate different connector types, while at any given moment only one electric vehicle battery can be charged. The Regulation recognizes charging points with a power output above 22 kW as high-power charging points, and those with a power output below 22 kW as low-power charging points, excluding devices with an output of 3.7 kW or less whose primary purpose is not electric vehicle charging. These provisions, along with other provisions that will be included in the future law regarding technical characteristics and other requirements for charging points, will provide clear guidance to AERS in establishing rules for the supply and billing of electricity for electric vehicle charging.

It is important to emphasize that the Directive contained clear guidelines for the introduction and development of alternative fuels infrastructure that each EU Member State should follow, which specifically include:

- (a) an assessment of the current status and future development of the alternative fuels market in transport and of alternative fuels infrastructure, taking into account an intermodal approach to alternative fuels infrastructure and, where relevant, cross-border continuity;
- (b) national individual and overall targets for the deployment of alternative fuels infrastructure across all modes of transport, ensuring compliance with minimum infrastructure requirements;
- (c) measures necessary to achieve the national, individual, and overall targets referred to in the previous point;
- (d) measures to promote the introduction of alternative fuels infrastructure in public transport services;
- (e) measures to promote and facilitate the deployment of charging points for light and heavy vehicles at privately owned locations that are not publicly accessible;
- (f) incentive measures to support additional use of alternative fuel vehicles;
- (g) measures to improve alternative fuels infrastructure in urban hubs, particularly regarding publicly accessible charging points for all types of vehicles, especially stations for charging small electric vehicles, taking into account underdeveloped municipalities;
- (h) measures to ensure a sufficient number of publicly accessible high-power charging points;
- (i) necessary measures to ensure that the deployment and operation of charging points, including the geographical distribution of bidirectional charging points, contribute to the flexibility of the energy system and the integration of renewable energy sources into the electricity system;
- (j) measures to ensure that publicly accessible charging points and alternative fuels supply points are accessible to elderly persons, persons with reduced mobility, and persons with disabilities;
- (k) measures to remove barriers related to planning, permitting, procurement, and management concerning alternative fuels infrastructure;

- (l) a review of the current status and measures for deploying alternative fuels infrastructure in ports, including international passenger terminals on inland waterways;
- (m) a review of the current status and measures for deploying alternative fuels infrastructure in rail transport; and
- (n) a review of the current status and measures for deploying alternative fuels infrastructure at airports.

Although the Directive is no longer in force for EU Member States, it would be highly beneficial for such provisions to be included in the future law of the Republic of Serbia. This would establish a clear obligation for the state to continuously and comprehensively assess issues relevant to the development of alternative fuels infrastructure and to identify optimal solutions.

The general rules for electric vehicles in the Regulation provide that on national roads forming part of the core indicative Trans-European Transport Network, as well as on parking areas, rest stops, fuel stations, and toll stations along these roads, publicly accessible electric vehicle charging stations for light vehicles must be installed by the road managers in each direction of travel, at a maximum distance of 60 km from each other. At each publicly accessible aggregated charging site for light vehicles, a total output power of at least 400 kW and at least one charging point with an individual output power of at least 150 kW must be provided by 31 December 2025, and a total output power of at least 600 kW with at least two charging points of at least 150 kW each must be provided by 31 December 2027. Special rules are established for heavy vehicles, as well as for roads with lower light vehicle traffic. It is important to note that in the Republic of Serbia, the necessary planning documents specifying locations for alternative fuels infrastructure have not yet been adopted, which is a prerequisite for applying these rules from the Regulation if they are incorporated into the future law.

The Regulation further establishes technical requirements for the installation of electric vehicle charging infrastructure, as well as rules for its use and payment, specifying obligations for operators of publicly accessible charging points. Prices charged by operators of publicly accessible charging points must be reasonable, easily and clearly comparable, transparent, and non-discriminatory. For publicly accessible charging points with an output of 50 kW or more, the ad hoc price charged by the operator is based on the price per kWh of electricity delivered. For publicly accessible charging points with an output below 50 kW, operators must clearly and simply display information about the ad hoc price, including all its pricing components, so that end users are aware of them before starting the charging session. The applicable pricing components should be presented in the following order:

- (a) price per kWh;
- (b) price per minute;
- (c) price per charging cycle; and
- (d) any other applicable price components.

Since the method of charging payment is only generally regulated by the Regulation, it is up to the legislator or another

act based on the law to make any further specifications if necessary.

Following the example of electricity, the Regulation sets out rules concerning the infrastructure for supplying road vehicles with hydrogen, although longer deadlines for the implementation of these rules are provided in the case of hydrogen. Thus, on national roads that are part of the core Trans-European Transport Network, the road manager is obliged to ensure the installation of publicly accessible hydrogen refuelling stations at intervals of no more than 200 km, with a total capacity of at least one ton per day and equipped with a pump operating at 700 bar, by 31 December 2030. Furthermore, in each urban node, it is necessary to ensure the introduction of at least one publicly accessible hydrogen refuelling station within the same timeframe. Special rules are also prescribed for establishing hydrogen infrastructure in areas with reduced traffic intensity.

The Regulation further establishes rules for infrastructure for liquefied natural gas for road vehicles, rules for supplying electricity from shore in ports or international passenger terminals on inland waterways, and rules for supplying electricity to stationary aircraft, as well as rules concerning railway infrastructure. For the purposes of monitoring the development of alternative fuel infrastructure and informing users, the establishment of a register of alternative fuel infrastructure is foreseen. A system of rules for informing users of alternative fuel vehicles has also been developed; among other things, it is prescribed that operators of publicly accessible charging points and alternative fuel supply stations, or providers of mobility services, are obliged to provide users free of charge with available static and dynamic data on the alternative fuel infrastructure they manage or on services associated with that infrastructure.

The law to be enacted based on the Regulation should establish a systematically organized framework for the development of alternative fuel infrastructure in the Republic of Serbia. Since the law is still in the drafting stage, this paper presents only a conceptual overview of what the Regulation and the Directive envisage, while an analysis of specific legal provisions will follow only after the law is adopted. In drafting the law, careful attention must be paid to ensuring consistency with the LPC and the Energy Law, as any discrepancies between them could lead to delays in implementation and, consequently, slower establishment of infrastructure solutions. Additionally, the Regulation provides detailed rules for infrastructure related to electricity, hydrogen, and liquefied natural gas, while other alternative fuels mentioned in the Regulation are not sufficiently elaborated and should also receive due attention in the drafting of the law and corresponding subordinate legislation.

IV ALIGNMENT OF THE LAW ON THE INTRODUCTION OF ALTERNATIVE FUEL INFRASTRUCTURE WITH OTHER REGULATIONS

The very mandate of the ministry responsible for transport to enact regulations related to alternative fuels indicates that sectoral regulations in this area will be incorporated within transport legislation. This is clearly reflected in the text of the Integrated National Energy and Climate Plan of the Republic of Serbia for the period up to 2030, with a vision to 2050

(hereinafter: INECP), which states that the main instrument for promoting energy efficiency in the transport sector will be the provision of tax incentives for the purchase of energy-efficient vehicles in both passenger and freight transport, as well as the expansion of public transport infrastructure and infrastructure for the types of alternative fuels being promoted [9]. The INECP anticipates that by 2030 approximately 44,800 electric vehicles (passenger and light commercial vehicles) will be registered, while the contribution of biofuels will remain dominant, with a particular increase in the share of advanced biofuels by 2030.

The INECP clearly states that a special emphasis in the transport sector will be placed on promoting electro mobility, meaning that the necessary legal framework will be adopted and the design and installation of the required electric vehicle charging infrastructure will be ensured. Furthermore, it is stipulated that the promotion of alternative fuels will be supported by the development of the necessary infrastructure for all incentivized types of alternative fuels, with a maximum level of alignment with policy measures integrated into the renewable energy dimension. Additionally, for the field of electro mobility, the INECP foresees the preparation of a dedicated action plan for the electrification of passenger and freight transport, roads, and infrastructure, with an emphasis on the development of the legal framework and the use of various financial instruments. This clearly indicates that the adoption of the Law on the Establishment of Infrastructure for Alternative Fuels can be expected in the coming years.

Furthermore, the INECP foresees the introduction of specific tax incentives to stimulate the purchase of energy-efficient vehicles, including vehicles that use alternative fuels, as well as subsidies and special excise duties. From this, it follows that regulations concerning public finances will need to undergo the necessary amendments in parallel with the adoption of regulations related to infrastructure for alternative fuels. Considering that general subordinate acts in this area already exist, particularly regarding subsidies for the purchase of electric and hybrid vehicles, it is necessary for the legislator to continue the good practice established in this field [10].

Additionally, innovative initiatives related to electric vehicles and their charging strategies will be supported, with an emphasis on electricity consumption from renewable energy sources, as well as hydrogen produced from renewable energy sources. Corresponding initiatives will also be launched for the development of innovative technologies for biofuels as renewable fuels for sustainable transport (road and aviation fuels).¹ From the above, it is evident that in the coming decades,

electricity will face strong competition in its share of alternative fuels on the market, which will inevitably also impact the diversification in the development of the necessary charging infrastructure.

The adoption of the Law on the Establishment of Infrastructure for Alternative Fuels will lay the foundations in this area of law. However, without simultaneous amendments and the adoption of related regulations, these provisions will not be sufficiently effective or applicable. Therefore, the first step following the adoption of INECP is the development and mutual alignment of strategies in the energy sector, with particular attention to energy efficiency and renewable energy sources, transport sector strategies, strategies related to the adoption of planning documents and building regulations, and strategies in the field of public finance, as the fundamental strategic documents that will ensure the development of electro mobility and, consequently, the development of infrastructure for alternative fuels. In addition, it is crucial to ensure alignment with public procurement regulations, environmental protection regulations, and industrial safety regulations [11]. Special attention must be paid to the adoption and implementation of technological standards in this field, without which the proper application of the adopted regulations will not be possible.

V CONCLUSION

How many times have we found ourselves, at the last moment during a journey, realizing that we do not have enough fuel to reach our intended destination and urgently need to find a fuelling station? With the development of electric vehicle chargers that citizens can privately own and use to charge at home, such situations will be reduced. However, for other alternative fuels, it is unlikely that technological advancements will soon allow for home-based refuelling. Therefore, public alternative fuel stations are of great importance, and it is not surprising that this challenge is being strategically addressed on a global level.

When it comes to electric and hybrid vehicles, the role of the electricity distribution system operator will be significant in the process of connecting vehicle charging stations to the electricity distribution network. Therefore, the regulations governing this process must be adopted—or amended—and harmonized as soon as possible. It is particularly important for the distribution system operator to be informed about the plans for the development of alternative fuel infrastructure, especially regarding the planned increases in charging station capacities, as this will enable them to adequately and strategically prepare for the upcoming connection procedures.

By introducing the provisions of the Regulation into Serbian legislation, the legislator will contribute to the development of alternative fuel infrastructure. However, all the specificities of the domestic legal system should be taken into account, and the legal solution should be adapted to actual needs and circumstances. This particularly applies to planning documents, which must be aligned with the future regulation as soon as

¹ The initiatives to be launched include: (a) the development of advanced liquid and gaseous biofuels through biochemical processes or from indigenous microorganisms and primary energy from renewable energy sources; (b) the demonstration of advanced liquid and gaseous biofuels through biochemical/thermochemical/chemical conversion from sustainable biomass and/or indigenous microorganisms and primary energy from renewable energy sources; (c) the development of other liquid and gaseous fuels (excluding hydrogen) through thermochemical/chemical/biochemical/electrochemical conversion of neutral energy carriers with renewable energy sources; (d) the demonstration of other liquid and gaseous fuels (excluding hydrogen) through thermochemical/chemical/biochemical/electrochemical conversion of neutral energy carriers with renewable energy sources; and (e) the production of

renewable hydrogen via water electrolysis using electricity from renewable energy sources.

possible to ensure that infrastructure can be constructed smoothly in accordance with legal requirements. Strategic planning of resources for law implementation must not be overlooked, such as ensuring a sufficient number of trained professionals in the relevant fields. Likewise, attention should be paid to the needs and capacities of the transport, traffic, and electricity systems in each specific case to ensure that the law is implemented in an optimal manner according to available resources.

The future Law on the Establishment of Alternative Fuel Infrastructure will most likely set only the minimum requirements that operators of alternative fuel stations must meet, which will certainly not prevent operators from continuously improving the operation of charging stations and finding more efficient and innovative solutions. Only through the joint efforts of all participants and users in the implementation process will the regulations be effectively enforced, ultimately accelerating the energy transition and shortening the path toward climate neutrality, to which the Republic of Serbia has committed through international agreements and local legislation.

REFERENCES

- [1] Batas-Bjelic, I., Rajakovic, N. National energy and climate planning approach for the Western Balkans: between the carrot and the stick of the EU Green Agenda, *International Journal of Global Environmental Issues*, Vol. 20, No. 2-4, pp. 123-134, 2022. <https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2021.121016>
- [2] Gómez Vilchez, J.J., Julea, A., Lodi, C., Marotta, A. An Analysis of Trends and Policies Promoting Alternative Fuel Vessels and Their Refueling Infrastructure in Europe, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 10, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.897916>
- [3] Zakon o energetici ('Sl. glasnik RS', br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon, 62/2023 i 94/2024), https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [Pristupljeno 02.03.2025]
- [4] Zakon o planiranju i izgradnji ('Sl. glasnik RS', br. 72/2009, 81/2009 - ispr., 64/2010 - odluka US, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - odluka US, 50/2013 - odluka US, 98/2013 - odluka US, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 - dr. zakon, 9/2020, 52/2021 i 62/2023) https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_planiranju_i_izgradnji.html [Pristupljeno 02.03.2025]
- [5] Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, *Regulation - 2023/1804 - EN - EUR-Lex* [pristupljeno 02.03.2025]
- [6] Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/94/oj/eng> [pristupljeno 02.03.2025]
- [7] Marotta, A., Lodi, C., Julea, A., Gómez Vilchez, J.J. European governments' electromobility plans: an assessment with a focus on infrastructure targets and vehicle estimates until 2030, *Energy Efficiency*, Vol. 16, No. 92, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10163-z>
- [8] Vesić: u pripremi zakon o infrastrukturi za alternativna goriva, <https://www.mgsi.gov.rs/lat/aktuelnosti/vesic-u-pripremi-zakon-o-infrastrukturi-za-alternativna-goriva> [pristupljeno 03.03.2025]
- [9] Integrirani nacionalni energetska i klimatski plan Republike Srbije za period do 2030. sa vizijom do 2050. godine, https://www.mre.gov.rs/extfile/sr/1138/INEKP_pre%C4%8Di%C5%A1%C4%87en_tekst_1.8.24.pdf [pristupljeno 02.03.2025]
- [10] Kaplanovic, S., Manojlovic, A., Živojinović, T. Uloga i značaj lokalnih podsticajnih mera u razvoju elektromobilnosti, *Ecologica*, Vol. 30, No 112, pp. 549-556, 2023. <https://doi.org/10.18485/ecologica.2023.30.112.6>
- [11] Mujčinović, M., Vukošić, F. Uspostava infrastrukture za alternativna goriva i potreba uvođenja alternativnih goriva radi smanjenja utjecaja prometa na okoliš, *Paragraf : časopis za pravna i društvena pitanja Pravnog fakulteta Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku*, Vol. 1, No. 1, pp. 95-115, 2017. <https://hrcak.srce.hr/188421> [pristupljeno 02.03.2025]

AUTOR

Miloš Kuzman – Serbian Energy Law Association, Belgrade, milos.kuzman@upes.rs, ORCID [0000-0002-9769-9713](https://orcid.org/0000-0002-9769-9713)

Ubrzanje energetske reforme uvođenjem infrastrukture za alternativna goriva

Rezime - Sve vidljivije posledice klimatskih promena su znak da se intenzivno mora raditi na smanjenju negativnih efekata koje utiču na ubrzano zagrevanje naše planete. Energetske reforme idu u pravcu sve veće prisutnosti obnovljivih izvora energije u energetsom miksu, u kome važno mesto, uz određene preduslove, zauzimaju vozila na obnovljiv i energetski efikasan pogon. Preduslov za značajnije prisustvo vozila na obnovljiv pogon u saobraćaju predstavlja, između ostalog, i garancija sigurnosti snabdevanja alternativnim gorivima. Kako bi alternativna goriva bila dostupna svim korisnicima, potrebno je omogućiti adekvatnu infrastrukturu koja će biti prisutna u potrebnoj meri na celokupnom geografskom području države. U ovom radu biće reči o mogućnostima, preduslovima i obavezama uvođenja infrastrukture za alternativna goriva u Republici Srbiji. Posebna pažnja u radu će biti posvećena električnoj energiji i vodoniku kao gorivima za koje je potrebno u najskorije vreme obezbediti adekvatnu infrastrukturu. Na kraju će biti predloženi zaključci i preporuke u susret donošenju propisa koji se odnose na uvođenje infrastrukture za alternativna goriva.

Ključne reči - alternativna goriva, električna vozila, vodonik, energetska tranzicija

Napredna dijagnostika stanja vetroparkova

Jelena Balšić *, Mileta Žarković **

* Elektromreža Srbije - EMS AD, Elektrotehnički fakultet Univerzitet u Beogradu

** Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Savremeni elektroenergetski sistemi se u sve većoj meri oslanjaju na obnovljive izvore energije, pri čemu vetroelektrane zauzimaju značajno mesto u strukturi proizvodnje. Zbog rada u promenljivim i često nepovoljnim uslovima okoline, vetroagregati su izloženi povećanom mehaničkom i električnom naprezanju, što dovodi do degradacije komponenti i povećanog rizika od kvarova. U tom kontekstu, monitoring stanja i pravovremena dijagnostika predstavljaju ključne alate za obezbeđenje visoke pouzdanosti, raspoloživosti i ekonomske isplativosti vetroparkova. U radu je dat pregled savremenih metoda monitoringa i dijagnostike stanja vetroagregata tokom eksploatacije. Posebna pažnja posvećena je praćenju kritičnih pod sistema, kao što su rotor i lopatice, reduktor, ležajevi, generator, energetske konvertori i sistem upravljanja. Analizirane su najčešće korišćene dijagnostičke tehnike, uključujući analizu vibracija, analizu ulja, termografiju, ultrazvučno ispitivanje, akustičnu emisiju, inspekciju lopatica i analizu električnih signala. Poseban akcenat rada stavljen je na primenu fazi logike u procesu dijagnostike stanja vetroagregata. Fazi logika omogućava integraciju nepreciznih, nepotpunih i heterogenih podataka, kao i uključivanje ekspertskog znanja u vidu lingvističkih pravila. Na taj način moguće je objediniti informacije iz više izvora monitoringa i dobiti jedinstvenu numeričku procenu stanja opreme i verovatnoće kvara. Fazi ekspertski sistemi doprinose pouzdanijem donošenju odluka o hitnosti intervencija, smanjenju vremena zastoja i optimizaciji strategija održavanja. Ovakav pristup omogućava prelazak sa korektivnog i preventivnog, na održavanje zasnovano na stvarnom stanju, čime se produžava radni vek opreme, povećava raspoloživost sistema i smanjuju ukupni troškovi eksploatacije.

Ključne reči – vetroparkovi, monitoring stanja, dijagnostika kvarova, fazi logika

I UVOD

U prethodne dve godine vetroenergetika je učestvovala sa do 20 % ukupne električne energije u Evropi. Sličan udeo u proizvodnji električne energije se očekuje i u bliskoj budućnosti na Balkanu. Pouzdani rad vetroparkova sa minimalnim brojem što kraćih zastoja u radu je od izuzetne važnosti za elektroenergetski sistem. Vetroparkovi su, međutim, sistemi visokog strukturnog i stohastičkog karaktera. Njihovo funkcionisanje uslovljeno je aerodinamičkim nelinearnostima, varijabilnošću resursa i mehaničkim zamorom ključnih komponenti (lopatice, prenosni sklopovi, generatori, konvertori, transformatori). U takvom kontekstu monitoring (kontinuirano praćenje parametara stanja) i dijagnostika (pravovremeno

otkrivanje i izolacija neispravnosti) nisu puka prateća aktivnost održavanja, već primarni mehanizam upravljanja rizikom, raspoloživošću i troškovima životnog ciklusa. Njihova uloga je dvojna: tehničko očuvanje integriteta opreme i stabilnosti rada, i ekonomska redukcija neisporučene energije i optimizacija intervencija.

Savremeni vetroparkovi generišu velike skupove podataka: SCADA (snaga, brzina rotora, uglovi zakretanja, parametri vetra), CMS (vibracije, akustika, temperatura, analiza ulja), kao i rezultate periodičnih *off-line* ispitivanja. Ključni izazovi su poznati: normalizacija na uslove vetra, sinhronizacija različitih frekvencija uzorkovanja, upravljanje nedostajućim podacima i, iznad svega, kontrola kompromisa između osetljivosti i lažnih alarma [1].

Naučni značaj rada ogleda se u formulisanju metodološkog okvira koji na sistematičan način spaja *model-based* i *data-driven* pristupe u dijagnostici vetroparkova. Praktični značaj je poboljšana rana detekcija kvarova koja omogućava planiranje intervencija u povoljnim meteo prozorima, povećanje raspoloživosti uz merljivo smanjenje proizvedene cene električne energije.

II METODOLOGIJA I SIGNALI

Savremeno održavanje vetroelektrana temelji se na dijagnostici stanja, koja se realizuje kroz merenje parametara stanja sistema i obradu rezultata utvrđenim metodama. Ranije strategije održavanja, koje su se oslanjale na isključivo subjektivnu procenu stanja opreme, često su vodile održavanju tek nakon nastanka kvara, sa svim negativnim implikacijama koje takav pristup nosi. Pažljivo odabran i implementiran sistem dijagnostike može pomoći operatoru da izbegne situacije koje dovode do trajnog oštećenja sistema vetroelektrane. Pored toga, takav sistem omogućava vrlo rano otkrivanje oštećenja u početnim stadijumima, što omogućava sprovođenje aktivnosti održavanja pre pojave kvara. Najčešći kvarovi elise su greške u njenoj proizvodnji, a značajno utiču i greške operatora, kao i grmljavine i taloženje leda na lopaticama [2]. Usled ovih uzroka dolazi do pukotina na lopaticama, koje se najčešće javljaju na spojevima. Elisa je postavljena na glavnom ležaju, na kome se javljaju oštećenja i kvarovi karakteristični za kotrljajuće ležajeve, a koji se otkrivaju utvrđenim metodama ispitivanja kotrljajućih ležajeva. Reduktor je deo vetroelektrane kod koga najčešće dolazi do kvara; na reduktoru otkazuju kotrljajući ležajevi, a nešto ređe i zupčanici na kojima nastaju pukotine. Reduktori su generatori buke, te se njihovoj dijagnostici i održavanju mora posvećivati posebna pažnja.

Svaki mehanički defekt na vetroturbini dovodi do promene dinamičkog odziva sistema, što se manifestuje promenom amplitudno-frekventnog spektra vibracija. Osnovni zadatak vibracione dijagnostike je identifikacija tih promena i njihovo povezivanje sa fizičkim uzrokom. Podaci se prikupljaju u toku rada turbine i analiziraju u vremenskom i frekvencijskom domenu [3]. Analiza uključuje RMS (*Root Mean Square*) vrednosti vibracija, spektralne karakteristike, harmonike u cilju detekcije defekata. RMS ukazuje na srednju energetska snagu signala i dobro pokazuje opšti nivo vibracija, ali ne uočava kratke impulse koji ukazuju na rana oštećenja. Svaka komponenta ima svoje karakteristične frekvencije i prisustvo kvara se ogleda u promeni amplituda i faza, kao i u pojavi bočnih spektralnih komponenti (*sideband*).

Pored RMS vrednosti, za ranu detekciju kvarova koriste se statistički indikatori kao što su *Crest Factor* (CF) i *Kurtosis* [4]. Analiza vibracija otkriva: neuravnoteženost rotora, neusaglašenost osovine i oštećenja ležajeva ili zupčanika. Za procenu ukupnog nivoa vibracija rotirajućih mašina koriste se standardi ISO 10816 [International Organization for Standardization, ISO 10816: *Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts*, Geneva, Switzerland: ISO] i ISO 20816 [International Organization for Standardization, ISO 20816: *Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration*], koji definišu granične vrednosti efektivne (RMS) brzine vibracija merene na kućištu mašine. Prikazane vrednosti u Tabeli 1.1 odnose se na industrijske mašine srednje i velike snage i koriste se kao orijentacioni pokazatelji. Za vetroturbine preporučuje se primena ISO 20816-21 i prilagođavanje praga specifičnostima turbine.

Tabela 1. Granične vrednosti za analizu vibracija

RMS vrednost (mm/s)	Stanje
≤ 2.8 mm/s	Normalno
2.8 – 4.5 mm/s	Alarm
≥ 4.5 mm/s	Hitno

Analiza ulja ključna je za ranu dijagnostiku habanja zupčanika i kotrljajućih ležajeva i za otkrivanje zagađenja (voda, prašina, produkti raspada aditiva). Sastav i svojstva ulja se menjaju ranije pre nego što poraste temperatura ili dođe do buke.

Tabela 2. Granične vrednosti za analizu ulja

Parametar	Granica
ISO čestice	> 20/18/15
Gvožđe	>150 ppm
Voda	>0.1% (1000 ppm)
Viskozitet	$\pm 10\%$ od normalne

Temperatura je važna za zaštitu, ali je manje pouzdana za ranu dijagnostiku (na nju utiču ambijent i režim rada) [5]. Praktično: pregrevanje glavnog ležaja najčešće ukazuje na neadekvatno podmazivanje (ili povećano opterećenje/deformaciju), dok je

pregrevanje reduktora najčešće posledica lošeg podmazivanja. Parametri mazivog ulja kao što su nivo viskoziteta, sadržaj vode, broj i identifikacija čestica, pritisak i temperatura mere se radi ranog otkrivanja defekata reduktora i ležaja. Nadzor stanja ulja u vetroagregatima obuhvata on-line senzore i off-line laboratorijsku analizu gde se aproksimativne granične vrednosti predstavljene u Tabeli 2.

Pregrevanje je jedan od najranijih vidljivih signala kvarova u elektro-mehaničkim sklopovima [6]. Termografija i merenje temperature retko daju ranu detekciju kvarova, ali kombinaciji sa analizom vibracija i ulja značajno povećavaju pouzdanost dijagnoze i ubrzavaju donošenje ispravnih odluka u vetroparku. Infracrvena kamera registruje toplotno zračenje tela i prevodi ga u temperaturnu mapu (termogram). Svakoju tački na površini komponenata (ležaj, reduktor, generator, kablovi, konektori, kočnice) pridružuje se temperatura uz korekciju za emisivnost materijala, odbojno zračenje i uticaj rastojanja/atmosfere. Ova analiza otkriva: pregrevane ležajeve, generatore, kablove, loše, slabe električne spojeve i kočnice u neprestanom kontaktu.

Tabela 3. Granične vrednosti za termografiju

Poruka	Granica
Pažnja	25°C iznad normalne
Alarm	40°C iznad ambijentalne
Visok rizik	ležajevi > 70°C

Analizira se oblik i harmonik električnih signala (struje i napona) generatora i pretvarača. Električni problemi često menjaju signale i mogu ukazati na: oštećenje rotorskih šipki, neuravnoteženost između faza i degradaciju izolacije.

Tabela 4. Granične vrednosti za analiza električnih signala

Parametar	Granica
THD(ukupna harmonijska distorzija)	>5–8%
Asimetrija napona	>2%

III FAZI LOGIKA

Monitoringom se prate parametri potrebni za ispravan rad opreme, a u postupku dijagnostike se izmerene vrednosti tih parametara upoređuju sa referentnim vrednostima [7]. U prethodnom poglavlju prikazane su okvirne i preporučene granične, alarmne vrednosti parametara. Na osnovu upoređivanja, moguće je utvrditi nastanak ili napredovanje već postojećeg kvara na opremi. Nedostatak ovakve metode je u tome što ona unosi suviše subjektivnosti kod ocenjivanja rezultata monitoringa. Druge dijagnostičke metode sagledavaju samo rezultate pojedinačnog monitoringa i ne pružaju uvid u celokupno stanje ispitivanog elektroenergetskog elementa, pa samim tim mogu dovesti i do pogrešne odluke. Takođe, u samom procesu dijagnostike stanja opreme često je potrebno upotrebiti i pravila, smernice i preporuke iz IEEE i IEC standarda i iskustva radnih grupa CIGRE i CIRED koja ponekad nisu u potpunosti konzistentna i egzaktna. Pomenute nedostatke postojećih

dijagnostičkih metoda moguće je prevazići primenom naprednih tehnika od kojih je jedna fazi logika (*fuzzy theory*). Dakle, samo sagledavanjem svih prikupljenih podataka u okviru monitoringa, može se proceniti verovatnoća kvara elektroenergetске opreme u razvodnom postrojenju. Za element elektroenergetskog sistema moguće je formirati Fazi ekspertske sisteme koji bi ukazivali na trenutno stanje i verovatnoću kvara odnosno hitnost intervencije na njima u cilju sprečavanja pojave kvara. Mnogi socijalni, tehnički i ekonomski sistemi ne raspolažu potpuno preciznim ulaznim podacima, već podacima sa izvesnom dozom neizvesnosti. Ljudi u takvim uslovima koriste intuiciju, iskustvo i subjektivnu procenu. Zadatak fazi teorije je da omogućiti formalno-matematički aparat koji može da tretira neodređenost i subjektivnost na sistematičan način. Osnovu ove oblasti čini teorija fazi skupova i njena primena u vidu fazi logike. Fazi logika omogućava aproksimativno rezonovanje i čini osnovu ekspertskih sistema, kontrole i donošenja odluka u uslovima nepotpunih ili nejasnih informacija. Fazi logika predstavlja snažan alat za formalizaciju neodređenosti i subjektivnosti u ljudskom rezonovanju. Njena prednost je mogućnost da modeluje složene sisteme i da daje približna, ali praktično upotrebljiva rešenja u realnom vremenu. Zahvaljujući primeni u tehnici, ekonomiji i društvenim naukama, fazi logika je postala most između ljudskog načina razmišljanja i mašinskog procesiranja informacija.

Postoje četiri faze u kreiranju svakog fazi ekspertskog sistema:

- fazifikacija – pretvaranje ulaznih podataka u fazi vrednosti,
- inferencija – procena pravila,
- agregacija – kombinacija izlaza i
- defazifikacija – pretvaranje fazi izlaza u jasan rezultat.

Na osnovu statistike kvarova kod vetroagregata i na osnovu vrste kvarova na koje ukazuju nabrojani parametri, ekspertski sistem se može podeliti na nekoliko podsistema koji se odnose na: analizu ulja, vibracija, ultrazvučno testiranje, akustično emitovanje, inspekciju lopatica, analizu električnih signala i termografsku sliku. Predložena dva ekspertiska podsistema sa svojim izlazima ujedno ukazuju na stanje i na verovatnoću nastanka kvara na pojedinim delovima vetroagregata Slika 2. Izlazi svakog ekspertskog podsistema se množe sa težinskim faktorima (w_i). Izlazi pomnoženi sa težinskim faktorima se sabiraju i dele sa brojem fazi podsistema i na taj način se dobija konačni izlaz. Ako težinski faktori uzimaju svi vrednost jedan, onda su oba podsistema podjednako važna. Odabirom vrednosti težinskih faktora moguće je pojačati neki od izlaza podsistema i tako dati na važnosti konkretnom delu vetroagregata. Pojačanjem težinskih faktora određenog podsistema, odgovarajući deo vetroagregata ima veći udeo u kompletnom stanju.

IV EKSPERTSKI SISTEMI

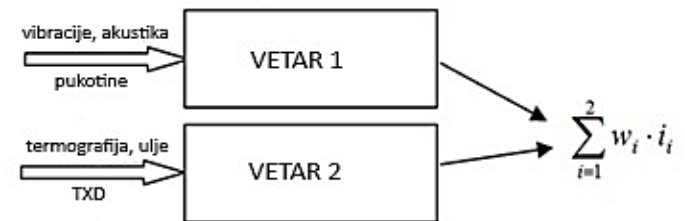
Prvi fazi ekspertski podsistem (Slika 1.) ima za ulaze:

- vibrosenzor,
- akustiku i
- pukotine.

Drugi fazi ekspertski podsistem ima za ulaze:

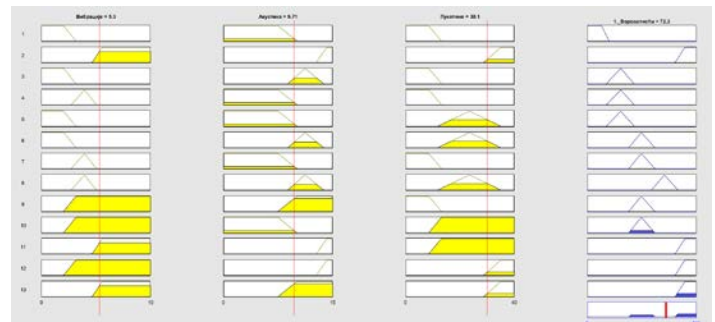
- termografija,

- ulje i
- THD (ukupna harmonijska distorzija).



Slika 1. Ekspertski sistem sa dva fazi ekspertiska podsistema

U skladu sa opisanim algoritmom metode primene fazi logike prvi korak u kreiranju fazi ekspertskog sistema je fazifikacija ulaza i izlaza. Fazifikacija (*fuzzification*) je proces u kome se realne ulazne vrednosti pretvaraju u fazi vrednosti, tj. stepene pripadnosti fazi skupovima koji imaju određena lingvistička svojstva. Fazifikacija naprosto modifikuje signale ulaza tako da mogu biti pravilno protumačeni i upoređeni sa pravilima u bazi pravila. Fazifikacija se takođe zove fazi uklapanje (*fuzzy matching*), kojim se računa sa kojim stepenom istinitosti se ulazni podaci poklapaju sa uslovima u fazi pravilima. Drugim rečima, ispituje se njihova pripadnost lingvističkim vrednostima definisanim fazi skupovima. Ovo omogućavaju upravo funkcije pripadnosti, koje u stvari mapiraju stepen istinitosti neke tvrdnje. Funkcija pripadnosti predstavlja kontinualno merilo sigurnosti da li je promenljiva klasifikovana kao ta lingvistička vrednost. Dakle, fazifikacija omogućava sistemu da radi sa nejasnim ili nepreciznim informacijama kao što su „sumnjivo“, ili „obrat pažnju“. Funkcije pripadnosti koje se najčešće koriste jesu trougaona i trapezoidna i mogu se uočiti za ulaze na Slici 2.



Slika 2. Grafički prikaz aktivacije pravila u MATLAB-u

Izlaz oba podsistema je predstavljen pomoću pet funkcija pripadnosti koje su u vezi sa porukama o potrebnim intervencijama na vetroparku:

- dobro stanje
- pažnja,
- sumnjivo
- alarm i
- hitna intervencija.

Izlazi svih fazi ekspertskih sistema su u opsegu od 0 do 1 ili od 0% do 100% verovatnoće kvara.

Sledeći korak u algoritmu jeste formiranje baze pravila. U fazi inferencije (*Inference*) primenjuju se pravila „ako – onda“ na

dobijene fazi vrednosti. Ova faza omogućava sistemu da na osnovu definisanih pravila proceni kakva bi trebalo da bude reakcija ili izlaz. Formiranje pravila je u obliku: *if* <uslov> *then* <posledica>, s tim što je moguće imati više paralelnih *if*-ova koji se povezuju veznicima „and“, „or“ i „not“, tako da se pomoću njih mogu graditi složena tvrđenja. Redanjem pravila formira se baza pravila (Slika 3) koja se koristi kod fazi rezonovanja. Baza pravila se formira za svaki fazi ekspertske podsistem i sistem. Pravila se formiraju tako da budu logična i u skladu sa tabelama u vezi sa tumačenjem vrednosti ulaznih parametara.

```

1. If (Вибрације is добро) and (Акустика is добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is добро) (1)
2. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is опасно) and (Пукотине is опасно) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)
3. If (Вибрације is добро) and (Акустика is сумњиво) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is пажња) (1)
4. If (Вибрације is сумњиво) and (Акустика is добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is пажња) (1)
5. If (Вибрације is добро) and (Акустика is добро) and (Пукотине is сумњиво) then (1_Вероватноћа is пажња) (1)
6. If (Вибрације is добро) and (Акустика is сумњиво) and (Пукотине is сумњиво) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
7. If (Вибрације is сумњиво) and (Акустика is добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
8. If (Вибрације is сумњиво) and (Акустика is сумњиво) and (Пукотине is сумњиво) then (1_Вероватноћа is аларм) (1)
9. If (Вибрације is not добро) and (Акустика is not добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
10. If (Вибрације is not добро) and (Акустика is добро) and (Пукотине is not добро) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
11. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is опасно) and (Пукотине is not добро) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)
12. If (Вибрације is not добро) and (Акустика is опасно) and (Пукотине is опасно) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)
13. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is not добро) and (Пукотине is опасно) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)

```

Slika 3. Baza pravila za fazi ekspertske podsistem

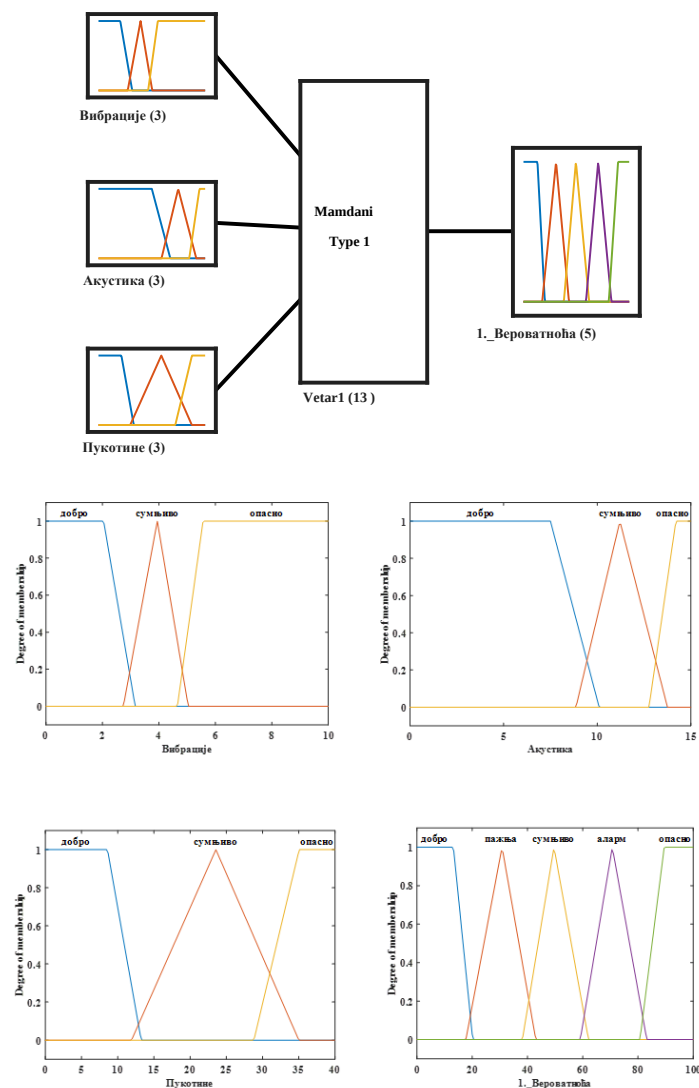
Postoje različiti tipovi i njihove modifikacije zaključivanja, inferencije u fazi logici, ali dva tipa zaključivanja koja su najzastupljenija su *Mamdani* i *Sugeno*. Kod oba tipa zaključivanja za neku unapred zadatu vrednost ulazne promenljive (koja se dobija merenjem, posmatranjem ili subjektivnom procenom) prolazi se kroz sva definisana pravila, tj. posmatra se koliko ima istine u svakoj pojedinačnoj tvrdnji. Tako se određuje vrednost jačine pravila. Kod zaključivanja se računa fazi skup iz zaključka fazi pravila u zavisnosti od jačine odgovarajućeg pravila. Postoje dva opšta pristupa koja se koriste kod Mamdani tipa zaključivanja: metod odsecanja i metod skaliranja, dok se kod Sugeno tipa zaključivanja izlaz fazi pravila dobija kao funkcija ulaznih fazi promenljivih koje u tom pravilu figurišu. Agregacija (*aggregation*) kombinuje rezultate više fazi pravila u jedan zajednički fazi izlaz. Cilj je da se dobije konačan fazi opis izlazne varijable pre defazifikacije. Zbog toga što se fazi sistem zasniva na pravilima koja se delimično preklapaju, određene ulazne vrednosti za sistem mogu da aktiviraju i više pravila odjednom pa je agregacija potrebna da kombinuje rezultate inferencije za svako aktivirano pravilo i oformi jedinstveni fazi skup za izlaznu promenljivu. U ovom radu je odabran Mamdani tip zaključivanja jer kao rezultat agregacije formira fazi skup čime se unosi neizvesnost u izlazu. Agregacija uzima sve prethodno isečene ili skalirane izlazne funkcije pripadnosti i sjedinjava u jednu izlaznu promenljivu koja predstavlja složenu figuru. Primer aktivacije pravila u grafičkom okruženju MATLAB je prikazan na slici 2.

Sledeći korak algoritma primene fazi logike je defazifikacija koja generiše konačni rezultat sistema. To je korak koji daje jasan i upotrebljiv rezultat na osnovu fazi logike. Najčešće korišćena metoda defazifikacije koja je korišćena i u ovom radu je se centar gravitacije (*centroid / center of gravity*).

V REZULTATI

Kompletan postupak kreiranja fazi ekspertske sistema i primene fazi logike moguće je provesti kroz softversku alat MATLAB nudi alat *Fuzzy Logic Toolbox* koji omogućava jednostavno kreiranje fazi logičkih sistema putem grafičkog interfejsa. Kao

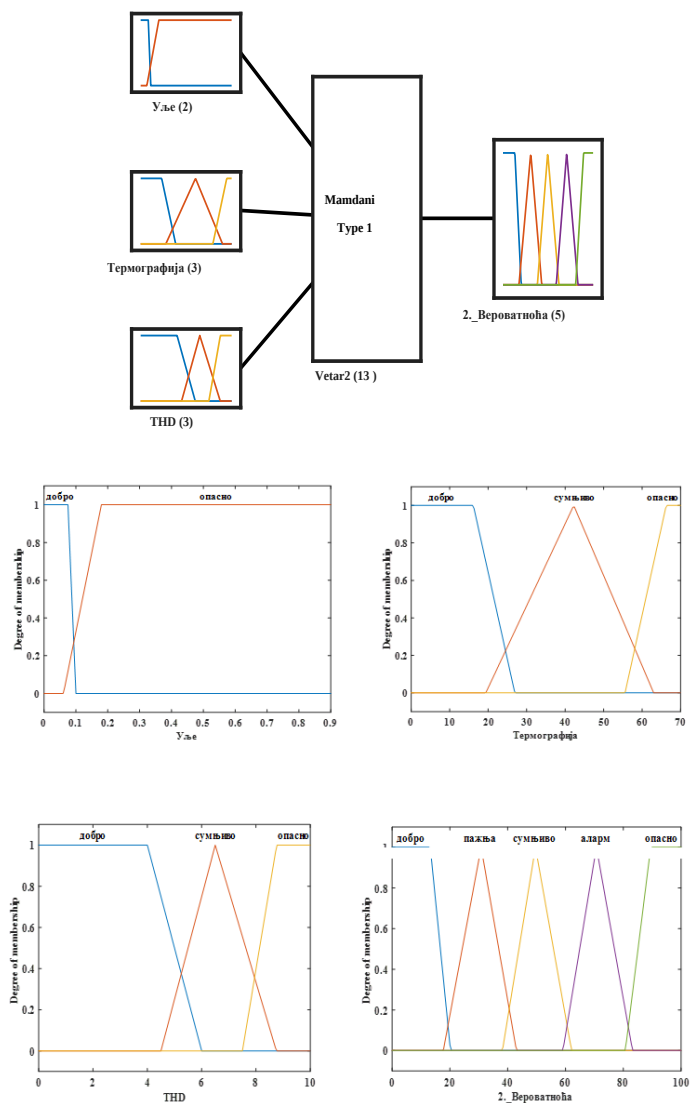
što je već pomenuto, u ovom radu realizovana je primena fazi logike na vetroagregatu kroz dva podsistema — VETAR 1 (mehanički indikatori na Slici 4) i VETAR 2 (termo/elektro indikatori na Slici 5). Za potrebe analize konstruisan je FIS model sa jasno definisanim ulaznim i izlaznim promenljivama, funkcijama pripadnosti i bazom pravila. Posebna pažnja je posvećena grafičkim prikazima. Ovi prikazi su ključni za intuitivno razumevanje ponašanja sistema, vizuelizaciju nelinearnosti, zasićenja i graničnih zona u kojima dolazi do nagle promene izlazne procene rizika. Vizuelizacija preko *Surface Viewer*-a dodatno olakšava izbor pragova i tumačenje međuzavisnosti: na presecima površi (držanjem jedne promenljive konstantnom) vide se karakteristične „S-krive“ koje opisuju kako sistem postepeno „uključuje“ sve više pravila. Takvi preseki su pogodni za obrazlaganje operativnih smernica, npr. koja kombinacija vibracija i akustike zahteva dalju dijagnostiku, ili koja kombinacija termografije i THD ukazuje na elektro-tehnički problem.



Slika 4. Fazi ekspertske podsistem sa ulazima i izlazom i funkcije pripadnosti za ulaz i izlaz podsistema Vetar 1

Vizuelni prikaz “površi” (surface) izlaza sistema kao funkciju dva izabrana ulaza je 3D slika 6. Površ je 3D grafikon koji

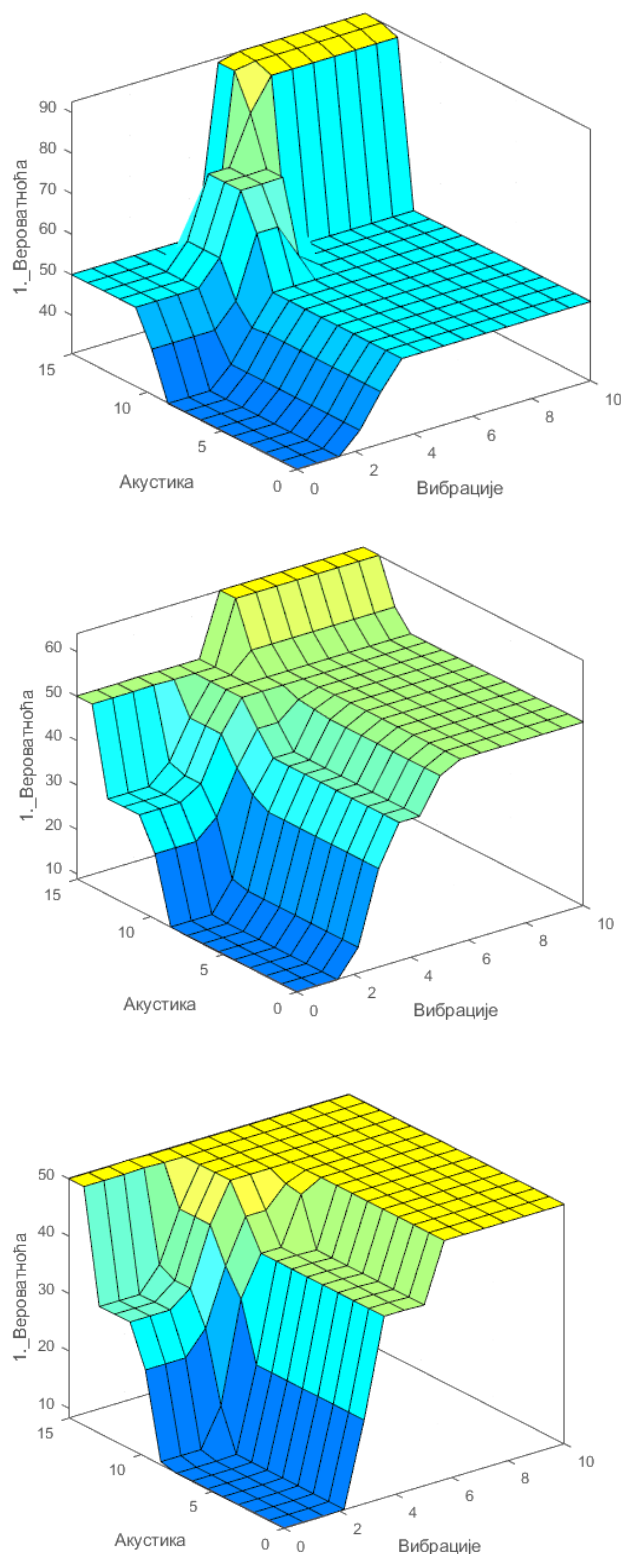
pokazuje kako se izlaz sistem menja kada se dva ulaza menjaju u svojim domenima, dok se ostali ulazi zadržavaju fiksnim referentnim vrednostima. Slike 6-8 ukazuju na promenu mehaničke verovatnoće kvara pri promeni parametara akustike i vibracija, a pri čemu je parametar pukotine fiksiran. Na Slici 6 se može uočiti logično povećanje vrednosti verovatnoće kvara na z-osi pri većem parametru pukotine. Na svim slikama pri povećanju parametra akustike i vibracija povećava se i verovatnoća kvara.



Слика 5. Фазни експертски подсистем са улазима и излазом и функције припадности за улаз и излаз подсистема Vetar 2

Табеларни пример вредности улаза и излазних процена у раду служи само као илустрација бројичке конзистентности и праћења очекиваног тренда (раст улаза → раст излазне вероватноће) и не носи тежиште интерпретације. Главни увиди потичу управо са приказаних површи и функција припадности: оне омогућавају да се визуелно идентификују зоне ниског ризика, транзиционе зоне појачане осетљивости и високоризичне зоне, како у подсистему VETAR 1, тако и у VETAR 2. На овај начин слике у раду не представљају само илустрацију, већ и доказ да је предložени фазни приступ погодан за тумачење слојених, међусобно зависних

индикатора стања ветроагрегата и за подршку доношењу одлука у мониторингу и дијагностици.



Слика 6. Вероватноћа у функцији акустике (x) и вибрација (y) при фиксном трећем улазу (38, 25 и 5).

Tabela 5. Primer vrednosti ulaza i izlaznih procena

Ulazi	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 4	Pr. 5	Pr. 6
Vibracije	0,69	2,11	2,78	2,82	6,15	8,78
Akustika	0,71	3,43	3,5	10,8	9,02	14,7
Pukotine	2,92	11,6	12,1	27,7	33	38,5
Izlaz 1	8,22%	16,4%	34,1%	54,1%	73,4%	92,6%
Ulje	0,017	0,081	0,091	0,86	0,643	0,86
Termografija	3,35	10,1	12,3	19,7	27,2	68,1
THD	0,48	0,73	1,37	3,51	1,37	9,8
Izlaz 2	8,31%	20,4%	33,6%	58,1%	71%	93,4%
Izlaz	8,26%	18,4%	33,85%	56,1%	72%	93%

VI ZAKLJUČAK

Sistematična primena vibracione analize, analize ulja, termografije, ultrazvuka, akustične emisije, inspekcije lopatica i analize električnih signala omogućava rano prepoznavanje degradacija na kritičnim komponentama i planirano održavanje pre nastanka skupih kvarova i dugih zastoja. Suočeni sa stohastičnim opterećenjima i režimskim zavisnostima, ovi metodi daju najveću vrednost kada su normalizovani na uslove rada i kada se njihovi rezultati tumače u međusobnoj fuziji. Doprinos rada je primena fazi logike kao transparentnog, inženjerski razumljivog okvira za integraciju takvih heterogenih i delimično neodređenih informacija. Predložena arhitektura sa dva podsistema (mehanički i termo/elektro) omogućava jasno razdvajanje uzročno-posledičnih veza i efikasnu raspodelu težina ukupne procene stanja. Predložena metodologija je testirana na mogućim ulazima monitoringa radi provere logičnosti. Rad utvrđuje da je fazi logika pogodna i efektivna za tumačenje složenih, međusobno zavisnih indikatora stanja vetroagregata. Uspešno spaja inženjersku intuiciju i formalizam, obezbeđujući da se neodređenost i varijabilnost svakodnevne eksploatacije prevedu u jasnu meru rizika koja podržava preventivno održavanje, povećanje raspoloživosti i smanjenje operativnih

rizika. Takav pristup predstavlja realnu osnovu za tehnički zreliji i ekonomski održiviji rad vetroparkova, a ujedno i platformu za dalje unapređenje analitike, integraciju novih senzora i uspešnu koordinaciju održavanja.

LITERATURA

- [1] Antunović, R., Halep, A. Diagnostic of wind power., Mašinstvo, Vol. 4, No. 13, pp. 203-210, 2016.
- [2] Son, J., Kang, D., Boo, D., Ko, K. An experimental study on the fault diagnosis of wind turbines through a condition monitoring system, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, No. 12, pp. 5573-5582, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1103-y>
- [3] Liu, W.Y., Tang, B.P., Han, J.G., Lu, X.N., Hua, N.N., He, Z.Z. The structure health condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 466-472, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.005>
- [4] Lu, B., Li, Y., Wu, X., Yang, Z. A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, in Proc. 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Lincoln, NE, USA, 24-26 June 2009. <https://doi.org/10.1109/PEMWA.2009.5208325>
- [5] Hossain, M.L., Abu-Siada, A., Mueen, S.M. Methods for advanced wind turbine condition monitoring, Energies, Vol. 11, No. 5, pp. 1309, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11051309>
- [6] Niemann, H., Poulsen, N.K., Mirzaei, M., Henriksen, L.C. Fault diagnosis and condition monitoring of wind turbines, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 32, No. 4, pp. 586-613, 2017. <https://doi.org/10.1002/acs.2782>
- [7] Žarković, M. Monitoring i dijagnostika stanja razvodnog postrojenja na bazi fazi modela stanja visokonaponske opreme, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2018.

AUTORI

Jelena Balšić – diplomirani inž.elektrotehnike i računarstva, EMS AD, jelenabalsic02@gmail.com, ORCID [0009-0006-3639-1762](https://orcid.org/0009-0006-3639-1762)

Dr Mileta Žarković – vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.rs, ORCID [0000-0001-5855-6595](https://orcid.org/0000-0001-5855-6595)

Advanced Condition Diagnostics of Wind Farms

Abstract – Modern power systems increasingly rely on renewable energy sources, with wind power plants playing a significant role in the generation mix. Due to operation under variable and often harsh environmental conditions, wind turbines are exposed to increased mechanical and electrical stresses, which lead to component degradation and an elevated risk of failures. In this context, condition monitoring and timely fault diagnostics represent essential tools for ensuring high reliability, availability, and economic viability of wind farms. This paper presents an overview of state of the art methods for condition monitoring and fault diagnostics of wind turbines during operation. Special attention is devoted to the monitoring of critical subsystems, including the rotor and blades, gearbox, bearings, generator, power electronic converters, and control system. The most commonly applied diagnostic techniques are analyzed, such as vibration analysis, oil analysis, thermography, ultrasonic testing, acoustic emission, blade inspection, and electrical signal analysis. Particular emphasis is placed on the application of fuzzy logic in the wind turbine condition diagnostics process. Fuzzy logic enables the integration of imprecise, incomplete, and heterogeneous data, as well as the incorporation of expert knowledge through linguistic rules. In this way, information from multiple monitoring sources can be unified to obtain a single numerical assessment of equipment condition and failure probability. Fuzzy expert systems contribute to more reliable decision-making regarding the urgency of maintenance actions, reduction of downtime, and optimization of maintenance strategies. Such an approach supports the transition from corrective and preventive maintenance to condition-based maintenance, thereby extending equipment lifetime, increasing system availability, and reducing overall operating costs.

Index terms – Wind farms, Condition monitoring, Fault diagnostics, Fuzzy logic

Off-grid solarno napajanje rezonantnog vibracionog dozatora sa elektromagnetnom pobudom

Željko V. Despotović, Uroš Ilić

Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Srbija

Rezime - Vibracione hranilice ili dozatori (popularno na zvani i kao “vibracioni fideri”) sa elektromagnetnom pobudom koji su prilagođeni za rad u režimu mehaničke rezonance su se pokazali kao veoma energetski efikasan način za doziranje rasutih i zrnastih materijala. Standardni mrežni rezonantni vibracioni fideri se napajaju iz mrežnog napajanja 230 V, 50 Hz pri čemu se vrši pretvaranje mrežnog napona u jednosmerni napon 300 Vdc, a iz ovog napona se odgovarajućim DC/AC pretvaračem napaja namotaj pobudnog elektromagneta vibracionog dozatora. U ovom radu je prikazan “off-grid” solarno napajan sistem vibracionog fidera u kojem se pored PV panela koristi baterijska banka 24Vdc. Punjenje baterijske banke se ostvaruje sa solarnim MPPT regulatorom dok se prilagođenje DC napajanja izlaznog DC/AC pretvarača vibracionog dozatora ostvaruje DC/DC pretvaračem podizačem napona 24 Vdc/300 Vdc. U radu su prikazani metodologija i rezultati proračuna predloženog sistema kao i DC/DC pretvarača. Tehničko rešenje predstavljeno u ovom radu bi imalo potencijalnu mogućnost primene u sistemima za doziranje hrane na ribnjacima, doziranje zrnaste hrane za ptice u rezervatima i ruralnim sredinama i sličnim aplikacijama gde se zahteva doziranje sitnozrnastih materijala.

Ključne reči - solarni sistemi, off-grid napajanje, vibracioni dozatori, mehanička rezonanca, DC/DC pretvarač, DC/AC pretvarač

I UVOD

Prerađivačka i proizvodna industrija neprestano se razvijaju kako bi zadovoljile zahteve kupaca. Da bi unapredili proizvodne procese proizvođači integrišu vibracione dozatore i hranilice u svoje aplikacije. Dodatnu motivaciju predstavljaju optimizacija proizvodnih procesa u cilju dobijanja ekonomične i adekvatne alternative manuelnim operacijama i manuelnom radu. Ovi mehanički uređaji su relevantni za sve industrije, uključujući proizvode široke potrošnje, medicinsku, farmaceutsku, automobilsku, proizvodnju električnih komponenti, industrije hrane i sl., takođe se može reći da su u ovim oblastima vibracioni dozatori i hranilice postali standardna i neodvojiva komponenta fleksibilne automatizacije.

U novije vreme se ove vibracione naprave sve više koriste i u aplikacijama za doziranje krupnozrnih i sitnozrnih materija, koje čine osnovu ishrane životinja u rezervatima i riba u jezerima i morskom priobalju. U slučajevima kada je mrežno napajanje dostupno vibracioni sistem za doziranje hrane predstavlja neprekidni sistem za dopremanje i doziranje. U slučajevima kada mrežno napajanje nije dostupno (ruralne sredine, rezervati,

ribnjaci na jezerskim pontonima i sl.) nameće se korišćenje obnovljivih izvora energije (OIE), a pre svih sunca, vetra, a na morskim priobaljima i energija plime i oseke. U ovim slučajevima se kao dodatna oprema koriste uređaji energetske elektronike kako bi se obezbedila besprekidnost i autonomija rada ovih sistema.

U suštini mehanički deo sistema za doziranje je baziran na korišćenju vibracija za transport pomenutih zrnastih ili rasutih materijala. Ukoliko se primeni rad u mehaničkom rezonantnom opsegu uz ograničenje amplitude vibracija na razumne vrednosti, onda je moguće postići relativno malu potrošnju pogonskih vibracionih jedinica. Inače u ovim sistemima se po pravilu koriste elektromagnetni vibracioni aktuatori koji vrše male vibracione pomeraje ($0.2 \div 5$) mm pobuđujući noseći transportni deo kojim se vrši doziranje rasutog materijala. Primenom energetske pretvarače je moguće ostvariti kontrolu amplitude i učestanosti vibracija. Ova dva parametra su najbitniji za optimizaciju vibracionog transporta.

U poslednje dve decenije uzgoj ribe je na svetskom postao jedan od ključnih faktora u proizvodnji hrane za čovečanstvo. Pored uzgoja ribe nametnuo se kao njegov neodvojivi deo i sistem za praćenje kvaliteta vode koji igra veoma važnu ulogu u cilju uravnoteženja i održavanja stanja ribnjaka za rast i zdravlje ribe u njemu [1-3].

Usled porasta potražnje za ribom i morskim plodovima, savremena tehnologija je omogućila uzgoj hrane kako u obalnim vodama, tako i na otvorenom okeanu. Ovaj proces se naziva akvakultura – metoda koja se primenjuje za proizvodnju hrane i komercijalnih proizvoda, ali i za obnovu divljih zaliha, prirodnih staništa i ugroženih populacija. Prema tipu vode, akvakultura se deli na dve glavne vrste: morsku i slatkovodnu..

U oba prethodna slučaja, svako kašnjenje u procesu hranjenja može uticati na kvalitet ribe kao što su veličina, manja zrelost i stanje. Iz ovih razloga se teži automatskim sistemima hranjenja, kojima se postiže savršeno rešenje za pružanje tačne i isplative hrane u svakom ribnjaku. Implementacijom automatskog sistema hranjenja se postiže pravilno, efikasno i energetski održivo hranjenje [4].

Pored ribnjaka postoje i drugi sistemi hranjenja koji se odnose na automatizovanu i kontrolisanu ishranu ptica i drugih životinjskih vrsta u ruralnim sredinama i rezervatima. I u ovim slučajevima itekako imaju smisla automatizovani i inteligentni sistemi hranjenja. U referenci [4] je prikazano istraživanje koje se fokusira na proučavanje različitih vrsta inteligentnog hranjenja i

razvoj mašina i mehanizama pogodnih za implementaciju strategije hranjenja. Studija prikazana u referenci [5] pruža informacije za unapređenje opreme koja se koristi za hranjenje u agrikulturi i akvakulturi počev od opšte automatizacije do inteligentnog upravljanja.

U većini prethodno opisanih slučajeva radi se o prehrani koja ima sitno- zrnasti karakter tako da se u automatizovanim sistemima optimizacija procesa ishrane svodi na inteligentnu kontrolu transporta i doziranja rasutih materijala. U ovim sistemima se najčešće koriste tračni, pužni i vibracioni dozatori.

Vibracioni dozatori sa elektromagnetnom pobudom u pomenutim sistemima su postali naročito interesantni za ostvarivanje zadatog gravimetrijskog protoka i doziranja rasutih materijala. Ostvarivanjem slobodnih vibracija promenljivog intenziteta i učestanosti u širokom opsegu, posredstvom elektromagnetnog vibracionog aktuatora, podesnog energetskog pretvarača i pripadajućeg kontrolera se obezbeđuje kontinualni transport i precizno doziranje rasutih materijala pri različitim eksploatacionim uslovima.

Najveći problem je taj što bilo da se radi o ribnjacima ili udaljenim rezervatima gde žive neke retke životinjske vrste, za napajanje pomenute opreme za kontrolu hranjenja, obično ne postoji elektroenergetska napojna mreža, tako da je jedini način održivosti ovih automatizovanih sistema korišćenje OIE, pre svega vetra i sunca. Obično se napajanje ovih automatizovanih sistema i sistema za merenje kvaliteta bilo vode ili vazduha, ostvaruje iz fotonaponskih panela i baterija, Ovo dalje podrazumeva korišćenje energetskih sistema za pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju. Obzirom da su ovi sistemi na udaljenim i nepristupačnim lokacijama, onda se može govoriti o "off-grid" sistemima specijalne namene.

Danas se kao standardni poluprovodnički izlazni stepeni snage za kontrolu vibracionih dozatora koriste tiristori i trijaci. Njihova upotreba podrazumeva korišćenje mrežnog napajanja i fazne kontrole. Obzirom da je učestanost napojne mreže fiksna, promenom faznog ugla, moguće je postići jedino podešavanje amplitude oscilacija dozatora ali ne i njegove učestanosti vibracija. Učestanost vibracija ima značajan uticaj na optimizaciju vibracionog transporta i doziranja rasutih materijala[6].

Tranzistorskim pretvaračima sa strujnom kontrolom je moguće ostvariti amplitudsku i (ili) frekventnu kontrolu vibracionih dozatora posredstvom jednosmernog ulaznog napajanja koji se upravo koristi "off-grid" solarnim sistema, kod kojih inače mrežno napajanje nije dostupno. Veoma bitna činjenica je da se optimizacija transporta pomenutih rasutih materijala može ostvariti amplitudsko-frekventnom kontrolom. Frekventna kontrola obezbeđuje rad vibracionih dozatora u oblasti mehaničke rezonance. Rad u rezonantnom opsegu je energetski povoljan, obzirom da se tada ima minimalna potrošnja energije [7-10].

U radu je predstavljeno jedno moguće rešenje amplitudsko-frekventne kontrole elektromagnetnih vibracionih dozatora posredstvom strujno kontrolisanog tranzistorskog energetskog pretvarača podizača koji se napaja iz jednosmernog baterijskog napona 24Vdc a na izlazu daje napon od 300Vdc koji služi za

napajanje vibracionog kontrolera baziranog na IGBT prekidačima.

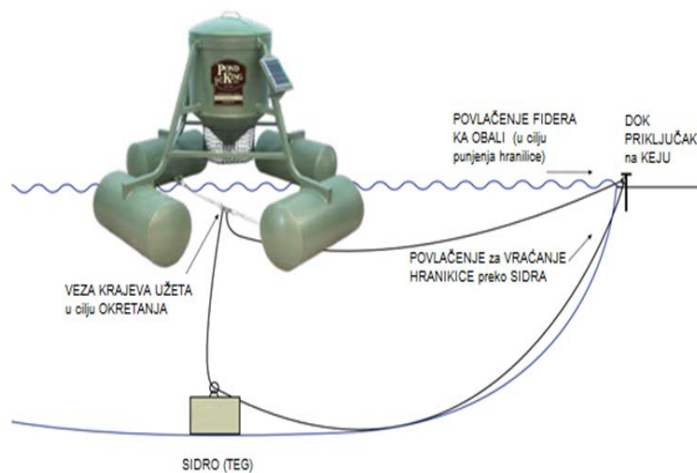
Punjenje baterijske banke se ostvaruje sa solarnim MPPT regulatorom dok se prilagođenje DC napajanja izlaznog DC/AC pretvarača vibracionog dozatora baterijskom napajanju ostvaruje DC/DC pretvaračem podizačem napona 24Vdc/300Vdc. U radu su prikazani metodologija i rezultati proračuna predloženog sistema kao i DC/DC pretvarača. Tehničko rešenje predstavljeno u ovom radu bi moglo imati potencijalnu mogućnost primene u "off-grid" sistemima za doziranje hrane na ribnjacima, doziranje zrnaste hrane za ptice u rezervatima i ruralnim sredinama i sličnim aplikacijama gde se zahteva doziranje sitnozrnastih materijala.

II PRIMERI DOZATORA I HRANILICA IZ PRAKSE

Uzgoj ribe podrazumeva veliku stavku u budžetu korisnika, naročito kada se radi o ručnom hranjenju ribe. Takođe, količina hrane koja se dozira, se obično razlikuje od one koja je potrebna, i ova neusklađenost je posledica ljudske greške. Ovo može dovesti do pothranjenosti ili prehranjenosti ribe. Stoga su automatske hranilice za ribu adekvatno rešenje i tako su dimenzionisane da distribuiraju tačnu količinu hrane u određeno vreme za datu lokaciju. Na ovaj način, automatizovan uređaj za ishranu koji je hrani ribu u tačno preciziranim trenucima i sa propisanom količinom može sprečiti preterano hranjenje ribe [1], [11].

Štaviše, svako kašnjenje u procesu hranjenja može uticati kvalitet ribe kao što je veličina ribe, manja zrelost i stanje ribe. Automatski sistem hranjenja je savršeno rešenje za pružanje tačne i isplative hrane za svaki ribnjak. Implementacijom automatskog sistema hranjenja moglo bi se postići pravilno i efikasno hranjenje [4].

Na slici 1 je dat principski prikaz plutajuće hranilice za ribe proizvodnje POND KING [12]. Plutajuća hranilica se za neku određenu lokaciju vezuje za podvodno sidro i za obalu, preko odgovarajućih užadi.

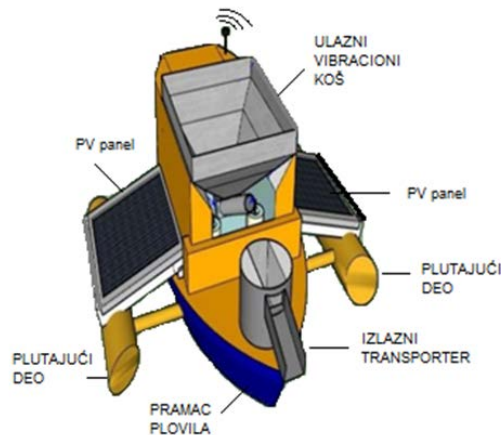


Slika 1. Plutajuća solarna hranilica sa užadima [12]

Užad su tako povezana da se plutajuća hranilica može nesmetano pomerati oko tačke fiksiranja koja se nalazi na obali ili keju. Napajanje opreme i pogona za doziranje se ostvaruje solarnim

panelom odgovarajuće snage i pripadajućim uređajima energetske elektronike (MPPT solarni punjač).

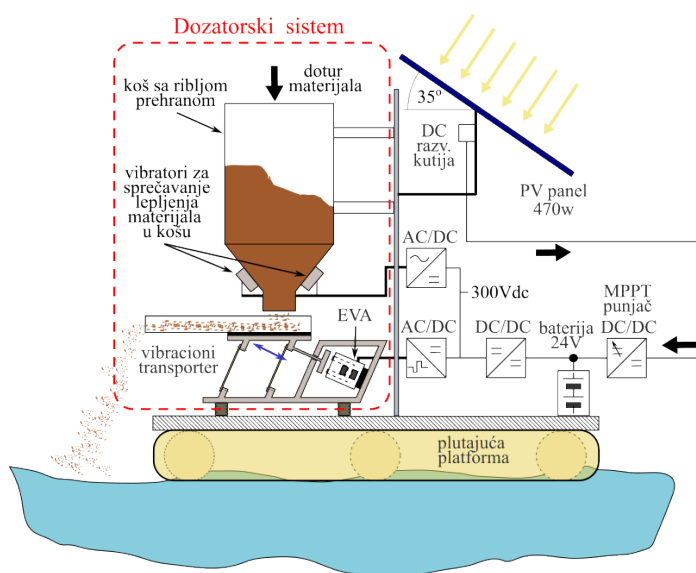
U referenci [1] je prikazana mobilna solarna hranilica (prikaz na Slici 2) koja dodatno može da posredstvom odgovarajuće opreme vrši merenja i proveru kvaliteta vode. Mobilna hranilica se može daljinski kontrolisati ili automatizovati u zavisnosti od lokacije i područja koje pokriva.



Slika 2. Mobilna plutajuća solarna hranilica [1]

III PREDLOŽENO OFF-GRID SOLARNO NAPAJANJE VIBRACIONOG DOZATORA HRANILICE

Na slici 3 je dat prikaz vibracione hranilice koja se napaja posredstvom "off-grid" sistema korišćenjem sunčeve energije i rezonantnog vibracionog transportera sa elektromagnetnom pobudom. Ovaj transporter u ovoj konfiguraciji ima ulogu vibracionog dozatora i služi za "izvlačenje" i doziranje sitnozrnog materijala (riblja hrana) prema utvrđenom vremenskom algoritmu i sekvencama ishrane. Na obodu koša su postavljeni vibracioni aktuatori koji posredstvom vibracija obezbeđuju sprečavanje taloženja i lepljenja materijala pri dnu.



Slika 3. "Off-grid" solarno napajanje vibracione plutajuće hranilice

Elektromagnetna pobuda vibracionog transportera se napaja posredstvom DC/AC pretvarača specijalne namene koji generiše pobudne strujne impulse i obezbeđuje pobudu vibracionog transportera na mehaničkoj rezonantnoj učestanosti. Obzirom da je mehanička rezonantna učestanost promenljiva jer se menja količina materijala na transportnom koritu, potrebno je za optimizaciju rada vibracionog transportera obezbediti promenu učestanosti pobudnih impulsa. Pored promene učestanosti ovaj energetski pretvarač mora da obezbedi i podešavanje trajanja strujnih impulsa za pobudu elektromagneta, a na ovaj način i amplitudu oscilacija vibracionog korita, odnosno gravimetrijski (maseni) protok materijala u hranilici. Ovaj tip DC/AC energetskog pretvarača je detaljno opisan u referencama [13-18].

Pobuda elektromagnetnih vibracionih aktuatora na obodu koša se ostvaruje DC/AC pretvaračem fiksne učestanosti i promenljive amplitude pobudne sile. Ovaj sistem radi u nad-rezonantnom opsegu i uključuje se povremeno po potrebi, kada dođe do taloženja i lepljenja materijala po obodu koša.

Snaga potrebna za doziranje sitnozrnog materijala je oko 25 W pri impulsnom naponu pravougaonog oblika amplitude 300 V. Pri ovoj maksimalnoj snazi se obezbeđuje protočnost materijala koja zadovoljava zahteve izvlačenja i doziranja riblje hrane (≈ 5 kg/min). Obzirom da se radi o rezonantnom pogonu, ova snaga se troši na pokrivanje gubitaka od kojih su dominantni gubici u namotaju elektromagnetnog aktuatora. Od ukupnih gubitaka u sistemu ovi gubici iznose oko 85%. Obzirom da se vibracioni mehanički sistem napaja iz DC/AC pretvarača ulazna snaga ovog sklopa P_{v1} je uvećana zbog gubitaka u energetskom pretvaraču.

Pod pretpostavkom da je efikasnost energetskog pretvarača 92%, ulazna električna snaga ovog sklopa je $P_1^* = P_{v1}/\eta = 25 \text{ W}/0,92 = 27,2 \text{ W}$. Obzirom da vibracioni sistem za doziranje radi sa određenom intermitencijom, usvojen je faktor jednovremenosti $K_{j1}=0,33$, tako da je potrebna srednja vrednost snage $P_1 = 27,2\text{W}/3 \approx 9\text{W}$.

Vibracioni pobuđivači koji se montiraju na obodu koša su svaki snage od 15W i ukupna ulazna snaga ovog sistema je $P_2^* = 2 \times 15 \text{ W}/0,92 = 32,6\text{W}$. I u ovom slučaju je pretpostavljeno da je efikasnost pripadajućeg DC/AC pretvarača 92%. Treba napomenuti da ovaj sistem za sprečavanje lepljenja materijala na košu nije u stalnom radu već se uključuje po potrebi, tako da ako se usvoji faktor jednovremenosti snage $K_{j2}=0,2$ za ovaj sistem se dobija da je ukupna potrebna snaga $P_2 = 32,6/5 \approx 6,5 \text{ W}$. Dakle ukupna snaga potrebna električna snaga potrebna za doziranje u ovom slučaju je $\sum P_v = P_1 + P_2 = 9 + 6,5 = 15,5 \text{ W}$. Uz odgovarajuću rezervu usvojena snaga potrošnje za ovaj sistem je $\approx 16\text{W}$.

IV PRORAČUN SOLARNOG NAPAJANJA REZONANTNOG DOZATORA

U ovom poglavlju će biti dati proračuni i izbor solarnog panela, MPPT solarnog punjača i kapaciteta baterije 24 Vdc. Proračun sistema je baziran na principskoj blok šemi prikazanoj na Slici 4.

Ključni element u sistemu od koga dalje sve zavisi je baterija, njen kapacitet i vreme autonomije. Kapacitet baterije je izračunat iz relacije:

$$C[\text{Ah}] = \frac{E[\text{Wh}] \cdot N_d}{U_{\text{bat_nom}} \cdot \text{DOD} \cdot K_\theta \cdot \eta_{\text{bat}}} \quad (1)$$

gde su:

E [Wh] – ukupna dnevna potrošnja pri zadatoj vrednosti snage potrošnje; u ovom slučaju je usvojeno da je $E=384$ Wh,

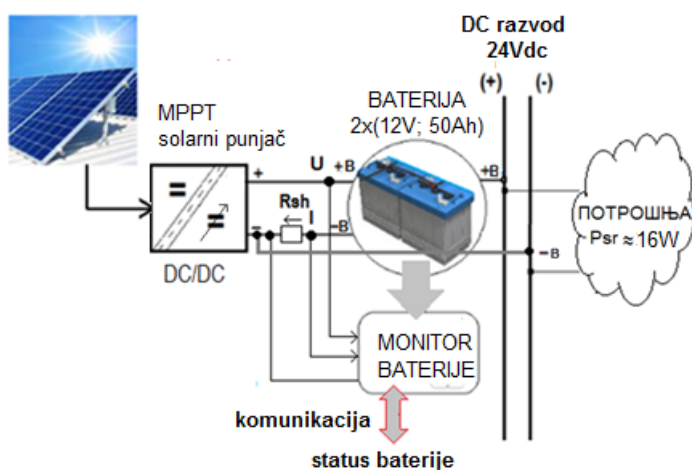
N_d – broj dana autonomije baterije (nema dopunjavanja baterije iz PV panela); pretpostavlja se da je u početnom trenutku baterija napunjena 100%, odnosno da je parametar SOC=100%. U ovom konkretnom slučaju je usvojena vrednost $N_d=3$,

U_{bat_nom} – nominalni napon baterije, odnosno 24Vdc,

DOD – dubina pražnjenja baterije (“depth of discharge”); usvojeno je da je u ovom ekstremnom slučaju 80%,

K_θ – koeficijent koji uzima u obzir temperaturni uticaj na kapacitet baterije; u ovom slučaju je usvojeno $K_\theta=1$,

η_{bat} – stepen iskorišćenja baterije; indirektno se njime uzimaju u obzir gubici koji potiču od unutrašnje otpornosti baterije; za ovaj slučaj je usvojena vrednost od 0,98.



Slika 4. Blok šema solarnog sistema za napajanje vibracione hranilice rezonantnog tipa

Za slučaj srednje potrošnje od 26 W (384 Wh), dubine pražnjenja DOD%=80% i autonomije od $N_d=3$ dana, potreban kapacitet baterije je:

$$C[Ah] = \frac{E[Wh] \cdot N_d}{U_{bat_nom} \cdot DOD \cdot K_\theta \cdot \eta_p} = \frac{384 \cdot 3}{24 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,98} \approx 61,22 \text{ Ah}$$

Usvojene su dve baterije $U_n=12$ V, $C^*=65$ Ah, tipa Deka DP24 AGM Vrla.

Potrebna snaga solarnog panela se dobija iz relacije :

$$P_{PV} = \frac{E}{N_{vs} \cdot K_k \cdot K_\theta} \quad (2)$$

gde su:

N_{vs} – broj sati vršnog sunca,

K_k – koeficijent usled gubitaka u kablovima i spojevima na DC strani,

K_θ – temperaturni korekcionni koeficijent.

Obzirom da pored napajanja potrošnje, solarni panel treba da obezbedi i punjenje baterije procenjena je ukupna energija koju PV panel treba da obezbedi. Izlazni napon MPPT solarnog punjača (izabran je solarni punjač BLUE SOLAR MPPT 100/15 VICTRON) pri punjenju baterije približno jednak 28,6 V i pri

izlaznoj struji od 6 A se na njegovom izlazu obezbeđuje snaga od 171,6 W. Obzirom da je efikasnost MPPT punjača $\eta_{mppt}=96\%$ ulazna snaga punjača pri ovim uslovima je 171,6 W / 0,96=178,75W. Obzirom da je prema projektnom zahtevu period korišćenja hranilice tokom godine je MART-OKTOBAAR, usvojen je prema analizi sunčevih zračenja (insolacija) za datu lokaciju (Beograd) broj vršnih sati sunca $N_{vs}=2$ h (pesimistička pretpostavka). Energija koju punjač može da dobije od PV panela kako bi punio bateriju pri ovim uslovima je 178,75 W x 2 h = 357,5 Wh. Ukupna energija koju PV panel treba da isporuči potrošačima (MPPT punjač i potrošnja sistem za doziranje je $E=357,5 \text{ Wh} + 384 \text{ Wh} = 742,5 \text{ Wh}$.

U proračunu je usvojeno da su $K_k=0,98$ (gubici u napojnim kablovima oko 2%) i $K_\theta=0,8$ (kritičan letnji period kada se ima najveća temperatura na površini PV panela, kada je pad snage za oko 20%). Zameno vrednosti u izraz 2, dobija se zahtevana vrednost snage solarnog panela od 473 W.

Usvojen je solarni panel snage 470 W_p, dimenzija 1,8 m x 1,8 m x 0,3 m. Pri insolaciji 1000 W/m² napon u MPPT tački je $U_{mpp}=35,3$ V, a struja $I_{mpp}=13,6$ A, efikasnost PV panela 22%. Pri insolaciji 800 W/m² (realan slučaj) snaga je 365 W_p pri $U_{mpp}=33$ V, $I_{mpp}=11$ A.

Provera proračuna u PVGIS simulatoru

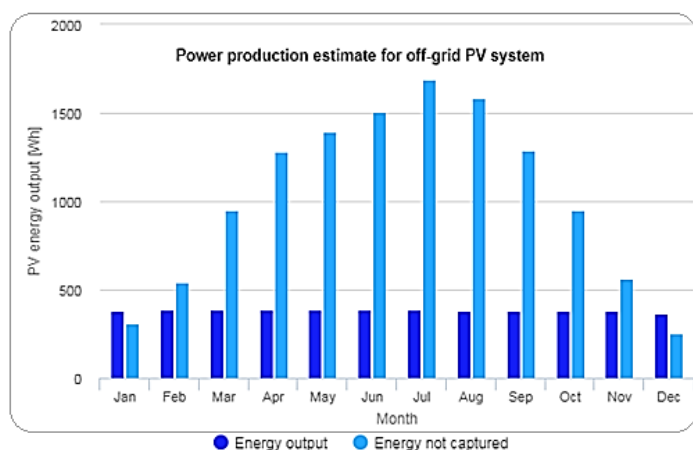
Projektovani podaci su verifikovani u PVGIS simulatoru sa bazom podataka solarnih insolacija PVGIS-SARAH3 za lokaciju Beograda. U Tabeli 1 su prikazani ulazni podaci za PVGIS simulator i za datu lokaciju. Nagibni ugao PV panela za datu lokaciju je 35°, pretpostavljeno je da je azimutni ugao 0° (PV panel okrenut ka jugu).

Tabela 1. Ulazni podaci i rezultati proračuna za solarni Off-grid sistem

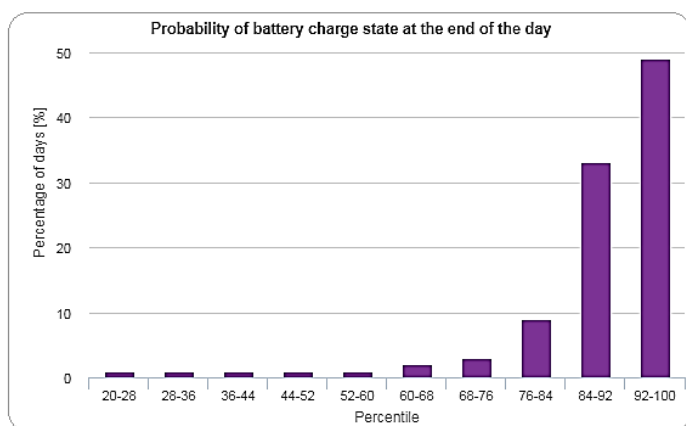
Lokacija [Lat/Lon]:	44,804, 20,446
PV instalisana snaga [Wp]:	470
Energija baterije [Wh]:	1560
Stepen ispražnjenosti (“cutoff” limit) [%]:	20
Dnevna potrošnja [Wh]:	384
Nagibni ugao [°]:	35
Azimutni ugao [°]:	0
REZULTATI SIMULACIJE :	
Procentualni broj dana sa punom baterijom [%]:	81,25
Procentualni broj dana sa praznom baterijom [%]:	1,69
Prosečna neuhvaćena energija [Wh]:	1265,51
Prosečna energija koja nedostaje [Wh]:	120,8

Na slici 5 je data procena proizvodnje solarnog sistema za napajanje hranilice, gde se uočava da je najveća proizvodnja u periodu MART-OKTOBAR.

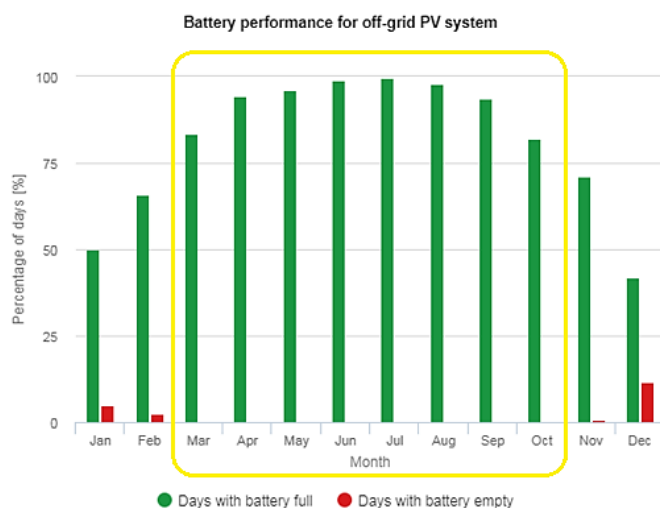
Na slici 6 je prikazan dijagram verovatnoće napunjenosti baterije na kraju dana za datu lokaciju, dok su na slici 7 prikazane performanse baterije po mesecima (procenat dana kada je baterija puna, odnosno kada je prazna).



Slika 5. Procena proizvodnje za dati „off-grid“ PV sistem napajanja vibracionog dozatora



Slika 6. Verovatnoća stanja napunjenosti baterije na kraju dana



Slika 7. Performanse baterije za projektovani „off-grid“ sistem

Sa dijagrama na Slikama 6 i 7 se dobija da u zahtevanom periodu MART-OKT status napunjenosti baterije je između 75% i 98%. Sa dijagrama na Slici 6 se vidi da je verovatnoća napunjenosti baterije za SOC% između 92% i 100%, oko 50%, kao i da je verovatnoća napunjenosti baterije za SOC% između 84% i 92%, oko 35%. Sa dijagrama na Slici 7 se uočava da u periodu MART-

OKTOBAR ne postoje dani kada je baterija prazna.

III DC/AC/DC NAPAJANJE VIBRACIONOG DOZATORA

DC/DC/AC napajanje vibracionog dozatora se sastoji od ulaznog DC/DC pre-regulatora podizача napona 24 Vdc/300 Vdc i izlaznog stepena DC/AC pretvarača sa kontrolisanom promenom širine impulsa (slika 8). Opseg promene ulaznog DC napona je $20 \div 28$ V, što je tipično za aplikacije sa baterijama nominalnog napona 24 Vdc. Izlazni AC napon je promenljive učestanosti i amplitude sinusnog trougaonog impulsa za pobudu elektromagnetnog pogona vibracionog transportera u sklopu sistema doziranja.

Izlazni stepen je realizovan kao asimetrični IGBT polumost čiji je ulazni DC napon 300 Vdc. Pobude energetskih IGBT prekidača Q1 i Q2 su optički izolovane od digitalnog upravljačkog kola baziranog na modulu SbRIO-9636 proizvodnje National Instruments.

Merenje struje elektromagnetnog aktuatora se ostvaruje LEM strujnim modulom sa *Hall* senzorom, dok se merenje napona aktuatora ostvaruje naponskim LEM modulom. Na ovaj način je ostvarena povratna sprega po struji i naponu vibracionog aktuatora. U sistemu je implementirana još jedna povratna sprega, po vibracionom pomeraju transportnog elementa dozatora-*p* ostvarena beskontaktnim induktivnim senzorom sa analognim izlazom. Ova povratna sprega obezbeđuje kontrolu protoka sitnozrnog materijala (riblje hrane), odnosno intenzitet njegovog doziranja.

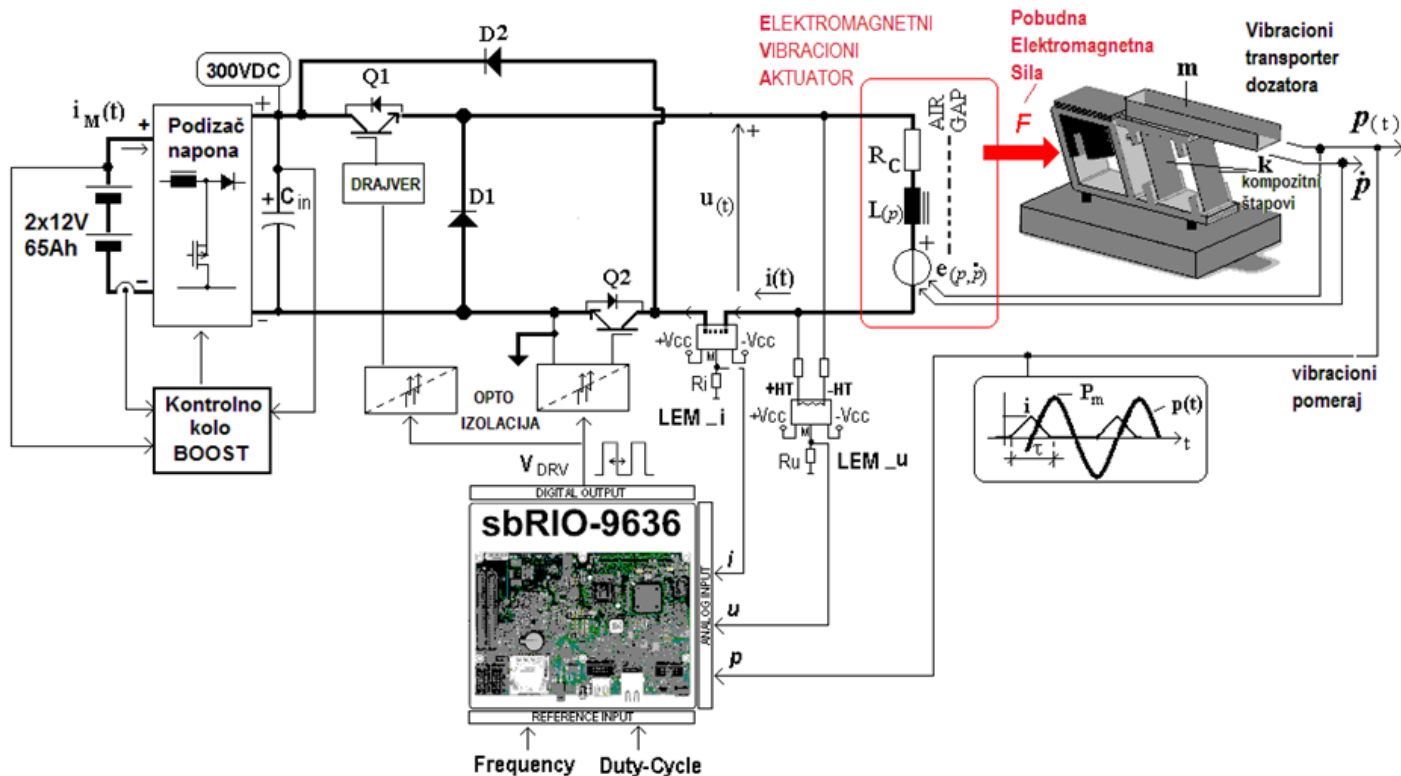
Na osnovu ove tri povratne sprege i na osnovu zadatih vrednosti frekvencije i zadate širine pobudnog impulsa IGBT prekidača Q1 i Q2 obezbeđena je kontrola vibracionog transporta rasutog materijala u sistemu doziranja riblje hrane. Podizач napona obezbeđuje prilagođenje potrebnog napajanja asimetričnog polumosta 300 Vdc baterijskom napajanju 24 Vdc (opseg $20 \div 28$ Vdc). U principu, bi elektromagnetni aktuator mogao biti napajan direktno iz baterije i posredstvom IGBT polumosta, ali bi u tom slučaju struja aktuatora bila značajna i sa njom gubici kako na prekidačkim elementima, tako i u namotajima vibracionog aktuatora. Elektromagnetni aktuator bi iz ovog razloga bio glomazan, sa malim stepenom iskorišćenja i na kraju veoma skup (veća potrošnja i bakra i gvožđa).

Na osnovu prethodnih konstatacija, elektromagnetni aktuator napaja sa višim naponom 300 Vdc. Projektovana maksimalna izlazna snaga ovog DC/DC stepena je 300 W ($300 \text{ V} / 1 \text{ A}$), obzirom da se iz njega napajaju pored glavnog pogona transportera (instalisanе snage oko 35 W) i pomoćni pogoni, kao na primer vibracioni aktuatori za sprečavanje lepljenja rasutog materijala po obodu vibracionog koša i ostali pomoćni elementi.

IV DIMENZIONISANJE DC/DC PRETVARAČA NAPONA

U nastavku će biti dati rezultati proračuna DC/DC podizача napona. Topologija primenjenog podizача napona i pripadajuće kontrolno kolo su dati na slici 9 [19]. Podizач napona je projektovan za opseg ulaznog DC napona $20 \div 28$ V (tipičan opseg promene napona baterije čiji je nominalni napon 24 Vdc). Posredstvom akumulacionih elemenata (prigušnice L_o i kondenzatora C_o) je obezbeđeno podizanje ulaznog napona na

300Vdc koliko je potrebno za regularan rad izlaznog asimetričnog polumosta za pobudu elektromagnetnog aktuatora.



Slika 8. Principialna šema DC/DC/AC pretvarača za pobudu elektromagnetnog vibracionog dozatora

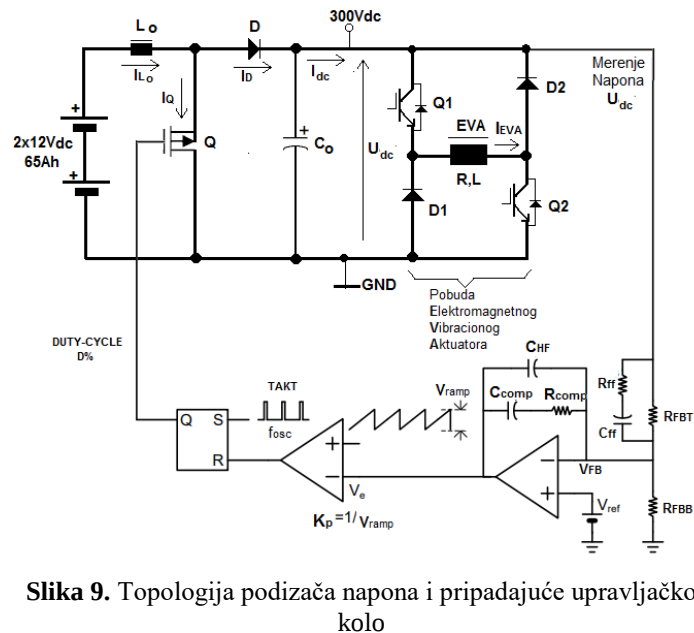
Izlazni napon se održava konstantnim bilo da se radi o promena ulaznog napona ili o promeni opterećenja. Opseg promene ulaznog napona je određen stanjem napunjenosti baterije i on varira u opsegu približno $\pm 20\%$, dok je opseg promene struje opterećenja $0 \div 2$ A vršne vrednosti, sa maksimalnom intermitencijom od 40%. Ovo je posledica impulsne strujne pobude elektromagnetnog vibracionog aktuatora putem polumosta koga čine dva IGBT tranzistora Q1 i Q2 i dve povratne diode D1 i D2 [12-18].

Pri promenama opterećenja naponski regulator podizača napona ima zadatak da kompenzuje nagle promene struje opterećenja. U tom cilju je projektovano upravljačko kolo koje je bazirano na pojačavaču greške između signala povratne sprege po izlaznom naponu V_{FB} i referentne vrednosti napona V_{ref} , koja je dobijena iz preciznog i stabilnog izvora napona (obično je to precizna Zener dioda).

Napon povratne sprege V_{FB} je dobijen preko razdelnika napona R_{FBT} i R_{BBT} , pri čemu je paralelno sa R_{FBT} postavljena filterska sprega koju čine redna veza otpornika R_{ff} i kondenzatora C_{ff} . U sklopu pojačavača greške sa integralnim dejstvom (integrator je realizovan primenom operacionog pojačavača i kondenzatora C_{HF}) je dodata kompenzaciona RC mreža koju čine kondenzator C_{comp} i otpornik R_{comp} [20].

Izlaz pojačavača greške se u komparatoru poredi sa signalom testeraste rampe V_{ramp} . Kada je napon rampe veći od izlaznog napona pojačavača greške izlaz komparatora resetuje "flip-flop" preko ulaza R. Setovanje "flip-flopa" preko ulaza R se ostvaruje

iz preciznog generatora takta koji određuje prekidačku učestanost pretvarača. Kada je aktivan ulaz S (na logičkoj „1“) tada se preko drajverskog kola uključuje energetski tranzistor Q. Kada je aktivan ulaz R tada se isključuje tranzistor Q.



Slika 9. Topologija podizača napona i pripadajuće upravljačko kolo

Karakteristični talasni oblici za ovaj slučaj su prikazani na Slici 10. Prikazani talasni oblici se odnose na režim kontinualne struje kroz prigušnicu L_o . Sa dijagrama se uočava da je srednja vrednost struje prigušnice $I_{sr} = (I_{max} + I_{min})/2$, a njena apsolutna

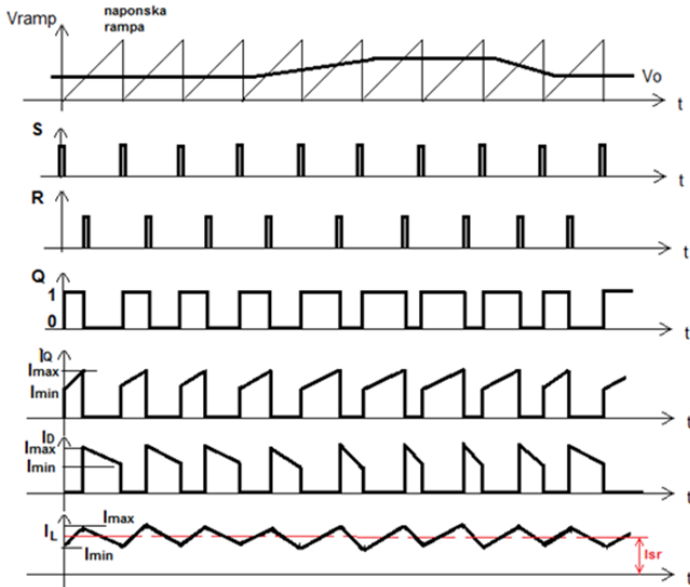
talasnost je $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$. Relativna talasnost je određena u odnosu na srednju vrednost, odnosno ona je jednaka $\Delta I / I_{sr}$.

Vrednost izlaznog napona DC/DC pretvarača je data relacijom:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (3)$$

D je koeficijent radnog režima DC/DC pretvarača i on je jednak odnosu vremena uključenosti prekidačkog tranzistora Q i periode učestanosti rada pretvarača:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (4)$$



Slika 10. Karakteristični teorijski talasni oblici za kolo DC/DC pretvarača podizачa napona

Obzirom da se ulazni napon menja u granicama $V_{in} = (20 \div 28)$ V, za održavanje konstantne vrednosti napona na izlazu $V_{out} = 300$ Vdc=const dolazi se do minimalne i maksimalne vrednosti koeficijenta radnog režima DC/DC pretvarača:

$$\frac{V_{in \min}}{1-D_1} = \frac{V_{in \max}}{1-D_2} = const = 300 \text{ Vdc}$$

Oдавde sledi da je :

$$D_1 = 1 - \frac{V_{in \min}}{V_{out}} = D_{\max}$$

$$D_2 = 1 - \frac{V_{in \max}}{V_{out}} = D_{\min}$$

Obzirom da su minimalna i maksimalna vrednost napona $V_{in \min} = 20$ V i $V_{in \max} = 28$ V dobija se vrednost koeficijenta radnog režima:

$$D_{\max} = 1 - \frac{20}{300} = 0,934 = 93,4\%$$

$$D_{\min} = 1 - \frac{28}{300} = 0,907 = 90,7\%$$

Na osnovu relacije (4) dobijaju se vremena uključenosti prekidača Q :

$$t_{on \max} = D_{\max} \cdot T \quad (5)$$

$$t_{on \min} = D_{\min} \cdot T \quad (6)$$

Za prekidaču učestanost rada prekidača je usvojena učestanost $f_{sw} = 20$ kHz, odnosno perioda prekidanja je $T = 1/20 \text{ kHz} = 50 \mu\text{s}$. Na osnovu ovog podatka i relacija (5) i (6) se dobijaju vremena:

$$t_{on \max} = 0,934 \cdot 50 \mu\text{s} = 46,7 \mu\text{s}$$

$$t_{on \min} = 0,907 \cdot 50 \mu\text{s} = 45,35 \mu\text{s}$$

Odnosno opseg vremena uključenosti prekidača je:

$$46,7 \mu\text{s} > t_{on} > 45,35 \mu\text{s}$$

Dimenzionisanje prigušnice L_o se bazira na pretpostavci da je ulazni napon maksimalan, srednja vrednost ulazne struja minimalna i da je talasnost struje prigušnice $\Delta I\% \leq 30\%$.

Minimalna srednja vrednost ulazne struje se ima pri maksimalnom ulaznom naponu od $V_{in \max} = 28$ V. Ukoliko zanemarimo gubitke u DC/DC pretvaraču dobijamo da je minimalna srednja vrednost ulazne struje (struje prigušnice L_o) jednaka:

$$I_{sr \min} = \frac{P_{in}}{V_{in \max}} \approx \frac{P_{out}}{V_{in \max}} = \frac{300}{28} = 10,71 \text{ A}$$

Za ove ulazne podatke potrebna vrednost prigušnice je:

$$L_o \geq \frac{V_{in \max} \cdot t_{on \min}}{\Delta I} = \frac{V_{in \max} \cdot t_{on \min}}{0,3 I_{sr \min}} \quad (7)$$

Na osnovu relacije (7) se izračunava potrebna vrednost induktivnosti prigušnice L_o :

$$L_o \geq \frac{28 \cdot 45,35}{0,3 \cdot 10,71} = 395,2 \mu\text{H}$$

Usvaja se vrednost prigušnice $L_o^* = 400 \mu\text{H}$. Za ovu vrednost stvarana talasnost struje izražena u [%] je $29,6\% \leq 30\%$, dok je apsolutna talasnost $\Delta I = 3,17 \text{ A}$. Maksimalna vrednost struje prigušnice pri ovim uslovima $I_{\max} = 12,3 \text{ A}$, dok je minimalna vrednost $I_{\min} = 9,14 \text{ A}$.

Dimenzionisanje kondenzatora C_o se bazira na činjenici da je srednja vrednost struje diode jednaka izlaznoj struji, odnosno da je srednja vrednost struje kondenzatora jednaka 0. Pri ovim uslovima je moguće dobiti sledeću relaciju:

$$C_o \geq \frac{I_{out} \cdot t_{on \max}}{V_{out} \cdot \Delta V_{out} \%} \cdot 100 \quad (8)$$

Usvojeno je da je $\Delta V_{out} \% = 0,1\%$ (projekttni zahtev za DC ulazni napon energetskog pretvarača za pobudu elektromagneta aktuatora). Ostale ulazne vrednosti su poznate $I_{out} = 1 \text{ A}$, $t_{on \max} = 46,7 \mu\text{s}$, $V_{out} = 300 \text{ V}$, tako da se dobija potrebna vrednost kapacitivnosti kondenzatora C_o :

$$C_o \geq \frac{1 \cdot 46,7}{300 \cdot 0,1} \cdot 100 = 156 \mu\text{F}$$

Usvojena je vrednost Al-elektrolitskog kondenzatora od $C_o^* = 330 \mu\text{F}$ (470 μF) maksimalno podnosivog napona 350 Vdc.

Prekidački elementi su dimenzionisani prema naponskim i strujnim zahtevima. MOSFET prekidač je projektovan za trajnu struju 20 A i maksimalni podnosivi napon od 400 V. Izabran je N-kanalni MOSFET prekidač FDP20N40 za 20 A/40 V kod koga

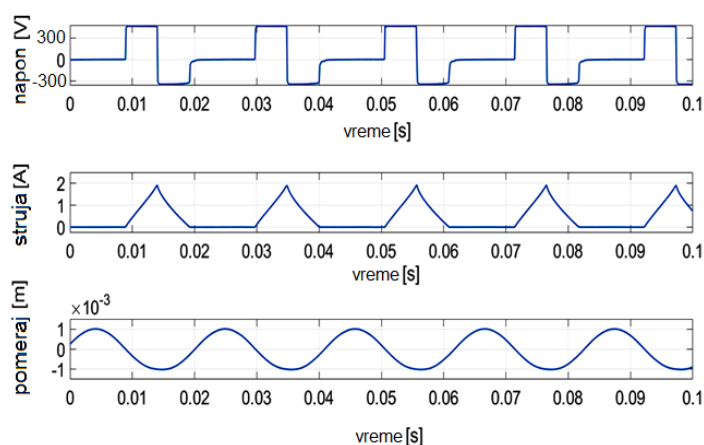
je $R_{ds(on)}=0,2 \Omega$. Takođe je izabrana ultra brza prekidačka dioda STTH20R04 20A/400V.

V EKSPERIMENTALNI REZULTATI

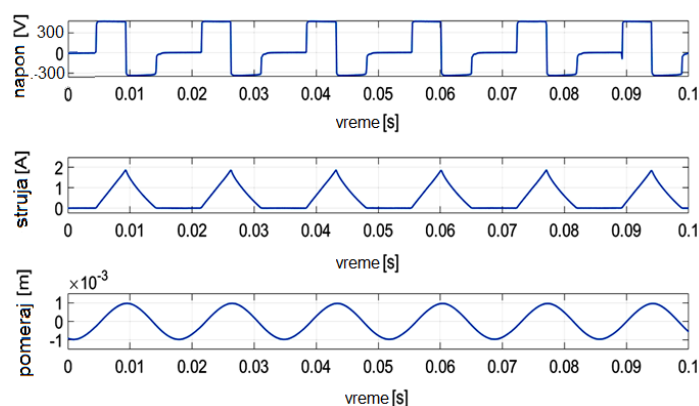
U ovom poglavlju su dati neki ključni eksperimentalni rezultati koji su dobijeni testiranjem na eksperimentalnom prototipu. U nastavku su prikazani eksperimentalni rezultati za izlazni DC/AC IGBT energetske pretvarač, a zatim i eksperimentalni rezultati za DC/DC pretvarač podizač napona 24 Vdc/300 Vdc

Eksperimentalni rezultati DC/AC pretvarač

Na slici 11 su dati talasni oblici napona i struje elektromagnetnog vibracionog aktuatora i pomeraja vibracionog korita za slučaj pod-rezonantnog režima rada vibracionog transportera. Sa prikazanih talasnih oblika se uočava da je “peak-peak” amplituda oscilovanja $\Delta p=2\text{mm}$. Pri ovim uslovima vršna vrednost trougaone struje je jednaka 2A, a njeno trajanje je 10ms.



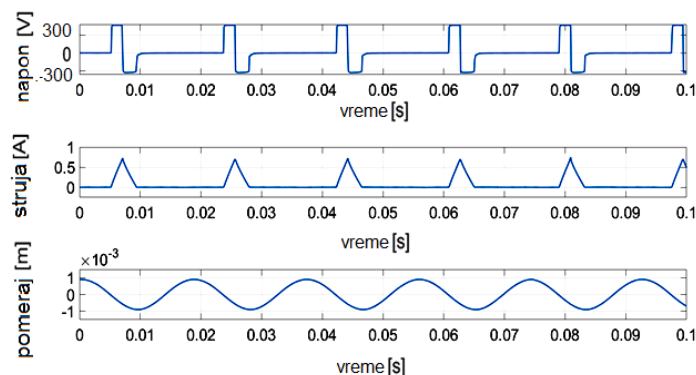
Slika 11. Karakteristični talasni oblici vibraciono-transportnog sistema na solarnoj hranilici za slučaj pod-rezonantnog režima rada na učestanosti 48Hz



Slika 12. Karakteristični talasni oblici vibraciono-transportnog sistema na solarnoj hranilici za slučaj nad-rezonantnog režima rada na učestanosti 59Hz

Na slici 12 su dati talasni oblici napona i struje elektromagnetnog vibracionog aktuatora i pomeraja vibracionog korita za slučaj nad-rezonantnog režima rada vibracionog transportera na učestanosti 59 Hz. Sa prikazanih talasnih oblika se uočava da je kao i u prethodnom slučaju “peak-peak” amplituda oscilovanja

$\Delta p=2 \text{ mm}$. Pri ovim uslovima je ako i za slučaj pod-rezonantnog režima vršna vrednost trougaone struje približno jednaka 2 A, a njeno trajanje je 10 ms.

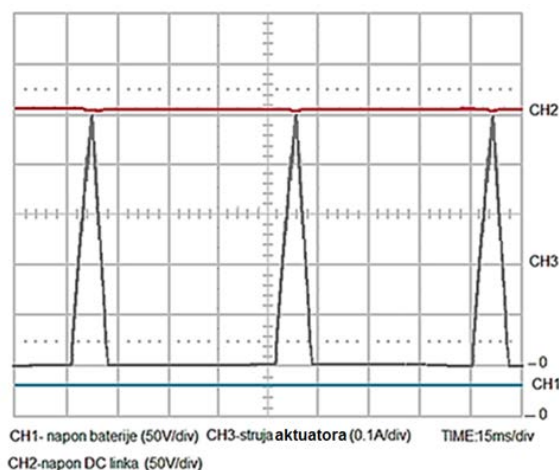


Slika 13. Karakteristični talasni oblici vibraciono-transportnog sistema na solarnoj hranilici za slučaj rezonantnog režima rada na učestanosti 54Hz

Na slici 13 su dati talasni oblici napona i struje elektromagnetnog vibracionog aktuatora i pomeraja vibracionog korita za slučaj kada transporter radi na mehaničkoj rezonantnoj učestanosti od 54 Hz. Kao i u prethodnim slučajevima zadata je ista vrednost amplitude oscilovanja $\Delta p=2 \text{ mm}$ i merena je struja potrošnje vibracionog aktuatora. Sa prikazanih talasnih oblika se uočava da je u rezonantnom režimu potrošnja struje značajno manja u odnosu na prethodna dva slučaja. U ovom slučaju je izmerena vršna vrednost struje od 0,6 A i značajno manjeg trajanja od oko 4ms. Ovi dobijeni rezultati idu u prilog rezonantnom režimu rada u pogledu energetske efikasnosti vibracionog pogona za doziranje. Izmerena snaga potrošnje u rezonantnom režimu je iznosila oko 3 W, dok je u nad-rezonantnom i pod-rezonantnom režimu iznosila oko 22 W.

Eksperimentalni rezultati DC/DC pretvarač podizač napona

U ovom delu su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni na DC/DC pretvaraču.

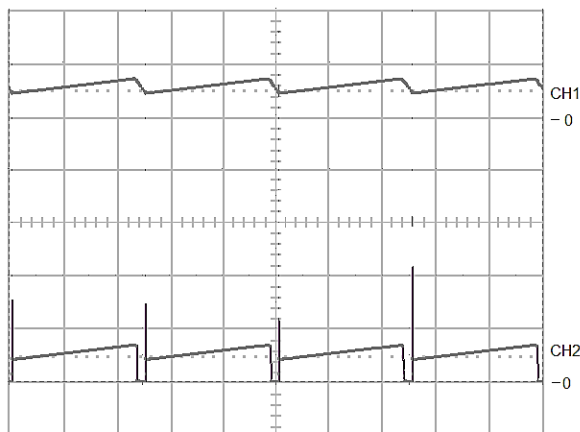


Slika 14. Osciloskopski snimci ulaznog i izlaznog napona DC/DC pretvarača pri impulsnom strujnom opterećenju amplitude 0,5 A

Na slici 14 su dati osciloskopski snimci ulaznog i izlaznog

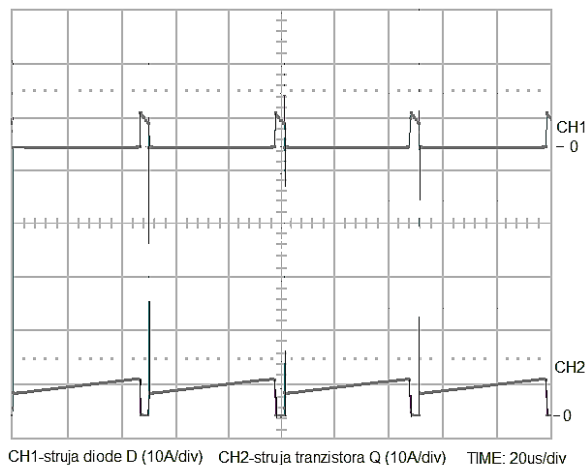
napona DC/DC pretvarača i struje vibracionog aktuatora. Baterija je bila napunjena na SOC%=100% i napon baterije je iznosio 28 Vdc. Izlazni napon je stabilisan na vrednost 300 Vdc. Opterećenje DC/DC pretvarača je bio IGBT asimetrični polumost sa vršnom vrednošću izlazne struje od 0,5 A i učestanosti pobude 54 Hz (rezonantni režim rada dozatora).

Na slici 15 su prikazani osciloskopski snimci talasnih oblika struje prigušnice L_o i struje tranzistora Q pri opterećenju na izlaznoj 300 V-noj strani, koje je dato na osciloskopskom snimku na Slici 14. Uočava se da je srednja vrednost struje prigušnice pri ovim uslovima 6 A i da je talasnost struje prigušnice 0,4 A. U struji tranzistora Q se uočavaju strujni pikovi koji su posledica komutacije prekidačkog tranzistora i prekidačke diode koje se u tom kratkom intervalu nalazi u inverznom oporavku. U ovom modu rada koeficijent radnog režima je iznosio 93%, a prekidačka učestanost 20 kHz.



CH1-struja prigušnice L_o (10A/div), CH2-struja tranzistora Q (10A/div) TIME: 20μs/div

Slika 15. Osciloskopski snimci struje prigušnice i struje prekidačkog tranzistora DC/DC podizača napona



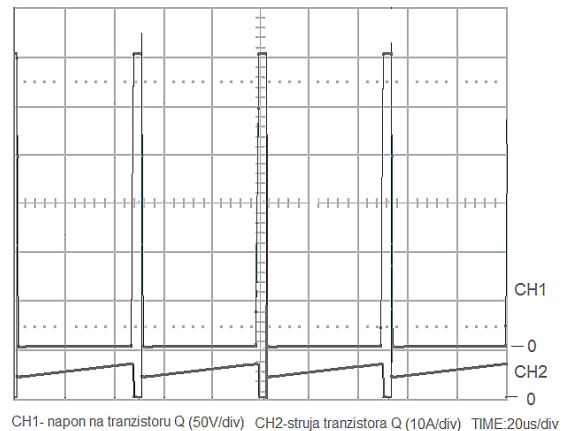
CH1-struja diode D (10A/div) CH2-struja tranzistora Q (10A/div) TIME: 20μs/div

Slika 16. Osciloskopski snimci struje prekidačke diode D i struje prekidačkog tranzistora Q

Na slici 16 su dati osciloskopski snimci struje prekidačke diode D i struje prekidačkog tranzistora Q. Uočava se da se dopunjavanje izlaznog kondenzatora DC/DC pretvarača ostvaruje strujnim impulsima struje kroz prekidačku diodu D.

Takođe se uočavaju strujni pikovi u struji prekidačkog tranzistora i inverzni strujni pikovi u struji prekidačke diode, koji su posledica visokofrekventnih komutacije između njih. Učestanost prekidanja i u ovom slučaju je iznosila 20 kHz.

Na slici 17 su prikazani talasni oblici napona i struje na prekidačkom tranzistoru Q, pri učestanosti prekidanja od 20 kHz. Maksimalni napon koji trpi prekidački tranzistor Q je 300 V, koji u stvari predstavlja napon DC linka.



Slika 17. Osciloskopski snimci napona i struje prekidačkog tranzistora Q u sklopu DC/DC podizača napona

Na osnovu prikazanih eksperimentalnih rezultata za DC/DC podizač napona se pokazuje da su dobijeni rezultati u skladu sa proračunom, čiji su detalji dati u poglavlju IV.

VI ZAKLJUČAK

U radu je dat predlog rešenja solarno napajanog vibracionog dozatora sa elektromagnetnom pobudom i njegove mogućnosti potencijalne primene u sistemima za doziranje sitnozrnih materija koje se koriste u sistemima hranilica za ishranu riba. Predloženi sistem je "off-grid" i potpuno je nezavisan od mrežnog napajanja i pogodan je za druge slične sisteme koji se sreću u ruralnim sredinama (ishrana ptica i svi drugih životinjskih vrsta koja za ishranu koriste sitnozrne materijale). U radu je akcenat dat na proračun solarnog napajanja i DC/DC energetskog pretvarača koji treba da obezbedi naponsko prilagođenje napona baterije 24 Vdc, izlaznom stepenu snage za pobudu elektromagnetnog vibracionog aktuatora kojim se obezbeđuje pogon vibracionog transportera dozatora. Na kraju su, kao potvrda sprovedenih proračuna, prikazani eksperimentalni rezultati nekih karakterističnih režima u okviru sistema napajanja vibracionog dozatora.

ZAHVALNICA

Finansiranje ovog istraživanja je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2024-2025. (Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034).

LITERATURA

- [1] Valencia, F.L., Brital, J.N., Aranas, K.D., Mendoza, R. Solar-powered fishpond feeder with real-time water quality monitoring system, International Journal of Innovative Science and Research Technology, Vol. 7, No. 4, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6506999>

- [2] Filipiński, M., Belton, B., Give a Man a Fishpond: Modelling the Impacts of Aquaculture in the Rural Economy, *World Development*, Vol. 110, pp. 205-223, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.05.023>
- [3] Konnerup, D., Trang, N.T.D., Brix, H. Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics, *Aquaculture*, Vol. 313, No. 1-4, pp. 57-64, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.026>
- [4] Shaari, M.F., Zulkefly, M.E.I., Wahab, M.S., Esa, F. Aerial fish feeding system, in *Proc. 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, pp. 2135-2140, 7-10 August 2011. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2011.5986311>
- [5] Wang, G., Hu, L., Long, W., Jiang, L. Evolution of Intelligent Feeding System for Aquaculture: A Review, in *Proc. 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM)*, Manchester, United Kingdom, pp. 392-397, 23-25 October 2021. <https://doi.org/10.1109/AIAM54119.2021.00085>
- [6] Goncharevich, I.F., Frolov, K.V., Rivin, E.I. *Theory of Vibratory Technology*, New York: Hemisphere Pub. Corp., 1990.
- [7] Despotovic, Z.V., Stojiljkovic, Z. Power Converter Control Circuits for Two-Mass Vibratory Conveying System With Electromagnetic Drive: Simulations and Experimental Results, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 1, pp. 453-466, 2007. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888798>
- [8] Misljen, P., Tanaskovic, M., Despotovic, Z., Matijevic, M. Controlling Electromagnetic Vibrating Feeder by Using a Model Predictive Control Algorithm, *Interciencia Journal*, Vol. 43, No. 10, pp. 31-47, 2018. http://is.fink.rs/podaci/Milan_Matijevic/50/PMisljen%20et%20all.pdf [pristupljeno 15.08.2025]
- [9] Despotovic, Z., Ribic, A., Terzic, M. A Comparison of Energy Efficiency of SCR Phase Control and Switch Mode Regulated Vibratory Conveying Drives, in *Proc. IX International Symposium Industrial Electronics - INDEL 2012*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, Vol.1, pp. 103-110, 1-3. November 2012, https://www.indel.etfbl.net/2014/resources/Proceedings_2012/xPaper_17.pdf [pristupljeno 15.08.2025]
- [10] Urukalo, D., Despotović, Ž.V. Experimental verification of electrical power consumption of resonant electromagnetic vibratory feeder, in *Proc. 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-5, 18-20 March 2020, <https://doi.org/10.1109/INFOTEH48170.2020.9066331>
- [11] Noor, M.Z.H., Hussian, A.K., Saaid, M.F., Ali, M.S.A.M., Zolkapli, M. The Design and Development Of Automatic Fish Feeder System Using PIC Microcontroller, in *Proc. 2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, Shah Alam, Malaysia, pp. 343-347, 27 August 2012, <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2012.6287189>
- [12] Floating Fish Feeder Assembly Instructions, <https://4239686.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/4239686/Assembly%20Instructions/Pond%20King%20Floating%20Feeder%20Assembly%20Instructions.pdf> [pristupljeno 15.08.2025]
- [13] Ribić, A.I., Despotović, Ž.V. High-Performance Feedback Control of Electromagnetic Vibratory Feeder, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 9, pp. 3087-3094, 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2037677>
- [14] Despotović, Ž.V., Ribić, A.I., Sinik, V. Power Current Control of a Resonant Vibratory Conveyor Having Electromagnetic Drive, *Journal of Power Electronics*, Vol.12, No. 4, pp. 677-688, 2012. <https://doi.org/10.6113/JPE.2012.12.4.677>
- [15] Despotovic, Z.V., Lecic, M., Jovic, M., Djuric, A. Vibration control of resonant vibratory feeder with electromagnetic excitation, *Journal FME Transactions*, Vol. 42, No. 4, pp. 281-289, 2014. <https://doi.org/10.5937/fmet.1404281D>
- [16] Ribić, A.I., Despotović, Ž.V. PI Plus State Observer Control of Electromagnetic Vibratory Feeder, in *Proc. 53rd ETRAN Conference*, Vrnjačka Banja, Serbia, 15-19 Jun 2009. https://www.pupin.rs/RnDProfile/pdf/despotovic-publ_29.pdf [pristupljeno 15.08.2025]
- [17] Sinik, V., Despotovic, Z.V., Palinkas, I. Optimization of the Operation and Frequency Control of Electromagnetic Vibratory Feeder, *Elektronika ir Elektrotehnika*, Vol. 26, No. 1, pp. 24-30, 2016. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.22.1.14095>
- [18] Sinik, V., Despotovic, Z.V., Palinkas, I. Improved power supply performance of vibratory conveyor drives, *Elektronika ir Elektrotehnika*, Vol. 22, No. 6, pp. 3-9, 2016. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.6.6924>
- [19] Huke, B. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage, 2009, <https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf?ts=1782280342957> [pristupljeno 15.08.2025]
- [20] Lee, S.W. Practical Feedback Loop Analysis for Voltage-Mode Boost Converter, 2014, https://www.ti.com/lit/an/slva633/slva633.pdf?ts=1782270948977&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Ftps61030%253FCMP%253Dconv-poasamples [pristupljeno 15.08.2025]

AUTORI

Željko V. Despotović – prof. dr, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
 Uroš Ilić – master ing., Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, uros.ilic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-3955-8995](https://orcid.org/0000-0003-3955-8995)

Off-Grid Solar Power Supply for a Resonant Vibratory Feeder with Electromagnetic Excitation

Abstract – Vibratory feeders with electromagnetic excitation that are adapted to operate in the mechanical resonance mode have proven to be a very energy-efficient way to dose bulk and granular materials. Standard on-grid resonant vibration feeders are powered from a 230 V, 50 Hz mains supply, where the mains voltage is converted into a DC voltage of 300Vdc, and from this voltage the excitation electromagnetic coil of the vibrating feeder is powered by a suitable DC/AC power converter. This paper presents a solar-powered vibrating feeder system in which a 24 Vdc battery bank is used in addition to the PV panel. The charging of the battery bank is realized with an MPPT regulator, while the adjustment of the DC power supply of the output DC/AC power converter of the vibrating feeder is realized with a boost DC/DC power supply 24 Vdc/300 Vdc. The paper presents the methodology and calculation results of proposed system including the DC/DC power converter. The presented technical solution would have potential application on dosage of food for fish in ponds, dosing of granular feed for birds in reserves and rural areas, and similar applications where dosing and feeding of fine-grained materials is required.

Index terms – Solar systems, Off-grid power, Vibratory feeder, Mechanical resonance, DC/DC converter, DC/AC converter

Rad primljen 20.08.2025., prihvaćen 08.01.2026.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.3

ENERGIJA, ekonomija, ekologija : list Saveza
energetičara / glavni i odgovorni urednik Dušan Gordić
. - God. 1, br. 1 (1996)- . - Beograd : Savez energetičara,
1996- (Kragujevac : Mašinac). - 29 cm

Tromesečno. - Drugo izdanje na drugom medijumu:
Energija, ekonomija, ekologija (Online) = ISSN 2812-7528
ISSN 0354-8651 = Energija (Beograd)
COBISS.SR-ID 108696839



www.savezenergeticara.org