

ISSN 0354-8651

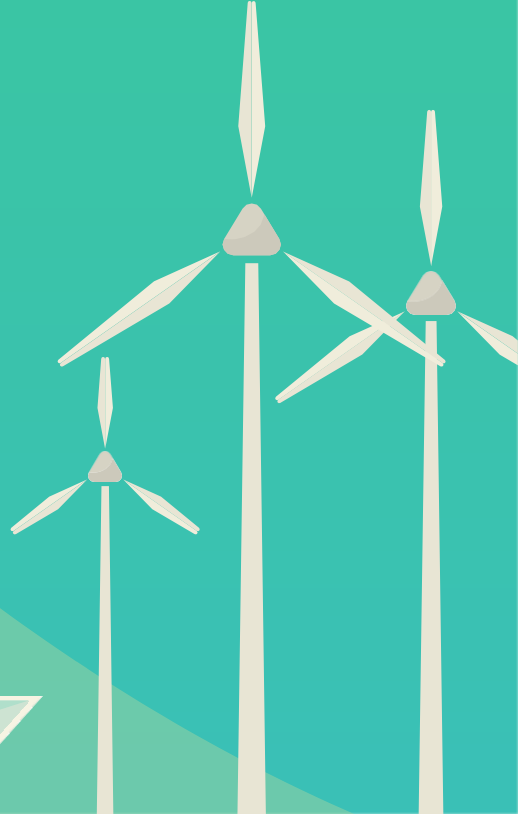


List Saveza energetičara

Broj 3 / Godina XXV / Septembar 2023.

energija

| ekonomija | ekologija



e3e3

Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 3, Septembar 2023

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 Ćirić, 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:
150

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] Vladan RISTIĆ, Darko ŠOŠIĆ, Dragana RISTIĆ
Primena širinske pretrage i georeferenciranja za određivanje optimalne trase dalekovoda / Application of Breadth-First Search and Georeferencing for Optimizing Overhead Line Route
- [09] Iva BATIĆ, Aleksandar IVANČIĆ
Analiza kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na krovovima stambenih zgrada u Srbiji / Analysis of Capacity for the Construction of Photovoltaic Systems on Residential Building Roofs in Serbia
- [17] Petar ĐUKIĆ, Slaviša ĐUKANOVIĆ
Konfuzija u energetske tranziciji - svet i Srbija danas / Confusion in the Energy Transition – The World and Serbia Today
- [24] Luka STREZOSKI
Sistemi za upravljanje distribuiranim energetske resursima: stanje u oblasti / Distributed Energy Resource Management Systems: State of the Art
- [30] Zoran SIMENDIĆ, Goran ŠVENDA, Tatjana LATAS, Dalibor MRAOVIĆ
Energetska efikasnost domaćinstva sa toplotnom pumpom i solarnom elektranom / Energy Efficiency of Households with a Heat Pump and a Solar Power Plant

- [39] Filip NASTIĆ
Predlog modela za predviđanje koncentracije suspendovanih (PM2.5) čestica u vazduhu / Proposing the Predictive Model for Airborne PM2.5 Concentration
- [45] Andreja STEFANOVIĆ
Simulacija proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela korišćenjem solarnih sistema za praćenje / Simulation of Photovoltaic Panels Electricity Generation Using Solar Tracking Systems
- [50] Nikola STANKOVIĆ, Srećko ĆURČIĆ
Potencijali korišćenja različitih supstrata u procesu proizvodnje biogasa / Potentials of Using Different Substrates in the Process of Biogas Production
- [56] Siniša SPREMIĆ, Aleksandar ANTONIĆ
Uticaj solarnih panela na gubitke u niskonaponskoj mreži / The Influence of Solar Panels on Losses in the Low-Voltage Network
- [60] Aleksa SAVIĆ, Vanja ŠUŠTERŠIĆ, Mladen JOSIJEVIĆ, Aleksandar NEŠOVIĆ, Nebojša JURIŠEVIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ
Numerička analiza toplotnih performansi geotermalne toplotne pumpe za potrebe grejanja i hlađenja stambene zgrade / Numerical Analysis of the Ground Source Heat Pump Thermal Performances for Heating and Cooling of the Residential Building

Primena širinske pretrage i georeferenciranja za određivanje optimalne trase dalekovoda

Application of Breadth-First Search and Georeferencing for Optimizing Overhead Line Route

Vladan Ristić^{***}, Darko Šošić^{**}, Dragana Ristić^{***}

^{*} Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” Beograd, Kneza Miloša 11, 11000 Beograd

^{**} Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

^{***} Projektni biro i usluge „AL & SA” d.o.o. Pančevo, Miloša Trebinjca 78, 26000 Pančevo

Rezime - Tranzicija kroz koju energetska sektor trenutno prolazi podrazumeva izlazak iz pogona konvencionalnih generatorskih kapaciteta koji koriste fosilna goriva, kao i posledično okretanje prema obnovljivim izvorima energije i održivim principima proizvodnje. Ovo će neizbežno dovesti do potrebe za izgradnjom nove prenosne infrastrukture u cilju plasiranja energije koja je generisana u ovim kapacitetima ka ostatku sistema i ublažavanja potencijalnih problema u vezi sa preopterećenjem postojećih elemenata mreže. Kako bi se što preciznije ocenio uticaj novih projekata, poželjno je da se inženjerima na raspolaganju nalaze što bolje procene tehničkih parametara tih projekata, s tim što se ovo, za nove vodove, najvećim delom može prevesti u estimacije dužina trasa. To se, čak i u stručnim krugovima, uglavnom radi prema empirijskim metodama. Kako bi se to izbeglo, u ovom radu se predlaže inovativna tehnika za aproksimaciju dužine nadzemnih vodova, zasnovana na principu širinske pretrage i georeferenciranoj projekciji sistema koji će biti ojačan novim dalekovodom. Taj pristup dopušta, između ostalog, i uzimanje u obzir postojanja zona kroz koje trasa ne sme da prođe, poput gradskih sredina ili zaštićenih oblasti, i prelazak sa standardnog dvodimenzionalnog načina predstavljanja trase voda na mapi na trodimenzionalnu projekciju pomoću koje je moguće uvrstiti u razmatranje i razlike u nadmorskim visinama delova terena preko kojih dalekovod prelazi. Ovo bi, zajedno sa prilagodljivošću različitim mrežama i smanjivanjem rizika vezanog za nastanak grešaka usled loših procena parametara novih dalekovoda, moglo svrstati opisanu tehniku u red alata koji će u narednom periodu biti vrlo značajni za adekvatan razvoj prenosnih mreža.

Ključne reči - georeferenciranje, dalekovodi, najkraća trasa, planiranje razvoja sistema, širinska pretraga

Abstract - The transition through which the entirety of energy sector is passing at the moment causes the shift from the conventional generation capacities, based on fossil fuels, towards the renewable sources and sustainable energy production. This, in turn, can lead to the need for constructing the new transmission infrastructure, necessary for the evacuation of the produced energy and mitigation of the potential overloading of the existing elements. In order to evaluate the impact of the

proposed new projects, the engineers need to have the proper information regarding the technical characteristics of those projects, with this, for the power lines, meaning as accurate the estimation of the line length as possible. This estimation is rather difficult to perform even for the experts, with some of them frequently turning towards the empirical methods instead. To avoid that, this paper proposes a technique for approximation of the length of the line connecting the two specified nodes of the grid, founded on the breadth-first search principle and the georeferenced projection of the system. This allows the inclusion of the zones through which the route cannot pass, such as the cities or the protected habitats, and also provides opportunity to expand the common two-dimensional definition of line's length to the three-dimensional space, since the heights of the terrain sections can also be included. That, together with the ease of modifications for application on the various systems, could make this method a powerful tool for the system planning engineers, mitigating the risk of the potential errors that would be caused by the misestimations of the parameters of the new overhead lines.

Index Terms - Breadth-first search, Georeferencing, Overhead lines, System planning, Shortest route

I UVOD

Kao što je već poznato i u stručnim, i u laičkim krugovima, u poslednjih desetak godina je došlo do značajnih promena u načinu doživljavanja koncepta rada elektroenergetskih sistema. U okviru promena, došlo je do okretanja od prethodno dominantnih elektrana na ugalj, proglašenih za jedne od glavnih izvora gasova izazivača efekta staklene bašte. Pri tome su, kao njihova zamena, predlagani izvori zasnovani na obnovljivim energentima, poput, na primer, vetroelektrana i solarnih elektrana. Ovakav zaokret bi mogao dovesti do posledica kao što su, primera radi, promene u smerovima tokova energije kroz elemente sistema, prebacivanje glavnih proizvodnih centara iz regija u kojima su locirani rudnici uglja u oblasti sa značajnim potencijalom za ekološki prihvatljivu proizvodnju energije i potrebe za hitnim razvojem infrastrukture za prenos energije u skladu sa novom konfiguracijom sistema i integracijom novopodignutih kapaciteta u njega. Naravno, razvoj infrastrukture mora, pored omogućavanja plasmana energije koja

je proizvedena u obnovljivim izvorima, obezbediti potrošačima pouzdano napajanje električnom energijom, shodno potrebama i odgovarajućim standardima koji pokrivaju ovu problematiku.

Iako je ovaj zadatak već i sam po sebi jako izazovan, situacija se dodatno komplikuje ako se u obzir uzmu i praktična ograničenja sa kojima se suočavaju inženjeri zaduženi za planiranje razvoja sistema, posebno ukoliko se razmatraju projekti koji obuhvataju izgradnju novih dalekovoda. Konkretno, empirijski je pokazano da je jedan od koraka na koje se potroši najveći deo vremena pri realizaciji takvih projekata definisanje trase tih vodova i, shodno tome, pribavljanje potrebnih dozvola i uslova. Na ova odlaganja, na primer, mogu uticati teškoće vezane za zabrinutost stanovnika u oblastima kroz koje bi trasa trebalo da prođe. Ta zabrinutost je, u najvećem broju slučajeva, vezana za potencijalni uticaj voda na zdravlje [1,2]. Uz to, problem mogu predstavljati i efekti koje bi nova elektroenergetska infrastruktura mogla da ima na određene ekološke indikatore, kao što je biodiverzitet, što postaje posebno značajno u slučajevima u kojima bi predviđena trasa dalekovoda trebalo da prođe kroz neke od zaštićenih prirodnih oblasti [3-5]. Kao ilustrativni primer takvih problema se može navesti slučaj iz Niša [6], gde su, iz protesta protiv podizanja novog dalekovoda, građani naselja Brzi Brod zatrpavali rupe kopane za postavljanje temelja stubova. Time je realizacija ovog projekta jako usporena, a rok njegove realizacije pomeren za više meseci. Iz tog primera se jasno može videti kompleksnost problema koje planeri razvoja sistema moraju rešavati kako bi se funkcionalnost istog održala.

Uz to, operatori sistema često raspolazu ograničenim budžetom, zbog čega se od predloženih projekata moraju odrediti oni koji se smatraju prioritetnim, dok se preostali projekti, ako budžet kojim se barata nije dovoljan, odlažu ili se od njih potpuno odustaje. Ta problematika će u narednim godinama biti posebno izražena zato što su cene materijala potrebnih za realizaciju novih projekata od proleća 2022. godine zabeležile značajan porast. Kao što se može zaključiti, ovo je direktno uvezano sa ratom u Ukrajini i uticajem istog na prilike u ekonomiji i oblasti prekograničnog transporta. Za bolje pojašnjenje efekata koje ovaj sukob ima na pokazatelje od interesa za projekte operatora sistema, može iskoristiti primer naveden u [7], gde je istaknuto da je cena čelične armature samo u martu 2022. godine skočila za čak 30% u odnosu na februar te godine. Kada se uvaži i to da je čelik potreban za gotovo svaki od projekata izgradnje novih dalekovoda, gde se koristi i za stubove, i za mehaničko ojačavanje provodnika, postaje jasno u kojoj meri ovakvo stanje može da utiče na cene ovakvih projekata. Ovakav zaključak predstavlja dodatni argument u korist prethodno iznete tvrdnje prema kojoj će operatori sistema morati da redukuju broj projekata koje mogu u potpunosti završiti u narednom periodu.

Kako bi se, kao što je već pojašnjeno, definisali prioritetni među svim predloženim projektima, operatori sistema moraju smišljati različite načine na koje će vršiti ocenjivanje projekata. Ti načini, poznatiji kao metodologije za prioritizaciju, mogu da se vide i u desetogodišnjim planovima razvoja različitih sistema, gde bi se primer mogao naći u Planu razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period od 2021. do 2030. godine [8]. Po metodologiji iz ovog dokumenta, moraju se posmatrati kako sredstva koja treba uložiti u realizaciju svakog projekta, tako i poboljšanja prilika u sistemu do kojih bi svaki od projekata mogao da dovede. Jasno je da je za ovu procenu, na osnovu koje se određuje i to koji će od

projekata biti uvršteni u trogodišnji Plan investicija u prenosni sistem, neophodno raspolagati ulaznim informacijama što bolje kvaliteta kako bi se povećala pouzdanost sprovedenog postupka.

Kvalitet ovih ulaznih podataka, sa druge strane, direktno zavisi i od pretpostavki koje je potrebno načiniti pre prioritizacije, poput, primera radi, procena dužina novih dalekovoda. Ovaj parametar utiče kako na estimaciju potrebnih ulaganja u projekat (pošto se cena ovakvih projekata tipično izračunava tako što se procenjena dužina množi odgovarajućom jediničnom cenom, te je, po pitanju potrebnih ulaganja, bolje da trasa voda bude što kraća), tako i na fazu procene uticaja projekta na situaciju u sistemu (zato što se, kao i ulaganja, i tehnički podaci o vodu obično određuju tako što se procenjena dužina istog pomnoži jediničnim parametrima). Pored toga što je takvu procenu teško napraviti samo upotrebom geografske mape, dodatnu dimenziju ovom problemu daje i to što postoje oblasti preko kojih novi vodovi ne bi smeli da pređu, kao što su urbana područja i nacionalni parkovi, na primer. Sada bi se moglo postaviti pitanje na koji je način moguće u obzir uzeti sve potrebne aspekte uz zadržavanje odgovarajućeg stepena tačnosti i efikasnosti predloženih procedura. Rešenja za ovo su predlagana u nemalom broju radova [9-12], gde je svaki od tih radova makar u izvesnoj meri dodavao neko poboljšanje u uobičajeno usvajane metode za mapiranje reljefa terena i određivanje dužine najkraće trase dalekovoda kojim bi se povezala neka dva čvora u sistemu. Na primer, rad [9] predlaže i do detalja analizira opciju primene LIDAR (eng. *Light Detection and Ranging*) tehnologije kako bi se, pre samog početka definisanja trase dalekovoda, raspolagalo što boljim informacijama vezanim za stanje terena u regionima u kojima bi ta trasa trebalo da se nalazi. Kroz ovakva ispitivanja, u radu se došlo do zaključka da bi preciznost koju bi korišćenje te tehnike moglo da donese dovela do uštede u projektima u okviru kojih će se graditi novi dalekovodi. Ušteda bi, zavisno od slučaja do slučaja, mogla da dostigne čak i 10% inicijalno procenjenog iznosa ulaganja u razmatrani projekat. Ako se uzme u obzir da se vrednosti investicija u projekte novih dalekovoda na kojima rade operatori prenosnih sistema leže u granicama od nekoliko stotina hiljada evra do nekoliko desetina miliona evra (posebno ukoliko se posmatraju 400 kV koridori dugački po više od 100 km), jasno je da bi ušteda od 10% te vrednosti mogla u velikoj meri pomoći operatoru oslobađanjem prostora u raspoloživom budžetu. Na taj način bi se sredstva koja bi inače bila rezervisana za postavljanje novog dalekovoda mogla da budu preusmerena u neke od ostalih projekata, čime bi se ubrzala i realizacija tih projekata, a situacija u sistemu relaksirala. Naravno, dodatno se mora naglasiti da bi to bila ušteda koja bi se ostvarila samo na jednom projektu. Ako bi se ta ušteda sada pomnožila brojem projekata podizanja vodova na kojima operatori sistema često i simultano rade, postalo bi još jasnije koliko bi preciznije određivanje trase novog dalekovoda moglo unaprediti pouzdanost procesa planiranja razvoja sistema. Na primer, prema [8], operator prenosnog sistema Srbije planira da u narednom periodu izgradi čak četiri 400 kV koridora koji će prelaziti preko teritorije Srbije. Svaki od ovih koridora (Panonski koridor, Transbalkanski koridor, Severni koridor i Centralno-balkanski koridor) obuhvata izgradnju 400 kV dalekovoda čija će se dužina kretati u granicama od oko 80 km do više od 300 km. Takođe, potrebno je istaći da procenjena ulaganja u ove koridore iznose nekoliko stotina miliona evra, kao i da se, uz njih, planira i izgradnja velikog broja internih dalekovoda 110 kV naponskog

nivoa. Ako bi se razmatranje sada vratilo na to da bi, korišćenjem tehnike predložene u [9], uštede mogle iznositi i do 10% ulaganja u ove projekte, postalo bi još jasnije u kojoj bi meri takve tehnike ubuduće mogle uticati na raspodelu budžeta operatora sistema.

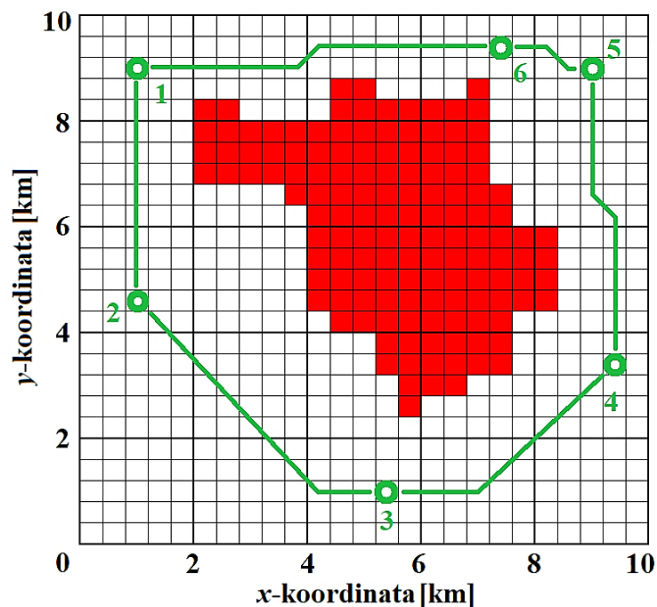
Nažalost, nijedna od metoda iz navedenih radova nije, bez obzira na potencijalne pozitivne posledice koje bi se mogle očekivati od njihovog korišćenja, naišla na adekvatan odziv među inženjerima zaduženim za planiranje razvoja mreže. Ako bi se ovde postavilo pitanje uzroka usled koga je došlo do manjka interesovanja za te tehnike, moglo bi se doći do dva osnovna razloga iz kojih, prema mišljenju autora ovog rada, nije zabeležena njihova šira primena. Prvi je opštepoznata činjenica po kojoj se predlaganje ma kakvih inovativnih tehnologija vrlo često susreće sa skepticizmom među zaposlenima na čije bi aktivnosti ta inovacija uticala. Drugi uzrok bi bila činjenica da se, ukoliko se tehnika predstavi kao napredna i apstraktna, smanjuje stepen voljnosti zaposlenih da je isprobaju, na šta bi se, za razliku od prvog navedenog razloga, moglo uticati tako što bi se tehnika približila zaposlenima i predstavila striktno kao nadogradnja empirijskih metodologija koje oni svakodnevno koriste. Uz uzimanje i ove problematike u obzir, u ovom radu se predlaže metoda za nalaženje optimalne trase novih dalekovoda, zasnovana na širinskoj pretrazi - jednostavnoj, intuitivnoj i efikasnoj tehnici namenjenoj pretrazi grafova u svrhe nalaženja najkraćeg puta kojim bi se povezala dva predefinisana čvora uz uvažavanje postavljenih pravila i ograničenja [13]. Pored toga što se primenom ove tehnike unapređuje proces nalaženja optimalne trase novog voda, upotreba georeferencirane projekcije sistema je dozvolila da se u razvijenu metodu uključe kako tehničke odlike tog sistema, tako i karakteristike terena na kome se sistem nalazi. Ovo je, opet, dopustilo da se iz standardnog dvodimenzionalnog predstavljanja sistema u ravni, po logici geografske mape, pređe u prikazivanje mreže u trodimenzionalnom prostoru. Ova odluka je dovela do toga da je bilo moguće da se, prilikom izračunavanja dužine trase voda, u obzir uzmu i razlike u nadmorskim visinama delova terena preko kojih bi ta trasa prelazila. Iako bi se, na prvi pogled, moglo učiniti da te razlike nemaju veliki uticaj na dužinu trase, u praksi bi se mogao naći veoma veliki broj primera kojima bi se dokazalo suprotno, posebno u planinskim predelima gde bi trasa morala da prelazi provalije i litice čiju bi gotovo vertikalnu prirodu bilo poželjno uzeti u razmatranje pri proceni dužine iste.

Što se organizacije rada tiče, on će, pored uvodnog segmenta, biti podeljen u još četiri poglavlja. Drugo poglavlje rada će se, u cilju što boljeg pojašnjavanja uvodnih pretpostavki koje su korišćene za potrebe sprovedenih analiza, zasnivati na detaljnom opisivanju kreiranog test-sistema i reljefa terena na kome usvojeno da se taj sistem nalazi. Treće poglavlje će se baviti samom metodologijom za određivanje dužina trasa novih dalekovoda. Pritom će se poći od opšte definicije širinske pretrage koja se koristi za grafove, da bi se potom pojasnila svaka od modifikacija koje je bilo potrebno implementirati u ovu tehniku kako bi se omogućila primena iste u svrhe navedene u ovom radu. Nakon toga će četvrto poglavlje biti fokusirano na prikaz rezultata dobijenih u okviru sprovedenih analiza, pri čemu će posebna pažnja biti obraćena na poboljšanja koja je korišćenje razvijene metodologije donela u poređenju sa standardnim tehnikama koje se koriste za procenu dužina vodova u operatorima sistema. Stoga će se u ovom poglavlju pružiti uvid u urađenu uporednu analizu rezultata dobijenih za slučaj u kome je korišćena standardna empirijska metoda i za slučaj u kome je u

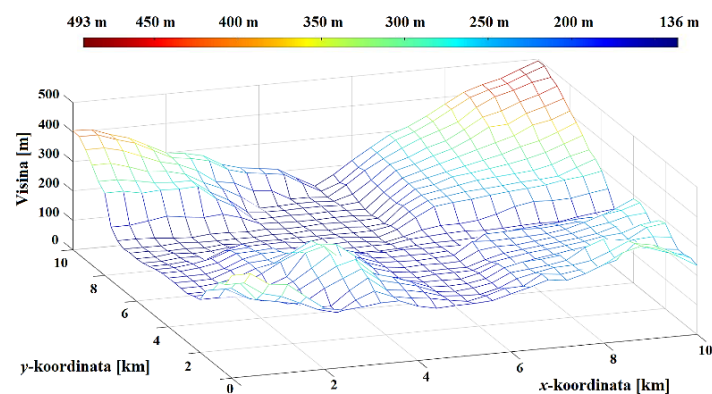
te svrhe primenjena ovde razvijena tehnika, bazirana na širinskoj pretrazi grafova. Na samom kraju rada će se nalaziti zaključak u kome će se rezimirati ishodi aktivnosti urađenih za potrebe rada i napomenuti potencijal koji ova tehnika nudi za dalja istraživanja.

II OPIS TEST-SISTEMA I RELJEFA TERENA

Kako bi se primena razvijene metode ilustrovala na odgovarajući način, kreiran je test-sistem, sačinjen od šest čvorova. Iako ovde nije bilo presudno kog su naponskog nivoa ti čvorovi, u praksi se može dogoditi da naponski nivo predstavlja ograničavajući faktor i trebalo bi ga, stoga, uzeti u obzir ako bi se ova tehnika koristila za proračune koji bi prethodili nekom od stvarnih projekata. Pri formiranju test-sistema, pretpostavljeno je da je svaki od čvorova u njemu povezan samo sa dva susedna čvora, te da je test-sistem koncipiran prstenasto.



Slika 1. Georeferencirana mapa terena i test-sistema



Slika 2. Nadmorske visine terena u izabranoj oblasti

Za potrebe analiza obavljenih u ovom radu je smatrano da se ovaj test-sistem nalazi na delu terena čiji reljef potpuno odgovara reljefu oblasti oko grada Kruševca, locirane u Centralnoj Srbiji. Ova oblast je izabrana pošto raspolaže obema karakteristikama bitnim sa aspekta razvijene metode - urbanom sredinom preko koje trasa voda ne bi mogla preći i varijacijama u nadmorskoj

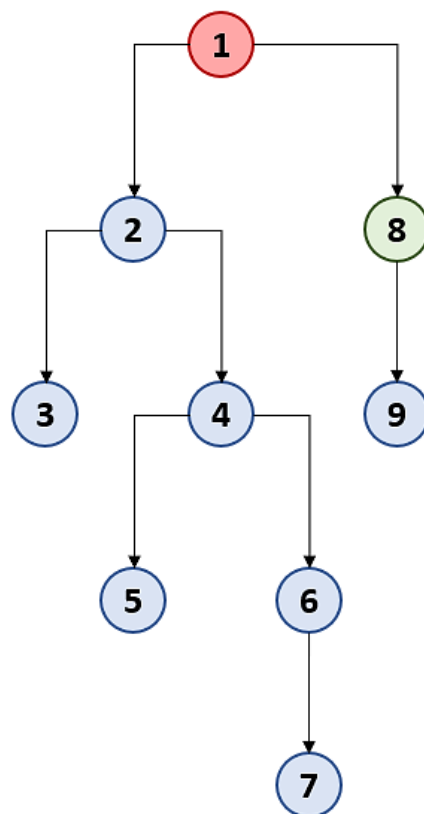
visini koje su dovoljno izražene da bi mogle uticati na procenu dužine novog dalekovoda. Izabrana oblast se proteže po 10 km u pravcima od istoka ka zapadu i od severa ka jugu, te je njena ukupna površina jednaka 100 km². Mapa na kojoj je data ova oblast sa ucrtanim test-sistemom (označeno zelenom bojom) i sa naznačenom gradskom sredinom (označeno crvenom bojom) se može videti na Sl. 1. Nadmorske visine delova terena u oblasti izabranoj za ove analize, preuzete iz [14], prikazane su na Sl. 2.

III OPIS KORIŠĆENE METODOLOGIJE

Kao što je i naznačeno u uvodnom poglavlju ovog rada, njegovo treće poglavlje je posvećeno opisivanju kreirane metodologije za procenjivanje dužina trasa novih dalekovoda. Ovde je, pre svega, potrebno objasniti šta je širinska pretraga grafova i zbog čega je baš ona odabrana kao baza na kojoj je zasnovana tehnika koja je predstavljena u ovom radu. Kako bi se to uradilo, potrebno je, na samom početku, malo izmeniti način na koji se sistem posmatra. Naime, za primenu ove metode je neophodno sagledavati sistem i teren na kome se on nalazi ne kao skup postrojenja i vodova, već kao graf sačinjen od čvorova i grana između njih. Ako bi se čitav region na kome se nalazi posmatrani sistem podelio na definisan broj delova terena, tada bi svaki od tih delova terena predstavljao po jedan čvor grafa. Postrojenja ovog sistema bi, u ovom slučaju, bila pripisana čvorovima grafa koji odgovaraju delovima terena na kojima se ta postrojenja u praksi nalaze. Grane grafa bi, prema tome, postojale između čvorova koji odgovaraju delovima terena koji se fizički graniče. U takvoj predstavi sistema bi najkraći put od jednog do drugog čvora grafa zapravo bio jednake dužine kao i optimalna trasa novog voda između postrojenja koja su locirana na delovima terena koji odgovaraju povezanim čvorovima. Zbog toga su, prilikom odabira metode za pronalaženje optimalne trase novog dalekovoda, razmatrane samo dve tehnike koje se najčešće biraju za pretraživanje grafova i nalaženje najkraćeg puta između dva čvora u njima - dubinska pretraga i širinska pretraga. Kako bi se objasnilo i zbog čega je širinska pretraga dobila prednost u odnosu na dubinsku pretragu, biće detaljno razmotrena primena i jedne, i druge metode na primer fiktivnog grafa u kome bi trebalo naći najkraći put između dva čvora. Ilustracija primene dubinske pretrage za pronalaženje željenog puta se može videti na Sl. 3.

Ovaj primer podrazumeva slučaj u kome se traži najkraći put od čvora označenog crvenom bojom (čvor broj 1 na Sl. 3) do čvora označenog zelenom bojom (čvor broj 8 na istoj slici). Brojevi koji su upisani u svaki od čvorova predstavljaju redosled kojim bi ovi čvorovi bili testirani ukoliko bi se koristila dubinska pretraga. Tu bi algoritam krenuo od početnog čvora, a potom bi pronašao prvu granu koja vodi od tog čvora. Put trasiran tom prvom granom bi bio ispraćen sve do prvog sledećeg račvanja, gde bi algoritam još jedanput izabrao prvu moguću granu i nastavio da je prati. Kada stigne do kraja puta definisanog granama biranim na ovaj način, algoritam se, ukoliko na tom putu nije pronašao ciljani čvor, vraća do poslednjeg račvanja koje je prešao i nastavlja da prati sledeću granu koja vodi od tog račvanja. Taj postupak se ponavlja dok se ne pronađe ciljani čvor. Međutim, ovakav pristup ima i nekolice nedostataka. Prvo, ako dužina puteva nije ograničena, može doći do situacije u kojoj bi algoritam završio u beskonačnoj petlji koja bi morala da se zaustavi manuelno. Drugo, ako bi postojalo više od jednog puta od početnog do ciljnog čvora, algoritam bi, nakon završetka postupka, predložio taj na koji je prvo naišao, što ne bi nužno značilo da neki od ostalih puteva nije bio kraći od njega. U

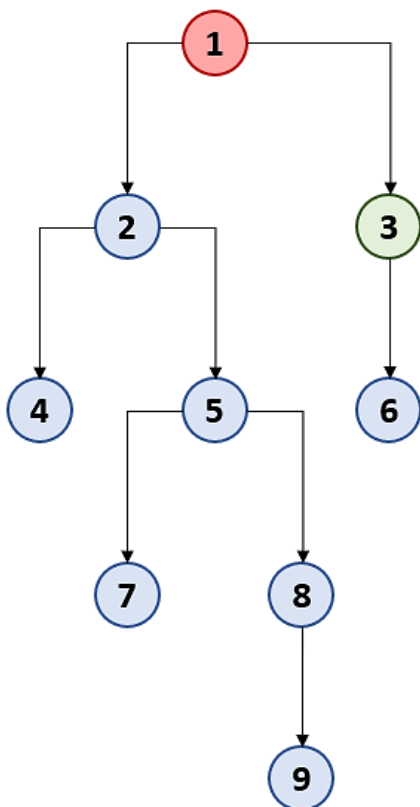
cilju izbegavanja takvih problema, odlučeno je da se predložena metoda ipak bazira na širinskoj pretrazi, predstavljenoj na Sl. 4. I u ovom primeru je bilo potrebno naći put od crvenog do zelenog čvora, s tim što je, kao što se može zaključiti na osnovu upisanih brojeva, ova metoda to uradila daleko efikasnije. Ovakva tehnika pretrage polazi od početnog čvora, a zatim proverava da li je neki od čvorova direktno povezanih sa njim ciljni. Ako nije, algoritam testira čvorove direktno povezane sa čvorovima koji su povezani sa početnim i tako sve dok ne pronađe ciljni čvor. Kada se željeni čvor nađe, korisniku se predlaže optimalni put između čvorova.



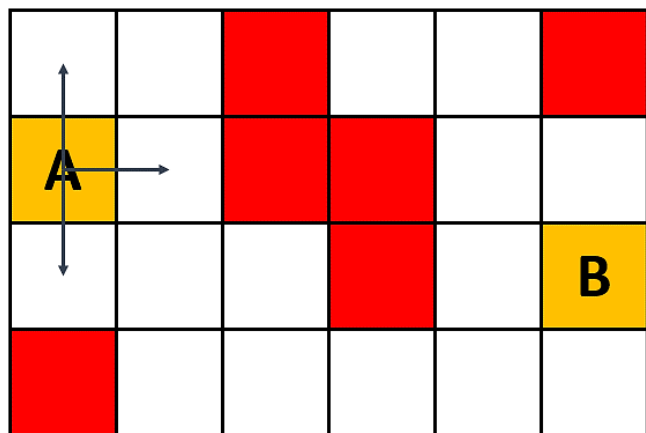
Slika 3. Primer dubinske pretrage grafa

Nakon što je objašnjeno zbog čega je odabrana širinska pretraga, može se preći i na pojašnjenje toga na koji bi način ona mogla da pomogne prilikom traženja optimalne trase novog dalekovoda. U te svrhe, formirana je posebna mreža od 24 kvadratna polja, gde je dužina stranice svakog od ovih kvadrata smatrana jediničnom. Zadatak je bio pronaći optimalni put od polja označenog slovom A do polja označenog slovom B, pri čemu taj put nije smeo preći preko polja obojenih crvenom bojom. Ukoliko bi se primenio već pojašnjeni princip prema kome bi svako polje odgovaralo jednom čvoru grafa, postalo bi jasno da bi prikazani zadatak bilo moguće svesti na problem sa prethodne dve slike, gde bi polje obeleženo slovom A bilo polazni, a polje obeleženo slovom B ciljani čvor. U slučaju primene standardne metode širinske pretrage, prvi korak bi, shodno opisu, predstavljala provera da li je neki od čvorova sa kojima je polazni čvor direktno povezan ciljani čvor. Ako bi se tu smatralo (u skladu sa uobičajenim načinom primene ove tehnike za pretragu prostora) da je polje direktno povezano samo sa onim poljima sa kojima deli stranicu, tada bi se u prvom koraku obavio test polja iznad, ispod i desno od početnog polja. To je prikazano

na Sl. 5. Unapređena verzija ovog algoritma, predložena u ovom radu, uvažava pretpostavku po kojoj se polje graniči sa nekim od drugih polja i u slučaju u kome dele samo teme. Ovime se metodi pretrage dozvoljava da već u prvom koraku testira ne tri, već pet polja, kao što se može videti na Sl. 6. U opštem slučaju bi se broj mogućih smerova kretanja povećao sa šest na osam, ali je to ovde bilo nemoguće zato što bi kretanje nalevo narušilo granice mreže.



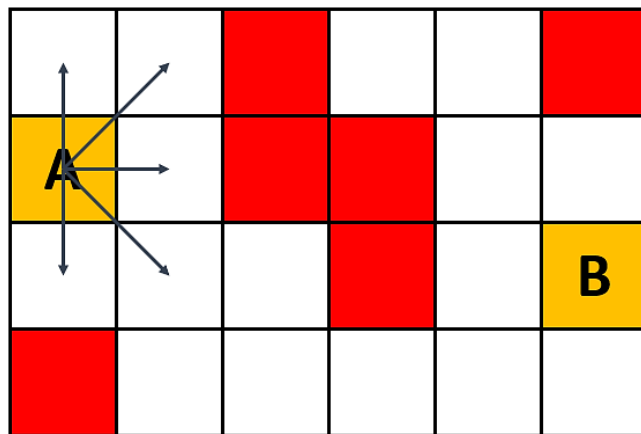
Slika 4. Primer širinske pretrage grafa



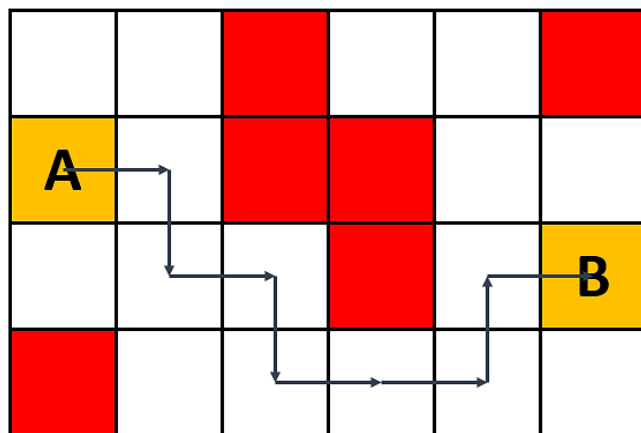
Slika 5. Prvi korak prema standardnoj pretrazi prostora

Naravno, ovo se moralo odraziti na način na koji se, nakon što se optimalna trasa pronađe, izračunava njena dužina. Ukoliko bi se koristila tipična metoda pretrage prostora zasnovana na širinskoj pretrazi, dužina trase bi bila jednaka proizvodu broja koraka koje je bilo potrebno napraviti da bi se došlo do cilja i dužine stranice

kvadratnog polja. Ako bi se koristila opisana unapređena tehnika, dužina svakog koraka načinjenog preko temena kvadratnog polja bi morala biti određena kao dužina stranice tog polja pomnožena kvadratnim korenom iz dva. Kako bi se to moglo uzeti u obzir pri izračunavanju dužine odabranog puta, potrebno je upamtiti i broj dijagonalnih koraka načinjenih na tom putu. Takođe, u slučaju da se do ciljnog čvora može stići na više od jednog načina, a u istom broju koraka, kao optimalni put se, zbog manje apsolutne dužine, korisniku nudi onaj koji uključuje manje dijagonalnih koraka, te je predlog koji korisnik vidi onaj koji je, za taj slučaj, optimalan. Da bi se prikazali efekti korišćenja unapređene metode, Sl. 7 i Sl. 8 prikazuju trase optimalnih puteva od polja A do polja B sudeći po standardnom i po unapređenom algoritmu. Optimalni put je, u slučaju u kome je korišćena standardna metoda, pronađen u osam koraka, te je njegova dužina jednaka osmostrukoj dužini stranice kvadratnog polja, što je, za ovde iznete pretpostavke, jednako 8. Što se tiče slučaja u kome je korišćena unapređena metoda, tu je optimalni put nađen u pet koraka, od kojih su tri bila dijagonalna. Shodno tome, dobijena je dužina trase jednaka 5,63. To znači da je dužina trase predložene od strane standardne metode za 28,4% veća od dužine trase dobijene pomoću unapređene tehnike.



Slika 6. Prvi korak prema unapređenoj pretrazi prostora



Slika 7. Optimalna trasa prema standardnoj pretrazi prostora

Iako je evidentno da je i samo uključivanje dijagonalnog kretanja kroz mrežu doprinelo povećanoj tačnosti dobijenih rezultata, ovo nije jedino poboljšanje koje je načinjeno u predloženoj tehnici za procenu dužine trasa novih dalekovoda. Naime, sva ovde izneta razmatranja su se odnosila isključivo na slučaj pri kome je sistem

predstavljen u dvodimenzionalnoj ravni. Ipak, u stvarnom životu, situacija može biti drugačija, pa može postojati značajna razlika između visina različitih delova terena preko kojih trasa treba da pređe. Ovo može uticati na dužinu te trase, ali ne može biti uzeto u razmatranje sve dok se oblast u kojoj se taj sistem nalazi gleda samo kao ravan. Kako bi uticaj razlika nadmorskih visina mogao biti uvažen u razvijenoj metodologiji, bilo je neophodno preći iz dvodimenzionalne ravni u trodimenzionalni prostor, pri čemu je i svakom od kvadratnih polja na koje je podeljena obrađena oblast bilo potrebno pripisati odgovarajuću nadmorsku visinu. Postupak nakon toga bi se najbolje mogao opisati na sledećem test-primeru u kome bi bilo potrebno naći udaljenost između kvadratnih polja 1 i 2, pri čemu bi se ova polja graničila preko jedne stranice. Prvi korak bi ovde bio usvajanje pretpostavke po kojoj bi ova distanca mogla biti izjednačena sa udaljenošću između centara ovih polja. Udaljenost između centara bi tada mogla biti određena prema:

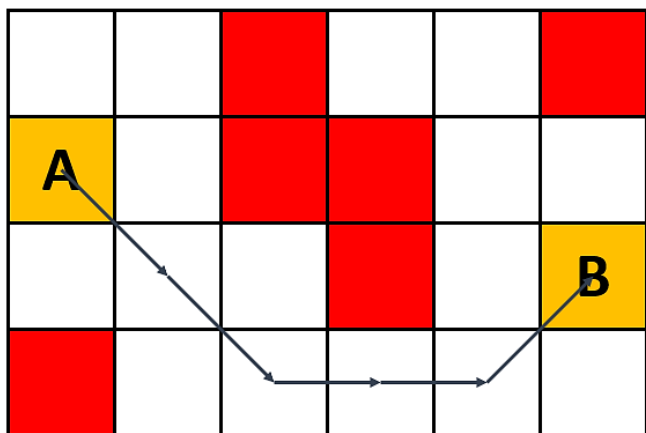
$$D_{1-2} = \sqrt{(D_{hor1-2}^2 + (H_2 - H_1)^2)} \quad (1)$$

gde su:

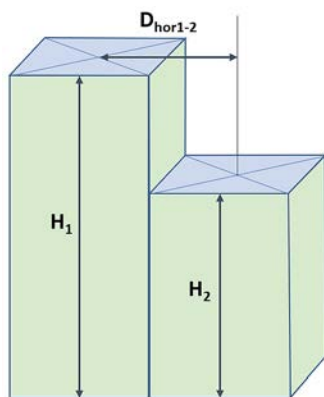
D_{1-2} - udaljenost između centara polja,

D_{hor1-2} - horizontalna udaljenost između centara projekcija polja u ravni,

H_1 i H_2 - nadmorske visine polja. Oznake su date i na Sl. 9.



Slika 8. Optimalna trasa prema unapređenoj pretrazi prostora.



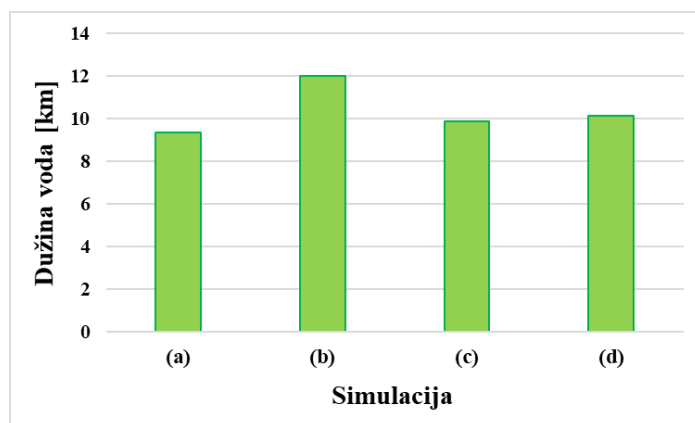
Slika 9. Uključivanje nadmorskih visina u proceduru

Ako bi sada bilo potrebno odrediti optimalnu trasu puta između

unapred definisanog početnog i ciljnog kvadratnog polja, slično primeru sa prethodne stranice, krenulo bi se od toga da se pronađe ne samo najkraći put između njih u dvodimenzionalnoj ravni, već bi se pronašlo (pod uslovom da ih toliko postoji) deset nezavisnih najkraćih puteva između ovih polja. Ako ovih puteva ne bi postojalo toliko, uzelo bi se onoliko nezavisnih trasa koliko ih postoji. Broj od deset nezavisnih puteva u dvodimenzionalnoj ravni, određenih u skladu sa metodologijom ilustrovanom na Sl. 8, odabran je empirijski, kroz veliki broj testiranja razvijene tehnike na različitim primerima. Potom bi svaki od tih deset puteva bilo potrebno prebaciti u trodimenzionalni prostor, primenom obrasca (1) onoliko puta koliko je iteracija odrađeno kako bi se formirala razmatrana trasa. Kada bi se to izvršilo, ona trasa koja bi u ovom prostoru imala najmanju dužinu bila bi proglašena optimalnom, a njena dužina bi potom bila prikazana kao dužina najkraćeg puta. Ovime bi se procedura opisana u ovom radu i zvanično završila.

IV PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA

Kako bi se sprovelo testiranje razvijenoj algoritma, uzet je primer prikazan na Sl. 1, pri čemu je usvojeno da je novim dalekovodom potrebno povezati čvor 2 (na levoj strani mape) sa čvorom 4 (na desnoj strani mape). Ti čvorovi su prevashodno izabrani zato što se između njih nalazi gradska sredina, označena crvenom bojom, pa je algoritam imao prilike da demonstrira ugrađenu sposobnost zaobilazanja zona preko kojih u realnosti ne bi bilo moguće proći novim nadzemnim vodom. Prema koordinatnom sistemu koji je označen na odgovarajućoj mapi mreže, kvadratnom polju na kom se nalazi čvor 2 bi odgovarale koordinate (1, 4,6), dok bi polju na kome je lociran čvor 4 bio pripisan par koordinata (9,4, 3,4). Kao što se može videti, dužina stranice jednog kvadratnog polja je, za ovaj slučaj, iznosila 400 m.



Slika 10. Uporedni prikaz dobijenih rezultata.

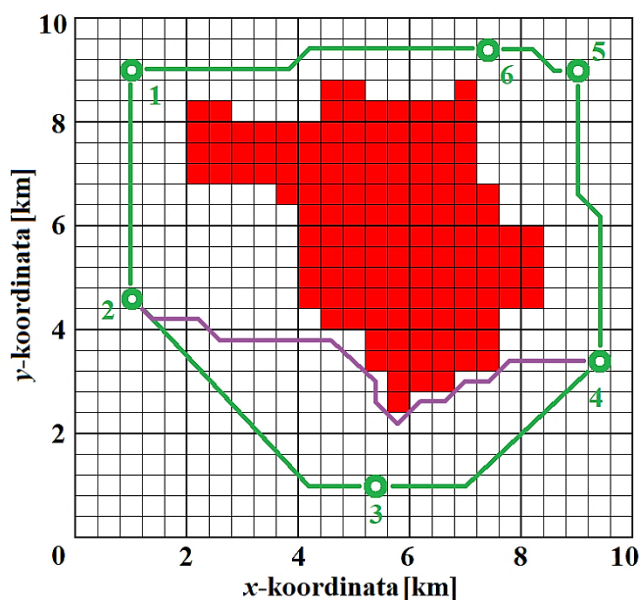
Sprovedene su četiri simulacije:

- Simulacija (a): dužina novog dalekovoda je računata po empirijskoj formuli, tako što je dužina duži povučene od jednog do drugog čvora na mapi uvećana za 10%. Po toj metodi, dobijeno je da je dužina voda jednaka 9,34 km.
- Simulacija (b): dužina novog dalekovoda je računata po sistemu klasične širinske pretrage u dvodimenzionalnoj ravni, slično onome što je prikazano na Sl. 7. Prema toj metodi, dobijeno je da je dužina voda jednaka 12 km.
- Simulacija (c): dužina novog dalekovoda je računata po

principima unapređene širinske pretrage u ravni, slično onome što je prikazano na Sl. 8, na prethodnoj stranici. Na ovaj način je dobijeno da je dužina voda 9,88 km.

- Simulacija (d): dužina novog dalekovoda je računata po pravilima algoritma za pretragu prostora u tri dimenzije, kao što je opisano pred kraj prethodnog poglavlja. Po toj metodi, dobijeno je da je dužina voda jednaka 10,13 km.

Da bi se olakšala uporedna analiza dobijenih rezultata, kreiran je dijagram na Sl. 10, na kome se mogu videti sve četiri rezultata iz gornje liste. Na kraju je, za simulaciju (d), to jest, slučaj u kome je korišćen razvijeni inovativni algoritam, formirana i mapa koja je data na Sl. 11. Ova mapa predstavlja nadogradnju mape sa Sl. 1, pri čemu se na njoj, osim svega datog na osnovnoj mapi, može videti i preporučena trasa novog dalekovoda između čvorova 2 i 4, memorisana u toku vršenja iteracija obuhvaćenih algoritmom i naznačena ljubičastom bojom na ovoj mapi u svrhe vidljivosti.



Slika 11. Preporučena trasa novog dalekovoda.

V ZAKLJUČAK

Kao što se može zaključiti sa dijagrama datog na Sl. 10, rezultati dobijeni različitim metodama ukazuju na to da su u simulacijama (a) i (c) izračunate dužine koje su manje od dužine koja odgovara simulaciji (d). Sa druge strane, krajnji rezultat simulacije (b) bila je dužina koja je veća od one dobijene simulacijom (d). Mada se, na prvi pogled, može činiti da su apsolutne razlike u rezultatima ovde prilično male, to se može i mora pripisati tome što je dužina voda koji se posmatra svega oko 10 km, a da je cela obuhvaćena oblast površine jednake 100 km². Ukoliko bi se identične metode primenile na slučajeve iz inženjerske prakse u kojima je potrebno povezati postrojenja udaljena po nekoliko desetina, pa i nekoliko stotina kilometara, postalo bi jasno u kojoj bi meri iste relativne razlike uticale na raspodelu raspoloživog budžeta operatora. Iako je i iz prikazanog test-primera relativno evidentno u kojoj bi meri inovativna tehnika predložena u radu mogla pomoći u planerskim aktivnostima, to bi postalo još očiglednije ako bi se uzelo u obzir i to da tipična cena 110 kV dalekovoda iznosi oko 175000 €/km [15]. Pored toga što se korišćenjem novog algoritma inženjerima omogućava dodatni stepen pouzdanosti pri raspodeli finansijskih

sredstava, ugrađena funkcionalnost ove tehnike pomoću koje se, pored dužine novog voda, korisnicima daje uvid u trasu kojom bi taj vod trebalo da se kreće dozvoljava blagovremeno otpočinjanje procedura pribavljanja neophodne dokumentacije, čime se mogu značajno ublažiti kašnjenja u gradnji projekata usled nedostataka potrebnih dozvola i birokratskih petlji koje bi se time pokrenule.

Sve ovo se može uzeti kao potvrda ne samo toga da bi razvijena metoda mogla biti od koristi velikom broju stručnjaka zaduženih za planiranje novih projekata u sistemima, već i toga da se u ovoj oblasti može naći značajan prostor za unapređivanje, pri čemu se gotovo svaki aspekt planerskih procesa može bar u izvesnoj meri učiniti preciznijim ili efikasnijim. U skladu sa time, i autori ovog rada će svoja dalja istraživanja usmeriti ka automatizaciji ostalih koraka u realizaciji projekata, posebno onih koji podrazumevaju izgradnju infrastrukturnih objekata od značaja kako za operatora sistema, tako i za korisnike koji se preko tog sistema snabdevaju.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dib, D., Mordjaoui, M. Study of the Influence High-voltage Power Lines on Environment and Human Health (Case Study: The Electromagnetic Pollution in Tebessa City, Algeria), *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-8, 2014. <https://doi.org/10.11648/j.jee.20140201.11>
- [2] Carles, C., Esquirol, Y., Turuban, M., Piel, C., Migault, L., Pouchieu, C., Bouvier, G., Fabbro-Peray, P., Lebaillly, P., Baldi, I. Residential proximity to power lines and risk of brain tumor in the general population, *Environmental Research*, Vol. 185, pp. 109473, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109473>
- [3] Biasotto, L.D., Kindel, A. Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 71, pp. 110-119, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.010>
- [4] Kohl, M.T., Messmer, T.A., Crabb, B.A., Guttery, M.R., Dahlgren, D.K., Larsen, R.T., Frey, S.N., Liguori, S., Baxter, R.J. The effects of electric power lines in the breeding ecology of greater sage-grouse, *PLoS ONE*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-25, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209968>
- [5] Richardson, M.L., Wilson, B.A., Aiuto, D.A.S., Crosby, J.E., Alonso, A., Dallmeier, F., Golinski, G.K. A review of the impact of pipelines and power lines on biodiversity and strategies for mitigation. *Biodiversity and Conservation*, Vol. 26, pp. 1801-1815, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1341-9>
- [6] Građani niškog naselja Brzi Brod sprečili radnike EMS da kopaju rupe za dalekovod, policija izašla na mesto protesta, 2022. <https://www.danas.rs/vesti/drustvo/gradjani-niskog-naselja-brzi-brod-sprečili-radnike-ems-da-kopaju-rupe-za-dalekovod-policija-izasila-na-mesto-protesta/> [pristupljeno 03.04. 2023]
- [7] Steel materials prices surge as impact of Ukraine war bites. <https://www.building.co.uk/news/steel-materials-prices-surge-as-impact-of-ukraine-war-bites/5117546.article> [pristupljeno 03.04. 2023]
- [8] A.d. Elektromreža Srbije. Plan razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2021. - 2030. godine. <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/07/Plan-razvoja-prenosnog-sistema-2.pdf> [pristupljeno 15.04. 2023. godine]
- [9] Zhang, L., Li, Q., Wang, Z., Liu, H., Li, Z., Gui, Y., Kletzli, R., Yang, X., Chen, S., Liu, Y. Lidar application in selection and design of power line route, in *Proc. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, pp. 3109-3111, 23-28 July 2007. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423502>
- [10] Khan, L.A., Naik, K., Ahmed, M., Al-Tekreeti, M. Ranking of routes for electrical transmission lines using GIS and image processing techniques, in *Proc. 2019 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Montreal, Canada, pp. 1-8, 16-18 October 2019. <https://doi.org/10.1109/EPEC47565.2019.9074782>
- [11] Eroglu, H., Aydin, M. Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 23, pp. 1418-1430, 2019.

<https://doi.org/10.3906/elk-1211-59>

- [12] Franken, M., Barrios, H., Schrief, A.B., Puffer, R. Transmission expansion planning considering detailed modeling of expansion costs, in Proc. *IEEE 2019 Milan PowerTech*, Milano, Italy, pp. 1-6, 23-27 June 2019. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810437>
- [13] Vidyashri, M.H. Breadth-first search example advantages and disadvantages. <https://www.vtupulse.com/artificial-intelligence/breadth-first-search-example-advantages-and-disadvantages/> [pristupljeno 08.04. 2023]
- [14] Platforma sa topografskim mapama. <https://en-bw.topographic-map.com> [pristupljeno 08.04. 2023]
- [15] ACER. Report on unit investment cost indicators and corresponding reference values for electricity and gas infrastructure, Version 1.1. 2015. <https://acer.europa.eu/news-and-events/news/acer-publishes-report-unit-investment-costs-indicators-and-corresponding-reference-values-european-energy-infrastructure> [pristupljeno 08.04. 2023]

[investment-costs-indicators-and-corresponding-reference-values-european-energy-infrastructure](https://www.acer.europa.eu/news-and-events/news/acer-publishes-report-unit-investment-costs-indicators-and-corresponding-reference-values-european-energy-infrastructure) [pristupljeno 08.04. 2023]

AUTORI/AUTHORS

msr Vladan Ristić - mast. inž. elektr. i računar., Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” i Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, vladagenius.vr@gmail.com, ORCID [0000-0001-9571-3238](https://orcid.org/0000-0001-9571-3238)
dr Darko Šošić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, sasic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-9029-8979](https://orcid.org/0000-0001-9029-8979)
msr Dragana Ristić - mast. inž. elektr. i računar., Projektni biro i usluge „AL & SA” d.o.o. Pančevo, dragana.ristic@alisadoo.rs, ORCID [0000-0002-3516-4457](https://orcid.org/0000-0002-3516-4457)

Analiza kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na krovovima stambenih zgrada u Srbiji

Analysis of Capacity for the Construction of Photovoltaic Systems on Residential Building Roofs in Serbia

Iva Batić*, Aleksandar Ivančić**

* Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu

** Sistemes Avançats d'Energia Solar Tèrmica - AIGUASOL

Rezime - Krovovi stambenih zgrada predstavljaju relevantan potencijal za izgradnju fotonaponskih panela. S obzirom da su krovne konstrukcije pasivne, konstrukcija fotonaponskih sistema na stambenim zgradama ne ometa funkcionalnost zgrade, niti na bilo koji drugi način utiču na životnu sredinu. Instalacijom fotonaponskih sistema na krovovima stambenih objekata u maksimalnoj mogućoj meri se približavaju proizvodnja i potrošnja električne energije, pa ovakvi sistemi obezbeđuju značajno smanjenje gubitaka električne energije u distributivnoj i prenosnoj mreži. U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja koje je imalo za cilj postavljanje okvira za decentralizovanu i dekarbonizovanu proizvodnju električne energije iz fotonaponskih sistema integrisanih u krovove stambenih zgrada u Srbiji, kroz podršku pristupa kupac-proizvođač. Za svaku utvrđenu kategoriju stambene zgrade u Srbiji, procenjena je moguća godišnja proizvodnja električne energije po jedinici prosečne površine krova. Sumirajući sve rezultate, urađena je procena mogućeg instalisanog kapaciteta fotonaponskih sistema, kao i procena godišnje proizvodnje električne energije na nacionalnom nivou.

Ključne reči - stambeni objekti, krovne površine, fotonaponski sistemi, instalisana snaga

Abstract - The roofs of residential buildings represent a relevant potential for the construction of photovoltaic panels. Given that roof structures are passive, the construction of photovoltaic systems on residential buildings does not interfere with the functionality of the building, nor do they affect the environment in any other way. By installing photovoltaic systems on the roofs of residential buildings, the production and consumption of electricity are brought closer to the maximum possible extent, so such systems ensure a significant reduction of electricity losses in the distribution and transmission network. This paper presents the results of research aimed at establishing a framework for decentralized and decarbonized production of electricity from photovoltaic systems integrated into the roofs of residential buildings in Serbia, through the support of the prosumer approach. For each defined category of residential building in Serbia, the possible annual production of electricity per unit of average roof area was estimated. Summarizing all the results,

assessments of the possible installed capacity of photovoltaic systems and annual electricity production at the national level were made.

Index terms - Residential buildings, Roof surfaces, Photovoltaic systems, Installed power

I UVOD

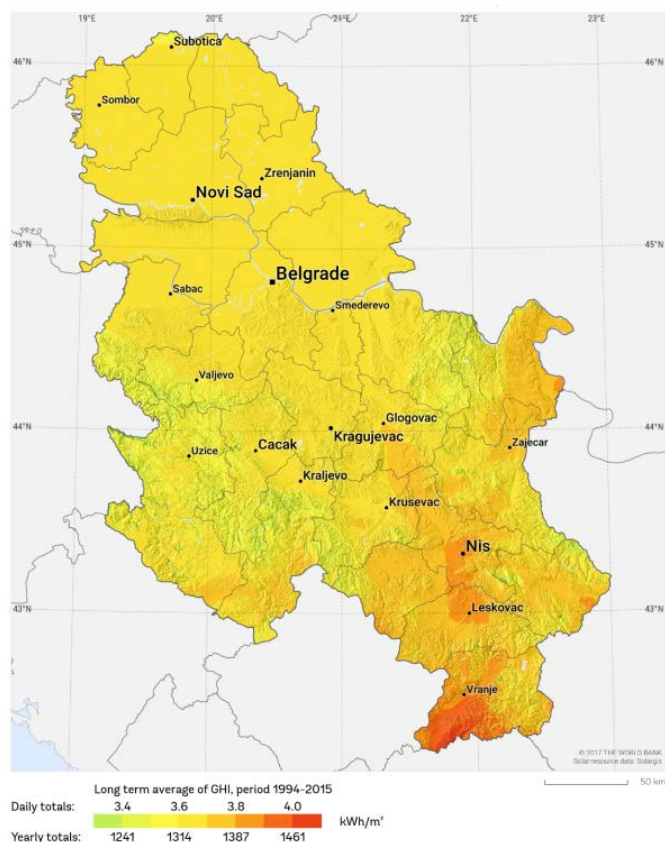
Električna i toplotna energija se u Srbiji još uvek proizvodi korišćenjem fosilnih goriva u zastarelim i energetske neefikasnim proizvodnim postrojenjima. Preko 70% električne energije se dobija iz termoelektrana, a oko 25% se dobija iz hidroelektrana. Procenjuje se da se svega 5% električne energije dobija iz vetro i solarnih elektrana. Posledice toga su brojne, kao na primer, visoke emisije gasova staklene bašte (GHG emisije), povećano zagađenje vazduha, kao i lokalno zagađenje životne sredine. Vlada Republike Srbije je prepoznala solarni energetske potencijal naše zemlje i za cilj postavila povećanje učešća obnovljivih izvora energije (OIE) u bruto finalnoj potrošnje energije, kao i poboljšanje energetske efikasnosti u svim sektorima. Kupac-proizvođač (prozumer) pristup uveden je u novi Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije [1], kao modalitet sopstvene potrošnje i sopstvene proizvodnje za pojedince i energetske zajednice. Instaliranjem fotonaponskog sistema na krovu zgrade, kupac-proizvođač postaje samostalni proizvođač električne energije za sopstvenu potrošnju, dok istovremeno sav višak energije koju proizvede može da skladišti u mreži ili je može skladištiti u baterijama.

Stambeni objekti u Srbiji predstavljaju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih sistema, koji bi bili integrisani u krovove ovih objekata. Izgradnja fotonaponskih sistema ne narušava funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno utiče na okolinu i životnu sredinu [2,3].

Fotonaponski sistemi služe za proizvodnju električne energije pomoću konverzije energije Sunčevog zračenja u električnu i značajni su ne samo zbog smanjenja emisije CO₂, već se postiže i efekat lokalne proizvodnje električne energije i smanjuje se neto preuzeta električna energija iz distributivnog sistema, čime se značajno smanjuju gubici električne energije u prenosnoj i

distributivnoj mreži. Količina električne energije koja se može dobiti iz fotonaponskih sistema pre svega zavisi od dozračene solarne energije na lokaciji objekta koji se posmatra i analizira. Snaga solarnog zračenja na površini Zemlje zavisi od više faktora, kao što su: geografska širina, oblačnost, godišnje doba i doba dana.

Za kreiranje nacionalne energetske politike izuzetno je značajno imati uvid o solarnom potencijalu na teritoriji Republike Srbije [3,4]. Na slici 1. prikazana je mapa globalnog potencijala solarnog zračenja na teritoriji Republike Srbije. Može se zaključiti da prosečna godišnja dozračena energija sunca po jedinici horizontalne površine na otvorenom terenu iznosi od 1450 kWh/m² na jugu, do oko 1250 kWh/m² na severu Srbije [5].



Slika 1. Solarni potencijal Srbije [5]

II METODOLOGIJA

Kao baza podataka u ovom istraživanju je korišćena postojeća Nacionalna tipologija stambenih zgrada u Srbiji, koja je nastala tokom nekoliko višegodišnjih istraživačkih projekata grupe profesora i saradnika Arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, čiji je cilj bio izrada prve te vrste, sveobuhvatne klasifikacije jedno i višeporodičnih stambenih zgrada u Srbiji.

Rezultati istraživanja su publikovani u monografskoj publikaciji Nacionalna tipologija stambenih zgrada u Srbiji [6], u kojoj je definisana 39 tipologija zgrada do 2011. godine. Pored toga, ista istraživačka grupa, uz podršku Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, razvila je on-line platformu <http://eekalkulator.mgsi.gov.rs/> [7], gde se informacije o objektima ažuriraju do 2016. godine. Platforma uvodi još 4

nove tipologije zgrada koje opisuje novije zgrade i sada broji 43 tipologije stambenih zgrada, što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Tipologije stambenih objekata

<http://eekalkulator.mgsi.gov.rs/> [7]

U ovom istraživanju analizirano je svih 43 tipologija stambenih objekata. Obimnim ispitivanjem terena, analiza je obuhvatila sve relevantne parametre, a to su: ukupna površina otiska zgrade, vrsta krova (dvovodni, četvorovodni, ravan krov), nagib krova, vrsta područja zgrade (urbano/ruralno), procena raspoloživosti slobodne površine krova za postavljanje fotonaponskih panela.

Tipologije stambenih objekata, obuhvaćenih navedenim izvorima, obuhvataju ukupno 3.202.850 stanova. Najnoviji statistički podaci pokazuju povećanje od 111.000 stanova u Srbiji u periodu od 2017. do 2021. godine. Razlika između ove dve baze podataka iznosi 3,4%, što se može smatrati zanemarljivim.

Metodologija proračuna koji se koristi za procenu nacionalnog fotonaponskog potencijala, u smislu mogućeg instalisanog kapaciteta (kWp) i moguće godišnje proizvodnje električne energije (kWh/god) je podeljena na tri glavna koraka. Svaki od ovih koraka je detaljno opisan u narednim delovima rada.

III PROCENA RASPOLOŽIVE POVRŠINE KROVA

Prvi korak ima za cilj da proceni raspoloživu površinu koja može da se prilagodi za postavljanje fotonaponskih panela. Uglavnom se zasniva na prikupljanju i obradi podataka prikupljenih iz Nacionalne tipologije stambenih zgrada i prateće on-line platforme.

Da bi procenili krovne površine stambenih objekata koje su pogodne za postavljanje fotonaponskih sistema, od velike važnosti je odrediti tipologiju zgrade kojoj krov pripada, znati nagib krova, izračunati otisak zgrade, kao i znati procenat već iskorišćenog dela krova drugim građevinskim elementima.

Nedostatak detaljnih informacija je veoma čest slučaj prilikom procena fotonaponskog potencijala, pa je potrebno uvesti nekoliko pretpostavki. Pretpostavke se uglavnom baziraju na referentnim vrednostima koje potiču iz drugih sličnih studija i prakse ili iz sopstvenog iskustva istraživača.

U ovom istraživanju uvedene su sledeće pretpostavke [4, 8].:

- Tipologije zgrada su podjednako raspoređene širom zemlje, što znači da su zastupljene u svim regionima Srbije.
- Kod svake tipologije objekata krov može biti geografski orijentisan ka severu, jugu, istoku i zapadu. Unutar svih tipologija postoji jednak broj objekata sa tom orijentacijom.
- Razmatraju se tri osnovna oblika krova: dvovodni, četvorovodni i ravni krovovi.
- Razmatraju se četiri nagibna ugla kosih krovova: 15°, 20°, 30°, 40°. Ravni krovovi omogućavaju da se na njima može postaviti noseća konstrukcija sa optimalnom orijentacijom (azimutnim i nagibnim uglom). Kod izgradnje konstrukcije mora se voditi računa o međusobnom rastojanju redova fotonaponskih panela tako da ne dolazi do međusobnog zasenčenja.
- Različiti krovni elementi poput dimnjaka, kućica za lift i ostali građevinski objekti zauzimaju između 5 i 15% ukupne površine krova u zavisnosti od tipologije zgrade i predstavlja se koeficijentom C_f .
- Efekat zasenčenja od drugih zgrada i drveća se smatra da iznosi između 10 i 40% u zavisnosti od tipologije zgrade i predstavlja se koeficijentom C_{sh} .
- Pretpostavlja se da prostor potreban za ugradnju i održavanje fotonaponskih modula zauzima 20% raspoložive površine krova i predstavlja se koeficijentom C_{cov} .
- Pretpostavlja se da je efikasnost fotonaponskog modula 19,5%. Uzimajući u obzir minimalne razmake između panela od 5% površine koja je pogodna za postavljanje fotonaponskih panela dobija se gustina snage od 0,18 kW/m². Takva efikasnost podrazumeva korišćenje monokristalne fotonaponske tehnologije.
- Gubici sistema se procenjuju na 14% i tu spadaju gubici usled zaprljanja panela, neuparenosti modula u stringu, degradaciju efikasnosti panela u toku eksploatacije, gubitaka na invertoru i gubitaka u električnim vezama.

Usled ovih gubitaka, snaga koja se isporučuje potrošaču ili električnoj mreži manja je od snage koju proizvode sami fotonaponski moduli.

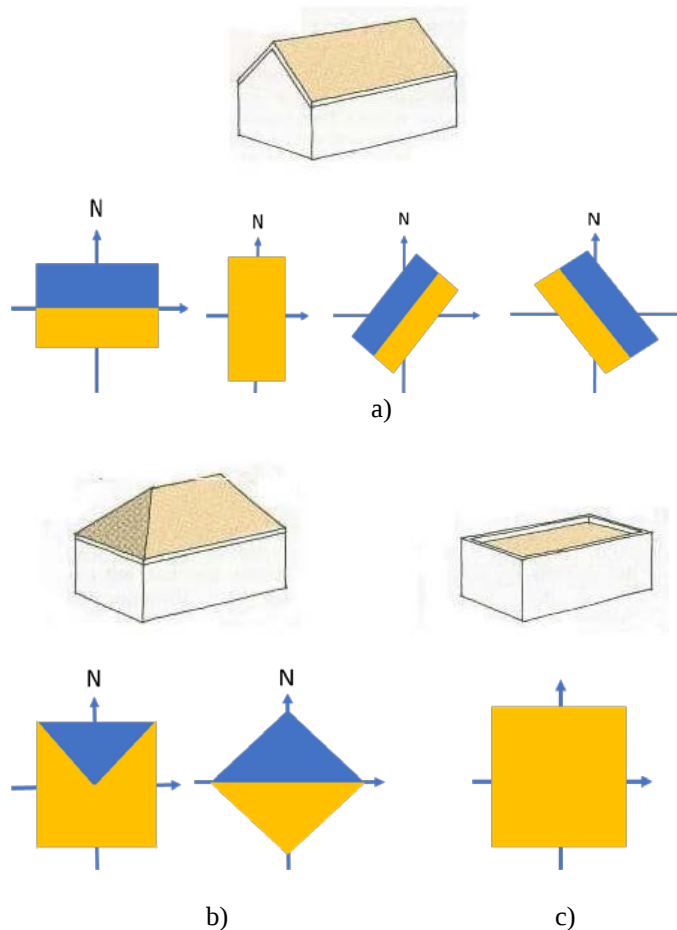
Izgradnja fotonaponskih sistema je podrazumevana na raspoloživim krovnim površinama koje imaju najbolju prostornu orijentaciju sa aspekta ukupne godišnje insolacije. Moduli sa neodgovarajućom orijentacijom primaju samo mali deo sunčevog zračenja, te na taj način proizvode malu količinu električne energije. Raspoložive površine koje se mogu koristiti za ugradnju fotonaponskih modula su po pretpostavci kose ili ravne površine krovova čija je orijentacija u granicama $\pm 90^\circ$ u odnosu na jug.

Na slici 3. žuta boja predstavlja odgovarajuću orijentaciju krova, a plava boja neodgovarajuću orijentaciju krova. Prikazani su slučajevi za sve tri vrste krova: dvovodne, četvorovodne i ravne.

Vrednosti raspoloživih krovnih površina analiziranih stambenih objekata su dobijene korišćenjem podatka o površini otiska zgrade iz Nacionalne tipologije stambenih zgrada u Srbiji, za svaku od 43 tipologije stambenih zgrada. Kod stambenih

objekata sa kosim dvovodnim i četvorovodnim krovovima, površina krova je dobijena geometrijskom projekcijom uzimajući u obzir procenjeni nagibni ugao krova, izraz (1).

$$Površina\ krova = \frac{Ovisak\ zgrade}{\cos(Nagib\ krova)} \quad (1)$$



Slika 3. Moguće orijentacije kod a) dvovodnih krovova, b) četvorovodnih krovova, c) ravnih krovova [9]

Za stambene objekte sa ravnim krovom, površina krova je jednaka površini otiska zgrade.

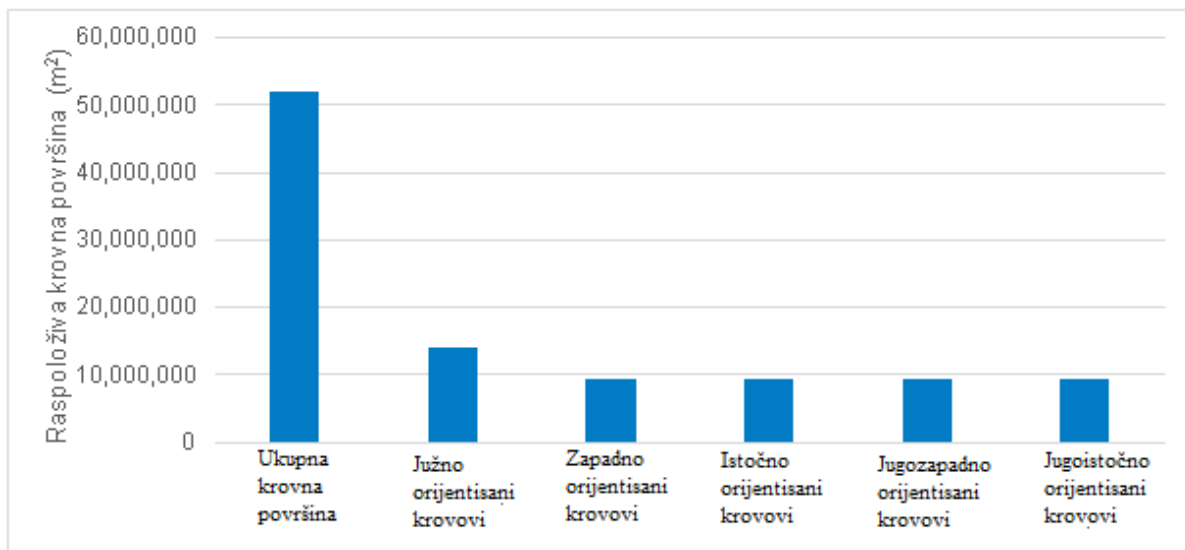
Na osnovu obrađenih podataka, ukupna krovna površina za fond stambenih zgrada u Srbiji iznosi 133.751.452 m² odnosno 133,75 km². Vrednosti dobijene geometrijskim projekcijama ne odgovaraju korisnoj površini krova, ona se dobija oduzimanjem zauzete površine krova ostalim građevinskim objektima od ukupne površine krova.

Usvajanjem kriterijuma o odabiru samo pravilnih orijentacija krovova za svaku tipologiju i oduzimanjem površina koje zauzimaju različiti građevinski elementi koji se nalaze na krovovima prema odgovarajućim koeficijentima C_f za svaku tipologiju zgrade, dobijena korisna površina je 80.451.664 m².

Konačno usvajanjem faktora zasenčenja C_{sh} koji odgovaraju svakoj tipologiji stambenih zgrada i prostoru potrebnom za

fizičku instalaciju i održavanje fotonaponskih modula C_{cov} korisni krovni prostor pogodan za instaliranje fotonaponskih modula iznosi 52.022.709 m² odnosno 52 km².

Na grafikonu na slici 4. je prikazana ukupna krovna površina stambenih objekata u Srbiji pogodna za postavljanje fotonaponskih panela sa odgovarajućim orijentacijama [9].



Slika 4. Krovna površina stambenih objekata u Srbiji pogodna za postavljanje fotonaponskih panela sa odgovarajućim orijentacijama [9]

IV PROCENA INSTALISANOG KAPACITETA

Drugi korak je procena instalisanog kapaciteta, kao i geografska segmentacija koja je urađena kako bi se dobila regionalna distribucija kapaciteta električne energije.

Faktor instalisanog kapaciteta odgovara instalisanom kapacitetu po raspoloživoj jedinici površine i izražen je u kW/m². Njegova vrednost je direktno povezana sa tipom tehnologije od koje su izrađeni fotonaponski paneli koji će se koristiti i sa vrstom krova na koji će paneli biti postavljeni. Korišćen je monokristalni fotonaponski modul snage 365W i nazivne efikasnosti 19,5%. Fotonaponski moduli ove efikasnosti su izabrani kao moduli prosečne efikasnosti koja uzima u obzir tehnološki napredak fotonaponskih modula u narednom periodu, kao i degradaciju efikasnosti modula tokom njihovog životnog veka [10].

Faktor instalisanog kapaciteta je uzet u obzir za svaki tip krova (dvovodni, četvorovodni i ravan krov).

U slučaju kada stambeni objekat ima dvovodni krov fotonaponski paneli se postavljaju pod istim nagibom uglom kao što je i nagibni ugao samog krova. Razmatrani faktor instalisanog kapaciteta je 0,18 kWp/m². Kod stambenih objekata koji imaju četvorovodni krov, isto kao u prethodnom slučaju, fotonaponski paneli se postavljaju pod istim nagibom uglom kao što je i nagibni ugao samog krova. Geometrija ovog tipa krova ne dozvoljava pokrivanje cele površine krovne ravni, pa se pretpostavlja da se može iskoristiti samo 50% površine. Razmatra se faktor instalisanog kapaciteta od 0,09 kWp/m².

U slučaju kada stambeni objekat ima ravan krov, fotonaponski paneli se postavljaju pod nagibnim uglom od 15°. Razmak

između panela se koristi za sprečavanje zasenčenja između redova postavljenih panela. Razmatra se faktor instalisanog kapaciteta od 0,1 kWp/m².

Kapacitet instalisane snage za svaku tipologiju zgrada se izračunava množenjem površine pogodne za ugradnju FN panela za svaku datu tipologiju stambene zgrade i faktorom instalisanog kapaciteta koji je povezan sa odgovarajućim tipom krova. Ukupni nacionalni kapacitet instalisane snage je zbir kapaciteta za sve tipologije zgrada.

Da bi se dobio potencijal za izgradnju fotonaponskih sistema za svaki region širom zemlje, potrebno je izvršiti raspodelu krovne površine za svaku analiziranu tipologiju zgrada po regionu. Geografska raspodela je napravljena da bi se procenio udeo instalisanog kapaciteta širom zemlje. Napravljena je podela na četiri geografska regiona, vodeći računa o rasporedu gradskog i seoskog stanovništva u skladu sa podacima nacionalne statistike. To su: Region Vojvodine, Beogradski region, Region Šumadije i Zapadne Srbije i Region Južne i Istočne Srbije. U obzir je uzeta administrativna podela Republike Srbije, prema zakonski važećoj teritorijalnoj podeli, a u skladu sa kojom su organizovani podaci Statističkog Zavoda Srbije.

Svaka tipologija zgrada je podjednako raspoređene širom zemlje, što znači da je zastupljena u svim regionima zemlje. Svakoј tipologiji zgrade dodeljen je tip urbane ili ruralne sredine, što je prikazano u tabeli 1.

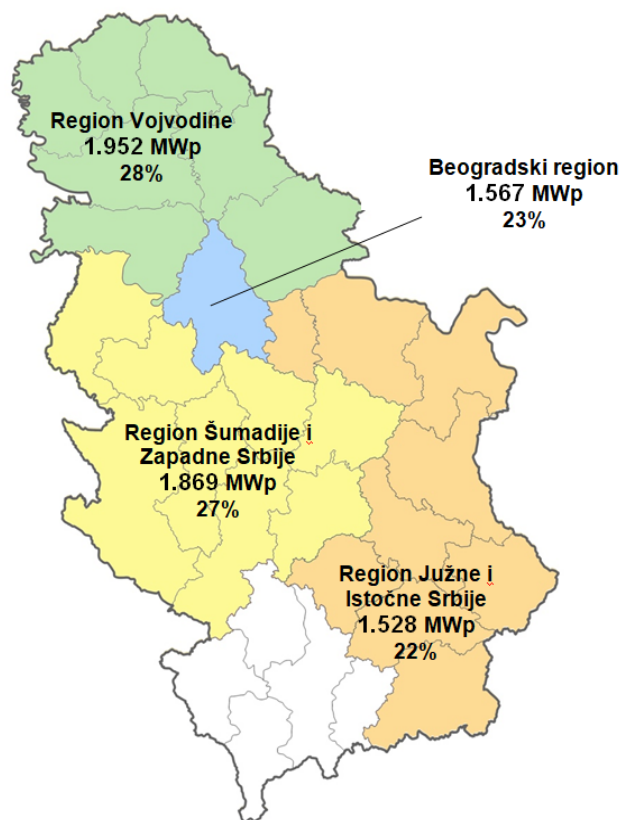
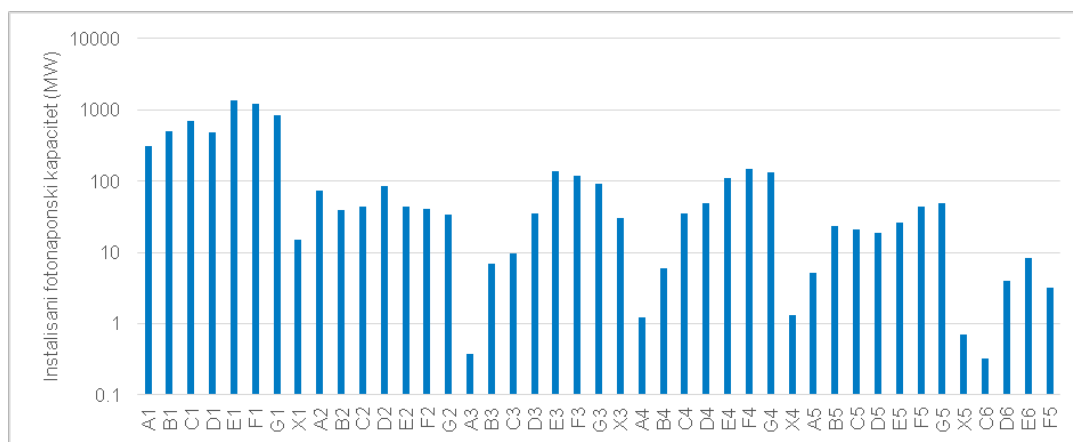
Iz raspodele po regionima, moguće je izračunati udeo instalisanog kapaciteta u različitim geografskim regionima zemlje. Raspodela tipologije zgrada između gore predstavljenih regiona omogućava da se odredi instalacioni kapacitet svakog regiona.

Tabela 1. Raspodela nacionalnog stambenog fonda po regionima

Region	Ruralno područje	Urbano područje
Beogradski region	11%	30%
Region Vojvodine	27%	29%
Region Šumadije i Zapadne Srbije	35%	22%
Region Južne i Istočne Srbije	27%	19%

Ukupna instalirana snaga fotonaponskog sistema koje je moguće instalirati na krovove svih stambenih objekata u Srbiji dostiže 6.917 MWp. Na slici 5. prikazana je mapa raspodele potencijala kapaciteta po regionima Srbije. Ukupni kapaciteti su raspoređeni na 4 regiona na prilično ravnomeran način, pri čemu najveći potencijal ima region Vojvodine, zatim Šumadija i Zapadna Srbija, Beogradski region, dok jugoistočna Srbija ima najmanji potencijal.

Najveći potencijal za izgradnju fotonaponskih sistema imaju tipologije iz tri perioda: 1971-1980 (E1), 1981-1990 (F1), 1991-2012 (G1). Tipologija E1 predstavlja skoro 20% fotonaponskog kapaciteta, dok tipologije F1 i G1 predstavljaju 18% i 12% respektivno. Ove tipologije su prisutne i u ruralnim i u urbanim sredinama. Instalirani fotonaponski kapacitet za svaku tipologiju zgrada je prikazan na slici 6.

**Slika 5.** Mapa raspodele potencijala kapaciteta po regionima Srbije [9]**Slika 6.** Instalirani fotonaponski kapacitet po tipologijama stambenih zgrada [9]

V PROCENA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Konačno, poslednji korak ove metodologije predstavlja korišćenje podataka o sunčevom zračenju za reprezentativni grad u svakom od posmatrana 4 regiona zemlje i na taj način omogućava procenu proizvodnje električne energije iz rezultujućeg instalacionog kapaciteta.

Proračun električne energije koja se može dobiti iz fotonaponskih

sistema integrisanih u krovove stambenih objekata je izvršena na osnovu: potencijala solarne energije na pretpostavljenoj lokaciji posmatranog stambenog objekata, raspoložive krovne površine objekta i njene prostorne orijentacije i efikasnosti fotonaponskih modula.

Za proračune proizvodnje električne energije korišćen je besplatan PVGIS on-line kalkulator [11] za 4 regiona, kao i za svaki od parova nagiba/orijentacije. Dobijene su vrednosti proizvodnje snage po jedinici kapaciteta - kWh/kWp, koje su

prikazane u tabeli 2. Lokalni meteorološki podaci koji se koriste za svaku zonu odgovaraju reprezentativnim gradovima: Beograd, Novi Sad, Kraljevo i Niš. Pretpostavlja se da su tipologije zgrade podjednako zastupljene u svim regionima zemlje.

Tabela 2. Specifična proizvodnja električne energije po regionima za različite nagibe i orijentacije fotonaponskih modula

Proizvodnja kWh/kWp					
Nagibni ugao /Orijentacija	Jug	Zapad	Istok	Jugoza pad	Jugoist ok
Beograd					
15°	1,217	1,067	1,070	1,173	1,175
20°	1,246	1,053	1,058	1,190	1,193
30°	1,284	1,021	1,028	1,206	1,211
40°	1,291	978	988	1,198	1,206
Novi Sad					
15°	1,212	1,061	1,064	1,168	1,170
20°	1,241	1,048	1,053	1,185	1,188
30°	1,279	1,018	1,025	1,202	1,207
40°	1,287	977	986	1,197	1,202
Kraljevo					
15°	1,164	1,027	1,039	1,123	1,131
20°	1,189	1,013	1,030	1,135	1,146
30°	1,218	979	1,004	1,145	1,161
40°	1,220	936	966	1,133	1,154
Niš					
15°	1,260	1,116	1,113	1,220	1,217
20°	1,288	1,103	1,100	1,235	1,233
30°	1,321	1,070	1,067	1,250	1,247
40°	1,323	1,027	1,023	1,240	1,238

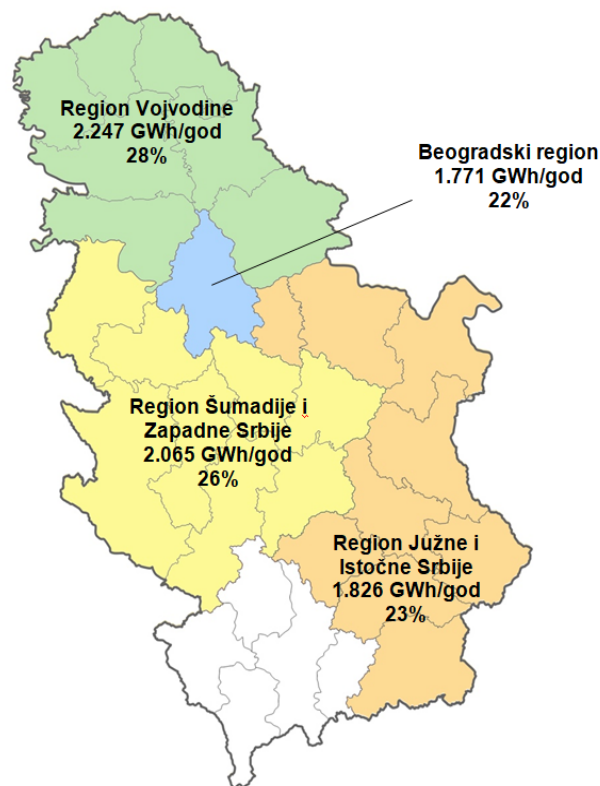
Proizvodnja električne energije se prvo posebno izračunava za svaki od 4 regiona. Instalirani kapacitet je raspoređen prema nekoliko orijentacija, gde je svaka orijentacija povezana sa specifičnim faktorom proizvodnje električne energije. Proizvodnja električne energije je jednaka instalisanom kapacitetu neke orijentacije pomnoženom sa specifičnim faktorom proizvodnje električne energije. Proizvodnja tipologije zgrada je zbir proizvodnje svih orijentacija, dok je ukupna proizvodnja električne energije u svakom regionu zbir proizvodnje električne energije procenjene za svaku tipologiju zgrade.

Dobijeni rezultati za svaki region omogućavaju da se dobije nacionalni potencijal jednostavnim sabiranjem proizvodnje električne energije u sva četiri regiona zemlje.

Sa instaliranim fotonaponskim kapacitetom od 6.917 MWp godišnja proizvodnja električne energije na nacionalnom nivou

dostigla bi 7.909 GWh/god.

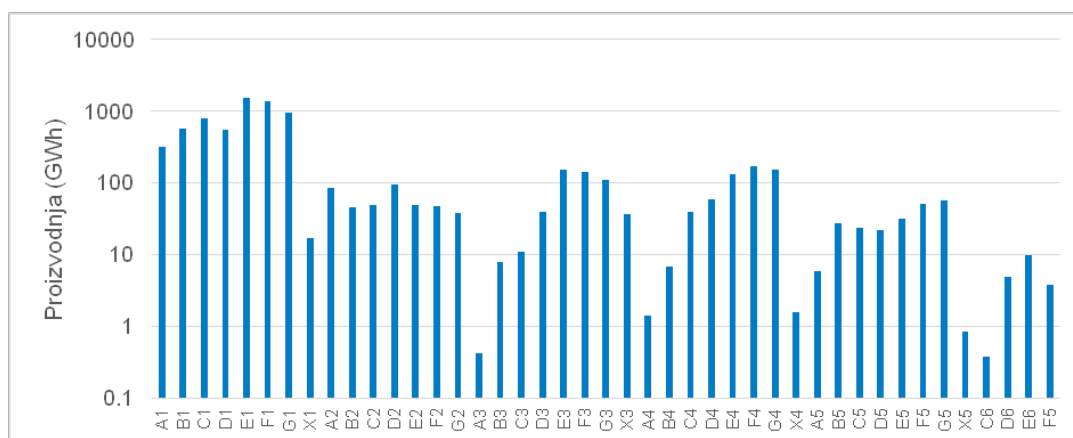
Regionalna distribucija godišnje proizvodnje električne energije održava isti trend kao instalirani kapacitet, sa malim varijacijama u procentima, što je u skladu sa klimatskim razlikama. Najveća godišnja proizvodnja električne energije se dostiže u regionu Vojvodine, zatim slede Šumadija i Zapadna Srbija, kao i region Južne i Istočne Srbije, dok bi Beogradski region ostvario najmanju proizvodnju električne energije godišnje.



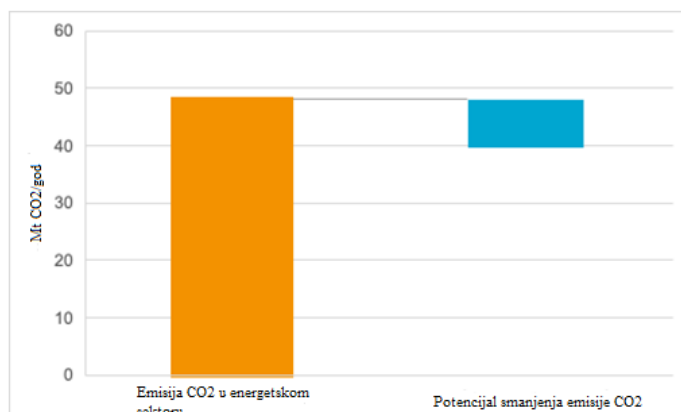
Slika 7. Mapa raspodele godišnja proizvodnja električne energije po regionima Srbije [9]

Najveći proizvodni potencijal u skladu sa potencijalom za izgradnju FN sistema imaju tipologije naziva porodične samostojeće kuće iz tri perioda: 1971-1980 (E1), 1981-1990 (F1), 1991-2012 (G1). Tipologija G1 predstavlja skoro 50% potencijala proizvodnje električne energije. Ove tipologije su prisutne i u ruralnim i u urbanim sredinama.

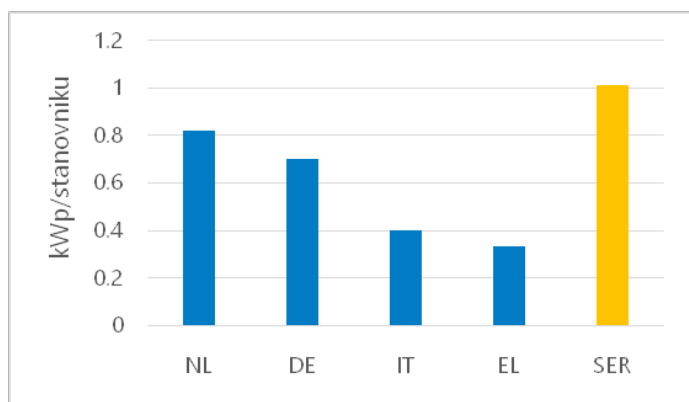
Dobijene vrednosti procene fotonaponskog kapaciteta i odgovarajuće proizvodnje električne energije ukazuju na to da je dostizanje punog potencijala u Republici Srbiji svakako dugoročna obaveza. Pod pretpostavkom da je sadašnji faktor emisije u miksu električne energije u Republici Srbiji od 1,099 tCO₂/MWh, proizvodnja 7.909 GWh/god čiste energije, uz nultu emisiju, uštedela bi 8.692 kt/god emisije CO₂ godišnje, s obzirom na to da svaki kWh proizveden pomoću solarne energije zamenjuje prosečni kWh iz sadašnjeg miksa električne energije u Srbiji. Ova količina predstavlja 19% nacionalne emisije CO₂ koja dolazi iz energetskeg sektora i koja se trenutno procenjuje na 48.120 ktCO₂/godišnje. Potencijal smanjenja emisije CO₂ u odnosu na sadašnje ukupne emisije energetskeg sektora u Srbiji prikazan je na slici 9.



Slika 8. Proizvodnja električne energije po tipologijama stambenih zgrada [9]



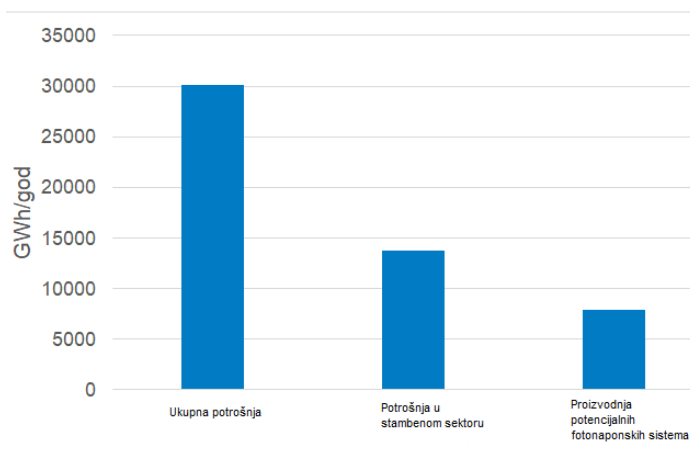
Slika 9. Potencijal smanjenja emisije CO₂ [9]



Slika 10. Instalirani fotonaponski kapacitet na krovovima stambenih zgrada po glavi stanovnika za odabrane zemlje EU i potencijal fotonaponskog kapaciteta Srbije [9]

Potencijal ukupne instalisane snage fotonaponskih sistema na krovovima svih stambenih objekata dostiže 6.917 MWp, što je oko 1 kWp po glavi stanovnika u Republici Srbiji. Ako se to uporedi sa statusom u nekim naprednim zemljama Evropske

Unije, može se zaključiti da je ova cifra daleko od nerealne. Tako je na primer, Holandija u 2021. godini dostigla 0,82 kWp/stanovniku, a Nemačka 0,7 kWp/stanovniku, a Grčka 0,33 kWp/stanovniku dok je prosek u EU bio 0,4 kWp/stanovniku. Instalirani fotonaponski kapacitet po glavi stanovnika za odabrane zemlje Evropske Unije i potencijal fotonaponskog kapaciteta Srbije je prikazan na slici 10.



Slika 11. Raspored potrošnje električne energije [9]

Sadašnja potrošnja električne energije na nacionalnom nivou dostiže oko 30,4 TWh godišnje, od čega oko 45% ili 13,8 TWh odgovara stambenom sektoru. Razvijanje punog potencijala fotonaponskih kapaciteta na krovovima stambenih zgrada daje 7,909 TWh/god, a to bi izmirivalo 58% potrošnje električne energije u domaćinstvu.

Da bi se procenila cena investicije potrebne za implementaciju punog tehničkog potencijala fotonaponskih sistema na krovovima stambenih zgrada u Srbiji, potrebno je da se pretpostavi specifična cena fotonaponskog sistema. Ovaj trošak uključuje izradu projekta, nabavku komponenti, instalaciju sistema i puštanje u rad. Istorijski gledano, jedinični troškovi su

bili u stalnom padu. Ipak, sa nedavnom krizom sirovina i svetskim trendom inflacije, jedinični trošak je postao manje predvidljiv. Specifični trošak koji se pretpostavlja u ovom istraživanju je 1.200 €/kVp, odnosno 140.820 RSD/kVp. S obzirom na ovu cifru, ukupna investicija za instaliranje 6.917 MVp bila bi 8.300 miliona €.

Ako dobijenu vrednost investicije stavimo u kontekst vrednosti dozvola za emisiju CO₂ u zemljama Evropske Unije, koja je iznad 70 €/t CO₂, period povrata samo na osnovu vrednosti smanjenja emisije CO₂ je manji od 15 godina.

VI ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja je bilo podizanje svesti i postavljanje okvira za decentralizovanu i dekarbonizovanu proizvodnju električne energije iz fotonaponskih sistema integrisanih u krovove stambenih zgrada u Srbiji, kroz podršku pristupa kupac-proizvođač. Za svaku utvrđenu kategoriju stambene zgrade u Srbiji, procenjena je moguća godišnja proizvodnja električne energije po jedinici prosečne površine krova. Sumirajući sve rezultate, urađena je procena mogućeg instalisanog kapaciteta fotonaponskih sistema, kao i procena godišnje proizvodnje električne energije na nacionalnom nivou.

Na osnovu sprovedenih analiza utvrđeno je da tehnički potencijal Republike Srbije za izgradnju fotonaponskih sistema koji bi bili integrisani u krovove stambenih zgrada prema utvrđenim tipologijama iz Nacionalne tipologije stambenih zgrada u Srbiji iznosi 6.917 MWp, a procenjena godišnja proizvodnja električne energije na nacionalnom nivou dostigla bi 7.909 GWh/god.

Krovovi stambenih objekata često imaju površine različite orijentacije i nagiba, pa izgradnja fotonaponskih sistema na svim površinama nema iste energetske i ekonomske pokazatelje. Iz tog razloga prioritet izgradnje treba da imaju površine sa najboljom godišnjom insolacijom, koje će obezbediti najbrži povraćaj investicije i najveću proizvodnju energije.

Izgradnja fotonaponskih sistema na stambenim objektima širom Srbije svakako predstavlja značajnu investiciju s obzirom na cenu koštanja komponenti ovog sistema. Sa druge strane, prednost fotonaponskih sistema je što su oni modularni, tako da je moguća njihova fazna izgradnja, odnosno proširivanje kapaciteta u toku vremena. Procenjeno je da bi ukupna investicija za instaliranje 6.917 MWp na krovove stambenih objekata u Srbiji iznosila 8,3 milijardi evra.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Ovaj rad je realizovan u okviru istraživanja na projektu finansiranog od strane Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, "Službeni glasnik RS", 6p. 40/2021. i 35/ 2023. <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 05.04.2023]
- [2] Đurišić, Ž., Škrbić, B. Potencijal energije sunca i vetra za strateško planiranje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.01D>
- [3] Batić, I., Đurišić, Ž. Analiza kapaciteta i uslova izgradnje fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 21-28, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.021B>
- [4] Škrbić, B., Đurišić, Ž. Komparativna analiza tehničkih, ekonomskih i ekoloških pokazatelja različitih modela prozjuma sa fotonaponskim panelima na primeru zgrade Tehničkih fakulteta u Beogradu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 4, pp.8-15, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.08S>
- [5] Solargis. <https://solargis.com/> [pristupljeno 05.04.2023]
- [6] Jovanović Popović, M., Ignjatovic, D. *National typology of residential buildings in Serbia*. Faculty of Architecture, University of Belgrade, GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2013
- [7] National Building Typologies <http://eekalkulator.mgsi.gov.rs/> [pristupljeno 05.04.2023]
- [8] Gomez-Exposito, A., Arcos-Vargas, A., Gutierrez-Garcia, F. On the potential contribution of rooftop PV to a sustainable electricity mix: the case of Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 132, 110074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110074>
- [9] *Assessment of the National Potential for Residential Rooftop Photovoltaic Installed Capacity in Serbia*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2023
- [10] PV module efficiency state of the art. Source: PHOTOVOLTAICS REPORT, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, December 2022
- [11] Photovoltaic geographical information system. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 05.04.2023]

AUTORI/AUTHORS

dr Iva Batić - naučni saradnik, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, iva@etf.rs, ORCID [0000-0003-0150-3235](https://orcid.org/0000-0003-0150-3235)

dr Aleksandar Ivančić - viši savetnik, Aiguasol, Barcelona Institute of Architecture, Institut de Recerca en Energia de Catalunya, Universitat Politècnica de Catalunya, Università degli Studi di Sassari, alex.ivancic@aiguasol.coop, ORCID [0000-0001-6387-8361](https://orcid.org/0000-0001-6387-8361)

Konfuzija u energetskej tranziciji - svet i Srbija danas

Confusion in the Energy Transition – The World and Serbia Today

Petar Đukić*, Slaviša Đukanović**

* Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

** Visoka poslovna škola strukovnih studija, Novi Sad

Rezime - Vanredne prilike usled pandemije trajale su skoro tri i po godine. Za to vreme nastupili su neočekivani novi izazovi u razvoju čovečanstva. Razumljivo je, s toga što se i većina dešavanja u današnjem svetu definišu kao različita *krizna stanja*, koja karakterišu: usporavanje globalnog rasta i međunarodne trgovine, skoro nesputana inflacija kao globalni fenomen, turbulencije na tržištima energije i hrane, konačno rat bez presedana u Evropi, geopolitička zaoštavanja odnosa nosilaca globalne moći, praćena široko primenjenim mehanizmima različitih ekonomskih i političkih sankcija. Sve to lako može da dovede do faktičkog prekida globalne akcije za klimu, organizovane borbe protiv siromaštva, štetnih nejednakosti i humanitarnih iskušenja u mnogim delovima sveta.

Energetska tranzicija kao jedan od ključnih izazova globalnog usaglašavanja privredne prakse i ekonomske politike u cilju bolje budućnosti u velikoj meri postaje žrtva nesprenosti na dogovor i dijalog, posebno među ključnim globalnim rivalima za ekonomsko-tehnološku i vojnu dominaciju. Konceptualno energetska tranzicija, kao deo zelene tranzicije, ostaje u fokusu svih politika, dokumenata i strategija, bar na papiru. Međutim, u praksi se ispostavlja da su strateška opredeljenja uvek žrtve taktičkih podešavanja politika i praksi na kratak i srednji rok.

Čovečanstvo se još jednom nalazi na prekretnici: ili će se vratiti praksi globalne saradnje, mukotrpnog usaglašavanja i akcija koje uključuju klimatsku politiku, socijalni i humani aspekt energetske tranzicije i preobražaja industrije u kontekstu zajedničkih ciljeva zaustavljanja rasta globalne temperature na nivou od 1,5 stepeni u odnosu na predindustrijsku eru, ili će se klimatski planovi i akcije raspasti kao mehur od sapunice u dominaciji kratkoročnih privrednih, militarnih i tehnoloških ciljeva.

Srbija spada u zemlje sa natprosečno izraženim klimatskim promenama a njena energetika među one s najvećim štetnim emisijama, kao i s najvišim ude lom uglja (preko 50%) u proizvodnji finalne energije. Restrukturiranje njena privrede i ekonomsko-tehnološke strukture u procesu energetske tranzicije biće izloženo visokim socijalnim i psihološkim izazovima, koji se posebno tiču lokalnih i regionalnih zajednica i javnih energetskih kompanija. Sa političke scene, do velikog dela zaposlenih u sektoru energetike stižu kontroverzne vesti i signali. Deo tih kontroverzi i nesporazuma potiče iz međunarodne javne scene, na koju utiču kriza rasta i dugova, inflacija i nove globalne konfrontacije. Uporedo sa eksternim sukobima, konfrontacije u

našem regionu, takođe mogu da budu snažan izazov u narednom periodu.

Uprkos svemu, tranzicija energetike u svetu je nezaustavljiv proces, koji ima klimatske, ekološke, resursne, socijalne i kulturne ciljeve, na kojima treba insistirati pri svakoj konceptualnoj krizi.

Ključne reči - deglobalizacija, postpandemijska ekonomija, restrukturiranje sektora, konceptualna konfuzija, energetska tranzicija i antiratna politika

Abstract - The extraordinary circumstances due to the pandemic have been lasted for almost three and a half years. During that period unexpected new challenges arose in the development of humanity. It is understandable, since most events in today's world are defined as different crisis situations, which are characterized by: slowing down of global growth and international trade, almost unrestrained inflation as a global phenomenon, turbulence in the energy and food markets, finally an unprecedented war in Europe, geopolitical tightening of relations between the bearers of global power, followed by widely applied mechanisms of various economic and political sanctions.

All this could easily lead to the de facto interruption of global climate action, the organized fight against poverty, harmful inequalities and humanitarian trials in many parts of the world. As one of the key challenges of global harmonization of economic practice and economic policy for the purpose of a better future, energy transition is largely becoming a victim of unwillingness to agree and to dialogue, especially among key global rivals for economic-technological and military dominance in the world. Conceptually, the energy transition remains, at least on paper, in the focus of all policies and documents and strategies as part of the green transition. However, in practice, it turns out that strategic decisions are always victims of tactical adjustments of policies and practices in the short and medium term.

Humanity is once again at a turning point: either it will return to the practice of global cooperation, painstaking harmonization and actions that include climate policy, the social and human aspects of the energy transition and industrial transformation in the context of the common goals of stopping the increase in global temperature at the level of 1.5 degrees comparing to the pre-industrial era, or climate plans and actions will collapse like a

soap bubble dominated by short-term economic, military and technological goals.

Serbia belongs to the countries with above-average climate changes intensity, and its energy sector is among those with the highest harmful emissions, as well as the highest share of coal (over 50%) in the production of final energy. The restructuring of its economy and economic-technological structure in the process of energy transition will be exposed to high social and psychological challenges, which especially concern local and regional communities and public energy companies. Controversial news and signals arrive from the political scene to a large part of employees in the energy sector. Part of these controversies and misunderstandings originate from the international public scene affected by the growth and debt crisis, inflation and new confrontations. Confrontations in our region confrontation, along the global, may be strong challenges in the coming period.

Despite everything, the energy transition in the world is an unstoppable process, which has climatic, ecological, resource, social and cultural goals, which should be insisted upon in every conceptual crisis.

Index Terms - Slowbalization, Post-pandemic economy, Sectorial restructuring, Conceptual confusion, Energy transition and anti-war policy

I UVOD

Dana 5. maja 2023. Svetska zdravstvena organizacija proglasila je *kraj opasnosti od Kovid pandemije*. Tačnije rečeno, direktor SZO saopštio je kako „sa velikom nadom proglašava da je Kovid-19 završen kao globalna zdravstvena kriza”. To bi se moglo tumačiti i kao veoma oprezna prognoza u vezi s mogućim povratkom slične, ili izbijanjem novih pandemija. U svakom slučaju, podaci govore da je „najmanje sedam miliona ljudi” umrlo od posledica korona virusa, ali da su prave brojke bliže cifri od 20 miliona - tri puta više.¹ Sve u svemu, današnji svet u sve većoj meri pohađa novi rizici po javno zdravlje, stabilnost i razvojnu održivost [1]. Globalna politika i globalna zajednica današnjeg čovečanstva, nažalost, i nakon višegodišnje kovid krize i distanciranja ljudi, nacija i čitavih društvenih slojeva, ostaje veoma podeljena. Protivrečnosti su uticale na produbljivanje nepoverenja i straha, po različitim osnovama. Danas je, možda više nego prethodno, jasno da su sve razvojne strategije pa i energetska, pod snažnim pritiskom ratnih dešavanja, eskalacije sankcijske politike u svetu, kao i opšte deglobalizacije [2].

Valutna kriza (posebno evra i dolara), a zatim i neuobičajeno globalno ispoljavanje inflacije, kao i krize i potresi na tržištima hrane i pojedinih energenata, samo su deo ikonografije koju

nameće novi ambijent u kojem dominira konfuzija u odnosu na sve razvojne strategije, pa i one koje se tiču energetike.

Možda bi pre razmatranja ključne teme ovog rada, valjalo potražiti odgovore na sledećih sedam strateških, ali kontroverznih pitanja:

1. Da li će veći deo sveta (potpisnici Pariskog klimatskog sporazuma) ikada ispunjavati u celini obaveze iz njega. Prema dosadašnjoj praksi, verovatnije je da neće;
2. Da li glavni rivali pri preraspodeli globalne moći ostaju na putu klimatske strategije i politike? Prema onome što smo videli u vreme Trampove ere (ili možda njene prve faze?!) teško je u to verovati;
3. Kolika je ratna potrošnja energije po stanovniku (vojniku) u ratom zahvaćenom području, i koliki deo te energije ide na destruktivne, antihumane i antiokološke ciljeve? Da li se takva praksa uskoro može zaustaviti? Prema dosadašnjoj istoriji sukoba (Jemen, Južni Sudan, Ukrajina) veoma teško;
4. Da li će nova postpandemijska i postkrizna strategija zemalja u razvoju moći da se uklopi u koncept "zelene" tranzicije, kakva se trasira na nivou razvijenih zemalja i područja? Takođe teško;
5. Kakve će posledice doneti aktuelni poremećaji na globalnom tržištu hrane, energije i inflacija u najranjivijim privredama i društvenim grupama? Po svoj prilici produbljivanje krize.
6. Standard ljudi u krizi pada selektivno. Najveći gubitnici bili su najsiriromašniji slojevi najbogatijih zemalja sveta, kao i veliki deo niže srednje klase. To se vidi na osnovu socijalnih i ekoloških pobuna u Francuskoj, SAD... Biće ih još.

7. Da li će se obnoviti politički protesti, prisutni početkom ove godine u velikom broju zemalja širom planete (od SAD i Kine, preko Francuske, Belorusije, Gruzije, Turske, Latinske Amerike, Oni su samo delom pacifikovani usled šokova kao što je rat u Evropi, poplave u Indo-Kini, zemljotres u Turskoj i Siriji. Mnoge od učesnika tih protesta interesuje, ne samo bolji život, standard, zaposlenost i dohodak, već i borba protiv korupcije, za funkcionalne institucije, konačno i osećaj prave slobode.

Nešto slobodnija, „raspevana“ interpretacija ovih pitanja, mogla bi da (bar na ovo poslednje pitanje) odgovori pitanjem našeg legendarnog pesnika Branka Miljkovića: „Da li će sloboda umeti da peva, kao što su sužnji pevali o njoj?”² Tada, u njegovoj 24. godini nije ni slutio da će jednog dana „sužnji” postati žitelji celog sveta, ali i da njihovo formalno oslobođanje neće biti ni malo veselo, obespokojavajuće, pa čak ni oslobađajuće.

II OPŠTE EKONOMSKO-POLITIČKE OKOLNOSTI

Globalna kriza je zajednički imenilac za skoro sve nevolje današnjeg svetskog poretka, ali i za pogoršanja perspektiva ljudi širom sveta. I umesto da svet proslavi pobedu nad pandemijom, on strahuje za sutrašnjicu, u većoj meri nego u prvim godinama pandemije.

A. Produbljivanje deglobalizacije

Nije u pitanju tek samo puka reorganizacija bilo kog sektora

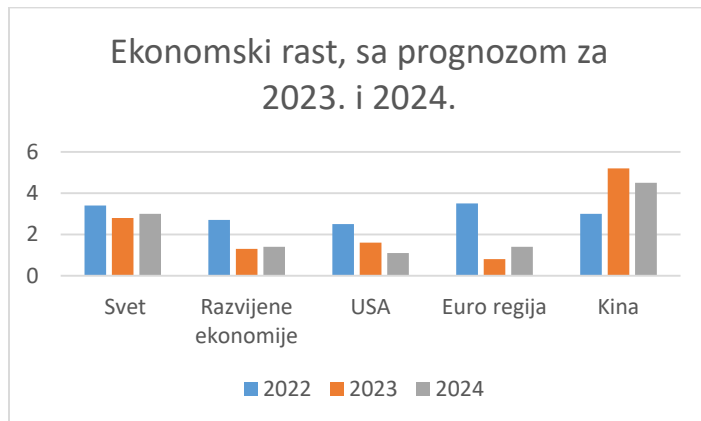
¹ Doktor Adhanom Tedros Gebrejesus, prema BBC News, <https://www.bbc.com/serbian/lat/svet-65500181>, (pristup 1. jula 2023). Navedeni podaci govore da je od posledica pandemije umrlo između 1 i 3 promila svetske populacije. Podaci o posledicama velike „Španske groznice” koja je okončana pre jednog veka, govore da je od ove opake boljke tokom nekoliko godina, nakon iscrpljujućeg Prvog svetskog rata, umrlo više od 50 miliona ljudi, (više nego u ratu) što predstavlja oko 27 promila u odnosu na tadašnju globalnu populaciju koja je iznosila oko 1,8 milijardi ljudi. Suvise pojednostavljani i nestručno usvojeni zaključci se ne preporučuju, ali ovu činjenicu treba imati u vidu.

² Iz njegove prve zbirke pesama „Uzalud je budim“, 1956.

ekonomije, niti čak preobražaj samog sistema postpandemijske privrede, industrijskih odnosa, digitalne ekonomske organizacije i radnih odnosa. Investiciona aktivnost je slaba, proizvodnja skupa i komplikovana, usled pokidanih lanaca snabdevanja, proizvodnje i isporuke većine dobara na svetskom nivou.

Čitava struktura globalne ekonomije nalazi se pred temeljnim strukturalnim promenama, koje je na izvestan način inicirala pandemija, ali i pred blokadama tih promena, izazvanih strahom, opštim nepoverenjem i nesigurnošću. Globalne investicije i rast trgovine nalaze se na udaru deglobalizacije, ili jedne nove pojave koja se u varijanti izveštača MMF-a naziva *slowglobalisation*. Uslovno bi se mogla prevesti kao usporavanje globalne međunarodne saradnje, mada ga autori izveštaja MMF-a tumače kao usporavanje i preobražaj slobodne međunarodne trgovine. [3].

Međutim, rast međunarodne trgovine i saradnje je zakonitost svetskih tehnoloških i kulturnih tokova. Logična posledica prekida političkih veza između pojedinih ekonomskih regiona je opadanje interesa za multilateralne sporazume, uz štetno kidanje veza prethodnog globalnog poretka, uspostavljanje novih geostrateških, ekonomskih i tehnoloških veza na regionalnom nivou. Naročito je bitna saradnja po osnovu geoeekonomskih i geopolitičkih interesa i vojne saradnje, tako da se svet na izvestan način udaljava od standarda prethodne slobodne globalne saradnje i principa slobodne, bescarinske trgovine.



Slika 1. Neočekivano (i nepotrebno) usporavanje globalnog rasta i nakon pandemije (nalazi MMF)

B. Ponovo kriza rasta

Međunarodne finansijske institucije, poput Svetske banke i MMF-a, prognoziraju da će globalni rast privrede u ovoj godini biti najniži u poslednje tri decenije (ne računajući godine recesije) dovoljno je zabrinjavajuća, a trebalo bi da bude i upozoravajuća za celi današnji svet. Stopa rasta u razvijenim ekonomijama čak ne više od jedan odsto. Male, otvorene i nedovoljno produktivne ekonomije, bi mogle da ostanu na vetrometini poremećenih ekonomskih tokova. Floskula tzv. "pokidanih globalnih lanaca snabdevanja" više nije dovoljna da objasni strukturne izazove pred kojima se nalazi svetska privreda, kao i čitav globalni poredak. Kako je Rusija za Evropsku uniju glavni dobavljač nafte, prirodnog gasa i metala, a zajedno sa Ukrajinom i pšenice i kukuruza, smanjena ponuda

ovih roba naglo je uvećala njihove cene, podižući na preko 8% inflaciju u EU (rekordnu u poslednje četiri decenije) [4]. Osnovna prognoza jeste da se rast globalne privrede usporava i da će nakon stope od 3,4% u 2022. moguća stopa rasta u 2023. biti svega 2,5%, dok bi u razvijenim ekonomijama stopa rasta pala ispod 1% (slika 1)

C. Izazovi novih nestabilosti

Pored skoro nesputane inflacije i nastavljanja trenda rasta kamata, najava bankarsko-finansijske krize u SAD, rat u Ukrajini, dalja geopolitička zaoštavanja između SAD s jedne strane i Rusije i Kine s druge - sve su to faktori dugoročnih rizika na koje se do skora nije moglo računati

A inflacija, koja je na globalnom nivou iznosila u proseku 8,7%, u 2022, u 2023. bi mogla da padne samo za nešto više od jedan procentni poen, odnosno na 7%. To je i dalje visoka cenovna nestabilnost, koja može da vodi novim tržišnim poremećajima a iz monetarne sfere da se prelije u realnu. Pojednostavljeno rečeno prosečni rast cena životnih dobara iznosi blizu dvocifrenog! A to znači da će se veoma brzo otvoriti sistemski i organizovani napori sindikata i drugih asocijacija zaposlenih za indeksaciju zarada i to tako da se nominalne zarade povećavaju iznad inflacije, što sigurno vodi u stagflaciju. Ova pak dalje obara kupovnu moć nominalnih zarada i podriva elementarno poverenje u ekonomski sistem, poreze, novac i uopšte u industrijske odnose. Demonstracioni efekat dalje dovodi do zahteva za povećanjem zarada i tamo gde nema nikakvog osnova u niskoakumulativnim i niskoproduktivnim poslovima.



Slika 2. Ekološka katastrofa Nova Kahovka, detalj zagađenja iz vazduha³

Podsećamo kako se svet, čitavu deceniju tokom sedamdesetih godina XX veka, borio protiv stagflacije. „Najuspešnija“ borba, bila je u Britaniji i SAD, uz primenu najnepopularnijih mera (otpuštanje zaposlenih u javnom sektoru i pad realnih zarada - Reganomika i Tačerizam). Ako dođe do obnove takve industrijske politike, biće to nove (stare) nevolje za globalnu ekonomiju, koje su uvek veće za male i neprilagođene privrede.

³ Izvor: <https://www.slobodnaevropa.org/a/kakhovka-brana-ekoloska-katastrofa/32455627.html>

D. Militarno-ekološke katastrofe

Obično se ekološki problemi (pogrešno) tretiraju van konteksta političkih i ekonomskih zbivanja, pa i ratnih katastrofa. Njihov tretman ide nekako najčešće uporedo sa analizama pojedinih zagađujućih sektora kao što su rudarstvo, industrija, energetika. To je za današnje uslove potpuno pogrešan pristup, jer zapravo nema ni jedne ljudske aktivnosti koja ostavlja "prirodu netaknutom". I brojne zablude o apsolutnoj ekološkoj prihvatljivosti slobodnog delovanja prirodnih faktora, kao i ekološki destruktivnom delovanju svih tehnologija u današnjem svetu traganja za održivošću potrebno je razobličiti [5].

Zato sada na red dolazi ekološka, socijalna, ekonomska i humana dimenzija savremenog rata. Poznato je da je najveći nuklearni akcident (eksplozije nuklearke Černobilj, krajem aprila 1986.) desio nedaleko od Kijeva, u Sovjetskom Savezu, današnjoj Ukrajini. Po svemu sudeći odneo je više desetina hiljada života, mahom kroz odložene smrti izazvane radijacijom, kao svojevršnom zagađenja životne sredine oslobođenim nuklidima.

Skoro 40 godina nakon tog akcidenta, dešava se jedna nova, ovaj put ratna (ili možda tehnološka) katastrofa, u kojoj je na energetskom objektu hidroelektrane Nova Kahovka na Dnjepru "eksplozirala" brana što je dovelo do poplavnog talasa, koji je usmrtio hiljade života, zagadio zemljište, useve, kuće, podzemne izvore vode, na prostoru od više hiljada kilometara kvadratnih, ostavivši stotine hiljada ljudi bez zdrave vode [6].

Blatnjave poplave u Hersonu, 10. juna dobile su nove nijanse, usled kombinacije izlivena nafte i mulja. Treba li podsetiti da smo takve i slične fotografije o tome kako može da gori more, gledali za vreme rata u Zalivu, u koji su bile upletene Irak, Iran i Sjedinjene Američke Države 1991.

Verovatno će ih biti još. Rat i održivi razvoj, pa i održiva energetika jednostavno ne idu zajedno. Ne treba se čuditi preovlađujućoj prioritizaciji zaustavljanja rata, u odnosu na sve politike pa i u odnosu na energetsku tranziciju. Stoga ratno-ekološke katastrofe dodatno deluju na konfuziju u vezi sa strategijama energetske tranzicije, kao i krizama koje nastaju u vezi sa njenom dinamikom i sadržajima u kriznim i ratnim uslovima.

III SRBIJA – EKONOMSKO-ENERGETSKE PRETPOSTAVKE ZA NOVU FAZU TRANZICIJE ENERGETIKE

Srbija je mala otvorena ekonomija s mnoštvom nasleđenih strukturnih problema i nedoumica, sa ne baš uspešnim strategijama restrukturiranja neefikasnog javnog sektora. A mnoštvo novih socio-ekonomskih pa i humanitarnih problema, (naročito za male i siromašne ekonomije, formalno srednjeg dohotka) mogao bi da izazove pad eksterne tražnje i narudžbi njihovih proizvoda i usluga od strane najrazvijenijih zemalja. Tu, naravno, pored inflacije spada i posebno povećanje troškova proizvodnje i trgovine dobara i usluga na globalnom nivou, usred promene postojećih tržišnih i tehnoloških struktura. Više od te činjenice bitna je domaća predistorija inflacije. Dok Narodna banka Srbije, već dve godine unazad predviđa vraćanje inflacije u očekivane okvire, stvarnost govori suprotno. Naime dok za kraj 2023. IMF u Srbiji predviđa inflaciju od 12%, Nacionalna banka je svodi i stalno revidira na oko 6%. Ni jedna revidirana procena

još se nije ostvarila, a naročito u godini u kojoj se od strane međunarodnih finansijera u Srbiji očekuje rast od oko 2%, što bi moglo da se prolongira za nekoliko narednih godina. Valutna kriza (pad kupovne moći evra i dinara još više) i inflacija koja je u Srbiji dvostruko veća (međugodišnja u junu 2023. iznosi čak 16,2%) veliki su izazovi za čitavu privredu i društvo u Srbiji [4].

Ma koliko su zvanična opredeljenja za „zelenu agendu“, kao i za tranziciju energetike i čitave industrije i privrede, u vazduhu lebdi pitanje urušavanja standarda i socijalne sigurnosti usled moguće recesije ili sve nižeg rasta. Takva, nesigurna i kolebljiva društvena scena i ikonografija nameću jedan novi ambijent u kojem dominira konfuzija u odnosu na sve razvojne strategije, pa i one koje se tiču energetike.

U trenutku dovršavanja ovog rada, nacrt novog Integrisanog nacionalnog energetsko-klimatskog plana za Srbiju je na javnoj raspravi [7]. Bez obzira na relativno visoku zainteresovanost javnosti, pokazuje se da su procene o mogućim energetsko-ekološkim ciljevima veoma rastegljive. Zapravo, današnje vreme i nije za nove strategije koje se tiču dugoročne energetske budućnosti. Sa druge strane, Srbija je u drastičnom zaostajanju za velikim delom zemalja Balkana, koje su zašle u duboku tranziciju energetike. Rumunija je šampion evropske energetske tranzicije, Grčka, Bugarska i Češka ostvaruju zavidne ali postepene rezultate, dok je Srbija uglavnom žrtva ne činjenja.

IV HAOTIČNI ENERGETSKI TOKOVI

Energetska tranzicija se odvija u čitavom današnjem svetu pod uticajem tehnoloških promena, energetske kulture i ekološke svesti. To je i proces ubrzane dekarbonizacije, smanjenja svih štetnih emisija i „ozelenjavanja“ energetike. Sa druge strane se podrazumeva stalno unapređivanje energetske efikasnosti.

Zelena tranzicija nije isto što i energetska tranzicija. Međutim, u sadašnjoj strukturi industrije, ozelenjavanje energetike, kao i povećanje energetske efikasnosti, ključni su pravci za održivu energetiku i zelenu tranziciju privrede u celini. Slično tome, zelena tranzicija nije isto što i dekarbonizacija privrede, a dekarbonizacija nije isto što i tranzicija energetike. Toga bi trebalo da su svesni nosioci svih energetskih strategija, ako ih još uopšte ima.

U današnjim uslovima potvrdilo se takođe da nema jednog (makar i genijalnog) rešenja za energetiku, u smislu univerzalno primenljivog i dovoljnog energenta ili postupka⁴, čak i da nema trajne koncepcije više usaglašenih rešenja i opcija. To pokazuje aktuelna kriza postpandemijskog privrednog i socijalnog razvoja.

Srbija spada u zemlje koje drastično kasne u preobražaju čitave ekonomske strukture, a naročito energetike. To pokazuju podaci o strukturi izvora energije koju koristi (dominacija uglja, uz udeo neobnovljivih goriva od 87%) kao i niska energetska efikasnost i visoka produkcija zagađujućih materija.

⁴ Naravno, da u delu teorija (zavere) postoje reminiscencija o nekakvom dobro skrivanom Teslinom pronalasku koji je univerzalno rešenje za energetiku. Uprkos pokušajima da se do njega dođe, stvari ostaju tajnovite, a energetičari i dalje razbijaju glave oko toga koji miks rešenja je najmanje loš. Mnogo toga može se naći u knjizi, američke novinark Margaret Čejni, „Tesla – čovek van vremena“ [8]

V IZAZOVI DEGLOBALIZACIJE I ENERGETIKA.

Usporavanje međunarodne saradnje govori i o krizi institucija. Bilateralni i regionalni sporazumi umesto globalnih sve više dominiraju svetskom ekonomijom i politikom, što sve uz krizu poverenja, dogovora i usaglašavanja, zajedno sa posledicama rata u Evropi, nosi nesagledive buduće ishode. Kao da se sve pretvara u jedno militarno-političko živo blato, sa bezizlaznim posledicama. A što se tiče aktuelnih kratkoročnih i srednjoročnih posledica, to su na prvom mestu: doprinos već pomenutom usporavanju rasta, kriza trgovine na osnovu kidanja proizvodnih lanaca i prethodne „međunarodne podele rada“.

Tu su naravno i nove psihološke blokade koje se tiču ratnih humanitarnih i možda i novih ekoloških katastrofa. Poznato je da su Sjedinjene Američke Države, tokom iscrpljujućeg rata u Vijetnamu, koristile taktiku „spržene zemlje“ radi „čišćenja“ neprijatelja sa terena, na kome, zbog delovanja bacača plamena i hemikalija, kasetnih bombi, nema uslova za život. Posledice su bile višedecenijske za obe strane. Sada, kao da se sličan scenario, ne znamo čijom zaslugom, ponavlja oko Hersona taktikom poplavljenih zemlje. Nasleđe ekološke katastrofe oko Dnjeptra i Kahovke biće daleko od lokalnog i ograničenog karaktera. O njemu vojni stratezi, kao i većina političara, nikada (dovoljno odgovorno) ne razmišljaju, valjda što na umu imaju „viši interes“.

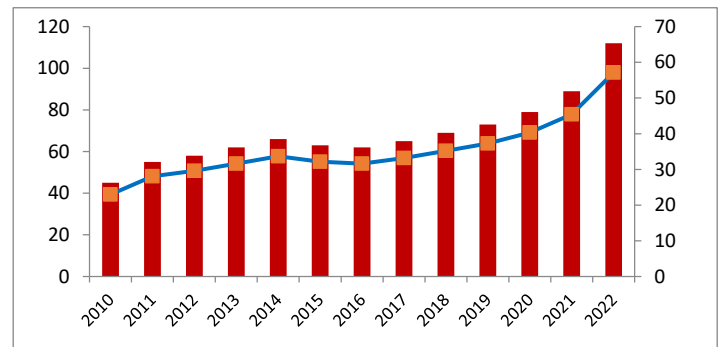
Informativni i obaveštajni rat, koji se na osnovu svega toga širi faktički čitavim svetom, pretili da na dugi period zatruje (i preusmeri) moguću saradnju među velikim delom globalne populacije. Trenutno, jedna od najvećih socio-psiholoških opasnosti jeste da ratna dešavanja (od Sudana, preko Jemena do Ukrajine, postanu sporedna vest, koja se na medijima tretira u skladu sa rutinskim ratnim saopštenjima: „na frontovima ništa novo“.

Poseban efekt na današnji i budući globalni ekonomski razvoj uzrokuje „sankcijska politika“. Naime politika izricanja i primene ekonomskih sankcija u današnjem svetu neočekivano je „napredovala“ skoro do neslučenih granica. U ovom momentu, kao da se ne nazire kako bi se stišala ili bar normalizovala. Podaci MMF-a govore da je 2010. u svetu bilo ukupno manje od 40 zemalja pod sankcijama, a 2022. ih je već bilo oko 80.⁵ Različiti oblasti ekonomskih, sportskih, kulturnih, naučnih komunikacijskih sankcija, suštinski predstavljaju mešanje politike u ekonomiju, trgovinu i globalnu tehnološku saradnju.⁶ Razume se da energetika povezuje zemlje i regione više nego bilo koji drugi sektor, tim pre što globalnom tržištu pogoduje slobodna razmena energenata, a naročito globalna energetska-

tehnološka saradnja. Sve to danas dolazi u pitanje, i na izvestan način poskupljuje i komplikuje procese, pa i ciljeve energetske tranzicije.

Pojedine opštevažeće ekonomske činjenice i zakonitosti, pre svega one koje se tiču tržišta energije u senci su militarno-rivalističkih scenarija dominacije, sankcija, kao i manje više nepoznatih i bilateralnih energetske sporazuma.⁷

Energetika je u toku nezaustavljive tranzicije iz mnogo razloga. Danas je ta tranzicija po formi, tokovima pa i konceptualno u konfuziji. Zašto? Svet se nije dovoljno pripremio za postpandemijsku ekonomiju. Emisija novca bez pokrića, veoma uzdrman evro i dolar, inflacija kao globalni fenomen, turbulencije na tržištu hrane i energenata, ratne i geostrateške neizvesnosti, slabljenje saradnje i poverenja, novi hladni rat Zapadnih zemalja sa jedne i Rusije i njenih pomagača sa druge strane. Rat u direktnoj vreloj formi, kao i onaj hladni, latentni uvek je destruktivan, kako u humanom, materijalnom, kulturnom, tako i u ekološkom smislu.



Slika 3. Ekspanzija sankcijske politike u današnjem svetu kao indikator deglobalizacije [3].

C. Energetska tranzicija - preoblikovanje ili kriza procesa

Sve govori da je današnja globalna politika veoma podeljena, a s njom i energetska politika. Naime, većina strategija energetske tranzicije, pod pritiskom su ratnih dešavanja u Evropi, konfrontacije velikih sila ili tihog trgovinskog rata između SAD i nekih azijskih ekonomija, posebno Kine.

VI MULTISEKTORSKA KRIZA I REKONFIGURACIJA ENERGETSKE TRANZICIJE

Svet je došao u čudnu i neočekivanu situaciju. Umesto da tokom proleća i leta 2023. slavi izlazak iz kovid-krize, kao i trajni oporavak međunarodne trgovine, usluga, posebno turizma,

⁵ Ova tematika posebno je tretirana na savetovanju Naučnog društva ekonomista Srbije i Ekonomskog fakulteta održanom 22 maja 2022. Sledi publikovanje monografija s nalazima autora na ovom skupu.

⁶ Verovatno je najveća žrtva izricanja i delovanja sankcija globalne zajednice bila SR Jugoslavija (kao Srbija i Crna Gora). I pre Rezolucije Saveta bezbednosti 757 (30. maja 1992) kojim je proglašen prekid svih veza globalne zajednice (OUN) sa SRJ, Evropska Unija je Srbiji i Crnoj Gori 11. novembra 1991. uvela sistem sopstvenih sankcija, koje su značile prekid preferencija, saradnje u okviru PHARE programa. Sankcijski sistem je, na ovaj ili onaj način, ostao da deluje na SRJ sve do novembra 2000. godine, dakle punih devet godina, koje su značile najveća moguća iskušenja za društvo, privredu pa i energetiku Srbije, najviše u smislu nečinjenja i odlaganja neophodnih reformi. O tome više u knjigama autora [9] i [10].

⁷ Tako je, naprimer, prošle 2022. godine došlo do diverzionog onesposobljavanja Severno-evropskog gasnog toka kojim je trebalo da se zemlje EU snabdevaju ruskim gasom. Kao posledica tog događaja, pooštrena je ruska politika koja zahteva da se isporuke ruskog gasa Zapadu plaćaju u rubljama. Još su (bez)smisleniji tajnoviti Putinovi dogovori o isporukama energenata Indiji, Kini i Turskoj po potpuno netransparentnim uslovima, koji širom otvaraju vrata svojoj ekonomiji i podrivaju energetska bezbednost zapadnih zemalja. Evropske zemlje ubrzano razvijaju alternativne načine snabdevanja, između ostalog skupim američkim komprimovanim gasom, tako da je poremećaj svetskih energetske-ekonomskih tokova objektivno preskupa igra velikih igrača i ogroman trošak koji plaćaju građani i privreda. Naravno da je posledica pad standarda i nastavak inflacije.

transfera i putovanja, sve veći broj ljudi na Paneti zabrinut je za neposrednu budućnost.

Mogućnost eskalacije kriznih geopolitičkih tenzija i sukoba interesa dolazi sada i kao produkt privikavanja na jedan opasan rat u Evropi, u čije su podsticanje upleteni interesi i akcije najvećih snaga militarne moći u svetu, posebno Rusije, NATO-a, a na izvestan način i Kine, Irana, potencijalno i posredno drugih nuklearnih sila. Vesti o stradanjima u bombardovanju gradova, pa čak i o ekološkoj katastrofi usled eksplozije (?) brane na Dnjepru sve više se povlače na kraj dnevnih političkih informacija.

Ostvarenje planova i strategija preobražaja energetike, nakon velike energetske krize, koja je nastupila već u jesen 2021. a produžila se tokom čitave 2022, sa još neizvesnim posledicama u 2023. u svetu postkovid ekonomije postaje mislena imenica. Niti više deklarativnih akcija i novih dokumenata, niti straha za neposrednu egzistencijalnu budućnost, na koju većina smrtnika gotovo ne može da utiče. Osećaj bespomoćnosti postaje nova globalna opasnost, koja stavlja glave nedužnih ljudi današnjeg sveta u vreće i torbe trgovinskih predstavnika globalne moći.

Svima je jasno da kriza prelazi iz jedne forme u drugu, a postoje verodostojna tumačenja da je reč o jednoj strukturalnoj krizi globalne ekonomije i svetskog poretka koja je nastupila još 2008, i koja prelazi iz faze u fazu, menjajući oblike i sadržaje. Naime, ako se i dalje povećava globalna emisija gasova staklene bašte, a posebno ugljen-dioksida (još 2015. prešla je preko 400 ppm) a prosečna temperatura, i klimatske promene u XXI veku napreduju daleko bržim tempom nego u drugoj polovini XX veka, onda su klimatske promene i njihove posledice, kao i nedostatak zajedničke reakcije, uzrok za daleko veću uzbunu nego što to jeste. Doduše, prema podacima najnovijeg Svetskog izveštaja za obnovljive izvore energije [11], investicije u primenu obnovljivih izvora su tokom 2022. godine, na svetskoj ravni uvećane za 17,2% u odnosu na prethodnu godinu! To je rezultiralo instalisanjem novih 348 GW vršne snage postrojenja za proizvodnju „zelenе“ struje, čime su obnovljivi izvori dostigli učešće od 30% u strukturi ukupnih izvora za proizvodnju električne energije, koja je, tokom 2022. godine, doprinosila sa 23% u ukupnoj svetskoj energetskej potrošnji. [11]

Evropska unija je, zbog rata u Ukrajini, po pitanju primene obnovljivih izvora energije, bila još aktivnija. Naime, tokom 2022. godine, udeo OIE, u strukturi ukupne proizvodnje električne struje na teritoriji EU, dosegao je visokih 39%! Pri tome, najveći napredak je ostvaren u oblasti primene solarnih ćelija i vetroelektrana, puštanjem u rad novoinstaliranih kapaciteta za proizvodnju električne energije poreklom sa sunca i vetra od 41 GW i 16 GW, vršne snage, respektivno. [12]

Sa druge strane, svedoci smo pomenute ekspanzije sankcijske politike i privrede. Ako se pri tom i štetne nejednakosti (koje uključuju i energetske siromaštvo) u svetu povećavaju u najvećem broju od ukupno 200 zemalja ponaosob, i ako se standard najsiromašnijeg dela Planete i dalje drastično srozava a samo jedan procent ljudi na planeti raspolaže većim delom planetarnog bogatstva, nego ostalih 99%, onda nešto duboko nije u redu s ekonomskim institucionalnim, pa i kulturnim modelom današnjeg globalnog društva.

To društvo nije u stanju da kontroliše sve protivrečnosti, što bi moglo da dovede do neslučenih posledica, društvenih sukoba i tragične destrukcije ljudi i Planete. Energetska tranzicija koja u osnovnim pravcima uticaja i globalnog delovanja treba da dovede do dekarbonizacije, smanjivanjem svih štetnih emisija i povećavanjem udela obnovljivih izvora, pre svega pametnim energetskim rešenjima, pa i štednjom, što se sve ispoljava kao unapređenje efikasnosti, lepo je zamišljen proces za koji trenutno nema jasnih i ostvarivih pretpostavki, bar kada je u pitanju globalni razvojni put. Oni koji upoređuju i mere aktivnosti energetske tranzicije po zemljama i regionima, stalno postavljaju nove teze, parametre i ocene. Šampioni energetske tranzicije u svetu iznenada postaju zemlje Azije i Afrike (Kambodža, Kenija, Etiopija, Indija, Bangladeš...) kao i nove zemlje članice EU (EU šampion Rumunija...). [13,14].

I Svetski energetskej savet, u svojim analizama primećuje da je nakon kovid-krize, došao „volatiln period energetske tranzicije“, između 2020 i 2022. registrujući sve teže okolnosti kao što su ekstremna vremenska događanja i akcidenti, Rat u Ukrajini, energetska kriza i inflacija [13].

VII ZAKLJUČAK: POLITIČKA VOLJA I DALJE NAJVEĆE ISKUŠENJE

Kombinacija obuhvaćenih ciljeva kratkog roka, među koje spada podsticanje rasta, monetarna stabilizacija, pa i restrukturiranje sektora energetike, kao prioritet preteže u današnjem trenutku, kako u svetu tako i u Srbiji. I takav scenario predstavlja nekakav razvoj, jer ne isključuje institucionalne promene, kako organizaciono-tehnološke, tako ni strukturne, a pogotovo ne investicije u energetska postojenja i infrastrukturu pa i nove izvore, o čemu je redovno poručivao Savez energetičara Srbije.

Međutim, sve to je veoma daleko od osmišljenih koncepcija i zajedničkih usaglašenih koraka i projekata, koji bi podsticali svetsku tranziciju energetskej sektora. Razume se da je takav razvojni scenario daleko od održivosti.

Scenario održive energetskej tranzicije po definiciji treba da bude plod preklapanja ekonomskih, ekoloških socio-humanitarnih i ciljeva sa odgovarajućom institucionalnom reorganizacijom sektora. Da bi energetska tranzicija bila uspešna i održiva, ona takođe treba da bude usaglašena sa strategijama globalne trgovine, tehnološkog progresa, poljoprivrede i turizma, urbanog i ruralnog palaniranja, zaštite prirode i prirodnih resursa, kao i sa humanitarnim pitanjima i kontrolom nejednakosti. Ovakav pristup nije ni na pomolu. I globalna zajednica ljudi (OUN) kao da je odustala od usaglašavanja osnovnih ljudskih načela i ciljeva.

Veliki deo zemalja nakon kovid-krize kao da se ponašaju veoma pragmatično, ali nojevski (s glavom u pesku) pokušavajući da osnaže tek samo rast i zaposlenost. Bez obzira na dugoročne i strukturne probleme, nejednakosti, pa i na preteći svetski sukob. Aktuelna faza konceptualne konfuzije i pregrupisanja ciljeva u srednjem roku mogla bi da donese mnoge nove nevolje svetu u celini. Oxfam tvrdi da „nejednakost doprinosi smrti najmanje jedne osobe svake četiri sekunde,...ali mnoge od smrtnih slučajeva zbog nejednakosti se mogu izbeći odgovarajućim političkim odlukama i ulaganjima“ [15].

Srpska ekonomsko-energetska scena takođe je konfuzna.

Strategija razvoja energetike, radi se, sa velikim zastojećima, još od 2020. Za to vreme menjaju se zakoni, predlažu i usvajaju nacionalni energetske i klimatski planovi. Bez obzira na zakonsku konstataciju da je Strategija energetike glavni strateški dokument iz kog proističu planovi, u praksi je stanje obrnuto. Sadašnji Integralni klimatsko energetske plan je na javnoj diskusiji i predstavlja navodno ključni strateški dokument koji bi trebalo da bude usvojen na jesen 2023. Javna diskusija pokazuje mnoštvo nedoumica u pogledu najverovatnijeg scenarija i uslova da se vrednosti navedene u planu uopšte ostvare. Mnogi ciljevi postavljeni su veoma fleksibilno, a dileme oko tempa dekarbonizacije i povećanja udela OIE ostaju dobrim delom nepoznanica [16].

I globalne stručne ocene stanja energetske tranzicije u Srbiji i svetu prilično su upitne. Dok je svetski energetske forum u okviru rangiranja održivosti energetike Srbiju rangirao na 70 mestu (od oko 140 zemalja, sadašnje rangiranja (najnoviji rang Energy Trillemma za 2022, Srbiju od ukupno 91 zemlje stavlja na 47 mesto, ovaj put ispred Severne Makedonije (52) i BiH (54). To ne bi trebalo mnogo da služi na ponos, jer je ta pozicija daleko iza naprednijih referentnih zemalja: Mađarska (14), Hrvatska (18), Albanija (43), Crna Gora 44) [14].

Zastoj u procesu energetske tranzicije logična je posledica pogoršanja globalnih ekonomskih i političkih okolnosti i neizvesnosti. Zajednica mladih, zajedno sa naučnom i akademskom zajednicom ljudi širom sveta ima izvestan potencijal da kroz usaglašavanje izvrši pritisak na političku elitu da se vrati pregovorima, kroz osmišljene ekološke i antiratne akcije, kao što je to pre pet decenija bio pritisak na aktore Vijetnamskog rata. Energetičari, kao deo globalne savesti čovečanstva, treba u tome aktivno da učestvuju.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Đukić, P. Different scenarios and challenges of the global crisis – the need for an innovative approach, *Economics – Innovativa and economic research Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 5-10, 2023. <https://economicsrs.com/index.php/eier/article/view/324> [pristupljeno 10.09.2023]
- [2] Đukić, P., Đukanović, S. Najveći izazovi energetske tranzicije u Srbiji: u srednjem i dugom roku, *Energetika, ekonomija, ekologija*, No.1-2. pp. 23-49, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.010DJ>
- [3] IMF. Global Financial Stability Report: Safeguarding Financial Stability amid High Inflation and Geopolitical Risks, Figure 3.2, p. 84 and Figure 3.8, p. 92, 2023. <https://www.imf.org/en/Publications/GFSR/Issues/2023/04/11/global-financial-stability-report-april-2023> [pristupljeno 10.09.2023]
- [4] Nikolić, G. Ekonomski aspekti rata u Ukrajini i zapadnih sankcija protiv Rusije, *Finansije - časopis za teoriju i praksu finansija*, Vol. 77, No. 1-6, pp. 1-32, 2022.
- [5] Đukić, P. Pravična tranzicija energetike Srbije - održivost reformi u uslovima nove globalne krize, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 53-62, 2022. <https://doi.org/10.46793-eee22-3-53d/>
- [6] Ukrajina i Rusija: Kako probijanje brane Nova Kahovka ugrožava životnu sredinu i snabdevanje hranom. <https://www.bbc.com/serbian/lat/svet-65934833> [pristupljeno 22.06.2023]
- [7] Integrirani nacionalni energetske i klimatske plan Republike Srbije za period 2030. godine sa projekcijama do 2050. https://mre.gov.rs/extfile/sr/1138/009_Integrated%20NECP%20of%20Serbia_13062023_SR.pdf [pristupljeno 10.04.2023]
- [8] Čejni, M. *Tesla – čovek van vremena*, Samizdat, Beograd, 1981.
- [9] Đukić, M.P. *Iskušenja ekonomske politike- život pod sankcijama*, Grmeč-Privredni pregled, 1995.
- [10] Đukić, M.P. *Moć i nemoć ekonomske politike – Jugoslavija u vreme suspenzije sankcija*, Atlantida RS, Beograd, 1997.
- [11] Renewable Energy in Energy Supply – Module Overview, Renewables 2023 - Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR-2023_Energy-Supply-Module.pdf [pristupljeno 24.06.2023]
- [12] European Commission. REPowerEU: Affordable secure and sustainable energy for Europe. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en [pristupljeno 01.03. 2023]
- [13] WEC. Volatile period of the Energy Transition. (2023) https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2023/infographics-ac0db16c98?_gl=1*1rmibm2*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwwb6lBhBJEiwAbuVUS6YBqyZtmUE0M1KTJZmwmeQdctrMwnRgiVCrgTv0zV341LMwJjRoC-lkQAvD_BwE [pristupljeno 24.06.2023]
- [14] World Energy Council. World Energy: Trilemma Index 2022. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf?v=1669839605 [pristupljeno 12.07.2023]
- [15] Oxfam. Možemo da stvorimo ekonomiju u kojoj niko nije siromašan i nejednakost više nikog ne ubija. <https://www.masina.rs/oxfam-mozemo-da-stvorimo-ekonomiju-u-kojoj-niko-nije-siromasan-i-nejednakost-vise-nikog-ne-ubija> [pristupljeno 12.07.2023]
- [16] Vlada Republike Srbije. Javne konsultacije i javna rasprava na predlog Uredbe o utvrđivanju INEKPA. <https://mre.gov.rs/tekst/1094/-javne-konsultacije-i-javna-rasprava-na-predlog-uredbe-o-utvrđivanju-inekp-a.php> [pristupljeno 12.07.2023]

AUTORI/AUTHORS

dr Petar Đukić - redovni profesor u penziji, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beograd, djukic@tmf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-5490-2059](https://orcid.org/0000-0001-5490-2059)

dr Slaviša Đukanović - profesor Visoke poslovne škole strukovnih studija, Novi Sad, slavisad63@gmail.com

Sistemi za upravljanje distribuiranim energetske resursima: stanje u oblasti

Distributed Energy Resource Management Systems: State of the Art

Luka Strezoski

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000, Novi Sad

Rezime - Ovaj rad istražuje sisteme za upravljanje distribuiranim energetske resursima (DERMS), inovativne softverske platforme dizajnirane da pruže operatorima distributivnog sistema (DSO) specijalizovani skup alata za optimizaciju integracije i upravljanja značajnom količinom distribuiranih energetske resursa (DER). U idealnom slučaju, DERMS bi trebalo da obuhvati širok spektar alata, pružajući prednosti kako DSO-ima, tako i krajnjim korisnicima. Međutim, s obzirom na to da se tehnologija DERMS još uvek razvija, njegova definicija ostaje nejasna, obuhvatajući različite nivoe softverske hijerarhije, od virtualnih elektrana i DER agregatora do centralizovanih sistema za kontrolne centre distributivnih preduzeća, poznatih kao "Mrežni DERMS." Iako se ove različite tehnologije često kolektivno nazivaju DERMS, one predstavljaju različite koncepte sa različitim skupovima alata, težeći da pruže različite usluge različitim interesnim stranama. Cilj ove studije je da se opiše struktura DERMS alata, da se istaknu izazovi i problemi sa kojima se DSO suočavaju zbog integracije velikog broja DER-ova, i da se izlože mogućnosti prevazilaženja ovih izazova korišćenjem i integracijom različitih nivoa DERMS rešenja.

Ključne reči - distribuirani energetske resursi, distributivni sistemi, DERMS, DMS.

Abstract - Distributed Energy Resource Management Systems (DERMS) are new software platforms designed to provide distribution system operators (DSO) with a specialized set of tools that enable them to maximize the benefits of integrating and managing a large amount of distributed energy resources (DER). Ideally, DERMS should cover a wide range of tools, offering advantages to both DSOs and end users. However, as DERMS technology is still evolving, its definition remains unclear and can refer to very different levels of software hierarchy, ranging from virtual power plants and DER aggregators to centralized systems intended for control centers of distribution companies, called Utility DERMS. Although all these different technologies are often simply referred to as DERMS, they are distinct concepts with different sets of tools and aim to provide different services to different stakeholders. The goal of this paper is to describe the structure of DERMS tools, to highlight the problems and challenges faced by DSOs due to the integration of a large amount of DERs, and to indicate the possibility of overcoming these challenges through the use and integration of different levels of DERMS solutions.

Index Terms - Distributed energy resources, Distribution systems, DERMS, DMS

1 UVOD

S obzirom na sve veću integraciju distribuiranih energetske resursa (DER) širom sveta, distributivne mreže postaju sve složeniji sistemi [1-3]. DER obuhvata različite vrste resursa, uključujući distribuirane generatore (DG) poput solarnih panela i vetro-turbina, razne sisteme za skladištenje energije kao što su baterije ili zamajci, električna vozila (EV) i stanice za njihovo punjenje [4-5]. Ovi novi resursi unose veliku složenost u tradicionalno pasivne distributivne mreže, kao i u njihovo upravljanje, kontrolu i vođenje [6-7].

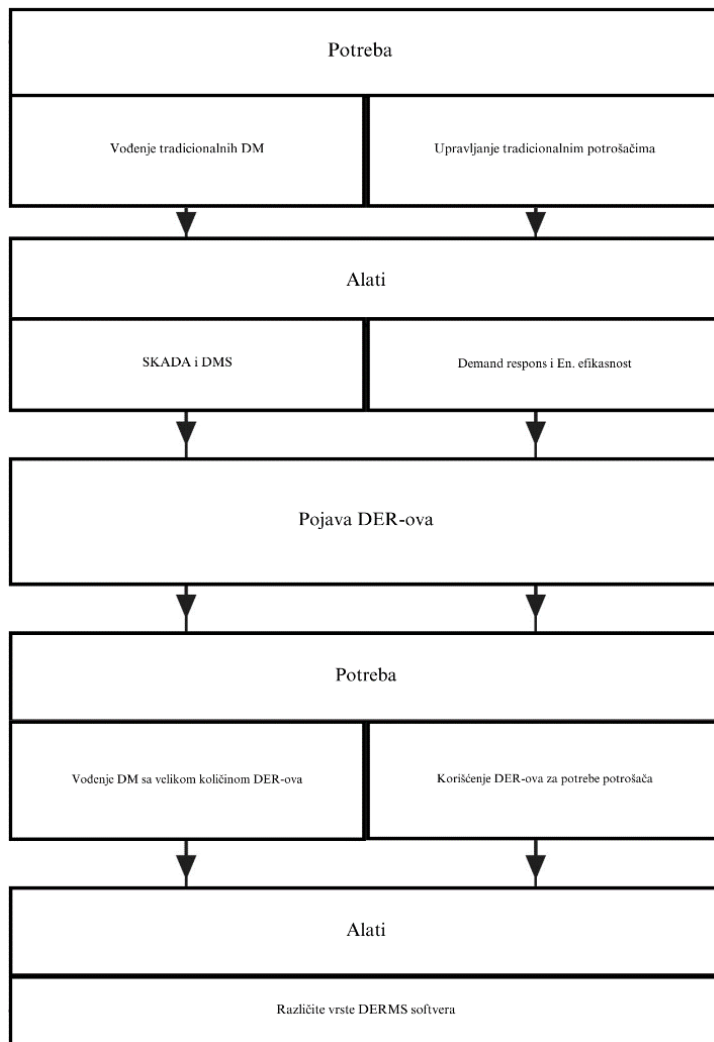
Izazovi usled stohastičke integracije DER-ova postaju sve izraženiji kod svih učesnika u distributivnim mrežama. Operatori distributivnih mreža (DNO) suočavaju se s preopterećenjima, naponskim problemima i problemima koordinacije zaštite zbog dinamičke i intermitentne prirode DER-ova [8-9]. Sa druge strane, krajnji potrošači sa DER-ovima, poznati kao "kupci-proizvođači", koji se nalaze iza brojala i koji žele da trguju svojim viškom energije, često su premali da bi konkurisali na tržištu električne energije [10].

Da bi se premostio jaz između tradicionalnih praksi upravljanja distributivnim mrežama i novih izazova uzrokovanih integracijom velike količine DER-ova, tradicionalni DNO razvijaju se ka mnogo aktivnijim učesnicima, poznatim kao Operatori distributivnog sistema (DSO) [11]. Tradicionalno pasivni potrošači, takođe se razvijaju ka znatno dinamičnijim potrošačima, koji mogu da se agregiraju u takozvane DER grupe, i ponude svoje usluge na agregiranom nivou [12].

Međutim, ova tranzicija zahteva prateću digitalizaciju kontrolnih centara i razvoj mnogo inteligentnijih softverskih rešenja koja će omogućiti praćenje, kontrolu, agregaciju i zaštitu ovako složenog distributivnog sistema sa velikom količinom DER-ova, rasprostrtih po celoj mreži [13-14]. Ovde dolaze do izražaja nova softverska rešenja, poznata kao Sistemi za upravljanje DER-ovima (DERMS sistemi), koja imaju za cilj da obezbede bezbednu integraciju novih DER-ova i potrošača, kao i pouzdano i bezbedno upravljanje takvim distributivnim sistemima [15-16].

U idealnom slučaju, DERMS bi trebalo da pokrije širok skup alata, pružajući prednosti kako DSO-u, tako i krajnjim kupcima. Međutim, kako se DERMS tehnologija još uvek razvija, njena definicija je nejasna i može se odnositi na veoma različite nivoe softverske hijerarhije, koja se proteže od virtualnih elektrana i DER agregatora, do centralizovanih sistema, nazvanih "Mrežni DERMS". Iako se svi ovi sistemi često jednostavno nazivaju DERMS, ove softverske tehnologije imaju različite skupove alata i imaju za cilj da pruže

različite usluge različitim zainteresovanim stranama. Dva granična slučaja, koja se često nazivaju DERMS, jesu DER agregatori i Mrežni DERMS. Iako se njihov cilj može činiti sličnim, ova dva rešenja se uveliko razlikuju po svojoj prirodi i odgovornostima. Razvojni put ovih softverskih alata, prikazan je na Slici 1, u skladu sa literaturom [16].



Slika 1. Razvojni put DERMS softvera

Cilj ovog rada je da opiše strukturu DERMS alata, da ukaže na probleme i izazove sa kojima se DSO suočavaju usled integracije velike količine DER-ova, i da ukaže na mogućnost prevazilaženja tih izazova korišćenjem i integracijom različitih DERMS rešenja.

II INTEGRACIJA DER U DISTRIBUTIVNE MREŽE

Izazovi usled integracije DER-ova razlikuju se po svojoj prirodi. Prvo, integracija velike količine DER-ova u postojeće mreže, ako nije ispravno planirana i projektovana, može izazvati nestabilnost i probleme zagušenja, a može zahtevati i velika ulaganja u izgradnju novih kablova i/ili jačanje postojećih [1].

Dalje, distribuirani generatori (DG) i skladišta energije, kada se njima stohastički upravlja, mogu uneti ozbiljne tehničke izazove, s obzirom da mogu izazvati preopterećenja na postojećim fiderima i značajno povećati napon na lokacijama na kojima su priključeni na mrežu. Štaviše, u periodima niske potrošnje, ali visoke proizvodnje

obnovljivih DG (npr. visoko zračenje sunca ili energija vetra), javlja se novi fenomen obrnutog toka energije. To znači da bi u ovim kritičnim periodima struja mogla da teče iz distributivnih u prenosne sisteme, za čega tradicionalni električni sistemi nisu projektovani. Ovo posledično može da izazove neispravan rad zaštitne opreme, kao i probleme sa naponom duž fidera [13].

Zatim, većina DG je zasnovana na obnovljivim izvorima, pa je intermitentna po svojoj prirodi, što uzrokuje visok nivo neizvesnosti u njihovoj proizvodnji. Stoga, ako se njome ne upravlja na inteligentan način, ova intermitentnost može izazvati probleme u kratkoročnom i dugoročnom operativnom planiranju distributivnih sistema.

Sa druge strane, na strani potrošača, sve veća količina krovnih solarnih panela, malih skladišta energije i električnih vozila, ubrzano menjaju ponašanje tradicionalnih niskonaponskih mreža. Konačno, dinamičko ponašanje današnjih sistema uvodi još jednu promenu paradigme u upravljanju električnim sistemima. Naime, tradicionalan rast potrošnje od nekoliko procenata godišnje, brzo nestaje. U današnjim elektroenergetskim sistemima sa velikom količinom malih DG, kao i skladišta energije iza brojlara, povećanje opterećenja postaje minimalno ili čak negativno. Stoga tradicionalni balansni mehanizmi korišćenja ogromnih elektrana na uglj ili nuklearnih elektrana, više nisu prikladni i moraju se pojaviti novi načini brzih i fleksibilnih usluga balansiranja [14-15].

Dalje, novi koncepti poput mikromreža i programa za odziv na potražnju („Demand Response“), takođe unose izazove u tradicionalno vođenje distributivnih mreža. Mikromreže, kao lokalizovani sistemi za generisanje, skladištenje i distribuciju energije, mogu biti izazov za tradicionalne modele upravljanja električnom energijom, jer zahtevaju visok stepen automatizacije i sofisticiranog upravljanja da bi se osigurala pouzdanost i efikasnost. S druge strane, programi za odziv na potražnju, koji podstiču potrošače da prilagođavaju svoju potrošnju energije u skladu sa stanjem u mreži, donose dodatnu složenost. Ovi programi zahtevaju napredne tehnologije za praćenje i kontrolu potrošnje, kao i nove metode za predviđanje i odgovor na promenljive obrasce potrošnje. Ove inovacije dovode do potrebe za modernizacijom infrastrukture distributivnih mreža, što može biti skupo i vremenski zahtevno, ali su ključne za integraciju obnovljivih izvora energije i postizanje veće energetske efikasnosti.

Svi ovi izazovi su danas dobro poznati, a inicijative za pronalaženje odgovarajućeg rešenja za njihovo suočavanje su uveliko u toku. Iz ovog razloga DERMS sistemi širom sveta postaju sve aktuelniji [16]. Pored uspešnog suočavanja sa izazovima nametnutim DER-ovima i obezbeđivanja sistematskog i inteligentnog upravljanja širokim spektrom različitih DER-ova, DERMS tehnologije nastoje da postignu još više. Naime, cilj DERMS alata jeste da potencijalne izazove nametnute velikom količinom DER-ova pretvore u operativne i novčane benefite, kako za DSO, tako i za krajnje potrošače [13-16].

III SISTEMI ZA UPRAVLJANJE DISTRIBUIRANIM ENERGETSKIM RESURSIMA - DERMS

Kako se sam koncept DERMS-a još uvek razvija, njegova definicija i dalje nije jasno uspostavljena. DERMS, kao što sam naziv kaže, jeste softversko rešenje za upravljanje DER-ovima. Međutim, termin DERMS može se odnositi na veoma različite nivoe softverske hijerarhije [13].

S jedne strane, postoje decentralizovana softverska rešenja za

agregaciju velikih količina resursa malih snaga, koji se nalaze iza brojila, kao što su sistemi za klimatizaciju ili grejanje, krovni solarni paneli, mala skladišta energije ili EV, sa ciljem da obezbede bolju preglednost niskonaponske mreže i da omoguće ovim malim resursima pružanje svojih usluga na agregirani i mnogo korisniji način - na primer, ulazak na tržište električne energije kao i programe energetske efikasnosti [13-14].

S druge strane, postoje centralizovani sistemi koji obezbeđuju preglednost režima, ručnu/automatsku kontrolu DER-ova, rešavanje narušenja tehničkih ograničenja, kao i napredne aplikacije za optimizaciju i efikasno upravljanje srednjim i velikim DER-ovima i DER grupama koje se sastoje od puno malih DER-ova, sa ciljevima pružanja operativnih i novčanih benefita DSO-u [15].

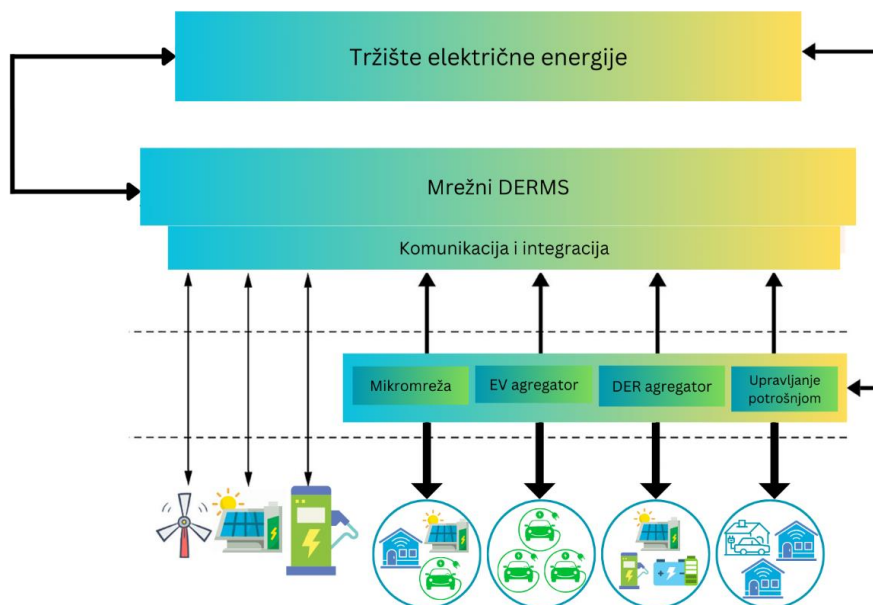
Dva granična slučaja, koja se često nazivaju DERMS, jesu DER agregator i Mrežni DERMS [13-15]. Iako njihovi ciljevi na prvi pogled mogu izgledati slično, ova rešenja se uveliko razlikuju po prirodi i odgovornostima. Međutim, oni se takođe savršeno dopunjuju u obezbeđivanju čitavog spektra usluga neophodnih za današnje DSO, odgovorne za obezbeđivanje bezbednog i optimalnog upravljanja sve većom količinom DER-ova.

Osnovni cilj DER agregatora je da agregira male DER-ove, uglavnom locirane iza brojila, u DER grupe, a zatim da pružaju različite usluge DSO-u, koristeći agregisanu snagu DER-ova. Usluge koje DER Agregatori mogu da pruže uključuju učešće na tržištu, angažovanje DER-ova u šemama za uštedu energije, programe za

smanjenje opterećenja, i druge usluge, uglavnom vezane za potrošački nivo [13-15]. Međutim, DER agregatori obično nemaju pristup tačnom mrežnom modelu i nisu svesni tehničkih ograničenja na nivou mreže, kao što su preopterećenja transformatora i vodova, ograničenja napona, itd.

S druge strane, Mrežni DERMS je inteligentna softverska platforma za optimalno upravljanje srednjim i velikim DER-ovima i DER grupama, sa ciljem da se svi ovi resursi iskoriste za postizanje optimalnog vođenja distributivnih mreža sa puno DER-ova, bez narušavanja tehničkih ograničenja [16]. Pored toga, Mrežni DERMS koristi sve svoje resurse (kako DER-ove tako i tradicionalne resurse) da reši već narušena ograničenja ili čak da proaktivno spreči predviđena narušavanja tehničkih granica. Prema tome, u pogledu velikih i srednjih DER-ova, čiji uticaj na mrežne uslove može biti značajan, Mrežni DERMS predstavlja prirodno okruženje za njihovo upravljanje i kontrolu [13-16].

Međutim, iako se i DER Agregator i Mrežni DERMS mogu koristiti kao samostalna rešenja i uspešno pružiti brojne prednosti, njihove pojedinačne vrednosti se značajno povećavaju kada se integrišu i koriste zajedno [13, 14]. Kada su pravilno integrisani da rade zajedno, ova dva softverska rešenja mogu da pokriju čitav spektar usluga u vezi sa pravilnim, bezbednim i sigurnim upravljanjem distributivnih mreža sa puno DER-ova. Drugim rečima, integrisani zajedno, DER agregator i Mrežni DERMS bi omogućili DSO-vima da iskoriste DER-ove kao vredne resurse u obavljanju širokog skupa neophodnih aplikacija.



Slika 2. Hibridno DERMS rešenje [16, 17]

Kroz komunikaciju sa Mrežnim DERMS-om, DER agregator bi u velikoj meri poboljšao vidljivost i sposobnost DSO-a da kontroliše i upravlja DER-ovima koji se nalaze iza brojila, posebno u aplikacijama koje se odnose na potrošače, kao što su učešće na tržištu električne energije, poboljšanje energetske efikasnosti, ili učešće u takozvanim „demand response“ programima. S druge strane, kroz svoje napredne aplikacije, i kroz integraciju sa DER agregatorima, Mrežni DERMS bi mogao da ponudi DSO-ima sposobnost da uspešno upravljaju i optimizuju svoje distributivne sisteme, sa velikom količinom različitih DER-ova, rasprostrtih po celoj mreži. Pored korišćenja DER agregatora kao resursa u svojim

naprednim aplikacijama, Mrežni DERMS bi stekao dodatni uvid u ponašanje DER-ova iza brojila, kroz komunikaciju sa DER agregatorom. Konačno, DER agregatori, ako su integrisani sa Mrežnim DERMS-om, mogli bi da obezbede mnogo bolji kvalitet usluga, pošto bi svi njihovi programi morali da budu validirani od strane Mrežnog DERMS-a i time bi osigurali da se tehnička ograničenja ne krše. Dakle, ova integracija bi značajno pomogla DSO-vima u prelasku u novu eru distributivnih sistema sa velikom količinom DER-ova, bez opasnosti da se ugrozi njihovo bezbedno funkcionisanje. Ova integracija je u skladu sa referencama [16, 17], prikazana na Slici 2, formirajući tzv. „Hibridno DERMS“ rešenje.

III-1 Hibridni DERMS

Hibridno DERMS rešenje integriše različite aspekte distribucije i potrošnje električne energije. Tržište električne energije deluje kao centralno mesto za trgovinu energijom, dok hibridni DERMS služi kao spona između tržišta i entiteta niže u hijerarhiji. Na ovom mestu je vrlo važno naglasiti da uključivanje DER u trgovinu električnom energijom još uvek nije regulisano na globalnom nivou, kao i da se i u državama gde jeste regulisano, ove regulative značajno razlikuju od države do države. Stoga, ovaj dijagram i ideju hibridnog DERMS rešenja treba shvatiti kao potencijalno rešenje u bližoj ili daljoj budućnosti.

U srži sistema su četiri ključna komponenta koja komuniciraju s mrežnim DERMS-om: mikromreže, EV agregatori, DER agregatori i upravljanje potrošnjom. Mikromreže su prikazane kao samodovoljne jedinice koje mogu efikasno upravljati lokalnom proizvodnjom i potrošnjom energije. EV agregatori organizuju i optimizuju punjenje električnih vozila kako bi se postigla veća energetska efikasnost. DER agregatori upravljaju izvorima energije kao što su solarni paneli i vetrogeneratori, obezbeđujući njihovu integraciju u distributivnu mrežu. Sistemi za upravljanje potrošnjom predstavljaju inicijative i tehnologije koje korisnicima omogućavaju prilagođavanje njihove potrošnje na temelju trenutnih uslova na tržištu i u mreži.

Ovaj hibridni DERMS pristup omogućava složenu i dinamičku interakciju između svih učesnika u energetskom sistemu, optimizujući distribuciju i potrošnju energije za postizanje održivosti i pouzdanosti u celokupnom energetskom lancu.

IV REPREZENTATIVNI PRIMERI UPOTREBE DERMS REŠENJA U PRAKSI

U ovoj sekciji biće prikazano nekoliko primera korišćenja industrijskog DERMS rešenja za prevazilaženje izazova koje unosi integracija velike količine DER-ova [7], [13-16].

IV-1 Integracija DER-ova

Planiranje integracije velike količine DER-ova predstavlja izazov u svetlu nove paradigme u elektroenergetskim sistemima. Tradicionalne planerske procedure, zasnovane na jednostavnim proračunima, više nisu primenljive zbog kompleksnosti koju donosi integracija DER-ova [16]. Intermitentna priroda većine DER-ova, gotovo stohastičko korišćenje električnih automobila, kao i mogućnost skladišta električne energije da injektiraju ili uzimaju električnu energiju iz sistema, zahtevaju napredne proračune za adekvatno planiranje njihove integracije.

DERMS sistemi pružaju kompletna planerska alata koja omogućavaju inženjerima u distributivnim preduzećima da poredе različite scenarije integracije novih DER-ova, kao i potencijalna rešenja za ojačavanje mreže na mestima gde bi novi DER-ovi mogli ugroziti bezbedan rad sistema. Kako je opisano u referenci [16], Mrežni DERMS alati omogućavaju analizu i poređenje tradicionalnih planerskih procedura, recimo ojačavanja ugroženih delova mreže, nadogradnjom i/ili zamenom pod-dimenzionisanih elemenata jačim elementima, sa novim metodima korišćenja fleksibilnosti DER-ova u svrhu rešavanja tehničkih ograničenja bez ulaganja u nadogradnju i ojačavanje mreže.

Pored toga, kriterijumi poređenja mogu biti finansijske i/ili tehničke prirode. Na ovaj način, Mrežni DERMS alati pružaju mogućnost brže i efikasnije integracije velike količine DER-ova, usput omogućavajući distributivnim preduzećima da uštede i vreme i

novac, odlaganjem ili potpunim izbegavanjem nepotrebnih ulaganja u ojačavanje mreže.

IV-2 Opservabilnost velike količine DER-ova u distributivnoj mreži

S obzirom na različite vrste i tehnologije distribuiranih energetskih resursa (DER-ova), na njihovu dinamičku i stohastičku prirodu, kao i na činjenicu da DER-ovi mogu biti snage od svega nekoliko kW (npr. krovni solarni paneli), do nekoliko desetina MW (farme solarnih panela ili vetrogeneratora), kao i da oni mogu biti locirani u svim delovima distributivne mreže (i na niskom i na srednjem naponu), opservabilnost njihovog ponašanja u realnom vremenu je od ključnog značaja za operatore distributivnih mreža [7]. Mrežni DERMS pruža skup sofisticiranih alata koji operatorima pružaju uvid u ponašanje DER-ova u realnom vremenu, njihov uticaj na ostatak mreže, fleksibilnost snage koju skladišta električne energije i agregisane baterije električnih automobila mogu da ponude, kao i mogućnost upravljanja DER-ovima [7].

Pored toga, integracijom Mrežnog DERMS-a sa DER agregatorima, koji grupišu i upravljaju malim DER-ovima iza brojila, operatori distributivnih mreža dobijaju uvid i u ponašanje ovih DER-ova, lociranih na niskonaponskom delu mreže, kao i mogućnost njihove grupe kontrole [13, 14]. Ovo omogućava preciznije planiranje, analizu i reakciju na promene u mreži, poboljšavajući tako efikasnost i pouzdanost distributivnih sistema. Integracija ovih sistema takođe pruža mogućnost za implementaciju naprednih strategija upravljanja, uključujući demand response inicijative i optimizaciju rasporeda punjenja električnih vozila, čime se dodatno povećava fleksibilnost i otpornost distributivne mreže.

IV-3 Optimizacija napona pomoću DER-ova

Velika količina DER-ova, rasprostrtih svuda po distributivnoj mreži, može ugroziti naponske prilike duž distributivnih izvoda [1, 7]. Međutim, s obzirom da je većina DER-ova povezana na mrežu pomoću invertera, ukoliko bi se sa njihovim naponskim podešavanjima i proizvodnjom/apsorpcijom aktivne i reaktivne snage upravljalo na inteligentan način, DER-ovi bi mogli da posluže kao značajni resursi za regulaciju napona.

Mrežni DERMS alati pružaju upravo ovu mogućnost kroz centralizovane aplikacije za optimizaciju napona, aktivnih i reaktivnih snaga [14, 15]. Ove aplikacije koriste tradicionalne resurse kao što su regulacioni transformatori i baterije kondenzatora, u kombinaciji sa inteligentnim upravljanjem naponskih podešavanja, kao i aktivnih/reaktivnih snaga invertorskih DER-ova, u cilju postizanja optimalnih naponskih profila, smanjenja gubitaka, kao i ekonomičnog vođenja distributivnih mreža [14, 15].

Implementacija ovakvih alata omogućava operaterima mreže da efikasno upravljaju različitim izazovima koje predstavljaju DER-ovi, uključujući i one vezane za naponsku stabilnost. Korišćenje ovih alata takođe doprinosi većoj pouzdanosti distributivnih mreža, što je posebno važno u kontekstu sve većeg učešća obnovljivih izvora energije. Dodatno, integracija ovakvih sistema omogućava bolje upravljanje rizicima i efikasnije reagovanje na promenljive uslove rada mreže, što u konačnici vodi ka većoj energetskej efikasnosti i održivosti distributivnih sistema.

IV-4 Korišćenje fleksibilnosti DER-ova u svrhu rešavanja tehničkih problema u distributivnoj mreži

Kao što je diskutovano u sekciji IV.A u kontekstu planiranja, fleksibilnost distribuiranih energetskih resursa (DER-ova) je možda još važnija u realnom vremenu, kao resurs za rešavanje narušenja

tehničkih ograničenja mreže, kao što su preopterećenja transformatora i izvoda, obrnuti tokovi snage, naponski problemi, itd. U tu svrhu, Mrežni DERMS pruža čitav skup alata nazvan „Upravljanje ograničenjima - Constraint Management“, koji detektujući narušenja tehničkih ograničenja, koristi slobodne kapacitete skladišta energije i grupisanih baterija električnih automobila, neiskorišćeni kapacitet obnovljivih izvora električne energije, kao i upravljanje potrošnje, kako bi na optimalan način, bez potrebe za drastičnim merama kao što su „sečenje potrošnje“ ili isključivanje DER-ova sa napajanja, rešili tehničke probleme i vratili mrežu u optimalan pogon [13-17].

U ovu svrhu, do posebnog izražaja dolaze DER agregatori i njihova integracija sa Mrežnim DERMS-om, s obzirom da se agregiranjem ogromne količine malih DER-ova u potpunosti koristi potpuni potencijal fleksibilnosti DER-ova, svih vrsta i veličina [13, 14]. Ovo omogućava efikasnije upravljanje distributivnom mrežom, smanjenje rizika od narušavanja stabilnosti mreže, i povećanje pouzdanosti napajanja za sve korisnike. Integracija DER agregatora sa Mrežnim DERMS-om takođe pruža dodatne mogućnosti za optimizaciju distributivne mreže, omogućavajući bolje iskorišćenje resursa i smanjenje troškova upravljanja mrežom. Ovakva integracija predstavlja ključan korak ka modernizaciji i digitalizaciji distributivnih sistema, čime se postavljaju temelji za buduće inovacije i razvoj u oblasti pametnih mreža.

IV-5 Proaktivno upravljanje DER-ovima u svrhu rasterećenja distributivnih izvoda

Konačno, vodeća Mrežna DERMS rešenja poseduju i module za „Upravljanje ograničenjima u budućnosti - Lookahead Constraint Management“, koji idu korak dalje, koristeći sofisticirane alate za prognozu stanja mreže u budućnosti. Ovi alati detektuju potencijalna narušenja tehničkih ograničenja i zatim, uz komunikaciju sa DER agregatorima i upravljivim DER-ovima, prognoziraju njihovu fleksibilnost u trenucima detektovanih preopterećenja u mreži kako bi manipulacijom njihove fleksibilnosti predupredili predviđene probleme [16]. Ovo se radi tako što se u DERMS-u prepoznaju planirane proizvodnje/potrošnje DER-ova, a zatim se kroz SCADA i internet protokole kojima je DERMS povezan sa DER-ovima i DER agregatorima, nove planirane proizvodnje/potrošnje komuniciraju ka krajnjim resursima. Na ovaj način se potpuno predupređuju narušenja tehničkih ograničenja distributivne mreže, pa se samim tim i značajno produžava životni vek elemenata.

Implementacija Lookahead Constraint Management modula unutar DERMS sistema predstavlja ključan korak ka proaktivnom upravljanju distributivnim mrežama, omogućavajući operaterima da ne samo reaguju na trenutna stanja, već i efikasno planiraju i prilagođavaju se budućim uslovima. Ova napredna funkcionalnost omogućava optimizaciju rada mreže, smanjenje rizika od otkaza i prekida, te povećanje efikasnosti i pouzdanosti celokupnog sistema. U konačnici, sofisticirani DERMS alati pružaju osnovu za stvaranje pametnijih, otpornijih i efikasnijih elektroenergetskih sistema, sposobnih da se nose sa izazovima moderne energetske tranzicije.

IV-6 Uključivanje DER-ova u trgovinu električnom energijom

Implementacija DER-ova može biti skupa, a njihova integracija u elektroenergetski sistem unosi izazove, kako je detaljno objašnjeno u članku. Regulatori, operatori tržišta i agregatori DER-ova počeli su da predlažu korišćenje njihovog potencijala za pružanje tržišnih usluga mreže koje mogu smanjiti ukupne troškove životnog ciklusa. Međutim, regulativa o učešću DER-a na tržištu je još uvek u povelju, i pravila se značajno razlikuju u različitim delovima sveta. Pored

toga, iako mogu biti privlačne, tržišne cene električne energije i pomoćne usluge, veličina pojedinačnih DER-ova predstavlja značajnu prepreku za njihov ulazak na tržište [19-21].

Da bi se stvorila značajna količina fleksibilnog kapaciteta DER-ova za učešće na tržištu električne energije, neophodno je dozvoliti agregaciju ovih resursa. Agregirani DER-ovi mogu pružati bitne usluge operaterima distributivnih sistema (DSO) i čak operaterima prenosnih sistema (TSO) i učestvovati na tržištima prodajom električne energije ili pomoćnih usluga [16]. Ipak, prvi i osnovni korak ka ostvarenju ovog cilja mora biti regulatorna reforma koja bi pružila podsticaj za iskorišćavanje potencijala DER-ova putem agregacije. Značajan korak ka regulisanju uključenosti DER-ova na tržišta električne energije i pomoćnih usluga bio je nalog br. 2222 Federalne energetske regulatorne komisije (FERC), Sjedinjenih Američkih Država (SAD) koji odobrava agregatorima DER-ova da učestvuju i budu ravnopravni igrači na veleprodajnim tržištima električne energije u SAD [22-23].

Ipak, kao što su novi entiteti koji prihvataju, sortiraju i komuniciraju ponude i aukcije nabavke od agregatora DER-ova postali stvarnost širom sveta, tako i lokalni operatori tržišta električne energije moraju imati uspostavljene komunikacione kanale s DERMS-om koji je svestan stanja mreže kako bi validirali dobijene rasporede na osnovu uslova i ograničenja mreže. Nekoliko pilot projekata testira ovakvu vrstu integracije između DERMS-a, agregatora DER-a i lokalnih operatora tržišta električne energije, obećavajući visoku stopu uspeha [16]. Međutim, da bi se ova rešenja primenila u punoj meri, na celoj distributivnoj mreži ili bar na njenim većim delovima, mnoga pitanja regulatornih odgovornosti još uvek treba razjasniti, kao što su: ko je odgovoran za uspostavljanje ugovora s DER-ovima i agregatorima DER-ova, ko može i sme da kontroliše pojedinačne DER-ove, treba li lokalno tržište električne energije biti centralizovano, decentralizovano ili hibridno, i konačno, treba li agregatori DER-ova da nude svoje usluge direktno TSO-u ili na lokalnom tržištu električne energije.

Sve navedeno su i dalje otvorena pitanja, i predstavljaju jedan od pravaca budućih istraživanja autora.

IV-7 Diskusija

Predstavljeni slučajevi ističu važnost DERMS rešenja za za DSO-e. Prvo, DERMS pruža DSO-ima mogućnost uvida u stvarno stanje vrlo dinamičkih uslova u nadolazećim distributivnim mrežama. Drugo, Mrežni DERMS i agregatori DER-ova pružaju DSO-ima sposobnost da pomognu operaterima prenosnih sistema (TSO) u njihovim potrebama za balansiranjem i drugim važnim uslugama, na primer, smanjenju vršnih opterećenja, inteligentnim korišćenjem fleksibilnosti dostupnih DER-ova i optimizacijom njihovog ponašanja u skladu sa zahtevima za agregiranom energijom.

Konačno, da bi se DER-ovima omogućilo učešće na tržištu električne energije, distributivne kompanije moraju biti sigurne da tehnička ograničenja neće biti prekršena rasporedima (agregiranih) DER-ova. Kako je diskutovano u radu, ovo je takođe omogućeno integracijom Mrežnog DERMS-a i agregatora DER-ova, gde Mrežni DERMS validira rasporede grupa DER-ova u odnosu na tehnička ograničenja distributivnih mreža. Cilj ovog rada, predstavljajući ključne slučajeve korišćenja DERMS-a, bio je da prikaže trenutno stanje tehnologije u razvoju industrije DERMS-a. Ovo su neki od najnovijih primera iz stvarnih industrijskih slučajeva upotrebe, koji pokazuju gde se trenutno nalazi zajednica elektroenergetskih sistema, kao i industrija, u razvoju DERMS-a, posebno sa integracijom Mrežnog DERMS-a i agregatora DER-ova.

Iako je već mnogo toga učinjeno na ovom polju, za postizanje idealnog slučaja koji bi omogućio integraciju i upravljanje nadolazećim distributivnim sistemima s vrlo velikom količinom DER-ova, potrebno je mnogo bolje razumeti različite nivoe rešenja DERMS-a kako bi se iskoristio njihov pun potencijal.

Autor se nada da će ovaj rad doprineti toj oblasti i pomoći u boljem razumevanju kako različiti hijerarhijski nivoi DERMS mogu raditi u skladu i doprineti transformaciji distributivnih mreža i primeni DERMS-a u kontrolnim centrima nadolazećih distributivnih mreža.

V ZAKLJUČAK

U radu je opisana struktura različitih DERMS alata. Na početku je ukazano na probleme i izazove sa kojima se Operatori distributivnog sistema (DSO) suočavaju usled integracije velike količine DER-ova. Potom su diskutovane različite vrste softverskih alata za upravljanje DER-ovima i ukazano je na mogućnost prevazilaženja navedenih izazova korišćenjem i integracijom različitih DERMS rešenja. Posebno su diskutovana dva granična slučaja - DER Agregator i Mrežni DERMS, kao i mogućnost njihove integracije u svrhu obezbeđivanja neophodnih alata operatorima distributivne mreže pri prevazilaženju izazova usled velike količine DER-ova. Konačno, kroz nekoliko ilustrativnih primera iz prakse, pokazano je kako DSO mogu iskoristiti DERMS alate kako bi obezbedili nesmetanu tranziciju ka elektroenergetskim sistemima zasnovanim na obnovljivim izvorima i distribuiranom proizvodnjom električne energije. U budućem radu autora, biće detaljno obrađene i različite mogućnosti korišćenja DERMS alata u svrhu zaštite distributivnih sistema i mikromreža, sa puno različitih vrsta DER tehnologija [18].

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije u okviru realizacije projekta pod nazivom: "Istraživanja u cilju unapređenja nastavnog procesa i razvoja naučno-stručnih oblasti Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije".

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Sajadi, A., Strezoski, L., Strezoski, V., Prica, M., Loparo, K.A. Integration of renewable energy systems and challenges for dynamics, control, and automation of electrical power systems, *WIREs Energy Environment*, Vol. 8, No. 4, 2018. <https://doi.org/10.1002/wene.321>
- [2] Agüero, J.R., Takayesu, E., Novosel, D., Masiello, R. Modernizing the Grid: Challenges and Opportunities for a Sustainable Future, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 15, No. 3, pp. 74-83, 2017, <https://doi.org/10.1109/MPE.2017.2660819>
- [3] Das, R., Madani, V., Aminifar, F., McDonald, J., Venkata, S.S., Novosel, D., Bose, A., Shahidepour, M. Distribution automation strategies: evolution of technologies and the business case, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 2166-2175, 2015. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2368393>
- [4] Guerrero, J.M., Blaabjerg, F., Zhelev, T., Hemmes, K., Monmasson, E., Jemei, S., Comech, M.P., Granadino, R., Frau, J.I. Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 4, No. 1, pp. 52-64, 2010. <https://doi.org/10.1109/MIE.2010.935862>
- [5] Smil, V. Distributed Generation and Megacities: Are Renewables the Answer?, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 17, No. 2, pp. 37-41, 2019. <https://doi.org/10.1109/MPE.2018.2884112>
- [6] Mozina, C.J. Impact of Green Power Distributed Generation, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 16, No. 4, pp. 55-62, 2010. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.936970>
- [7] Strezoski, L., Stefani, I., Brbaklic, B. Active Management of Distribution Systems with High Penetration of Distributed Energy Resources, in Proc. *IEEE EUROCON 2019 - 18th International Conference on Smart*

- Technologies*, Novi Sad, Serbia, pp. 1-5, 1-4 July 2019. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861748>
- [8] Driesen, J., Belmans, R. Distributed generation: challenges and possible solutions, in Proc. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 8, 18-22 June 2006. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709099>
- [9] Strezoski, L., Vojnovic, N., Strezoski, V., Vidovic, P., Prica, M.D., Loparo, K.A. Modeling challenges and potential solutions for integration of emerging DERs in DMS applications: power flow and short-circuit analysis, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 7, pp. 1365-1384, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0494-1>
- [10] IEEE Draft guide for distributed energy resources management systems (DERMS) Functional Specification, 2021. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9447316>
- [11] Sadan, N., Renz, B. New DER Communications Platform Enables DERMS and Conforms with IEEE 1547-2018 Requirements, in Proc. *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Chicago, IL, USA, pp. 1-5, 12-15 October 2020. <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9300002>
- [12] Pratt, A., Baggu, M., Veda, S., Ding, F., Mendoza, I., Lightner, E. A Test bed to Evaluate Advanced Distribution Management Systems for Modern Power Systems, in Proc. *IEEE EUROCON 2019 - 18th International Conference on Smart Technologies*, Novi Sad, Serbia, July 1-4, 2019. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861563>
- [13] Strezoski, L. Utility DERMS and DER Aggregators: An Ideal Case for Tomorrow's DSO, in Proc. *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Novi Sad, Serbia, pp. 1-5, 2022. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960384>
- [14] Strezoski, L., Padullaparti, H., Ding, F., Baggu, M. Integration of Utility Distributed Energy Resource Management System and Aggregators for Evolving Distribution System Operators, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 277-285, 2022. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000667>
- [15] Strezoski, L., Stefani, I. Utility DERMS for Active Management of Emerging Distribution Grids with High Penetration of Renewable DERs, *Electronics*, Vol. 10, No. 16, 2021. <https://doi.org/10.3390/electronics10162027>
- [16] Strezoski, L. Distributed energy resource management systems-DERMS: State of the art and how to move forward, *WIREs Energy and Environment*, Vol. 12, No. 1, e460, 2023. <https://doi.org/10.1002/wene.460>
- [17] Schneider Electric Global. Powering and digitizing the economy, Available online at: <https://www.se.com/ww/fr/assets/342/document/24794/14-presentation-smartbuilding.pdf>, [pristupljeno 03.06.2023]
- [18] Simic, N., Strezoski, L., Simić, S., Čohadžić, D. Verification of Distributed Energy Resource Models for Microgrid Fault Calculations, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 4, pp. 53-58, 2021, <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.53S>
- [19] Australian Renewable Energy Agency (ARENA). (2020). Report: On the calculation and use of dynamic operating envelopes. <https://arena.gov.au/knowledge-bank/on-the-calculation-and-use-of-dynamic-operating-envelopes/> [pristupljeno 03.06.2023]
- [20] Australian Renewable Energy Agency (ARENA). (2021a). Report: DER impacts on operational technology, 2021. <https://arena.gov.au/assets/2021/04/evolve-project-der-impacts-on-operational-technology.pdf> [pristupljeno 03.06.2023]
- [21] Australian Renewable Energy Agency (ARENA). (2021b). Report: On the implementation and publishing of operating envelopes. <https://arena.gov.au/knowledge-bank/on-the-implementation-and-publishing-of-operating-envelopes/> [pristupljeno 03.06.2023]
- [22] Autogrid. (2020). DERMS Data Sheet, 2020. AutoGrid. <https://www2.autogrid.com/DERMS-Datasheet> [pristupljeno 03.06.2023]
- [23] Earley, B. (2020). FERC opens electricity markets to distributed resource aggregators. <https://www.insideenergyandenvironment.com/2020/09/ferc-opens-electricity-markets-to-distributed-resource-aggregators/> [pristupljeno 03.06.2023]

AUTORI/AUTHORS

dr Luka Strezoski, vanredni profesor, Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, lukastrezoski@uns.ac.rs, ORCID [0000-0003-0109-4320](https://orcid.org/0000-0003-0109-4320)

Energetska efikasnost domaćinstva sa toplotnom pumpom i solarnom elektranom

Energy Efficiency of Households with a Heat Pump and a Solar Power Plant

Zoran Simendić, Goran Švenda*, Tatjana Latas**, Dalibor Mraović***

* Fakultet tehničkih nauka Novi Sad

** Somborelektro d.o.o. Sombor

*** Aqua Flam Vent d.o.o. Sombor

Rezime - U radu je razmatrano domaćinstvo sa solarnom elektranom i toplotnom pumpom. U zavisnosti od potrošnje i proizvodnje električne energije, kretanje energije kroz električno brojilo je u oba smera. Mogućnosti i ekonomska opravdanost primene razmatranog, integrisanog sistema upoređeni su sa sistemima za grejanje domaćinstava koji se uobičajeno koriste u Republici Srbiji. Analize i prikazani rezultati zasnivaju se na merenjima koja su realizovana kod kupca-proizvođača u Elektrodistribuciji Sombor.

Gljučne reči - Toplotna pumpa, solarni paneli, solarna elektrana, energetska efikasnost

Abstract - The paper considered a household with a solar panel and a heat pump. Depending on the consumption and production of electricity, the flow of energy through the electric meter is in both directions. The possibilities and economic justification of the application of the considered integrated system were compared with the household heating systems that are commonly used in the Republic of Serbia. The analysis and presented results are based on measurements that were carried out at the prosumer in Elektrodistribucija Sombor.

Index Terms - Heat pump, solar panels, solar power plant, energy efficiency

I UVOD

Globalni rast potražnje energije u svetu u uslovima visokih i nestabilnih cena zahteva njenu racionalnu upotrebu i štednju [1]. U tu svrhu Republika Srbija je izmenila Zakon o energetici [2] i donela više zakona među kojima je i zakon o energetske efikasnosti. Definisan je kupac-proizvođač, kao pravno ili fizičko lice, odnosno preduzetnik. To je krajnji kupac električne energije (el.en.) koji deo svojih potreba za el.en. zadovoljava iz sopstvene proizvodnje, i po potrebi koristi distributivnu mrežu (DM) za predaju viška proizvedene i preuzimanje el.en. kada njegova proizvodnja nije dovoljna da zadovolji sopstvene potrebe [3].

Ugradnja toplotne pumpe (TP) ima ekspanziju kako u svetu tako i kod nas. TP koristi energiju vazduha, zemlje i podzemnih voda da bi vršila hlađenje ili grejanje objekta. Kao takva, ona minimalno opterećuju životnu sredinu. Korišćenjem samo TP

domaćinstvo znatno povećanu potrošnju el.en. i zbog toga dobija velike račune (u plavoj, a često i u crvenoj zoni). Ugradnjom solarne elektrane i njenom integracijom sa TP omogućeno je značajno smanjenje preuzimanja el.en. iz DM, odnosno značajno smanjenje računa. Na taj način se osim povećanja efikasnosti u grejanju i hlađenju, povećava i proizvodnja i potrošnja zelene el.en.

Integracijom sistema za grejanja i hlađenja sa obnovljivim izvorima energije postižu se tri stepena energetske efikasnosti [4]: smanjenje gubitaka energije, efikasno korišćenje energije i efikasna proizvodnja energije.

Nažalost, početna ulaganja za realizaciju integrisanog sistema su velika: projektantska cena TP je 4.000÷7.000 € za 100 m² domaćinstva, u zavisnosti da li se koristi za grejanje, grejanje i hlađenje ili grejanje, hlađenje i zagrevanje vode. Cena solarnih elektrana se kreće od 700÷1.200 € po 1 kW panela (kWp). Dakle, za realizaciju integrisanog sistema potrebno je unapred optimalno dimenzionisati TP i solarnu elektranu [5], sve u skladu sa potrošnjom razmatranog domaćinstva (potrošnja, grejanje, hlađenje).

Za potrebe ovog rada, analizu i verifikaciju isplativost integrisanog rešenja, razmatran je kupac-potrošač na teritoriji Elektrodistribucije Sombor.

Nakon uvoda, u drugom poglavlju su prikazani osnovni podaci o TP, solarnim elektranama, integrisanom sistemu koji se sastoji od solarne elektrane i TP, energetske efikasnosti, cenama i osnovnim podacima o kupcu-proizvođaču. Eksperiment i ostvareni rezultati su prikazani u trećem poglavlju. Rezultati analize ekonomske opravdanosti prikazani su u četvrtom poglavlju. Nakon zaključka, referentno je navedena literatura korišćena za realizaciju ovog rada.

II POSTAVKA PROBLEMA

Princip održivog razvoja znači da se resursi koriste tako da zadovoljavaju potrebe sadašnjice i da se ne dovodi u pitanje sposobnost budućih generacija da zadovolje njihovih potreba. U skladu sa tim, potrebna je sve veća proizvodnja zelene el.en. koja se koristi u domaćinstvima i industriji [6]. Povećanjem

produkcije el.en. putem obnovljivih izvora smanjuje se njena proizvodnja na osnovu fosilnih goriva, čime se smanjuje zagađenje životne sredine i doprinosi se održivom razvoju. Na tom putu, veliki doprinos ima ekonomski isplativa rešenja za grejanje i hlađenje objekata.

Toplotna pumpa

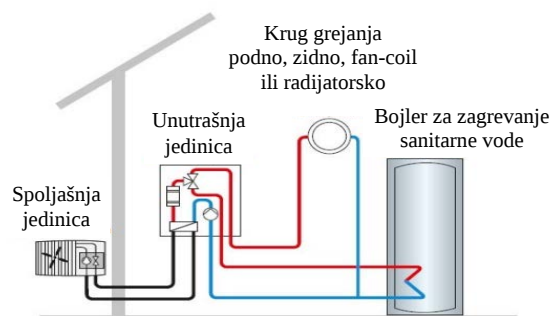
TP za potrebe grejanja ili hlađenja preuzima energiju sa jednog mesta i prebacuju je na drugo mesto. Ona ima tri osnovne jedinice: spoljašnju jedinicu (isparivač), unutrašnju jedinicu (kondenzator) i rashladni fluid, slika 1. Rashladni fluid prenosi toplotu tako što cirkuliše između spoljašnje i unutrašnje jedinice. Isparivač crpi energiju iz obnovljivog izvora (vazduh (kao na slici 2), voda, geotermalni ili solarni izvor) pri čemu dolazi do isparavanja rashladnog fluida. Kompresor komprimuje gas čime mu povećava temperaturu. Kondenzator prenosi toplotu sa gasa na grejni sistem, a gas se vraća u tečno stanje. Ekspanzioni ventil snižava pritisak rashladnog sredstva, što izaziva isparavanje i početak novog ciklusa. Prilikom hlađenja ovaj ciklus je obrnut, slika 2 [7].

Današnje TP podnose izuzetno niske temperature. One mogu da rade na -25° , pritom do -15° imaju na raspolaganju pun kapacitet bez upotrebe grejača. Iste TP omogućavaju i zagrevanje sanitarne vode i unutrašnjih prostorija. Cena TP se smanjuje tako da one postaju sve više konkurentne u odnosu na ostale sisteme grejanja.

Nadzor sistema i upravljanje radnim i servisnim parametrima omogućen je sa fabrički isporučenim softverom. Njegovom primenom omogućeno je da se u svakom momentu nadzire i po potrebi promeni rad svih komponenti TP [8].



Slika 1. Unutrašnja jedinica sa kompresorom i spoljašnja jedinica



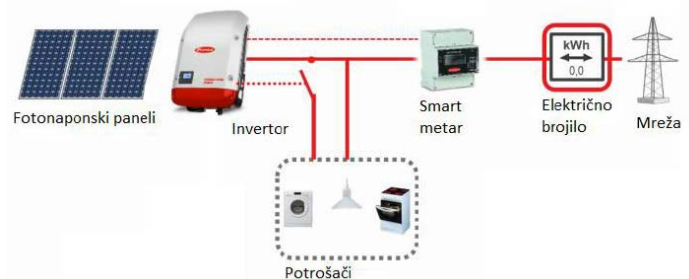
Slika 2. Šematski prikaz rada toplotne pumpe

Solarna elektrana

U oblasti fotonaponskih sistema za domaćinstva mogu da se realizuju [9]:

- sistem na mreži (on grid),
- kućni hibridni sistem (on grid, ili off grid),
- minigrid sistem (off grid),
- ostrvski sistemi (off grid).

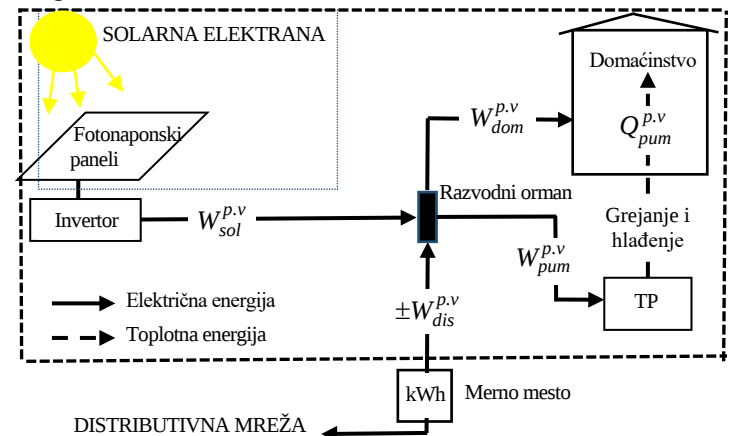
On grid sistemi su sistemi koji rade paralelno sa DM i zavisni su od njega. Oni predstavljaju više od 90% tržišnih fotonaponskih sistema. Važno je da svaki inverter kao sistem ne degradira kvalitet snabdevanja el.en. u tački konekcije. Modalitet rada je proizvodnja el.en. za sopstvene potrebe uz vraćanje viška u DM da bi se ista kasnije koristila. Na slici 3 je prikazana solarna elektrana instalirana kod kupca-proizvođača (domaćinstvo i industrija). Najčešće se iza mernog uređaja (električno brojilo) ugrađuje uređaj za merenje tokova energije. Na osnovu tih merenja se u svakom trenutku može pratiti rad solarne elektrane.



Slika 3. Solarna elektrana [9]

Kućni hibridni sistemi su sistemi koji koriste više izvora el.en. (solarnu elektranu, punjive baterije ili vetrogeneratore). Minigrid sistemi se grade tamo gde DM nije dostupna, i/ili može da snabdeva više domaćinstava. Ostrvski sistemi se grade za domaćinstva gde DM nije dostupna i za ona domaćinstva koja povremeno troše el.en.

Integrisan sistem



Slika 4. Integrisani sistem, solarna elektrana i TP u domaćinstvu

Na slici 4 je prikazan integrisani sistem koji obuhvata solarnu elektranu i TP primenjene u domaćinstvu. Kretanje energije kroz električno brojilo je u oba smera u zavisnosti od potrošnje

domaćinstva i proizvodnje el.en. solarne elektrane. Oznake na slici su definisane u delu Kupac-proizvođač. Kada je proizvodnja solarne elektrane veća od potrošnje u domaćinstvu el.en. se kreće prema DM. Kada je proizvodnja solarne elektrane manja od potrošnje domaćinstva el.en. se kreće od DM prema domaćinstvu. TP se koristi za zagrevanje i hlađenje domaćinstva.

Cene

Za potrebe ovog rada korišćene su cene energenata koje su važile u toku maja 2023. godine:

- gas: 1 kWh iznosi 4,917 din. sa PDV, za 1 kWh potrebno je 0,0871143 m³ gasa (račun Sombor gas);
- pelet: za 1 kWh potrebno je 0,244 kg peleta prosečne kalorijske vrednosti, 1 t peleta iznosi 38.400 din. [11] (internet [10]);
- na dan 21.5.2023. godine srednji kurs 1 € = 117,2808 din. (kupovni 116,8 din, a prodajni 117,25 din. [12]).

Napomena: U tabeli 6 je uračunato povećanje cena energenata od 9% koje je planirano od novembra 2023. godine.

Kupac-proizvođač

Kupac-proizvođač je krajnji kupac koji je na unutrašnje instalacije priključio sopstveni objekat za proizvodnju el.en. iz obnovljivih izvora energije, pri čemu se proizvedena el.en. koristi za snabdevanje sopstvene potrošnje, a njen višak se predaje u prenosnu mrežu, DM, odnosno zatvorenu DM [2]. Na osnovu donetog Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije kao i Uredbe o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca-proizvođača i snabdevača, Elektrodistribucija Srbije je donela neophodnu proceduru za sticanje statusa kupca-proizvođača [13].

Kupci-proizvođači su podeljeni u tri kategorije i na osnovu toga za svaku kategoriju definisana je posebna procedura priključenja:

- domaćinstva sa direktnim merenjem i objekti koji nisu domaćinstva i stambene zajednice instalirane snage fotonaponskih modula do 10,8 kW;
- objekti koji nisu domaćinstva i stambene zajednice, a imaju instalirane snage fotonaponskih modula od 10,8 kW do 50 kW;
- stambene zajednice.

Za kategoriju kupac-proizvođač domaćinstvo sa direktnim merenjem i objekti koji nisu domaćinstva i stambene zajednice instalirane snage fotonaponskih modula do 10,8 kW sticanje statusa kupca-proizvođača se vrši po pojednostavljenoj proceduri. U tu svrhu, Elektrodistribucija Srbije definisala je Opšte uslove za priključenje fotonaponskih modula na unutrašnje instalacije postojećeg objekta kupca [14].

U uredbi o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja [15] su definisani osnovni pojmovi za obračun el.en.:

- preuzeta el.en. je el.en. koju preuzme kupac-proizvođač iz elektroenergetskog sistema;
- isporučena el.en. je aktivna el.en. koju objekat za proizvodnju el.en. iz obnovljivih izvora isporuči u elektroenergetski sistem;
- neto električna energija predstavlja razliku ukupne preuzete i ukupne isporučene električne energije kupca -

proizvođača u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem u toku jednog meseca, utvrđene u kWh na osnovu očitavanja brojila električne energije koja ispunjavaju propisane metrološke zahteve i utvrđuje se po vremenima primene tarifa za aktivnu energiju zasebno u skladu sa ovom uredbom;

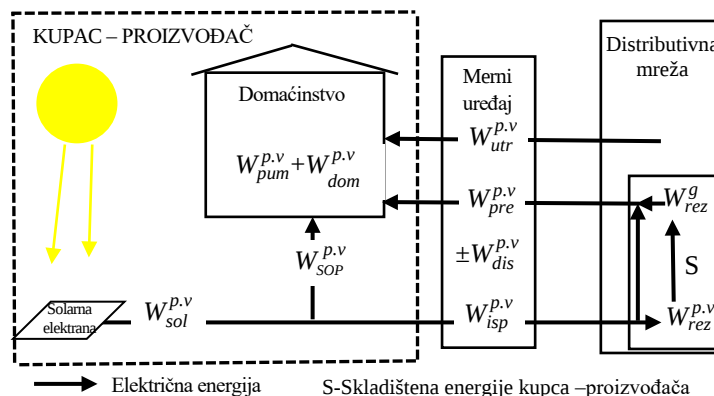
- utrošena el.en. za svaki obračunski period, kupcu - proizvođaču obračuna kao pozitivnu vrednost razlike neto el.en. utvrđene po vremenima primene tarife za aktivnu el.en. i višak el.en. iz prethodnog perioda, utvrđene po vremenima primene tarife za aktivnu energiju.

Kretanje el.en. u jednotarifnom domaćinstvu za bilo koji period prikazan je na slici 5. Tri varijante kretanja energije kroz brojilo prikazane su na slikama 5a, b, i c.

Na slikama i izrazima koji slede korišćene su sledeće oznake:

U radu su korišćeni sledeći periodi vremena (*p.v*): *m* (mesečni), *g* (godišnji) kao i trenutak *t*. Oznaka *m_k* označava mesec u godini.

<i>t</i>	- trenutak
$W_{sol}^{p.v}, P_{sol}^t$	- proizvedena energija i snaga solarne elektrane;
$\pm W_{dis}^{p.v}, \pm P_{dis}^t$	- energija i snaga iz DM u domaćinstvo (znak +), domaćinstvo skladišti u DM (znak -);
$W_{pum}^{p.v}, P_{pum}^t$	- energija i snaga potrošnje TP;
$W_{dom}^{p.v}, P_{dom}^t$	- energija i snaga potrošnje domaćinstva bez TP;
$W_{utr}^{p.v}, P_{utr}^t$	- utrošena energija i snaga kupca-proizvođača;
$W_{pre}^{p.v}, P_{pre}^t$	- preuzeta energija i snaga kupca-proizvođača;
$W_{isp}^{p.v}, P_{isp}^t$	- isporučena energija i snaga u DM;
$W_{sop}^{p.v}, P_{sop}^t$	- sopstvena isporučena energija i snaga od solarne elektrane kupcu-proizvođaču;
$W_{rez}^{p.v}$	- rezervna energija kupca-proizvođača skladištena u DM;
$Q_{pum}^{p.v}$	- proizvodnja toplotne energije koja se meri na TP.



Slika 5. Kretanje el.en. kod integriranog sistema kupac-proizvođač

Za integriran sistem kupca-proizvođača važe sledeće relacije:

$$W_{sol}^{p.v} = W_{isp}^{p.v} + W_{sop}^{p.v}, \quad (1)$$

$$W_{dis}^{p.v} = W_{utr}^{p.v} + W_{pre}^{p.v} - W_{isp}^{p.v}, \quad (2)$$

$$W_{pum}^{p.v} + W_{dom}^{p.v} = W_{utr}^{p.v} + W_{pre}^{p.v} + W_{sop}^{p.v}, \quad (3)$$

$$W_{isp}^{p.v} = W_{pre}^{p.v} + W_{rez}^{p.v}, \quad (4)$$

$$W_{rez}^g = \sum_{k=1}^{12} W_{rez}^{m_k}. \quad (5)$$

$$W_{pre}^{m_k} \leq W_{rez}^{\sum_{k=1}^{k-1} m_k}. \quad (6)$$

Isto tako u domaćinstvu je u svakom trenutku t odnos snaga:

$$P_{sol}^t = P_{isp}^t + P_{sop}^t, \quad (7)$$

$$P_{pum}^t + P_{dom}^t = P_{utr}^t + P_{pre}^t + P_{sop}^t, \quad (8)$$

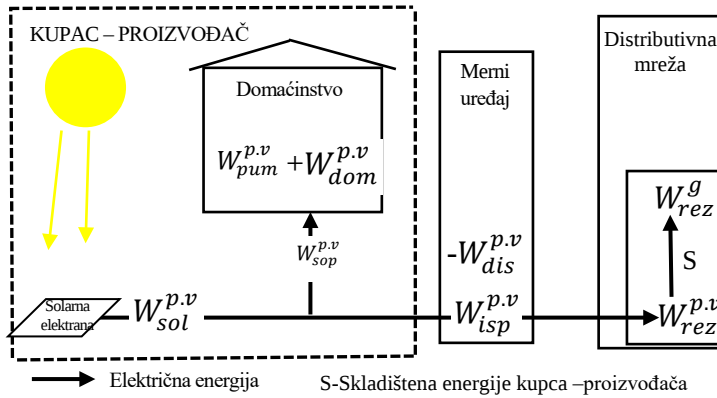
$$P_{dis}^t = P_{utr}^t + P_{pre}^t - P_{isp}^t. \quad (9)$$

U izrazima (7) i (8) postoje sledeća ograničenja:

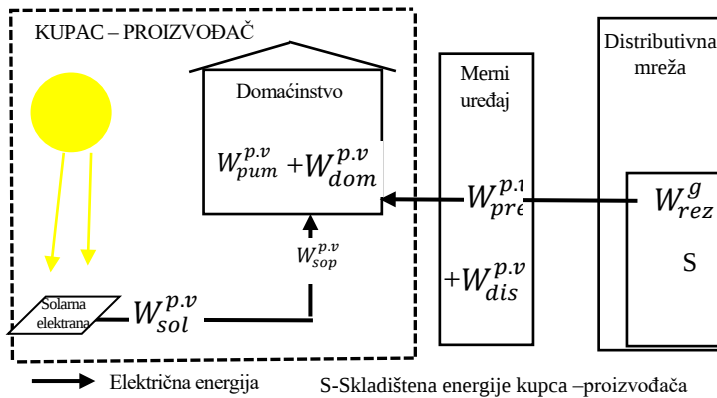
$$\begin{aligned} P_{sol}^t &> P_{dom}^t + P_{pum}^t & P_{utr}^t &= P_{pre}^t = 0 \\ P_{sol}^t &\leq P_{dom}^t + P_{pum}^t & P_{utr}^t &= 0 \text{ ako postoji rezervna el.en.}, \\ P_{sol}^t &\leq P_{dom}^t + P_{pum}^t & P_{pre}^t &= 0 \text{ ako ne postoji rezervna el.en.} \end{aligned}$$

Kao pokazatelji energetske efikasnosti domaćinstva u ovom radu koriste se sledeće veličine:

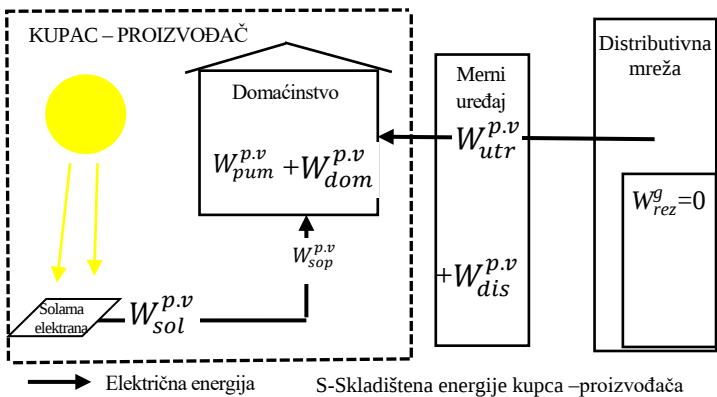
- godišnja ušteda el.en. kWh,
- godišnja ušteda ostalih energenata za grejanje,
- smanjenje proizvodnje CO₂.



Slika 5a. Proizvodnja solarne elektrane je veća od potrošnje domaćinstva



Slika 5b. Proizvodnja solarne elektrane je manja od potrošnje domaćinstva, ili ne radi, a postoji el.en. u DM u rezervi



Slika 5c. Proizvodnja solarne elektrane je manja od potrošnje domaćinstva, ili ne radi, ne postoji el.en. u DM u rezervi i koristi se el.en. iz DM

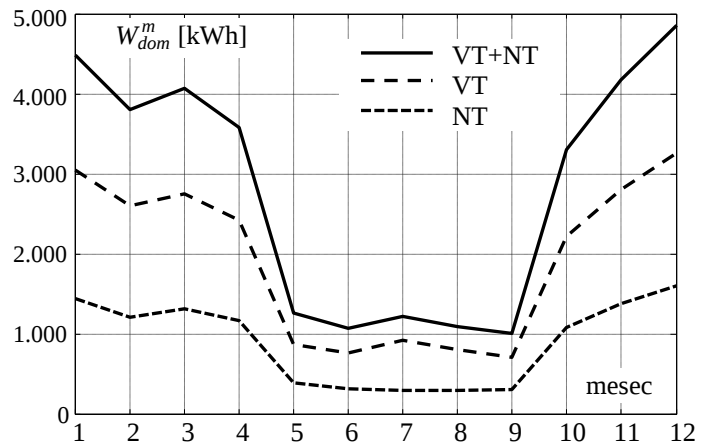
Ako je domaćinstvo ostvarilo rezervu energije u DM prvo se troši ta energija. Kada više nema rezervne energije energija koju koristi domaćinstvo je utrošena energija. U gornjim izrazima postoji sledeće ograničenje:

III EKSPERIMENT

Za potrebe ovog rada razmatra se jednospratna kuća stambene površine 260 m² koja se nalazi u Gradu Somboru i izgrađena je 2002. godine. Objekat ima elektroenergetsku saglasnost 27,6 kW. Do 2022. godine objekat se grejao putem električnog kotla snage 18 kW (najviše je istovremeno bilo uključeno 12 kW grejača električnog kotla). Pored električnog kotla tokom leta i zime je radila i jedna inverterska klima. Podešena temperatura u prizemlju je iznosila 22°C. U kući je vladala neujednačenost temperature u prizemlju i na spratu. Takvo grejanje je prouzrokovalo velike račune za el.en. Spoljašnji izgled stambenog objekta kao i raspored postavljenih solarnih panela prikazani su na slici 6.



Slika 6. Spoljašnji izgled stambenog objekta

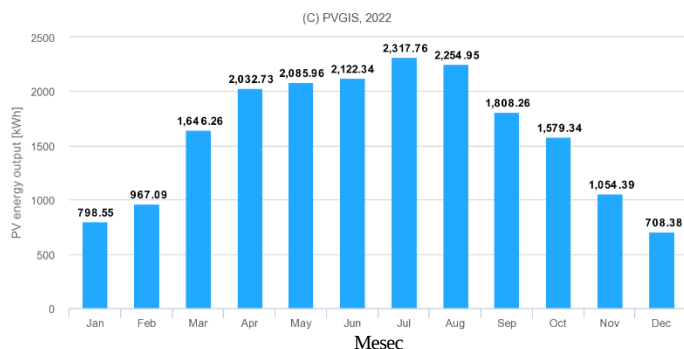


Slika 7. Potrošnja el.en. domaćinstva, 2021. god.

Do 2022. godine stambeni objekat je imao status domaćinstva sa merenom snagom. Ukupna godišnja potrošnja el.en. je prešla 30.000 kWh zbog grejanja putem električnog kotla, slika 7. Godine 2021. u višoj tarifi (VT) potrošeno je 14.167 kWh, a u nižoj tarifi (NT) 10.762 kWh. Godišnja potrošnja el. en. je bila 33.909 kWh, odnosno godišnje 130 kWh/m² što pokazuje da je domaćinstvo standardno izolovano. Na osnovu dopisa EPS Snabdevanja, zbog velike potrošnje, domaćinstvo je trebalo preći iz kategorije garantovanog snabdevanja u komercijalnog kupca. To bi dodatno povećalo postojeće, velike račune.

Krajem 2022. godine u domaćinstvo je ugrađena trofazna TP vazduh-voda snage 20 kW, gde se kompresor nalazi u unutrašnjoj jedinici TP. Prednost je bezšumnost TP i efikasnije postizanje većih temperatura u sistemu grejanja putem radijatora. TP je podešena da održava temperaturu u prostorijama na 25°C. Podešena je za grejanje i pripremu sanitarne tople vode.

Procena proizvodnje budućeg solarnog sistema izvršena je na sajtu [16]. Na osnovu ulaznih podataka za procenu potrošnje (grad Sombor, 40 solarnih panela snage 380 W, koje se postavljaju na krov, nagib panela 40°, azimut 25° i gubitak sistema od 6%) dobijena je prosečna mesečna proizvodnja el.en. od 19.376 kWh (očekivano od solarne elektrane na razmatranom objektu), slika 8. Prilikom projektovanja i izgradnje korišćena su iskustva jedne od prvih solarnih elektrana [17].



Slika 8. Procenjena mesečna proizvodnja solarne elektrane

Ukupna snaga solarne elektane iznosi 15,2 kW. Solarna elektrana sa invertorom, ormanima zaštite na jednosmernom i naizmeničnom naponu prikazana je na slici 9.

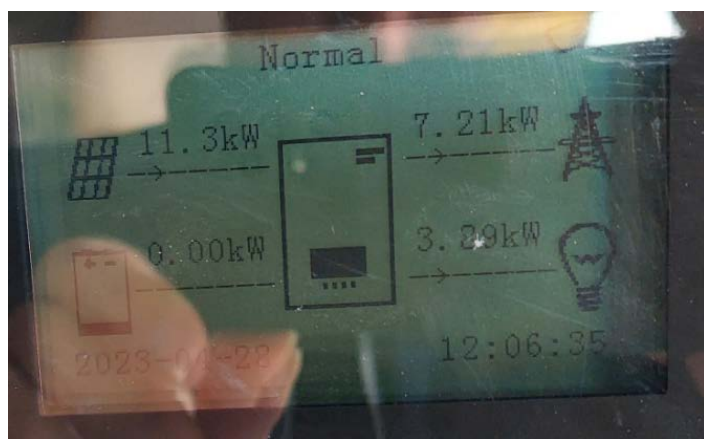


Slika 9. Slika solarne elektrane

Za procenjenu potrošnju domaćinstva, očekivan rad TP i proizvodnju solarne elektrane ugrađen je invertor 20 kW (nešto

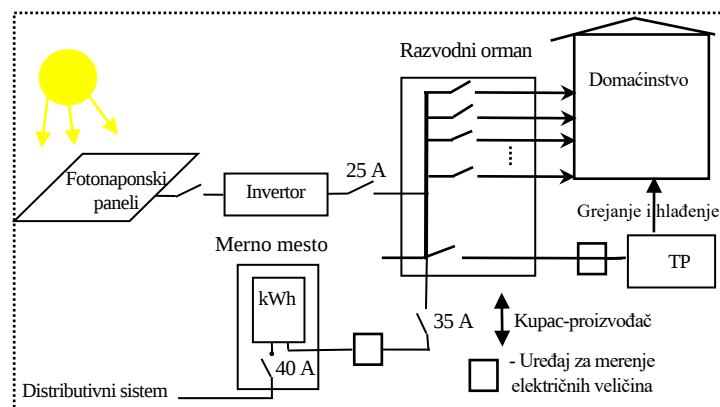
veće snage od trenutno potrebne, da bi se omogućilo proširenje kapaciteta solarne elektane, zbog planiranih investicija u budućnosti, kao što su električni automobil, sistemi skladištenja el.en., itd.). Displej invertora prikazan je na slici 10. Za razmatrani trenutak solarna elektana proizvodio 11,3 kW, od toga domaćinstvo trošilo 3,29 kW, a razlika proizvedene snage od 7,21 kW se injektira u DM.

Kupac je 11.4.2023. godine prešao iz statusa kupca u status kupac-proizvođač.



Slika 10. Kretanje energije u domaćinstvu na invertoru

Na slici 11 je prikazana jednopolna šema elektroinstalacija u domaćinstvu, sa amperažom osigurača. Kompletna šema je u skladu sa Opštim uslovima Elektrodistribucije Srbije [14]. Uočavaju se dva postavljena merna uređaja koji memorišu jedno-minutne srednje vrednosti merenja modula struja i napona, kao i protok el.en. Te vrednosti se koriste u ovom radu.

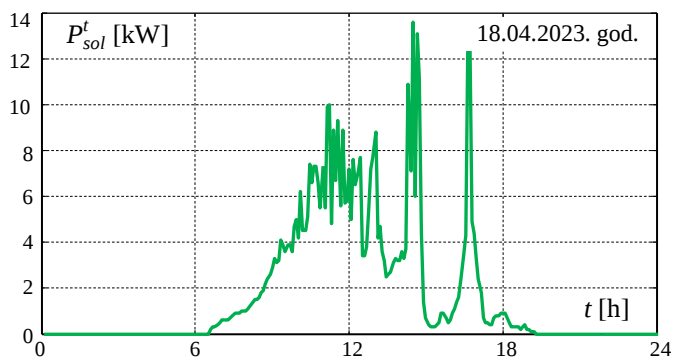


Slika 11. Jednopolna šema elektroinstalacije integrisanog sistema

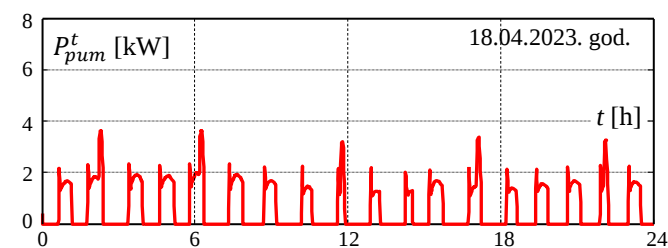
Ostvareni rezultati

U ovom delu detaljno je prikazan i analiziran rad integrisanog sistema za jedan karakterističan dan, 18.4.2023. godine.

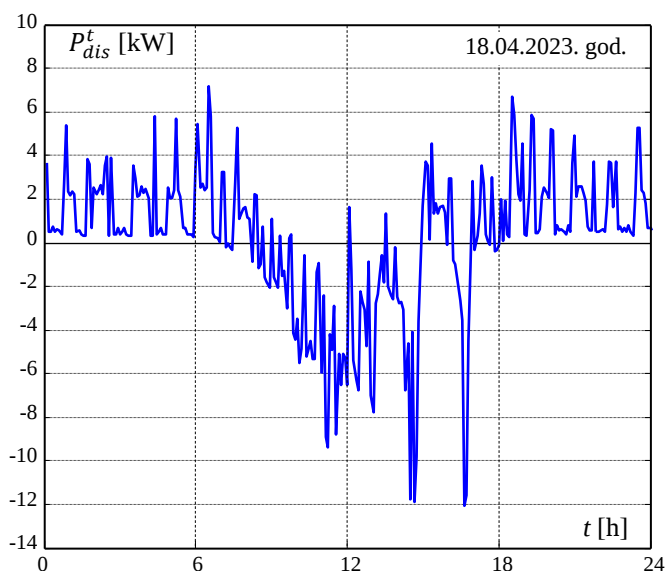
Na slici 12 je prikazana proizvodnja solarne elektrane, sa periodom očitavanja pet minuta. Mogu se uočiti velike oscilacije u proizvodnji el.en. od maksimalnih 14 kW pa do manje od 1 kW.



Slika 12. Dijagram rada solarne elektrane

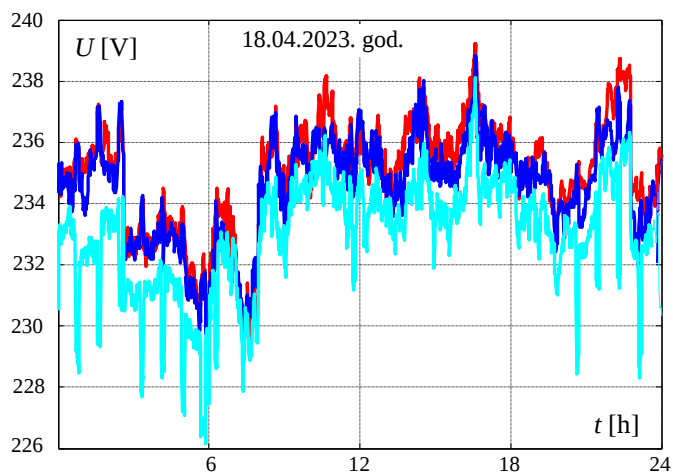


Slika 13. Dijagram rada toplotne pumpe



Slika 14. Dijagram aktivne snage iz DM u domaćinstvo (+), iz domaćinstva u DM (-)

Potrošnja TP tokom dana je prikazana na slici 13, jednominutna očitavanjima. U toku dana TP dvadesetak minuta radi i troši el.en. do 4 kW, a dvadesetak minuta ne radi. Noći su duži periodi kada je TP ne radi. Promena vrednost aktivne snage na brojilu domaćinstva prema DM je prikazana na slici 14, jednominutna očitavanja. Mogu se uočiti velike oscilacije kako noću kada domaćinstvo preuzima el.en iz DM, tako i po danu kada domaćinstvo pretežno šalje el.en. u DM, ali i povremeno el.en. preuzima DM. Velike oscilacije vrednosti napona su direktna posledica tako velikih oscilacija u razmeni el. en. Na slici 15 je prikazana promena vrednosti modula napona na sabirnicama potrošača.



Slika 15. Dijagram vrednosti modula napona

Energija proizvedena i potrošena u domaćinstvu sa integrisanim sistemom za prvih pet meseci 2023. godine prikazana je u tabeli 1. U drugoj koloni je prikazana proizvodnja solarne elektrane domaćinstva od 11. aprila kada je puštena u rad. Potrošnja domaćinstva i potrošnja TP, od početka godine, prikazani su u kolonama tri i četiri, respektivno. U petoj koloni je prikazana proizvedena toplotna energija u kWh. Može se uočiti da je proizvodnja solarne elektrane manja od očekivane, slici 8. Istovremeno, zbog neuobičajno hladnog i kišovitoг maja potrošnja domaćinstva je bila iznad proseka.

Tabela 1. Merena proizvodnja i potrošnja domaćinstva

mesec	W_{sol}^m kWh	W_{dom}^m kWh	W_{pum}^m kWh	Q_{pum}^m kWh
januar	-	1.140	1.145	3.200
februar	-	1.084	1.016	2.800
mart	-	1.259	781	1.800
do 11 aprila	-	334	197	700
od 11 aprila	1.516	459	396	1.300
maj	1.720	679	242	1.000

Tabela 2. Procenjena mesečna proizvodnja i potrošnja domaćinstva

mesec	W_{sol}^m kWh	W_{dom}^m kWh	W_{pum}^m kWh	W_{rez}^m kWh	W_{rez}^g kWh
april	2.047	1.200	593	254	254
maj	1.720	1.068	242	410	664
jun	2.122	900	242	980	1.644
jul	2.317	800	242	1275	2.919
avgust.	2.254	800	242	1212	4.131
septem.	1.808	900	242	666	4.797
oktob.	1.579	1.000	600	0	4.776
novem.	1.054	1.000	800	0	4.030
decem.	708	1.000	1.000	0	2.738
januar	798	1.100	1.100	0	1.336
februar	976	1.100	1.000	0	212
mart	1.640	1.100	600	0	152
ukupno	19.023	11.968	6.903	-	-

Na osnovu prethodno prikazanih vrednosti, i izraza (1)-(9), urađena je procena vrednosti mesečne proizvodnje i potrošnje domaćinstva, za period od godinu dana, april 2023 - mart 2024, tabela 2. Proizvodnja solarne elektrane je procenjena na 90% od procenjene proizvodnje solarne elektrane putem sajta. Od oktobra se troši rezerva el.en. koja je tokom godine deponovana u DM, posledenje dve kolone. Tokom februara i marta više nema deponovane energije u DM.

Na osnovu vrednosti koje su prikazane u tabeli 1, izvršena je procena potrošnje i proizvodnje TP za godinu dana, tabela 3. U poslednjoj koloni je prikazan odnos proizvedene i potrošene el.en. TP - koeficijent učinka, COP (coefficient of performance). Što je veći koeficijent učinka to je efikasnost TP veća. U toku letnjih meseci je manja, a u toku zimskih meseci je preko 3 što je dobro.

Tabela 3. Procena mesečne proizvodnje i potrošnje TP

mesec	W_{pum}^m kWh	Q_{pum}^m kWh	$COP = Q_{pum}^m / W_{pum}^m$ -
april	593	2.033	3,4
maj	242	1.023	4,2
jun	242	500	2,1
jul	242	500	2,1
avgust	242	500	2,1
septem.	242	1.100	4,5
oktob.	600	1.800	3,0
novem.	800	2.503	3,1
decem.	1.000	3.361	3,4
januar	1.100	3.283	3,0
februar	1.000	2.758	2,8
mart	600	1.646	2,7
ukupno	6.903	21.007	3,0

Mogućnosti i ekonomska opravdanost primene sistema u kojem su integrisani solarna elektrana i TP, upoređeni su sa drugim sistemima koji se uobičajeno koriste za grejanje domaćinstava u Republici Srbiji (gas i pelet). U tu svrhu u tabeli 4 su prikazane procenjene količine energenata koje su potrebne za grejanje domaćinstva za godinu dana, na osnovu proizvedene energije iz TP, gasa i peleta (u skladu sa podacima iz dela Cene).

U tabeli 5 je data godišnja potrošnja el.en. i potrošnja za grejanje domaćinstva preračunata u kWh, u zavisnosti da li radi integrisan sistem, samo solarna, samo TP ili neka od kombinacija sistema za grejanje. Korišćeni su podaci iz tabele 2.

U tabeli 6 su dati troškovi domaćinstva u zavisnosti od sistema za grejanje. Najskuplje grejanje je grejanje na kotao komercijalno i garntovano snabdevanje a najjeftinije je korišćenje integrisanog sistema TP i solarne elektrane.

Tabela 4. Uporedna godišnja procena potrebe za grejanjem

Električna energ.	Gas		Pelet	
kWh	m ³	RSD	kg	RSD
23.300	2.030	115.000	5.685	218.000

Primenom integrisanog sistema, TP i solarna elektrana, dobija se:

- godišnja ušteda el.en. od 34.000 kWh u odnosu na grejanje na električni kotao;
- godišnja uštedu energenata - 2.030 m³ gasa, ili 5.685 kg

peleta, ili 23.300 kWh, u odnosu na grejanje na gas ili pelet;

- godišnje smanjenje proizvodnje CO₂ - 13,5 t za smanjenje od 18.871 kWh ili smanjenje proizvodnje CO₂ - 19,7 t za smanjenje od 34.000 kWh.

Tabela 5. Procenjena godišnja potrošnja el.en. u zavisnosti od načina grejanja

Vrsta grejanja	W_{sol}^g	W_{dom}^g	Energija za grejanje	Ukupna potrošnja domaćin
	kWh	kWh	kWh	kWh
toplotna pumpa	19.023	18.871	-	0
	-	18.871	-	18.871
elekt.kotao - garantovano	19.023	34.000	-	14.977
	-	34.000	-	34.000
elekt.kotao - komercijalno	-	34.000	-	34.000
gas	19.023	11.968	-	0
	-	11.968	-	11.968
pelet	19.023	11.968	-	0
	-	11.968	-	11.968

Tabela 6. Godišnji troškovi domaćinstva za više vrsta grejanja

Vrsta grejanja	W_{sol}^g	W_{dom}^g	Energija za grejanje	Ukupni troškovi domaćin
		din.	din.	din.
toplotna pumpa	+	73.000	-	73.000
	-	310.000	-	310.000
elekt.kotao - garantovano	+	372.000	-	372.000
	-	823.000	-	823.000
elekt.kotao - komercijalno	-	818.000	-	818.000
gas	+	64.000	124.000	188.000
	-	171.000	124.000	295.000
pelet	+	64.000	218.000	282.000
	-	171.000	218.000	389.000

Može se uočiti da je TP u prednosti u odnosu na elektro kotao. Napomena: Primenom integrisanog sistema podignuta je zadata temperatura, sa 22° na 25°. Na osnovu kataloških podataka povećanjem temperature za 1° povećava se potrošnja TP za 7%. Da je temperatura ostala na 22° potrošnja el.en. TP bi bila još manja i integrisani sistem još isplativija.

Posle integrisanog sistema TP i solarna elektrana, integrisani sistemi gas i solarna elektrana imaju najmanje godišnje troškove.

IV EKONOMSKA OPRAVDANOST

Procena ekonomske opravdanosti investicionih projekata je urađena u cilju što kvalitetnijeg donošenja odluka o izboru potencijalne investicije.

Postoje različiti načini ispitivanja efikasnosti investicionog ulaganja u određeni projekat. Uobičajeno je da se za ocenu isplativosti investicionih projekata koriste statičke i dinamičke metode [19]. Statičke metode, za razliku od dinamičkih, ne uvažavaju vremensku dimenziju novca i retko se uzimaju kao jedini kriterijumi za ocenu isplativosti projekta.

Za analizu isplativosti zamene sistema grejanja korišćene su sledeće metode [19]: period povraćaja (statička metoda), neto

sadašnja vrednost, interna stopa prinosa i indeks profitabilnosti (dinamičke metode).

Metod neto sadašnje vrednosti (NSV) je jedan od najpopularnijih alata za evaluaciju projekta, s obzirom na to da vrednost svakog projekta svodi na ukupnu procenjenju vrednost projekta izraženu u današnjim €. Ulazni podaci u ovom slučaju su bili: ukupna investiciona ulaganja (€), godišnja neto ušteda (€), troškovi održavanja (€), troškovi alternativnih energenata (€) i diskontna stopa (%).

Procena troškova el.en. urađena je na osnovu podataka koji su dati u tabeli 6, korigovanih za predviđeni rast [19] u prvoj godini i 5% godišnjeg rasta cena el.en. u svakoj narednoj godini.

Procena očekivanih troškova urađena je na osnovu procene troškova održavanja svakog pojedinačnog sistema i troškova alternativnih energenata (tabela 4), korigovanih za predviđeni rast [19] u prvoj godini (samo u slučaju gasa) i 5% godišnjeg rasta cena energenata u svakoj narednoj godini.

Tabela 7. Pregled investicija u različite sisteme grejanja sa ekonomskim parametrima

PROJEKAT	Eksploatacioni period	Inicijalna investicija	Period povraćaja	Diskontna stopa	Neto sadašnja vrednost	Interna stopa prinosa	Indeks profitabilnosti
	God.	€	God.	%	€	%	-
solarna +TP	25	43.747	6,2	5	103.605	18	2
TP	25	27.741	5,8	5	74.782	20	3
solarna	25	16.006	3,9	5	72.416	28	5
solarna + gas	25	21.122	3,7	5	89.456	30	4
solarna + pelet	25	20.099	4,2	5	90.465	27	5
pelet	25	4.093	1,2	5	83.166	92	20
gas	25	5.116	1,2	5	101.986	91	20

Ukupna NSV za period eksploatacije sistema od 25 godina i diskontnu stopu od 5% prikazana je u tabeli 7. S obzirom na to da je u svim slučajevima NSV>0 realizacija svih projekata po ovom pokazatelju je opravdana. Interna stopa prinosa je za iste ulazne podatke (tabela 7), viša u odnosu na baznu diskontnu stopu (5%), što takođe potvrđuje opravdanost investicije u bilo koji od navedenih projekata. Indeks profitabilnosti je u svim slučajevima veći od 1 (tabela 7), što takođe ukazuje na opravdanost investicija. U tabeli 7 se može uočiti da se investicije u jednostavnije sisteme grejanja, otplaćuju već u drugoj godini, dok je za složenije sisteme potrebno od 4 do 6 godina.

Tabela 8. Isplativost projekata po različitim metodama

Kriterijum	Predlog	Vrednost
NSV	solarna i toplotna pumpa	103.605 €
Interna stopa prinosa	samo pelet	92%
Indeks profitabilnosti	samo pelet	20
Period povraćaja	samo pelet i samo gas	1,2 god.

Posmatrano pojedinačno svaki od ovih projekata je ekonomski opravdan. Najisplativiji je projekat sa najvećom NSV. U razmatranom primeru to je integrisani sistem TP i solarna elektrana, tabela 8. Imajući u vidu da sistem grejanja na gas i

sistem grejanja sa TP imaju približno istu neto sadašnju vrednost, koristeći indeks profitabilnosti kao dodatni kriterijum, dolazi se do zaključka da je ekonomski najopravdanije investirati u sistem grejanja na gas, jer obezbeđuje bolji profit. Međutim, prilikom odlučivanja, važno je imati u vidu da investicija u sistem grejanja sa TP i solarnom elektranom obezbeđuje potpunu nezavisnost od fosilnih goriva, njihove dostupnosti i njihovih cena.

V ZAKLJUČAK

U radu je razmatrano domaćinstvo u kojem su integrisani solarna elektrana i toplotna pumpa. Njegove mogućnosti i ekonomska opravdanost primene upoređene su sa sistemima za grejanje domaćinstava koji se koriste u Republici Srbiji (gas i pelet). Prednosti integrisanog rešenja (solarna elektrana i toplotna pumpa) su kvantifikovane na realnom primeru, domaćinstvo kupac-proizvođač u Elektrodistribuciji Sombor.

I pored velikih početnih ulaganja, integrisani sistem se pokazao kao najisplativiji sistem. Njegovom primenom omogućeno je stvaranje energetski efikasnih domaćinstava, sa radikalno smanjenom zavisnošću od upotrebe fosilnih goriva. U skladu sa tim, ugradnja takvog sistema bi trebala da se ekonomski podrži. Praktično, taj sistem bi se dodatno unapredio dodavanjem baterija za skladištenje el. en..

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Rajaković, N. Da li je pravo vreme za izgradnju velike solarne elektrane u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.01R>
- [2] Vlada Republike Srbije, Zakon o energetici. Sl. glasnik RS, br. 145/2014, 95/2018 i 40/2021, 2021. https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 03.03.2023]
- [3] Vlada Republike Srbije, Zakon o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Sl. Gl. RS 40/2021, 2021. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgr/skupstina/zakon/2021/40/4/reg> [pristupljeno 03.03.2023]
- [4] Čenejac, A., Bjelaković, R., Petrović, S., Čenejac, M. *Studija o mogućnostima primene toplotnih pumpi na teritoriji AP Vojvodine, kako za individualne i komercijalne objekte pojedinačno, tako i za daljinske sisteme grejanja po ugledu na EU, a u skladu sa aktuelnom direktivom*, FTN, Novi Sad, 2012.
- [5] Simendić, Z., Majstorović, Z., Miljanić, S., Mraović, D. Rezultati rada solarnih elektrana na području Vojvodine, in Proc. *CIGRE Srbije, C6-19*, Budva, Crna Gora, 9-12 Maj, 2023.
- [6] Rajković, D. *Osnovi održivog razvoja*, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Kragujevac, 2020. <https://vts.edu.rs/wp-content/uploads/2020/03/Osnovi-odr%C5%BEivog-razvoja-skripta-IV-PIM.pdf> [pristupljeno 03.06.2023]
- [7] Toplotna pumpa vazduh-voda (EVI serija) do - 30°C <https://www.msinstalacije.rs/oprema/toplotne-pumpe/toplotna-pumpa-vazduh-voda-evi-serija.html> [pristupljeno 03.06.2023]
- [8] <https://www.wemportal.de>
- [9] Vuković, M., Ostojić, B. Koncept korišćenja mini solarnih centrala u domaćinstvu, in Proc. *36 Međunarodno savetovanje Energetike*, Zlatibor, T4-175, 2021.
- [10] Pelet za zimu je alternativa klasičnom uglju i gasu <https://agroinfonet.com/poljoprivreda/ratarstvo/pelet-za-zimu/> [pristupljeno 21.05.2023]
- [11] Peletbukov. Prodaja peleta u Beogradu i Pančevu po najpovoljnijim cenama. https://www.peletbukov.rs/pelet-cena/?gclid=Cj0KCQjw4s-kBhDQARIsAN-ipH14zeigMV44gqo6zAToexTiqqXjh43TE2w2v5Uc6R1r2gB2Zcg2ek4aAvfVEALw_wcB [pristupljeno 21.05.2023]
- [12] Narodna banka Srbije. Kursna lista.

- https://www.nbs.rs/sr_RS/finansijsko_trziste/medjubankarsko-devizno-trziste/kursna-lista/zvanicni-srednji-kurs-dinara/index.html [pristupljeno 21.05.2023]
- [13] EPS. <https://elektrodistribucija.rs/> [pristupljeno 21.05.2023]
- [14] EPS. Opšti uslovi za priključenje fotonaponskih modula na unutrašnje instalacije postojećeg objekta kupca <https://elektrodistribucija.rs/pdf/Opsti%20uslovi.pdf> [pristupljeno 09.03.2023]
- [15] Vlada Republike Srbije, Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca - proizvođača i snabdevača, Službeni glasnik RS, br. 83/2021 i 74/2022. <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/uredba/2021/83/1/reg> [pristupljeno 13.03.2023]
- [16] Photovoltaic geographical information system https://re.jrc.ec.europa.eu/pyg_tools/en/tools.html [pristupljeno 13.03.2023]
- [17] Katić, V., Čorba, Z., Milićević, D., Dumnić, B., Popadić, B. Realizacija krovne fotonaponske elektrane na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, Tehnika-Elektrotehnika, Vol. 64, No. 4, pp. 655-662, 2015. <https://doi.org/10.5937/tehnika1504655K>
- [18] Vlada Republike Srbije, Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije (Službeni glasnik RS, br.40/2021 i 35/2023), 2021. <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 13.03.2023]
- [19] International monetary fund. Republic of Serbia: Third Review Under the Policy Coordination Instrument, Request for a Stand-By Arrangement, and Cancellation of the Policy Coordination Instrument-Press Release; Staff Report; and Statement by the Executive Director for the Republic of Serbia, IMF Country Report, No. 22/384, 2022. <https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2022/12/20/Republic-of-Serbia-Third-Review-Under-the-Policy-Coordination-Instrument-Request-for-a-527261> [pristupljeno 13.03.2023]

AUTORI/AUTHORS

dr Zoran Simendić, zoransimendic@gmail.com, ORCID [0000-0002-4641-9777](https://orcid.org/0000-0002-4641-9777)

dr Goran Švenda, svenda@uns.ac.rs, ORCID [0000-0003-4422-5175](https://orcid.org/0000-0003-4422-5175)

dr Tatjana Latas, tatjana.latas@somborelektro.rs, ORCID [0009-0007-7941-3447](https://orcid.org/0009-0007-7941-3447)

Dalibor Mraović - ek., mrdalibor@gmail.com, ORCID [0009-0001-2873-7050](https://orcid.org/0009-0001-2873-7050)

Predlog modela za predviđanje koncentracije suspendovanih (PM_{2.5}) čestica u vazduhu

Proposing the Predictive Model for Airborne PM_{2.5} Concentration

Filip Nastić

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - Rastući broj istraživanja ukazuje na negativan uticaj suspendovanih (PM) čestica na zdravlje ljudi. Jedan od načina da se izbegnu njihove negativne posledice, jeste blagovremena predikcija koncentracije PM_{2.5} u vazduhu. Znajući časovnu koncentraciju, građani bi mogli organizovati svoje dnevne aktivnosti sa ciljem smanjenja njihovog izlaganja intenzivnom zagađenju. U cilju formiranja optimalnog modela za časovnu predikciju koncentracije PM_{2.5} u vazduhu, analizirane su prediktivne performanse tri različita algoritma mašinskog učenja: "Random forest", "XGBoost" i "Light gradient boosting machine". Koristeći pomenute algoritme mašinskog učenja stvoreni su modeli koji koristeći meteorološke i hronološke podatke mogu izvršiti predikciju koncentracije PM_{2.5} na časovnom nivou sa zadovoljavajućom tačnošću. Podaci o koncentraciji PM_{2.5} su prikupljeni laserskim senzorom u gradu Kragujevcu, čija su očitavanja preuzeta sa sensor.community otvorene baze podataka. Evaluacija modela je izvršena koristeći koeficijent determinacije (R^2), osrednjenu apsolutnu grešku (MAE) i koren srednje kvadratne greške (RMSE).

Glavne reči - Zagađenje vazduha, časovna predikcija, mašinsko učenje, PM_{2.5}, zdravlje ljudi

Abstract - Increasing number of studies indicate the negative influence of Particulate Matter on human health. One of the ways to avoid their negative consequences is a timely prediction of airborne PM_{2.5} concentrations. Knowing hourly PM_{2.5} concentrations, people could organize their daily activities to reduce exposure to intensive pollution. With the goal to train an optimal predictive model, the predictive performances of three machine learning algorithms were analysed: „Random forest“, „XGBoost“, and „Light gradient boosting machine“. Using mentioned regression algorithms in combination with meteorological and chronological data, the models were trained to predict hourly airborne PM_{2.5} concentrations with relatively high accuracy. The data about airborne PM_{2.5} concentrations were collected using the laser sensor in the city of Kragujevac, Serbia. The trained models were evaluated using the coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE), and root-mean-square error (RMSE).

Index terms - Air pollution, hourly prediction, human health, machine learning, PM_{2.5}

1 UVOD

Zagađenje vazduha je postao jedan od najvećih problema današnjice. Aktuelna istraživanja ukazuju na štetan uticaj zagađenja na životnu sredinu, zdravlje ljudi i kvalitet života [1]. Prema Svetskoj zdravstvenoj organizaciji, zagađenje je odgovorno za oko 6.7 miliona prevremenih smrti godišnje [2], pri čemu je oko 4 miliona prevremenih smrti godišnje izazvano zagađenjem PM_{2.5} [3]. Suspendovane (PM) čestice predstavljaju sve čvrste i tečne čestice koje se mogu naći u vazduhu. Razlikuju se:

- PM₁₀ - čestice u vazduhu prečnika manjeg od 10 μm ,
- PM_{2.5} - čestice u vazduhu prečnika manjeg od 2.5 μm .

PM_{2.5} predstavljaju veliku pretnju po ljudsko zdravlje, jer one mogu, zahvaljujući svojim malim dimenzijama, preko pluća da dospeju u krvotok [4]. Problemi sa zdravljem koje izaziva izloženost PM_{2.5} su bolesti respiratornog i kardiovaskularnog sistema i kancer pluća [5].

Trenutno je poznato da se u Srbiji oko 70% električne energije dobija iz termoeletrana na ugalj [6]. Ako se uzme u obzir uticaj uglja na životnu sredinu i kvalitet vazduha, starost postojećih termoelektrana, zaključuje se da su građani Republike Srbije izloženi značajnoj količini zagađenja. Ideja ovog rada jeste da se razvije model za predviđanje časovne koncentracije PM_{2.5} u vazduhu. Blagovremena predikcija zagađenja može ponuditi građanima mogućnost pravilne organizacije svojih obaveza i aktivnosti sa ciljem smanjenja izloženosti visokim koncentracijama ovih čestica.

Rad [7] je analizirao uticaj meteoroloških faktora na koncentraciju PM_{2.5} u vazduhu širom Kine. Navedeno je da spoljna temperatura, brzina vetra, relativna vlažnost, precipitacija i atmosferski pritisak imaju značajan uticaj na koncentraciju ovih čestica. Istraživanje [8] je potvrdilo pomenute činjenice baveći se uticajem temperature, brzine vetra, apsolutne vlažnosti vazduha i precipitacije na koncentraciju PM_{2.5} tokom letnje, zimske i jesenje sezone. Postoje različiti indikatori vlažnosti vazduha, dok je rad [9] zaključio da se relativna vlažnost može koristiti kao dobar indikator koji je u jakoj korelaciji sa koncentracijom PM_{2.5} u vazduhu. Baveći se zavisnošću koncentracije PM_{2.5} u vazduhu i spoljašnje temperature, rad [10] je došao do zanimljivih rezultata. Pokazano je da je spoljašnja temperatura u pozitivnoj korelaciji

sa koncentracijom predmetnih čestica, iz razloga što visoke temperature pozitivno utiču na hemijski proces formiranja PM u vazduhu. Istraživanje [11] daje kontradiktorne zaključke, ukazujući na negativnu korelaciju između temperature i koncentracije suspendovanih čestica izazvanu intezivnijim sagorevanjem goriva za potrebe grejanja usled nižih temperatura. Može se zaključiti da znak korelacije u slučaju temperature zavisi od toga da li se ona posmatra tokom ili van grejne sezone, što ukazuje na još jedan uticajni parametar, faktor grejne sezone. Takođe, ljudska aktivnost (saobraćaj, poljoprivreda, industrija, itd.) imaju značajan uticaj na koncentraciju suspendovanih čestica [12]. Ljudski uticaj na koncentraciju suspendovanih čestica u vazduhu se može opisati faktorom "Sat" koji opisuje promenu inteziteta ljudskih aktivnosti tokom dana.

Poređenjem performansi različitih regresionih algoritama sa aspekta predviđanja koncentracije $PM_{2.5}$ u vazduhu, rad [13] je pokazao da su Random forest i Gradient boosting regressor algoritmi dali najveće koeficijente determinacije koji iznose 0,9872 i 0,9983 respektivno. Sa istim ciljem, rad [14] je proveravao prediktivne performanse regresionih algoritama u kombinaciji sa AdaBoost algoritmom (klasifikacioni meta-algoritam). Ponovo, Random forest i XGBoost algoritmi su se pokazali kao najbolji, rezultirajući koeficijentom determinacije od 0,922, pri čemu je korišćenjem AdaBoost algoritma postignut skroman skok u performansama (0,3%). Rezultati dati u istraživanju [15] ukazuju na još jedan regresioni algoritam koji može pružiti dobre prediktivne performanse, a to je CatBoost algoritam. U ovom istraživanju poređene su performanse Arima-Artificial neural network, Arima-Support vector machine, Decision tree i CatBoost algoritama sa aspekta predikcije koncentracije $PM_{2.5}$ u vazduhu, gde je CatBoost nadmašio ostatak rezultirajući koeficijentom determinacije od 0,95. Rad [16] je analizirao mogućnost predikcije koncentracije $PM_{2.5}$ u vazduhu koristeći Light gradient boosting machine algoritam poredivši njegove evulacione pokazatelje sa rezultatima iz referentnih radova. Ovaj algoritam se pokazao kao najbolji, rezultirajući koeficijentom determinacije od 0,84 za dnevnu predikciju.

Na osnovu priložene literature, mogu se usvojiti uticajni

parametri i algoritmi koji će se koristiti u analizi:

- uticajni parametri koji će se koristiti u predmetnoj analizi u ovom radu su: Spoljašnja temperatura, brzina vetra, relativna vlažnost, atmosferski pritisak, faktor „Sat“, faktor grejne sezone i koncentracija $PM_{2.5}$ 24 h pre momenta predikcije;
- regresioni algoritmi koji će se koristiti u predmetnoj analizi u ovom radu su: Random forest, XGBoost, CatBoost i Light gradient boosting machine.

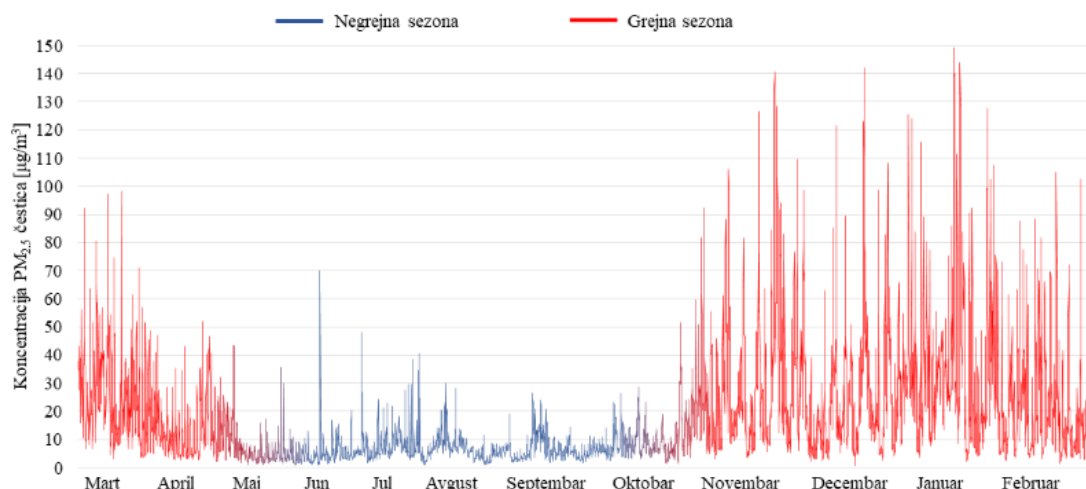
II MATERIJAL I METODOLOGIJA

Ovaj rad je istraživao mogućnost predikcije koncentracije $PM_{2.5}$ u vazduhu na primeru grada Kragujevca. Posmatrana lokacija je jedan od najvećih gradova u Republici Srbiji i jedan od najvećih administrativnih, edukativnih i industrijskih centara koji broji preko 150.000 stanovnika. Posmatrajući pomenutu lokaciju, glavni izvori zagađenja su:

- Toplana koja je pretežno koristila ugalj kao energent (od grejne sezone 2022/2023 toplana je u potpunosti prešla na prirodni gas)
- Individualna ložišta u kombinaciji sa zgradama niske energetske efikasnosti;
- Intezivan saobraćaj karakterističan po nedostatku kružnih tokova;
- Izvori zagađenja van grada, kao što je obližnji auto-put A1 (Beograd - Niš).

Na slici 1 je prikazana varijacija koncentracije $PM_{2.5}$ u gradu Kragujevcu za period od 1.03.2021. do 28.02.2022. godine.

$PM_{2.5}$ koncentracije su merene na 3 različite lokacije u Kragujevcu koristeći senzor „SDS 011“ postavljen od strane građana, čija je verodostojnost proverena u radu [17]. Ovaj rad je pokazao da ovaj senzor ima veliki potencijal za stvaranje niskobudžetne mreže za monitoring zagađenja, jer je pokazivao visoku tačnost sve dok se ne dostigne vrednost relativne vlažnosti vazduha od 70%, nakon koje su se javljale blage greške pri merenju. Sva merenja sa pomenutog senzora su prikupljena sa sensor.community [18] otvorene internet baze podataka.



Slika 1. Varijacija koncentracije $PM_{2.5}$ u Kragujevcu za period od 1.3.2021. do 28.2.2022.

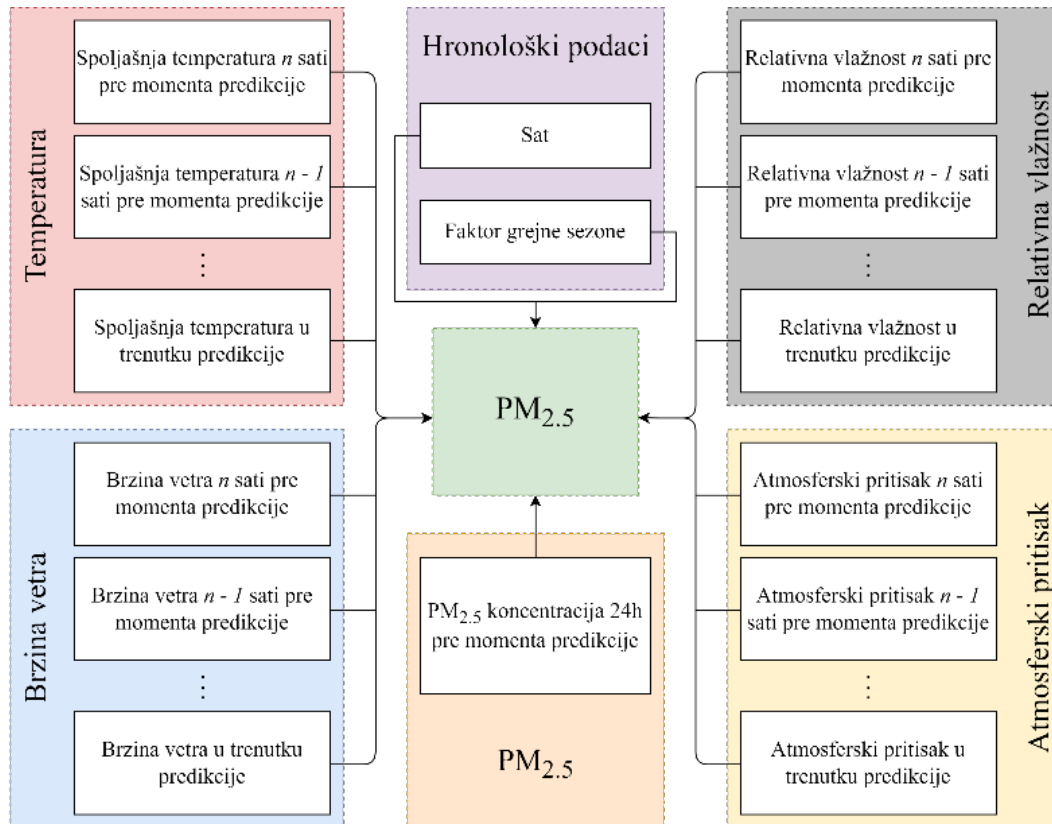


Slika 2. Metodologija istraživanja

Meteorološki podaci za Kragujevac za posmatrani period preuzeti su sa internet stranice „Nasa Data Access Viewer“ [19] čija je verodostojnost proverena u radu [20] na primeru predikcije solarne iradijacije.

Na slici 2 je prikazana metodologija istraživanja.

Prvi koraci istraživanja jesu prikupljanje podataka i njihovo pretprocesiranje. Podaci su skinuti sa archive.sensor.community [18] i Nasa Data Access Viewer [19] internet stranica, izvršeno je njihovo časovno osrednjavanje i korekcija podataka koji nedostaju, i na kraju su svi podaci spojeni u jednu bazu podataka. Baza podataka je zatim podeljena na bazu za treniranje, koja sadrži 70% nasumično odabranih podataka, i na bazu za testiranje, koja sadrži preostalih 30% podataka. Korišćeno je ukupno 4 regresionih algoritama koji su trenirani u cilju dobijanja prediktivnog modela, a to su: Random forest (RF), XGBoost (XGB), CatBoost (CB) i Light gradient boosting machine (LGBM) algoritmi. Pomenutim algoritmima je ponuđena baza za treniranje, na kojoj su učili i razvili prediktivni model. Nakon treniranja ovih regresionih algoritama, svaki od treniranih modela je testiran primenom baze za testiranje, pri čemu su njihove prediktivne performanse opisane koeficijentom determinacije (R^2), osrednjenom apsolutnom greškom (MAE) i korenom srednje kvadratne greške (RMSE). Na osnovu pomenutih pokazatelja prediktivnih performansi modela je odabran model koji pruža najveću tačnost pri najoptimalnijem broju ulaznih varijabli.



Slika 3. Vizuelizacija pristupa problemu

Pristup samom problemu je baziran na pretpostavci da većina uticajnih parametara ima, pored trenutnog, i retrospektivni uticaj na koncentraciju $PM_{2.5}$. Pod retrospektivnim uticajem se podrazumeva da varijacije određenog uticajnog parametra određen broj sati pre momenta predikcije ima direktan uticaj na posmatrani trenutak u sadašnjosti. Varijabla koja opisuje vremenski dijapazon u prošlosti u kojem se uzimaju časovne varijacije svih uticajnih parametara se naziva uticajni period. Uticajni periodi (n) koji su uzeti u razmatranje su: 48h, 24h, 12h, 8h, 4h, 2h, 1h i 0h. Vizuelizacija pristupa problemu je data na slici 3.

III REZULTATI I DISKUSIJA

Za svaki od primenjenih algoritama razvijen je model koji koristi različit uticajni period parametara. U tabeli 1 su prikazani pokazatelji prediktivnih performansi za svaki algoritam pri svakom od analiziranih uticajnih perioda.

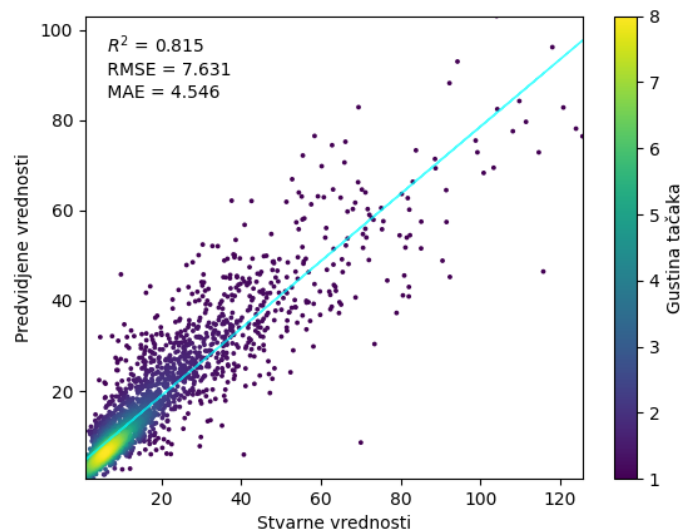
Tabela 1. Pokazatelji prediktivnih performansi istreniranih modela

Uticajni period	48h	24h	12h	8h	4h	2h	1h	0h
RF	R^2	0,78	0,76	0,75	0,74	0,72	0,71	0,70
	MAE	4,90	5,15	5,21	5,34	5,54	5,58	5,60
	RMSE	8,27	8,73	8,82	9,02	9,29	9,50	9,58
XGB	R^2	0,80	0,77	0,75	0,74	0,71	0,70	0,68
	MAE	4,79	5,00	5,37	5,60	5,89	5,99	6,15
	RMSE	7,94	8,51	8,90	9,07	9,57	9,72	10,10
CB	R^2	0,83	0,81	0,78	0,75	0,72	0,70	0,69
	MAE	4,45	4,74	5,16	5,44	5,78	5,93	6,04
	RMSE	7,36	7,71	8,38	8,80	9,41	9,71	9,90
LGBM	R^2	0,80	0,78	0,75	0,74	0,70	0,69	0,67
	MAE	4,93	5,10	5,44	5,52	5,98	5,97	6,08
	RMSE	7,98	8,32	8,82	9,04	9,76	9,88	10,12
Broj ulaznih	199	103	55	39	23	15	11	7

Na osnovu tabele 1 je uočljivo da su prediktivne performanse svih korišćenih algoritama slične, pri čemu je najbolje rezultate dao CB. Takođe je uočljivo da se sa povećanjem uticajnog perioda, samom algoritmu nudi veći broj ulaznih varijabli za učenje, pa je samim tim njegova tačnost veća. Preporučeni model jeste CatBoost algoritam u kombinaciji sa uticajnim periodom od 8h koji je dao relativno visok R^2 faktor (0.75) pri relativno niskom broju ulaznih varijabli (39). U cilju poboljšanja prediktivnih performansi preporučenog modela potrebno je optimizovati hiperparametre CB regresora. Prema zvaničnoj internet stranici catboost.ai [19], tri hiperparametra ovog algoritma imaju značajan uticaj na njegove performanse, a to su: dubina stabla (Tree depth), broj iteracija (Number of iterations) i stopa učenja (Learning rate). Što se tiče dubine stabla, sa povećanjem dubine bi trebalo da se poveća tačnost predikcije, pri čemu su preporučene vrednosti ovog hiperparametra od 4 do 10, zbog čega se usvaja da je dubina stabla 10. Hiperparametri stepen učenja i broj iteracija su zavisni jedan od drugog, i preporučuje se da se pri manjem stepenu učenja smanji broj iteracija i obratno. Kako je predodređena vrednost stepena učenja samog algoritma 0.03, usvaja se da je broj iteracija 5000.

Optimizovani model baziran na CatBoost algoritmu i uticajnom periodu od 8h je postigao značajan skok u svojim prediktivnim performansama. On je rezultovao višim koeficijentom determinacije (0,815), nižom osrednjenom apsolutnom greškom

(4.55) i nižim korenom srednje kvadratne greške (7.63). Na slici 4 je prikazan scatter dijagram koji pokazuje odnos stvarnih i predviđenih vrednosti za preporučeni model.



Slika 4. Odnos stvarnih i predviđenih vrednosti za preporučeni model

Na osnovu prikaza sa slike 4 je moguće zaključiti sledeće:

- najveća gustina tačaka je oko linije trenda, što ukazuje na relativno dobre prediktivne performanse preporučenog modela,
- postoji relativno mali udeo raspršenih tačaka koji ukazuje na moguće, ali ne toliko česte, greške prediktivnog modela.

U tabeli 3 je izvršeno poređenje pokazatelja prediktivnih performansi preporučenog modela i modela razvijenih u drugim istraživanjima koji su se bavili sličnim problemom.

Tabela 2. Komparacija prediktivnih performansi preporučenog modela i modela razvijenih u drugim istraživanjima

Literatura	Lokacija	Algoritam	R^2	MAE	RMSE
[22]	Tjencin	XGB	0,95	11,77	16,29
[14]	Delhi	XGB	0,92	25,84	15,02
Ovaj rad	Srbija	CB	0,815	4,55	7,63
[16]	Kina	LGBM	0,8	/	19,8
[23]	Kina	RF	0,78	28	/
[24]	Indija	RF	0,69	30,78	44,69

Na osnovu rezultata datih u tabeli 3 moguće je zaključiti:

- posmatrajući koeficijent determinacije, preporučeni model prevazilazi većinu modela razvijenih u pregledanim radovima;
- posmatrajući pokazatelje greški (MAE i RMSE), preporučeni model prevazilazi sve modele razvijene u pregledanim radovima, što može biti izazvano ili boljim prediktivnim performansama modela, ili manjim vrednostima koncentracija $PM_{2.5}$ na posmatranoj lokaciji;
- uzimajući u obzir da je preporučeni model učen na podacima izmerenim niskobudžetnim senzorima postavljenih od strane građana, dok su modeli u

pregledanim radovima učenici na podacima izmerenim visokobudžetnim senzorima postavljenih od strane države, preporučeni model je pokazao veoma dobre prediktivne performanse.

Na osnovu priloženih rezultata može se zaključiti da je prikazanom metodologijom razvijen model zadovoljavajućih prediktivnih performansi koji se može koristiti u svrhe blagovremenog informisanja građana o budućim koncentracijama $PM_{2.5}$ u vazduhu.

IV ZAKLJUČAK

Sa ciljem da se ublaže posledice koje $PM_{2.5}$ imaju na zdravlje ljudi, ovaj rad je analizirao potencijal algoritama mašinskog učenja za predikciju časovnih koncentracija $PM_{2.5}$ u vazduhu. Prediktivni modeli su učenici na podacima koji su izmereni niskobudžetnim laserskim senzorima za merenje $PM_{2.5}$ u vazduhu („SDS 011“) postavljenih od strane građana a koji su skinuti sa sensor.community otvorene baze podataka i meteorološkim podacima koji su skinuti sa „Nasa Data Access Viewer“ internet stranice. Skinuti podaci su prikupljeni u jednu bazu podataka, osrednjeni su na časovnom nivou i izvršeno je korigovanje podataka koji nedostaju.

Analizirane su prediktivne performanse četiri algoritma mašinskog učenja: Random forest, XGBoost, CatBoost i Light gradient boosting machine. Odabir pomenutih algoritama je izvršen na primeru drugih radova koji su se bavili sličnim problemom. Pristup problemu je baziran na činjenici da varijacija svih meteoroloških parametara pre momenta predikcije takođe ima uticaj na koncentraciju $PM_{2.5}$ u momentu predikcije. Vodeći se ovom pretpostavkom, uveden je parametar koji definiše vremenski interval u prošlosti (u odnosu na trenutak predikcije) u kome se uzimaju časovne vrednosti svakog od meteoroloških parametara koji se naziva uticajni period. Analizirani uticajni periodi su 48h, 24h, 12h, 8h, 4h, 2h, 1h i 0h. Analizom prediktivnih performansi svakog od pomenutih algoritama, pri svakom od pomenutih uticajnih perioda, zaključeno je da CB daje najbolje performanse. Uzimajući u obzir vrednost koeficijenta determinacije i broja ulaznih varijabli, preporučuje se model baziran na CB algoritmu i uticajnom periodu od 8h koji je okarakterisan sa 39 ulaznih varijabli. Sa ciljem poboljšanja prediktivnih performansi preporučenog modela, izvršena je optimizacija njegovih hiperparametara. Optimizovani preporučeni model je dostigao relativno visoku vrednost koeficijenta determinacije (0,815) i relativno niske vrednosti osrednjene prosečne greške (4,55) i korena srednje kvadratne greške (7,63).

Poređenjem preporučenog modela, koji je baziran na niskobudžetnim senzorima, sa modelima razvijenim u drugim istraživanjima, koji su bazirani na visokobudžetnim senzorima, zaključuje se da dati model daje veoma dobre prediktivne performanse i da se može primeniti za blagovremenu predikciju koncentracija $PM_{2.5}$.

Predmetno istraživanje pruža univerzalnu metodologiju za precizno predviđanje koncentracije $PM_{2.5}$ koja je primenjena na primeru grada Kragujevca za period od 1. 3. 2021. do 28. 2. 2022. godine. Usled različitosti klimatskih uslova, ljudskih

aktivnosti, saobraćaja i industrije, svaka lokacija predstavlja jedinstven slučaj koji bi zahtevao zasebno učenje modela. Analogno tome, svaka promena ovih uslova za neku lokaciju bi zahtevala ponovno učenje modela na novim podacima koji uzimaju u obzir predmetnu promenu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Jurišević, N., Stojadinović, M., Končalović, D., Josijević, M., Gordić, D. Students' Perceptions of Air Quality - an Opportunity for More Sustainable Urban Transport in the Medium-sized University city in the Balkans, *Tehnika*, Vol. 78, No. 4, pp. 455-463, 2023. <https://doi.org/10.5937/tehnika2304455J>
- [2] World Health Organization, Air quality and health, <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants> [pristupljeno 30.4.2023]
- [3] Nansai, K., Tohno, S., Chatani, S., Kanemoto, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Takayanagi, W., Lenzen, M. Consumption in the G20 nations causes particulate air pollution resulting in two million premature deaths annually. *Nature Communications*, Vol. 12, No. 6286, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26348-y>
- [4] United States Environmental Protection Agency. Particulate Matter (PM) Basics, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> [pristupljeno 30.4.2023]
- [5] World Health Organization, Regional Office for Europe. Health effects of particulate matter: policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. 2013. <https://iris.who.int/handle/10665/344854> [pristupljeno 30.4.2023]
- [6] Đurišić, Ž., Škrbić, B., Potencijal energije sunca i vetra za strateško planiranje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.01D>
- [7] Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., Kwan, M., Cai, J., Zhuang, Y., Zhao, B., Wang, X., Chen, B., Yang, J., Li, R., He, B., Gao, B., Wang, K., Xu, B. Influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations across China: A review of methodology and mechanism, *Environment International*, Vol. 139, No. 105558, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105558>
- [8] Megaritis, A.G., Fountoukis, C., Charalampidis, P.E., Denier Van Der Gon, H.A.C., Pilinis, C., Pandis, S.N. Linking climate and air quality over Europe: Effects of meteorology on $PM_{2.5}$ concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 14, No. 18, pp. 10283-10298, 2014. <https://doi.org/10.5194/acp-14-10283-2014>
- [9] Zalakeviciute, R., López-Villada, J., Rybarczyk, Y. Contrasted effects of relative humidity and precipitation on urban $PM_{2.5}$ pollution in high elevation urban areas, *Sustainability*, Vol. 10, No. 6, pp. 2064, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10062064>
- [10] Wang, J., Ogawa, S. Effects of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations in Nagasaki, Japan, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 12, No. 8, pp. 9089-9101, 2015. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>
- [11] Hernandez, G., Berry, T.-A., Wallis, S.L., Poyner, D. Temperature and humidity effects on particulate matter concentrations in a sub-tropical climate during winter, in *Proc. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering, (ICECB 2017)*, 2017. <https://doi.org/10.7763/IPCBE.2017.V102.10>
- [12] Chang, L.T.C., Scorgie, Y., Duc, H.N., Monk, K., Fuchs, D., Trieu, T. Major source contributions to ambient $PM_{2.5}$ and exposures within the New South Wales Greater Metropolitan Region, *Atmosphere*, Vol. 10, No.3, pp. 138, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10030138>
- [13] Doreswamy, H.K.S., Km, Y., Gad, I. Forecasting air pollution particulate matter ($PM_{2.5}$) using machine learning regression models, *Procedia Computer Science*, Vol. 171, pp. 2057-2066, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.221>
- [14] Kumar, S., Mishra, S., Singh, S.K. A machine learning-based model to estimate $PM_{2.5}$ concentration levels in Delhi's atmosphere, *Heliyon*, Vol. 6, No. 11, pp. E05618, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05618>
- [15] Shahriar, S.A., Kayes, I., Hasan, K., Hasan, M., Islam, R., Awang, N.R., Hamzah, Z., Rah, A., Salam, M. Potential of ARIMA-ANN, ARIMA-SVM,

- DT and CatBoost for Atmospheric PM_{2.5} forecasting in Bangladesh, *Atmosphere*, Vol. 12, No. 1, pp. 100, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12010100>
- [16] Zhong, J., Zhang, X., Gui, K., Wang, Y., Che, H., Shen, X., Zhang, L., Zhang, Y., Sun, J., Zhang, W. Robust prediction of hourly PM_{2.5} from meteorological data using LightGBM, *National Science Review*, Vol. 8, No. 10, nwaa307, 2021. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa307>
- [17] Liu, H.Y., Schneider, P., Haugen, R., Vogt, M. Performance assessment of a low-cost PM 2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway, *Atmosphere*, Vol. 10, No. 2, pp. 41, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10020041>
- [18] Archive - Sensor.Community. <https://archive.sensor.community/> [pristupljeno 03.05.2023]
- [19] Data Access Viewer, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> [pristupljeno 03.05.2023]
- [20] Shuvho, M.B.A., Chowdhury, M.A., Ahmed, S., Kashem, M.A. Prediction of solar irradiation and performance evaluation of grid connected solar 80KWp PV plant in Bangladesh, *Energy Reports*, Vol. 5, pp. 714-722, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.011>
- [21] CatBoost. Parameter tuning, <https://catboost.ai/en/docs/concepts/parameter-tuning> [pristupljeno 10.4.2023]
- [22] Pan, B. Application of XGBoost algorithm in hourly PM_{2.5} concentration prediction, in *Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 113, 3rd International Conference on Advances in Energy Resources and Environment Engineering 8-10 December 2017, Harbin, China, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012127>
- [23] AlDaweesh, S.A. Predicting hourly particulate matter (PM_{2.5}) concentrations using meteorological data, in *Proc. International Conference of Computing, Electronics & Communications Engineering (ICCECE)*, pp. 136-140, London, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICCECE46942.2019.8941696>
- [24] Sihag, P., Kumar, V., Afghan, F.R., Pandhiani, S.M., Keshavarzi, A. Predictive modeling of PM_{2.5} using soft computing techniques: case study-Faridabad, Haryana, India, *Air Quality, Atmosphere & Health*, Vol. 12, pp. 1511-1520, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00755-z>

AUTORI/AUTHORS

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

Simulacija proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela korišćenjem solarnih sistema za praćenje

Simulation of Photovoltaic Panels Electricity Generation Using Solar Tracking Systems

Andreja Stefanović

Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, Leposavić

Rezime - Krovovi i zidovi zgrada predstavljaju značajnu lokaciju za instalaciju fotonaponskih sistema u urbanim sredinama. Soliteri, sa specifičnim prostornim oblikom, pružaju mogućnost instalacije ovih sistema i na krovu i na spoljašnjim zidovima. Jedan od mogućih načina povećanja efikasnosti solarnih sistema je korišćenje solarnih sistema za praćenje koji maksimizuju proizvodnju električne energije. U ovom radu je izvršena simulacija proizvodnje električne energije fotonaponskih sistema postavljenih na krovu i zidovima solitera u gradu Kragujevcu u Srbiji, uz korišćenje fiksne instalacije i instalacija koje koriste jednoosni i dvoosni sistem za praćenje Sunca. Simulacija je izvedena u programu EnergyPlus. Rezultati pokazuju da je korišćenjem solarnih sistema za praćenje moguće ostvariti značajna povećanja proizvedene električne energije, naročito korišćenjem dvoosnog sistema kod solarnih sistema nepovoljne orijentacije.

KLjučne reči - fotonaponski paneli, solarni sistem za praćenje, simulacija, EnergyPlus

Abstract - Roofs and walls of buildings represent an important location for the installation of photovoltaic systems in urban areas. High-rise buildings, with a specific spatial shape, provide the possibility of installing these systems both on the roof and on the exterior walls. Possible way to increase the efficiency of solar systems is to use solar tracking systems which maximize electricity production. In this paper, a simulation of photovoltaic systems installed on the roof and walls of a high-rise building in the city of Kragujevac, Serbia was performed, using fixed installation and installations with single and dual axis systems for solar tracking. The simulation was performed in the EnergyPlus software. The results show that usage of solar tracking systems increases electricity production, especially dual axis system for solar systems with an unfavourable orientation.

Index Terms - Photovoltaic panels, Solar tracking system, Simulation, EnergyPlus

1 UVOD

Pronalaženje dovoljnih izvora čiste energije biće jedan od najznačajnijih izazova društva u budućnosti. Zato proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije

danās postaje sve konkurentnija energiji proizvedenoj iz drugih izvora. Pored svoje neiscrpnosti, obnovljivi izvori energije nemaju štetan uticaj na životnu sredinu i njihovo korišćenje utiče na globalno smanjenje emisije ugljen-dioksida i drugih gasova sa efektom staklene bašte.

Među svim obnovljivim izvorima energije, solarna energija je jedan od najzastupljenijih izvora energije. Oko $1,2 \cdot 10^5$ TW Sunčevog zračenja stiže do površine Zemlje [1]. Sunčevo zračenje ima najveći potencijal za zelene i čiste tehnologije jer je čist, besplatan i neiscrpan izvor energije [2].

Sunce zrači energiju u obliku elektromagnetnih talasa i količina elektromagnetnog zračenja koja dospeva do Zemlje naziva se Sunčevo zračenje. Solarna elektromagnetna energija koja prođe kroz atmosferu, normalno na jedinicu površine u jedinici vremena, naziva se Solarna konstanta i iznosi oko 1367 W/m^2 [3].

Direktno pretvaranje Sunčeve svetlosti u električnu energiju ostvaruje se preko fotonaponskih solarnih ćelija, uz upotrebu poluprovodnika. Industrija fotonaponskih panela je doživela brži razvoj od bilo koje druge industrije u oblasti obnovljive energije i sada je ekonomski konkurentna tehnologija [4].

Trenutno je u nekim zemljama isplativije proizvoditi energiju koristeći fotonaponsku tehnologiju i tehnologiju vetra nego iz novih elektrana na ugalj. Međutim, ove vrste čistih tehnologija nastavljaju da se suočavaju sa izazovima kao što je nastavak ulaganja u fosilnu energiju, uprkos očiglednoj šteti po životnu sredinu usled emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Zbog toga je neophodno nastaviti sa inovacijama kako bi se poboljšale globalne performanse solarne tehnologije. Generalno, postoje dva načina za poboljšanje performansi fotonaponske tehnologije. Jedan je upotreba novih materijala i poboljšanje postojećih materijala za proizvodnju fotonaponskih modula. Drugi je korišćenje uređaja za orijentaciju solarnog fotonaponskog modula prema Suncu. Da bi se postigla najveća efikasnost konverzije, Sunčeva svetlost mora da pada pod pravim uglom na površinu modula.

U ovom radu je izvršena simulacija proizvodnje električne energije fotonaponskih sistema postavljenih na krovu i zidovima solitera u gradu Kragujevcu u Srbiji, uz korišćenje fiksne

instalacije i instalacija koje koriste jednoosni i dvoosni sistem za praćenje Sunca. Simulacija je izvedena u programu EnergyPlus, koji se koristi za različite energetske simulacije u zgradama [5, 6, 7].

II SOLARNI SISTEM ZA PRAĆENJE

Jedan od načina optimalnog iskorišćenja Sunčeve energije u solarnim sistemima je pozicioniranje solarnih panela tako da se prikupi maksimalna moguća energija, što je moguće korišćenjem solarnih sistema za praćenje koji mogu pratiti položaj Sunca tokom godine i doba dana [8].

Da bi se prikupila Sunčeva energija na Zemlji, važno je znati ugao između Sunčevih zraka i površine panela. Kada Sunčevi zraci nisu usmereni pod pravim uglom u odnosu na panel, gubi se deo energije koja bi se mogla prikupiti.

Položaj Sunca iznad posmatrane lokacije zavisi od njene geografske širine, dana u godini i vremenskog trenutka u datom danu.

Solarni sistem za praćenje je uređaj koji na posmatranoj lokaciji na Zemlji obezbeđuje orijentisanje aktivne površine panela u odnosu na relativni položaj Sunca na nebu i maksimizira ukupnu izlaznu snagu sistema održavajući panele tako da Sunčevi zraci padaju na njih pod pravim uglom, tokom maksimalnog broja sati dnevno.

Solarni sistem za praćenje ne zahteva naročitu preciznost. I kada su paneli nagnuti za 5° u odnosu na normalu prema Suncu, njihova izlazna snaga 0,5% je manja od maksimalne snage koja bi se dobila kada su Sunčevi zraci pod pravim uglom usmereni na solarni panel [9].

Prema stepenu slobode, odnosno broju nezavisnih kretanja koje paneli mogu da vrše, solarni sistemi za praćenje se dele na jednoosne i dvoosne sisteme. Jednoosni solarni sistemi za praćenje uključuju jednu osu oko koje se vrši rotacija, kako bi se pozicionirali u odnosu na Sunce u željenoj orijentaciji za maksimalno prikupljanje Sunčeve energije. Osa oko koje se vrši rotacija je najčešće horizontalna ili vertikalna. Dvoosni solarni sistemi za praćenje imaju dva stepena slobode, odnosno dve ose rotacije panela, koje su obično normalne jedna na drugu. Ovaj sistem zahteva složeniji sistem kontrole, ali je efikasniji od sistema sa jednom osom.

Prema korišćenom sistemu pogona solarni sistemi za praćenje dele se na pasivne i aktivne sisteme. Pasivni solarni sistem za praćenje ne uključuje mehanički pogon za orijentaciju panela prema Sunčevom zračenju. Umesto toga, koristi komprimovani gas ili fluid kao aktuator koji po prijemu neuravnoteženog osvetljenja, vrše ugaono pomeranje panela. Aktivni solarni sistemi za praćenje koriste električne, hidraulične ili pneumatske pogone i mehaničke prenosnike koji orijentišu panele normalno u odnosu na Sunčevo zračenje. Ovi sistemi su tačniji i efikasniji od pasivnih, ali sa druge strane je potrebno njihovo napajanje pošto troše energiju [10].

Prema načinu praćenja putanje Sunca solarni sistemi za praćenje mogu biti hronološki, sistemi koji koriste optičke senzore i hibridni. Hronološki sistemi koriste unapred definisane dijagrame putanje Sunca koji mapiraju putanju Sunca preko

neba. Oni pokazuju položaj Sunca u odnosu na lokaciju solarnog sistema za praćenje, tokom dana i godine. Sistemi koji koriste optičke senzore pomoću fotootpornika određuju intenzitet Sunčevog zračenja i šalju signal kontrolnoj jedinici koja pokreće fotonaponske panele. Hibridni sistemi rade po unapred definisanom algoritmu ali mogu da vrše proveru putanje Sunca korišćenjem senzora.

Osnovni elementi solarnog sistema za praćenje su sledeći [11]:

- algoritam za praćenje Sunca,
- kontrolna jedinica koja izvršava algoritam za praćenje Sunca i koordinira kretanje sistema za pozicioniranje,
- sistem pozicioniranja koji pomera panel tako da bude okrenut prema Suncu pod optimalnim uglovima. Sistemi za pozicioniranje mogu biti električni, hidraulički i pneumatski,
- pogonski prenosni mehanički mehanizam,
- senzorski uređaji.

III PREDMET PROUČAVANJA

U radu je izvršena simulacija generisanja električne energije iz fotonaponskih panela postavljenih na krov i suprotno orijentisane spoljašnje zidove solitera u gradu Kragujevcu u Srbiji. Soliter je izabran kao objekat na kome se solarni fotonaponski sistemi mogu postaviti i na ravnom krovu i delimično na spoljašnjim zidovima. Na ovaj način moguće je izučavati potencijal solarnih sistema postavljenih i na horizontalnim i na vertikalnim površinama modeliranjem samo jedne zgrade.



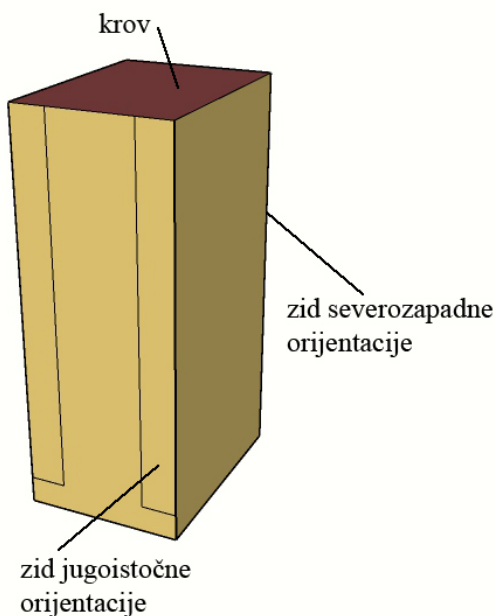
Slika 1. Soliter koji je predmet proučavanja

Krov solitera ima površinu $422,4 \text{ m}^2$ i pretpostavljeno da je ceo dostupan za postavljanje panela, odnosno da je u potpunosti ravan.

Spoljašnjost izučavanog solitera je takva da su dve suprotne fasade gotovo potpuno pokrivene prozorima, dok se ostale dve

sastoje od po dve slobodne površine razdvojene jednom kolonom prozora. Delovi spoljašnjih zidova koji su pogodni za postavljenje panela su orijentisani u pravcu jugoistok i severozapad i njihova površina iznosi 168 m² sa svake strane zgrade.

Solarni potencijal ovog solitera je procenjen u ranijem istraživanju [12], ali je tada uzet u obzir samo fiksni sistem fotonaponskih panela instaliran na spoljašnjim zidovima.



Slika 2. Površine solitera na kojima su instalirani solarni fotonaponski sistemi

IV MODELIRANJE SOLITERA I SIMULACIJA GENERISANE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ FOTONAPONSKIH SISTEMA

Za modeliranje solitera korišćen je program Sketchup (zajedno sa plug-in programom Legacy OpenStudio) koji predstavlja grafički editor za fajlove koji su ulazni podaci za simulacije u programu EnergyPlus. U programu Sketchup ucrtana je geometrija zgrade i izvršeno je pozicioniranje zgrade na realne koordinate u prostoru. Soliter je predstavljen njegovim konstrukcionim omotačem, uz izdvajanje površina na fasadama koje su pogodne za instalaciju fotonaponskih panela.

Simulacija je sprovedena za period cele godine i koristi fajl klimatskih podataka za grad Kragujevac koji je dobijen korišćenjem programa Meteonorm [13].

Model fotonaponskog panela na osnovu čijih dimenzija i nominalne izlazne snage su izračunati broj instaliranih panela i ukupna snaga solarnog sistema je Exe Solar A-EXP285/156-60, kao model koji je dostupan u prodaji u Srbiji. Korišćene karakteristike ovog panela su: nominalna izlazna snaga: 285 W, dužina: 1640 mm i širina: 991 mm [14].

Na osnovu raspoloživog prostora, uz uzimanje u obzir mogućnost zasenčenja koje paneli mogu stvarati na susednim panelima sistema [15], na krovu je moguće postaviti 120 (12x10) fotonaponskih panela sa izlaznom snagom sistema od 34,2 kW,

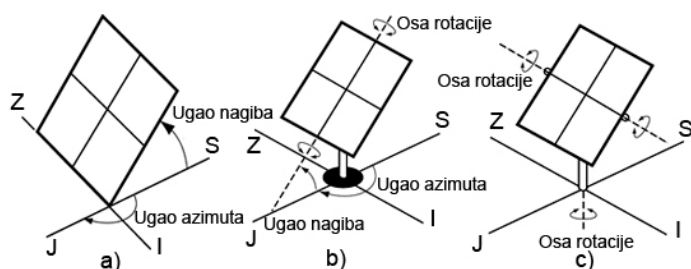
dok je na spoljašnjim zidovima na jugoistočnoj i severozapadnoj strani moguće ugraditi po 57 (3x19) panela sa ukupnom izlaznom snagom od 16,24 kW.

Fotonaponski paneli na krovu su okrenuti ka jugu, sa optimalnim uglom nagiba panela od 35° za područje Srbije, preuzetim sa sajta PV-GIS [16]. Paneli na spoljašnjim zidovima su pričvršćeni za zidove i njihove površine i orijentacija su definisani površinom spoljašnjih zidova.

Simulacija proizvedene električne energije iz fotonaponskih panela izvršena je u softveru EnergyPlus. Tačnost programa je opsežno potvrđena [17, 18] i pokazao se kao jedan od najpodobnijih alata u oblasti simulacije energije u zgradama, u istraživanju koje su sprovedla grupa autora [19], gde su upoređivane sposobnosti velikog broja simulacionih programa. Ovaj alat se koristi u širokom spektru istraživanja i u fazi je aktivnog razvoja, što znači da je svaka nova verzija programa funkcionalnija i poboljšana.

Opcija „PVWatts“ je iskorišćena kao model za predviđanje proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela. Objekat „Generator:PVWatts“ koristi web aplikaciju [20] i modul u NREL-ovom (National Renewable Energy Laboratory) softveru Sistem Advisor Model (SAM) koji procenjuje proizvodnju električne energije fotonaponskog sistema na osnovu nekoliko jednostavnih ulaza, kao što su lokacija sistema, tip fotonaponskih modula, vrsta sistema za praćenje, sistemski gubici i ugao nagiba i azimuta. Ovaj modul je izabran zato što poseduje mogućnost simulacije jednoosnog i dvoosnog solarnog sistema za praćenje. U polju Field: Array Type korisnik može izabrati jednu od sledećih opcija:

- FixedRoofMounted – koristi se za tipične nepokretne fotonaponske panele montirane na krovu,
- OneAxis – ugao nagiba i ugao azimuta su fiksni, paneli mogu rotirati oko ose, kao što je prikazano na Slici 3,
- TwoAxis – ugao nagiba i ugao azimuta prate Sunce.



Slika 3. Tipovi fotonaponskih panela u modulu PVWatts: a) fiksni, b) jednoosni i c) dvoosni

Ugao nagiba je ugao između horizontale i ravni fotonaponskog panela. Za fiksni panel, ugao nagiba je 0° za horizontalno, a 90° za vertikalno postavljen panel. Za panele sa jednoosnim praćenjem, ugao nagiba je ugao između horizontale i ose rotacije panela. Ugao nagiba se ne primenjuje na panele sa sistemom za praćenje dve ose (Slika 3).

Za fiksni panel ugao azimuta je ugao meren u smeru kretanja kazaljke na satu između pravca severa i normale na ravan panela. Ovo znači da je fiksni panel sa uglom azimuta od 180° okrenut

prema jugu, dok je za ugao azimuta od 0° okrenut prema severu. Za panel sa praćenjem po jednoj osi, ugao azimuta je ugao meren u smeru kretanja kazaljke na satu između pravca severa i ose rotacije. Ugao azimuta se ne primenjuje na panele sa sistemom za praćenje dve ose (Slika 3).

V REZULTATI I DISKUSIJA

Simulacija generisanja električne energije iz fotonaponskih panela je sprovedena za solarne sisteme na tri površine zgrade (krov, deo spoljašnjeg zida orijentisan ka jugoistoku i deo spoljašnjeg zida orijentisan ka severozapadu), za fiksni solarni sistem i za dva tipa sistema solarnog praćenja (jednoosno praćenje i dvoosno praćenje). Ukupna godišnja generisana električna energija za svaki od devet slučajeva prikazana je u Tabeli 1.

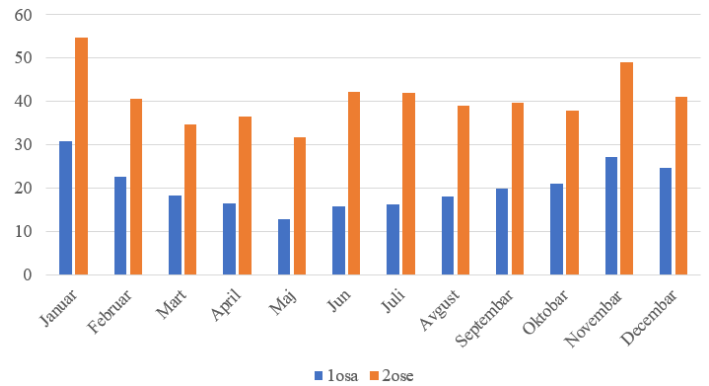
Tabela 1. Godišnja generisana električna energija na soliteru koji je predmet proučavanja

Površina solitera	Godišnja generisana električna energija [kWh]		
	Fiksni solarni sistem	Jednoosni solarni sistem za praćenje	Dvoosni solarni sistem za praćenje
Krov (120 panela)	36.846,54	43.763,37	51.493,69
Spoljašnji zid usmeren ka jugoistoku (57 panela)	12.484,50	14.260,69	20.302,22
Spoljašnji zid usmeren ka severozapadu (57 panela)	7.015,92	7.992,05	14.194,54

Rezultati pokazuju da je solarnim sistemom za praćenje moguće u najčešće primenjivanim solarnim sistemima koji se instaliraju na krovu povećati efikasnost za 19% za jednosne i 40% za dvoosne sisteme, u odnosu na fiksni solarni sistem. Ovo je značajno povećanje pošto se fiksni fotonaponski paneli na krovovima najčešće postavljaju sa takvim uglovima azimuta i nagiba da maksimalno iskoriste energiju Sunca.

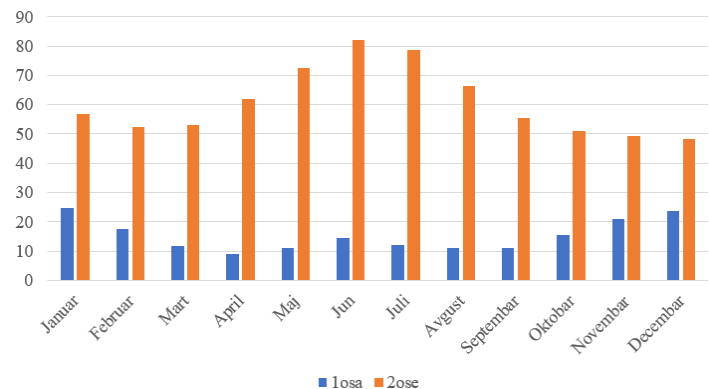
Pošto je u proučavanom slučaju ugao azimuta i nagiba fotonaponskih panela definisan površinom spoljašnjeg zida na kome se nalaze, primena jednoosnog sistema generiše samo 14% više električne energije u obe orijentacije, u odnosu na fiksni solarni sistem. Ali zato, ovi sistemi pri korišćenju dvoosnog solarnog sistema za praćenje generišu na jugoistočnoj 63% a na severozapadnoj čak 102% više električne energije u odnosu na fiksni solarni sistem.

Na Slici 4 prikazano je mesečno procentualno povećanje proizvodnje električne energije fotonaponskog sistema na krovu solitera, za slučajeve sistema sa jednoosnim i dvoosnim solarnim praćenjem, u odnosu na fiksni solarni sistem. Najveće povećanje efikasnosti sistema je u januaru kada je generisana električna energija veća za 31% za jednoosni sistem a 55% za dvoosni sistem praćenja.



Slika 4. Mesečno procentualno povećanje generisane električne energije iz fotonaponskog sistema na krovu

Na Slici 5 prikazano je mesečno procentualno povećanje proizvodnje električne energije fotonaponskog sistema na jugoistočnom spoljašnjem zidu solitera, za slučajeve sistema sa jednoosnim i dvoosnim solarnim praćenjem, u odnosu na fiksni solarni sistem. Najveće povećanje efikasnosti sistema je u januaru za jednoosni sistem kada je generisana električna energija veća za 25% i u junu za dvoosni sistem kada je generisana električna energija veća za 82%.



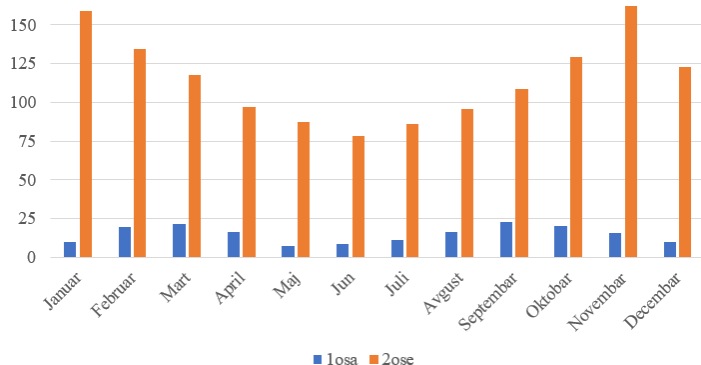
Slika 5. Mesečno procentualno povećanje generisane električne energije iz fotonaponskog sistema na jugoistočnom spoljašnjem zidu

Na Slici 6 prikazano je mesečno procentualno povećanje proizvodnje električne energije fotonaponskog sistema na severozapadnom spoljašnjem zidu solitera, za slučajeve sistema sa jednoosnim i dvoosnim solarnim praćenjem, u odnosu na fiksni solarni sistem. Najveće povećanje efikasnosti sistema je u septembru za jednoosni sistem kada je generisanje električne energije veće za 23% i u novembru za dvoosni sistem kada je generisanje električne energije veće za 162%.

Sa Slici 4, 5 i 6 se može primetiti da je razlika između povećanja proizvodnje električne energije korišćenjem jednoosnog i dvoosnog sistema, u odnosu na fiksni solarni sistem, najmanje izražena kod solarnog sistema na krovu, u odnosu na sisteme na jugoistočnom i naročito severozapadnom zidu.

Najveći mesečni porast proizvodnje električne energije zavisi i od orijentacije fotonaponskih panela u slučaju fiksnih sistema. Tako se za solarni sistem na krovu najveće povećanje

proizvodnje javlja u zimskim mesecima i za jednoosni i za dvoosni sistem praćenja. Za solarni sistem na jugoistočnom zidu najveće povećanje proizvodnje je u zimskim mesecima za jednoosni i letnjim za dvoosni sistem praćenja. Za solarni sistem na severozapadnom zidu najveće povećanje proizvodnje je u martu i septembru za jednoosni i u zimskim mesecima za dvoosni sistem praćenja.



Slika 6. Mesečno procentualno povećanje generisane električne energije iz fotonaponskog sistema na severozapadnom spoljašnjem zidu

VI ZAKLJUČAK

Energija iz fotonaponskih solarnih sistema je u mnogim zemljama postala ekonomski konkurentan način proizvodnje električne energije. Sledeći korak u primeni fotonaponskih sistema je povećanje njihove efikasnosti. Jedan od načina za to je primena solarnih sistema za praćenje. U ovom radu je simulirana proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sistema postavljenih na krovu i suprotno orijentisanim zidovima solitera u gradu Kragujevcu u Srbiji, za slučaj fiksnog sistema i jednoosnog i dvoosnog solarnog sistema za praćenje.

Upotreba solarnog Sistema za praćenje je za panele na krovu povećala proizvodnju 19%, odnosno 40%, za jednoosni, odnosno dvoosni sistem praćenja, u odnosu na fiksni solarni sistem. Za fotonaponske panele na jugoistočnom zidu povećanje je 14%, odnosno 63%, dok je na severozapadnom zidu povećanje proizvodnje električne energije 14%, odnosno 102%, za jednoosni, odnosno dvoosni sistem praćenja, u odnosu na fiksni solarni sistem.

Opšti zaključak je da korišćenje solarnih sistema za praćenje može značajno povećati proizvodnju električne energije iz fotonaponskih panela. Dodatni zaključak do koga se dolazi je da što je orijentacija fiksnog fotonaponskog sistema nepovoljnija, upotreba dvoosnih solarnih sistema za praćenje je efikasnija. Ovo se naročito odnosi na solarne sisteme koje su pored nepovoljne orijentacije ograničeni i prostorom na kome se nalaze, poput fasada zgrada.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Li, G., Shittu, S., Diallo, T.M.O., Yu, M., Zhao, X., Ji, J. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation,

Energy, Vol. 158, pp. 41-58, 2018

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>

- [2] Paulo, A.F.d., Porto, G.S. Evolution of collaborative networks of solar energy applied technologies, Journal of Cleaner Production, Vol. 204, pp. 310-320, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.344>
- [3] Duffie, J.A., Beckman, W.A. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [4] González-Peña, D., García-Ruiz, I., Díez-Mediavilla, M., Dieste-Velasco, M.I., Alonso-Tristán, C. Photovoltaic prediction software: evaluation with real data from Northern Spain, Applied Sciences, Vol. 11, No. 11, pp. 5025, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11115025>
- [5] Nešović, A., Nikolić, D., Lukić, N. Energo koncept Yaodong podzemnih zgrada u XXI veku na teritoriji Srbije, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 1, pp. 35-39, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-1.35N>
- [6] Stefanović, A., Gordić, D. Modeling methodology of the heating energy consumption and the potential reductions due to thermal improvements of staggered block buildings, Energy and Buildings, Vol.125, 1. August 2016, pp. 244-253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.058>
- [7] Stefanović, A., Bojić, M., Gordić, D. Achieving net zero energy cost house from old thermally non-insulated house using photovoltaic panels, Energy and Buildings, Vol.76, June 2014, pp. 57-63, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.057>
- [8] Đurović, M., Despotović, Ž. Predlog rešenja dvo-osnog mobilnog solarnog tragača sa mogućnošću akumuliranja energije, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 2, pp. 36-43, <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.36D>
- [9] Despotović Ž. Sistemi za dvoosno praćenje sunca-primena u solarnim i solarno termičkim sistemima, in Proc. *European Solar Days in Kula*, Kula, Serbia, 2017, 01-19. May 2017. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30413.44007>
- [10] Awasthi, A., Shukla, A.K., Manohar, M.S.R., Dondariya, C., Shukla, K.N., Porwal, D., Richhariya G. Review on sun tracking technology in solar PV system, Energy Reports, Vol 6, Novembar 2020 pp. 392-405, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004>
- [11] Solar tracking application, A Rockwell automation White paper https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/oem-wp009_-en-p.pdf [pristupljeno 10.04.2023]
- [12] Stefanović, A. Vertikalne fasade solitera kao lokacije za instalaciju fotonaponskih panela, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 2, pp. 6-12, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.06S>
- [13] Meteororm Software, <https://meteororm.com/en/> [pristupljeno 02.02.2023]
- [14] EXP230-285_156-60 EU, <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/38270> [pristupljeno 27.03.2023]
- [15] Kušić J., Đorđević A., Đurišić Ž. Uticaj zasenčenja na proizvodnju fotonaponskih panela, in Proc. *13th International Scientific-Professional Symposium on Information Technology INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 13, pp. 299-303, 19-21. March 2014. <https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2014/radovi/ENS-4/ENS-4-5.pdf> [pristupljeno 31.03.2023]
- [16] Optimal tilt angles taken from the PV-GIS website, https://www.researchgate.net/figure/a-Optimal-tilt-angles-taken-from-the-PV-GIS-website_fig3_324899317 [pristupljeno 31.03.2023]
- [17] Henninger, R., Witte, M., Crawley, D. Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HV AC BESTEST E100-E200 test suite, Energy and Buildings, Vol. 36, No. 8, pp. 855-863, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.025>
- [18] US DOE, EnergyPlus: Testing and Validation, <https://energyplus.net/testing> [pristupljeno 02.02.2023]
- [19] Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, Building and Environment, Vol. 43, No. 4, pp. 661-673, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- [20] NREL's PVWatts® Calculator, <https://pvwatts.nrel.gov/>, [pristupljeno 04.04.2023]

AUTORI/AUTHORS

dr Andreja Stefanović, Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, andreja2202@gmail.com, ORCID [0000-0003-3641-1074](https://orcid.org/0000-0003-3641-1074)

Potencijali korišćenja različitih supstrata u procesu proizvodnje biogasa

Potentials of Using Different Substrates in the Process of Biogas Production

Nikola Stanković*, Srećko Ćurčić**

* Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“, Balkanska 13, 11 000 Beograd

** Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, 32 000 Čačak

Rezime - Biogas od odgovarajućih sirovina nastaje u biogasnim postrojenjima koja se koriste za proizvodnju električne i/ili toplotne energije u takozvanim CHP ili kogenerativnim postrojenjima. U procesu proizvodnje biogasa koriste se različite vrste supstrata sa odgovarajućim energetske potencijalom. Potencijalni prinos biogasa od odgovarajućih sirovina izražava se po toni sveže, suve ili organske suve mase razmatranog supstrata. U ovom radu su prikazani potencijali korišćenja različitih vrsta supstrata za proizvodnju biogasa. Naročito je dat osvrt na potencijalni prinos biogasa iz supstrata koji nastaju u stočarstvu kao što su tečni i čvrst stajnjak, zatim iz energetske biljaka, iz organskog otpada prehrambene industrije, organskog otpada klanične industrije, komunalnih otpadnih voda prehrambene industrije i komunalnog čvrstog organskog otpada.

Glavne reči - Biogas, biogasna postrojenja, biomasa, supstrat, metan, organska suva masa

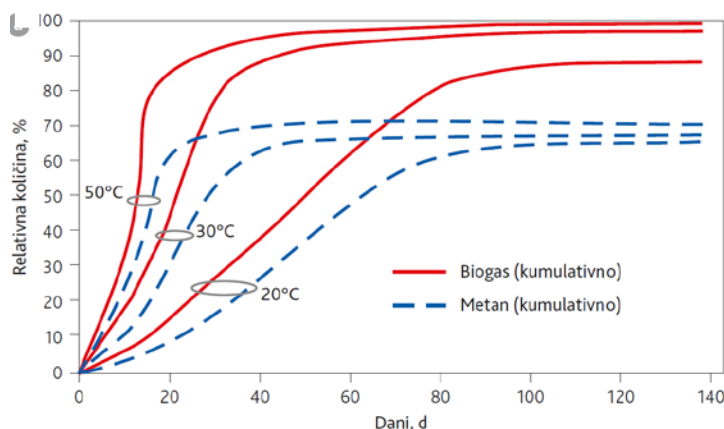
Abstract - Biogas made of appropriate raw materials in biogas plants is used for the production of electrical and thermal energy in so-called CHP or cogenerative plants. In the biogas production process, different types of substrates with appropriate energy potential are used. The potential biogas yield of appropriate raw materials is expressed in tons of fresh, dry or organic dry mass of the substrate considered. This paper presents the potentials of using different types of substrates for biogas production. A review of the potential yield of biogas are especially given in animal husbandry such as liquid and firm manure, from energy waste of food industry, organic waste industry, utility wastewater of food industry and communal solid organic waste.

Index Terms - Biogas, Biogas plants, Biomass, Substrate, Methane, Organic dry mass

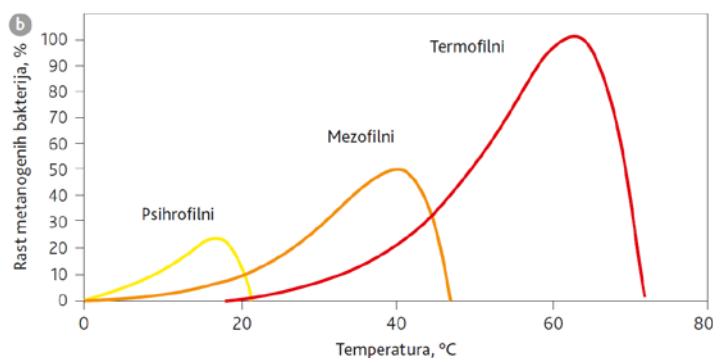
I UVOD

Pojam „biogasna postrojenja“ obuhvata postrojenja koja mogu da proizvode biogas od odgovarajućih raspoloživih supstrata, sirovina ili biomase sa odgovarajućim energetske potencijalom za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije [1]. Biomasa predstavlja biorazgradivi deo proizvoda, otpada ili ostatak biološkog porekla [2]. Postoji širok spektar organskih materija koje su pogodne za anaerobnu (bez prisustva kiseonika) razgradnju u malim biogasnim postrojenjima [3]. Tokom procesa

anaerobne digestije nastaje biogas. Biogas je gas koji se najvećim delom sastoji od metana (CH_4) i ugljen-dioksida (CO_2) [4]. Proizvedeni biogas u malim biogasnim postrojenjima, trebalo bi da se koristi u postrojenju za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije (CHP - kogeneraciono postrojenje). Na proces metanogeneze, stvaranje metana, utiču sastav supstrata, brzina punjena fermentora, vreme zadržavanja supstrata (izražen u danima) i temperatura [5].



Slika 1. Uticaj temperature i vremena zadržavanja supstrata na relativni prinos biogasa [7]



Slika 2. Uticaj temperature na rast populacije metanogenih bakterija [7]

Uticaj vremena zadržavanja supstrata i temperature na relativni prinos biogasa prikazan je na slici 1. Na rast i aktivnost anaerobnih mikroorganizama, odnosno na efikasnost anaerobne digestije, utiče odsustvo kiseonika, snabdevanje hranljivim materijama, intenzitet mešanja kao i prisustvo i količina inhibitora [5]. Osim anaerobnih uslova, neophodni uslovi su konstantna temperatura i pH vrednost od 6,5 do 7,5 [6]. Anaerobna digestija se može odvijati na temperaturi od < 20 °C (psihofilne bakterije), 30 do 42 °C (mezofilne) i 43 do 55 °C (termofilne) [6].

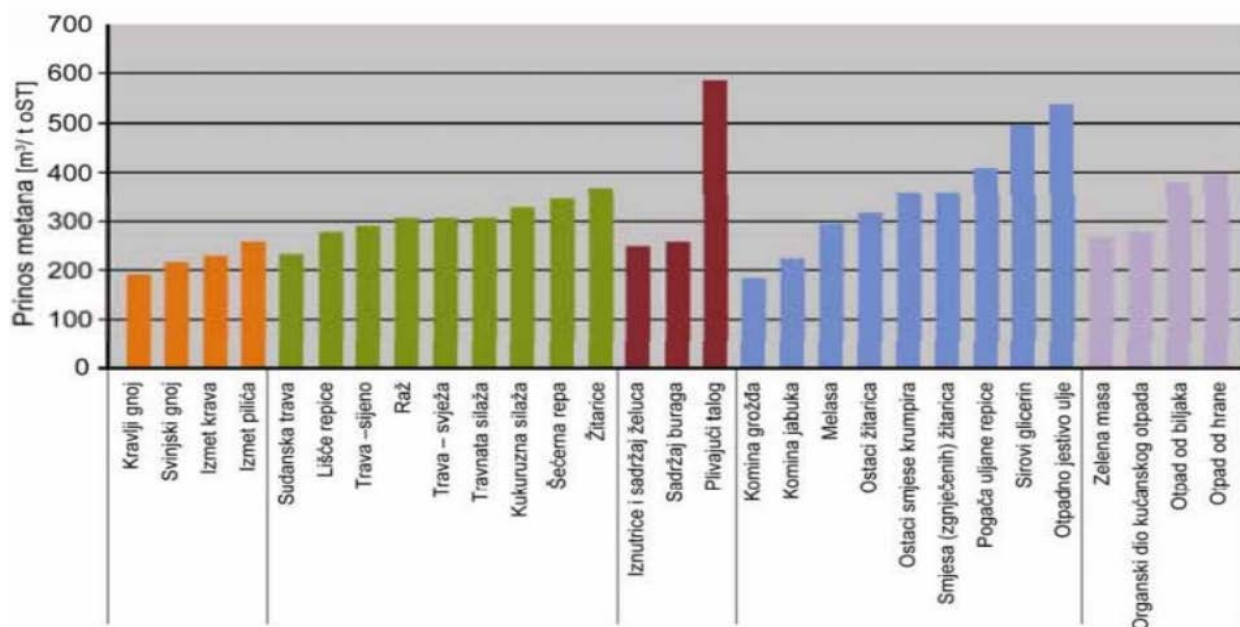
Uticaj temperaturnog režima na rast metanogenih bakterija je prikazan na slici 2. Minimalno vreme zadržavanje se pokazalo da je između 15 do 20 dana za termofilne bakterije, 30 do 40 za mezofilne i 70 do 80 za psihofilne [5].

II SUPSTRATI KOJI SE KORISTE ZA PROIZVODNJU BIOGASA

Termin supstrat je naziv sirovine za proizvodnju biogasa koji je široko rasprostranjen. Ukoliko kombinujemo više supstrata, dobija se kosupstrat. U razmatranju potencijalne proizvodnje biogasa, najbitnije su količine i cena potencijalnih supstrata [7].

Odnosno moraju se analizirati karakteristike supstrata koje predstavljaju potencijal za proizvodnju biogasa, a time i dimenzionisanje biogasnog postrojenja. Prinos biogasa određuje se na osnovu količine sveže, suve ili organski suve materije određenog supstrata. Potencijalni prinos metana je jedan od važnih kriterijuma za procenu različitih supstrata koji se mogu koristiti u biogasnim postrojenjima u procesu anaerobne digestije [5]. Prinos biogasa iz datog supstrata je potencijalan, jer količina proizvedenog biogasa u biogasnom postrojenju zavisi od pogonskih uslova i stabilnosti procesa. [7]. Supstrati koji se mogu koristiti za proizvodnju biogasa su [3,8]:

- stajnjak sa farmi,
- energetske usevi (kukuruzna silaža),
- ostaci iz poljoprivredne proizvodnje,
- biorazgradivi organski otpad iz prehrambene i sličnih industrija,
- biorazgradiva frakcija komunalnog otpada i otpada iz ugostiteljstva (ostaci hrane),
- otpadne vode prehrambene industrije i otpadni muljevi iz postrojenja za tretman voda.



Slika 3. Potencijalni prinos biogasa po toni organske suve materije različitih supstrata [8]

2.1 Stajnjak

Postoji tečni i čvrsti stajnjak. Tečni se sastoji od ekskremenata životinja i može se transportovati pumpama i cevovodima do biogasnog postrojenja. Tabela 1 pokazuje sadržaj suve i organske suve materije za dve vrste tečnog stajnjaka, goveđi i svinjski, i za tri vrste čvrstog stajnjaka, od goveda, svinja i peradi. Za tečni stajnjak sadržaj suve materije je najveći kod goveđeg tečnog stajnjaka i ide do 11%. Sadržaj organske suve materije je veći kod tečnog svinjskog stajnjaka i ide do 86%. Supstrati koji imaju sadržaj suve materije manji od 20% koriste se za „mokru digestiju“ i tu spada stajnjak [8].

Prinos biogasa je najpre uslovljen sadržajem organske suve

materije [9]. Na osnovu slike 3, može se videti da stajnjak ima relativno malu potencijalnu proizvodnju metana po jedinici organske suve materije [8]. Ovaj prinos je uslovljen sastavom, odnosno tečni stajnjak goveda sadrži pretežno ugljene hidrate, dok tečni stajnjak svinja uglavnom proteine što daje veći sadržaj metana [9]. Prinos biogasa kod goveđeg tečnog stajnjaka je između 20-30 m³ što je nešto ispod svinjskog tečnog stajnjaka koji ima između 20-35 po toni sveže materije (Tabela 2). Ukoliko se koristi prostirka, dobija se čvrsti stajnjak [7]. Kod čvrstog stajnjaka sadržaj organske suve materije je najveći kod svinja i peradi sa sadržajem od 80% (Tabela 1). Zbog toga je i najveći prinos biogasa za čvrst stajnjak od svinja i peradi dok je udeo metana izjednačen i kreće se do 60% (Tabela 2).

Tabela 1. Procenat suve i organske materije za različite vrste stajnjaka [7]

Supstrat	Suva materija, (%)	Organska suva materija, (%)
Govedi tečni stajnjak	8-11	75-82
Svinjski tečni stajnjak	7	75-86
Čvrsti stajnjak goveda	25	68-76
Čvrsti stajnjak svinja	20-25	75-80
Čvrsti stajnjak peradi	32	63-80

Tabela 2. Potencijalni prinosi biogasa sa udelom metana za različite vrste stajnjaka [7]

Supstrat	Prinos biogasa		Udeo CH ₄ , (%)
	Stm ³ /t sveža materija	Stm ³ /t organska suva materija	
Govedi tečni stajnjak	20-30	200-500	60
Svinjski tečni stajnjak	20-35	300-700	60-70
Čvrsti stajnjak goveda	40-50	210-300	60
Čvrsti stajnjak svinja	55-65	270-450	60
Čvrsti stajnjak peradi	70-90	270-450	60

Što se tiče srednjih vrednosti i potencijalnog prinosa metana iz organske suve materije je najveća kod stajnjaka peradi (Tabela 3). Sadržaj vode kod stajnjaka je visok i kreće se između 68 do 93% i uslovljava njegov nizak energetski potencijal [7]. Sadržaj vode u stajnjaku je povoljan ukoliko se kombinuje sa drugim kosupstratima sa višim udelima suve mase, i to može biti silaža kukuruza. Ako poredimo stajnjak sa silažom kukuruza, stajnjak može da ima i deset puta manji prinos biogasa po jedinici težine, što znači da je za istu veličinu biogas postrojenja potrebno deset puta veća količina stajnjaka, nego silaže kukuruza [9]. Dakle, za postrojenje nazivne električne snage 150 kW, bilo bi potrebno najmanje 1.000 uslovnih grla goveda jer jedno uslovno grlo, govedo mase 500 kg, daje svega 0,11 do 0,15 kWe [7]. Sa stanovništva ekonomičnosti povoljnija je izgradnja i korišćenje većih postrojenja, nazivne električne snage od 500 do 1.000 kW [10]. Iz ovog razloga savremena postrojenja koriste mešavinu stajnjaka i drugih kosupstrata kao što se energetske biljke.

Tabela 3. Potencijalni prinos metana iz organske suve materije za različite vrste stajnjaka [5]

Supstrat	Potencijalni prinos metana iz organske suve materije (Nm ³ /t oSM) - srednje vrednosti
Govedi tečni stajnjak	210
Svinjski tečni stajnjak	250
Govedi čvrsti stajnjak	250
Stajnjak peradi	280

2.2 Energetske biljke

Energetske biljke se ne koriste samo kao kosupstrat već kao i glavna sirovina u biogasnim postrojenjima [7]. Energetske biljke su namenski uzgajana biomasa, koja se najčešće silira i na taj

način skladišti. Najčešće se koristi silaža kukuruza, silaža celih biljaka žitarica na primer raž, ili sve vrste žitarica kao i njihove mešavine, zrna žitarica, silaža trave, silaža repe (stočna ili šećerna) kao i list šećerne repe. Pored korišćenja cele biljke u vidu kukuruzne silaže, uobičajene varijante su i silaža kukuruznog klipa i lista komušine, mešavina zrna i klipa, kukuruz u zrnu kao i korišćenje isključivo klipa [9]. Sadržaj suve i organske suve materije kod raznih energetskih biljaka je prikazan u tabeli 4.

Tabela 4. Procenat suve i organske materije za različite vrste energetskih biljaka [7]

Supstrat	Suva materija (%)	Organska suva materija, (%)
Silaža kukuruza	20-35	85-95
Raž, silaža cele biljke	30-35	92-98
Silaža trave	25-50	70-95
Šećerna repa	23	90-95
List šećerne repe	16	75-80

Procenat suve materije je najveći kod silaže trave i iznosi 50%, dok je najmanji kod lista šećerne repe i iznosi 16%. Procenat organske suve materije je najveći za raž, za silažu cele biljke, i iznosi 98%, a najmanji kod silaže trave 70%. Energetski usevi i silaže sa sadržajem suve materije oko 35% ili većim se obično koriste u anaerobnoj digestiji koja se zove „suva digestija“ [8]. Sadržaj suve materije kod kukuruza manji od 28% uslovio bi pojavu procednih voda pa samim tim i znatne energetske gubitke [11]. Što se tiče silaže celih biljaka žitarice, žetva bi, trebalo da se obavi u trenutku najvećih prinosa suve materije (monokulturni sistem), a to je na kraju mlečne zrelosti odnosno početku voštane zrelosti [9]. Kod travne silaže veoma je bitno da sadržaj suve materije ne prelazi 35% jer raste udeo lignina i vlakana, čime dolazi do opadanja prinosa metana u odnosu na organsku suhu materiju [11]. Najveći prinos biogasa daje šećerna repa sa 860 m³ biogasa po toni organske suve materije, dok se udeo metana kreće do 55% (Tabela 5).

Tabela 5. Potencijalni prinosi biogasa sa udelom metana za različite vrste energetskih biljaka [7]

Supstrat	Prinos biogasa		Udeo metana, %
	Stm ³ /t sveže materije	Stm ³ /t organske suve materije	
Silaža kukuruza	170-200	450-700	50-55
Raž, silaža cele biljke	170-220	550-680	55
Silaža trave	170-200	550-620	54-55
Šećerna repa	170-180	800-860	53
List šećerne repe	ca. 70	550-600	54-55

Najveća srednja vrednost za prinos metana po toni organske suve materije je kod zrna žitarica i iznosi 380 m³, a najmanja kod silaže trave 310 m³ (Tabela 6). Zrna žitarice se koriste kao dopuna uz postojeće supstrate, pri tome vrsta žitarice nije bitna, i posebno su pogodna za precizno upravljanje proizvodnjom biogasa [11]. Usled povoljnih energetskih prinosa po hektaru i

fermentacionih osobina kukuruz je posebno pogodan za proizvodnju biogasa [9]. Od jedne tone silaže kukuruza, dobija se 350 do 400 kWh [7]. Za postrojenje nazivne snage 500kW, bilo bi potrebno 170 do 250 ha za proizvodnju silaže kukuruza [7]. U zemljama sa povoljnim feed-in tarifama, udeo biogasa koji se proizvodi iz silaže je od 30 do 100% [10].

Tabela 6. Potencijalni prinos metana iz organske suve materije za različite vrste energetskih biljaka [9]

Supstrat	Potencijalni prinos metana iz organske suve materije (Nm ³ /t oSM) -srednje vrednosti
Kukuruzna silaža	340
Silaža celih biljaka žitarica	329
Travna silaža	310
Zrna žitarica	380
Šećerna repa	350
Stočna repa	350

2.3 Organski otpad prehrambene industrije

Organski otpad iz prehrambene industrije nastaje, na primer, u proizvodnji šećera, alkohola, ulja, piva, prerada voća i povrća itd. Radi se o materijama, koje nastaju prilikom prerade biljaka, odnosno sastavnih delova biljaka [9]. Komina kao sporedni proizvod nastaje prilikom prerade grožđa i voća u vino i voćne sokove, kao sporedni proizvod nastaje u proizvodnji alkohola od žitarica, repe, krompira ili voća [11]. Prilikom proizvodnje piva nastaje kao sporedni proizvodni pivski trop, dok u proizvodnji šećera kao sporedni proizvod nastaju rezanci šećerne repe. Melasa i repini rezanci usled preostalog sadržaja šećera predstavljaju pogodan kosupstrat za proizvodnju biogasa [9]. Korišćenje ovih sporednih proizvoda u druge svrhe je neizvesno, ali zbog dobrog prinosa biogasa pogodni su da se koriste kao supstrati ili kosupstrati za proizvodnju biogasa. Ovo važi za nusproizvode iz proizvodnje alkohola, koji imaju prinos biogasa uporediv sa stajnjakom [7]. Generalno gledano prikazani supstrati u tabeli 7 imaju visok procenat organske suve materije.

Tabela 7. Procenat suve i organske mase za različite vrste organskog otpada iz prehrambene industrije [7]

Supstrat	Suva materija (%)	Organska suva materija (%)
Repin rezanac	22-26	95
Melasa	80-90	85-90
Komina žitarica	6-8	83-88
Komina krompira	6-7	85-95
Komina voća	2-3	95
Pivski trop	20-25	70-80

Repin rezanac, komina krompira i voća imaju 95% organske suve materije. Melasa ima znatno veći prinos biogasa po svežoj masi supstrata, do 340 m³, nego što imaju druge energetske biljke, što pokazuje da sadrži puno organske materije (Tabela 8).

Tabela 8. Potencijalni prinosi biogasa sa udelom metana za različite vrste organskog otpada iz prehrambene industrije [10]

Supstrat	Prinos biogasa		Udeo metana, (%)
	Stm ³ /t sveže materije	Stm ³ /t organske suve materije	
Repin rezanac	60-75	250-350	70-75
Melasa	290-340	360-490	70-75
Komina žitarica	30-50	430-700	58-65
Komina krompira	36-42	400-700	58-65
Komina voća	10-20	300-650	58-65
Pivski trop	105-130	580-750	59-60

Ostali potencijalni supstrati (repin rezanac, komina žitarica, krompira, voća, pivski trop) imaju znatno niži potencijalni prinos biogasa po toni sveže mase, na primer pivski trop do 130 m³, dok repin rezanac do 75 m³. Međutim, najveći potencijalni prinos biogasa po toni organske suve mase ima pivski trop sa 750 m³, komina žitarica i krompira sa 700 m³ i komina voća sa 600m³, gde se udeo metana kreće do 75% (Tabela 8). Najveću srednju vrednost za potencijalni prinos metana po toni organske suve ima komina jabuke sa 453 m³, zatim komina grožđa sa 448 m³ i pogača uljane repice sa 396 m³ (Tabela 9).

Tabela 9. Prinos metana iz organske suve materije za različite vrste supstrata iz prehrambene industrije [11]

Supstrat	Potencijalni prinos metana iz organske suve materije (Nm ³ /t oSM) - srednje vrednosti
Pivski trop	313
Komina od žitarica	385
Komina od krompira	362
Voćna komina	285
Sirovi glicerol	185
Pogača uljane repice	396
Pulpa krompira	336
Rezanci šećerne repe	218
Melasa	308
Komina jabuke	453
Komina grožđa	448

2.4 Organski otpad klanične industrije

Uredba Evropske unije, otpad nastao u klaničnoj industriji razvrstava u tri kategorije, K1, K2 i K3 [12]. Jedna od tehnologija zbrinjavanja ovog otpada jeste i biogas tehnologija. Uglavnom kao supstrat za proizvodnju biogasa koristi se klanični otpad kategorije K2 i K3 [10]. Biogasna postrojenja koja koriste organski otpad nastao iz klanične industrije kao karakterističnu opremu obično sadrži sistem za usitnjavanje i homogenizaciju klaničnog otpada [7].

2.5 Komunalne i otpadne vode prehrambene industrije

Komunalne otpadne vode ili otpadne vode nastale iz domaćinstva su nastale iz stambenih naselja i rezultat su pretežno ljudskog metabolizma i kućnih aktivnosti. Otpadne vode nastale u prehrambenoj industriji predstavljaju otpadne vode iz procesa

produkcije. Neretko se komunalne i otpadne vode nastale u prehrambenoj industriji ispuštaju direktno u vodotoke i jezera čime negativno utiču na životnu sredinu. Zbog ovog razloga otpadne vode moraju da se prečišćavaju, odnosno definisani su načini i uslovi ispuštanja otpadnih voda u recipijent radi sprečavanja zagađivanja životne sredine [13]. Pre ispuštanja u recipijent, otpadna voda se tretira fizičkim, biološkim i hemijskim postupcima [14]. Nakon procesa prečišćavanja otpadnih voda nastaje otpadni mulj. Jedan od izazova jeste adekvatno zbrinjavanje otpadnog mulja na način kojim se ne ugrožava životna sredina i zdravlje ljudi. Anaerobnim procesom, moguće je uraditi organsku stabilizaciju i higijenizaciju otpadnog mulja [15]. Nakon anaerobne digestije, ukoliko to analize pokažu, moguće je otpadni mulj bezbedno odložiti na deponiju ili iskoristi na poljoprivrednim površinama [7]. Procenat suve materije u mulju ide i do 5%, dok generalno gledano, komunalne i otpadne vode prehrambene industrije sadrže nizak udeo suve materije, ponekad i manje od 1%, odnosno imaju visok udeo vode što utiče na veličinu biogasnog postrojenja [10]. Bioglasna postrojenja, koja koriste otpadne vode kao supstrat za proizvodnju biogasa, uglavnom su deo sistema za prečišćavanje otpadnih voda, tako da proizvodnjom električne energije iz biogasa, pokrivaju jedan deo svojih energetskih potreba [16].

2.6 Komunalni čvrst organski otpad

Pod komunalnim čvrstim organskim otpadom podrazumeva se biorazgradivi otpad, koji je pogodan za anaerobnu razgradnju, i uključuje otpad iz bašti, parkova, od hrane, kuhinjski otpad iz domaćinstava, restorana, ugostiteljstva, održavanja zelenih površina [17]. Ovu vrstu otpada karakteriše nehomogenost sastava i neujednačenost, stoga je potrebna primarna separacija otpada i bioglasna postrojenja koja koriste ovu vrstu otpada moraju imati opremu za odvajanje krupnih nečistoća i metala, kao i uređaj za usitnjavanje supstrata [7]. Što se tiče sadržaja suve materije, u poređenju sa drugim supstratima, značajno je viša nego kod stajnjaka, a uporediva sa energetskim biljkama [7]. Tako da prinos biogasa iz ovog supstrata iznosi oko 100-120 m³ po toni [10]. Dok je potencijalni prinos metana iz jedne tone organske suve mase od zelenog otpada 369 m³ (Tabela 10).

Tabela 10. Potencijalni prinos metana iz organske suve materije za zeleni otpad [11]

Supstrat	Potencijalni prinos metana iz organske suve materije (Nm ³ /t oSM)
Zeleni otpad	369

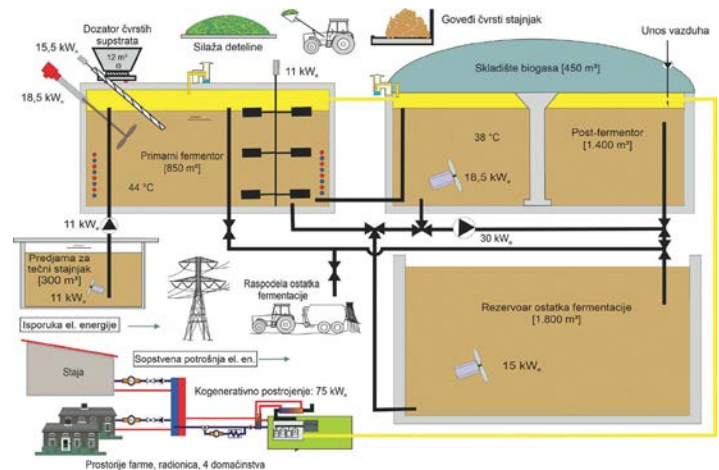
Izgradnjom biogasnog postrojenja, koje bi koristilo ovu vrstu supstrata, pored toga što bi se rešio problem zbrinjavanja komunalnog biorazgradivog otpada, ostvarili bi se prihodi od proizvodnje električne i toplotne energije.

III PRIMER IZ PRAKSE

Malo bioglasno postrojenje (slika 4.) je pušteno u rad 2016. godine i integrisano je u organsku poljoprivrednu farmu da doprinese njenoj isplativosti i zaštiti životne sredine [180]. Mešavina supstrata sastoji se od goveđeg čvrstog stajnjaka i svinjskog tečnog stajnjaka, svaki po 41% od ukupnog unosa supstrata. Preostali udeo supstrata čini silaža deteline. Dnevni

unos supstrata je oko 15 t, prosečnog sadržaja suve materije 20%. Tečni stajnjak se iz predjame zapremine 300 m³ pumpa u fermentor, dok se čvrsti supstrati ubacuju pomoću uređaja zapremine 12 m³ montiranog na betonski ravan krov fermentora.

Fermentor ima radnu zapreminu 850 m³, a post-fermentor 1.400 m³ sa integrisanim skladištem za biogas od 450 m³. Fermentori su zagrejani na 44 i 38 °C, respektivno (mezofilni režim). Ukupno hidrauličko retenciono vreme je 150 dana u proseku, čime je ispunjen pravni zahtev da rezervoar ostatka fermentacije zapremine 1.800 m³ nije potrebno da se pokriva.



Slika 4. Šema malog biogasnog postrojenja [1]

Kogenitivno postrojenje sa gasnim motorom ima instaliranu električnu snagu 75 kW i električnu efikasnost oko 37%. Kompletna količina električne energije 1.780 kWh/d isporučuje se u mrežu. Sopstvene potrebe za pogon biogasnog postrojenja iznose 10% za električnu i 19% za toplotnu energiju, u odnosu na generisane količine. Oko 22% generisane količine toplotne energije iskoristi se za grejanje svinjske staje, objekata u okviru farme i četiri stambena objekta.

Ukupni trošak investicije iznosio je 550.000 €. Prosečan godišnji prihod je oko 168.500 €, od čega se 87% ostvaruje prodajom električne energije, dok ostatak plasiranjem ostatka fermentacije i iskorišćenjem toplotne energije. Godišnji troškovi su oko 110.500 €, od čega je 23% za nabavku supstrata, 40% amortizacija, 31% operativni troškovi, a 6% za radnu snagu.

IV ZAKLJUČAK

Cilj rada jeste da prikaže potencijalni prinos biogasa odnosno metana od strane različitih vrsta supstrata ili biorazgradive materije odnosno biomase. Potencijalni prinos biogasa ili metana može se prikazati prema toni sveže materije ili organski suve materije. Gledajući potencijalni prinos biogasa po toni sveže materije, za tri vrsta supstrata, stajnjaka (tečni i čvrsti), energetskih biljka i organskog otpada nastao iz prehrambene industrije, najveći potencijalni prinos ima melasa sa 340 m³ u odnosu na najveće prikazane vrednosti. Ako se uporedi potencijalni prinos metana po toni organske suve materije, od stajnjaka (tečni i čvrsti), energetskih biljka i organskog otpada nastao iz prehrambene industrije, najveću srednju vrednost ima

komina jabuke sa 453 m³ od prikazanih vrednosti. Što se tiče potencijalnog prinosa biogasa po toni organske suve materije, najveću vrednost ima šćerna repa od 860m³ u poređenju sa najvećim datim vrednostima. Pored pojedinačnog korišćenja različitih tipova supstrata u funkciji proizvodnje biogasa, u radu je naznačena uloga kosupstrata odnosno korišćenja dve ili više različitih tipova supstrata a cilju većeg potencijalnog prinosa biogasa ili metana. Pored navedenog osnovnog cilja, u rada je prikazana fundamentalna funkcija biogasnog postrojenja, a to je potencijalno zbrinjavanje navedenih supstrata, a naročito organskog otpada iz klanične industrije, mulja nastao iz prečišćavanja komunalnih i prehrambenih otpadnih voda i komunalnog čvrstog organskog otpada u svrhu proizvodnje biogasa. Anaerobnom digestijom navedenih supstrata u biogasnim postrojenjima nastaje biogas od koga se proizvodi električna i toplotna energija (kogeneracija), čime se štiti životna sredina, sa aspekta manjeg korišćenja neobnovljivih izvora energije i time se manje emituje otpadnih gasova, otpadnih voda i drugih tipova zagađenja u životnu sredinu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Đatkov, Đ., Višković, M., Martinov, M., Nesterović, A., Bojić S., Venus, T., Effenberger, M. *Mala biogas postrojenja*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija i Institut za poljoprivredu tehniku i stočarstvo, Frajzing, Nemačka, 2021. https://www.euki.de/wp-content/uploads/2021/03/Brosura_Biogas-Initiative_WEB.pdf [pristupljeno 12.03.2023]
- [2] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, "Službeni glasnik RS", broj 40 / 20210 i 35/2023. <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 12.03.2023]
- [3] Kulić, F., Kamenko, I., Bugarski, V., Nikolić, P. Određivanje biometanskog potencijala za različite vrste sirovina, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 2, pp. 1-5, 2022. <https://doi.ub.kg.ac.rs/2022/10-46793-eee22-2-01k/>
- [4] Climate and clean air coalition. *Priručnik za upravljanje bio otpadom*, Novi Sad, April 2020. https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/6_se_europe_cities_organic_waste_mgt_guidance_final_draft.pdf [pristupljeno 12.03.2023]
- [5] Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark, Esbjerg, Danska, Oktobar, 2008. <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf> [pristupljeno 12.03.2023]
- [6] Vukašinović, V. *Tehnologije korišćenja biomase*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2022.
- [7] Martinov, M., Kovacs, K., Đakov, Đ. *Biogas tehnologija*, Novi Sad, 2012.
- [8] Cveković, S. *Modelovanje i optimizacija procesa korišćenja biogasa u proizvodnji zelene energije*, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2016.
- [9] Stručna agencija za obnovljive resurse, registrovano udruženje (FNR) *Priručnik o biogasu: od proizvodnje do korišćenja*, Gülzow-Prüzen, Nemačka, 2016.
- [10] Martinov, M., Đatkov, D. *Biogas postrojenje - Uputstvo za izradu prethodnih studija opravdanosti sa primerom za jedno biogas postrojenje*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2012. <https://www.psegs.vojvodina.gov.rs/wp-content/uploads/2013/03/Biogas-postrojenje-Uputstvo-za-izradu-prethodnih-studija-opravanosti.pdf> [pristupljeno 12.03.2023]
- [11] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Rostock, https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Leitfaden_Biogas_web_V01.pdf [pristupljeno 12.03.2023]
- [12] Regulation (EC) 1069/2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002, Official Journal of the European Union, 2009. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1069/oj> [pristupljeno 21.03.2023]
- [13] Zakon o vodama „Službeni glasnik RS“, br. 30/2010, 9/2012, 101/2016, 95/2018, - dr. zakon. https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_vodama.html [pristupljeno 21.03.2023]
- [14] Aleksić, A., Gordić, D., Šušteršić, V., Babić, M. Application of fat trap for the wastewater treatment in margarine production, *Desalination and Water Treatment*, Vol.57, No.8, pp. 3466-3472, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.986529>
- [15] Šušteršić, V. *Tehnologije i postrojenja u pripremi vode za piće i tretmanu otpadnih voda*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2014.
- [16] Aleksić, N., Šušteršić, V., Rakić, N., Gordić, D. Potrošnja energije i primena obnovljivih izvora energije u postrojenjima za tretman otpadnih voda, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 7-15, 2022, <https://doi.ub.kg.ac.rs/2022/10-46793-eee22-3-07a/>
- [17] Zakon o upravljanju otpadom “Službeni glasnik RS”, br. 36/2009, 88/2010, 95/2018- dr zakon 35/2023. https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_upravljanju_otpadom.html [pristupljeno 21.03.2023]
- [18] Ćurčić, S., Nikolić, D., Veskovski, M. Mala biogasna postrojenja, In 37. *Međunarodno savetovanje Energetika 2022.*, Zbornik apstrakata, pp. 66, 21-24. Jun 2022, Zlatibor, Srbija

AUTORI/AUTHORS

msr Nikola Stanković - vodeći inženjer za zaštitu životne sredine za TE i TE-TO, Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“, stankovic.nikola@eps.rs, ORCID [0000-0002-8053-4488](https://orcid.org/0000-0002-8053-4488)
dr Srećko Ćurčić - red. prof., Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, srecko.curcic@ftn.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-6632-293X](https://orcid.org/0000-0002-6632-293X)

Uticaj solarnih panela na gubitke u niskonaponskoj mreži

The Influence of Solar Panels on Losses in the Low-Voltage Network

Siniša Spremić, Aleksandar Antonić

Elektro distribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad

Rezime - Najveći deo tehničkih gubitaka električne energije u distribuciji električne energije su tehnički gubici u niskonaponskim vodovima. Tehnički gubici električne energije su gubici koji nastaju u distribuciji električne energije od transformatora do potrošača u elektrodistributivnoj opremi. Komercijalni gubici obuhvataju neovlašćeno korišćenje električne energije i gubitke zbog grešaka merne opreme. Glavni izvor tehničkih gubitaka električne energije nastaje protokom električne struje kroz provodnike. Solarni paneli ugrađeni kod potrošača mogu uticati na smanjenje gubitaka smanjenjem protoka električne struje, tj. električne energije kroz niskonaponske vodove. U ovom radu je dat prikaz pretpostavljenog dnevnog dijagrama simetričnog opterećenja niskonaponskog voda sa proračunom gubitaka po satima sa i bez uticaja solarnih panela. Uticaji solarnih panela su takođe prikazani dnevnim dijagramom, kao i vrednosti napona na kraju niskonaponskog voda. U proračunu se za niskonaponski vod koristi ekvivalentni vod sa pola dužine i punim satnim opterećenjem.

Ključne reči - tehnički gubici, solarni panel, niskonaponski, nadzemni vod, opterećenje

Abstract - The largest part of technical losses of electricity in electricity distribution are technical losses in low-voltage lines. Technical losses of electricity are losses that occur in the distribution of electricity from transformers to consumers in electrical distribution equipment. Commercial losses include unauthorized use of electricity and losses due to errors in measuring equipment. The main source of technical losses of electricity is caused by the flow of electric current through conductors. Solar panels installed by consumers can affect the reduction of losses by reducing the flow of electric current, i.e. of electricity through low-voltage lines. The presentation of the assumed daily diagram of the symmetrical load of the low-voltage line is given with the calculation of losses per hour with and without the influence of solar panels. Solar panels effects are also shown in the daily diagram, as well as the voltage values at the end of the low-voltage line. In the calculation, an equivalent line with half the length and full hourly load is used for the low-voltage line.

Index Terms - Technical losses, Solar panels, Low voltage, Overhead line, Load

I UVOD

U nekim delovima sveta se već duže vreme koriste termalni kolektori za zagrevanje i solarni paneli za proizvodnju električne energije za sopstvene potrebe i/ili za isporuku u elektrodistributivnu ili prenosnu mrežu. U Srbiji je napravljeno nekoliko solarnih elektrana na zemlji srednjih snaga i veći broj solarnih elektrana manjih snaga na objektu ili objektima najvećih snaga do 500 kW. Za njih su obavljene analize uticaja na kvalitet električne energije u elektrodistributivnoj mreži [1, 2]. Prema proračunima, priključenje solarnih elektrana na elektrodistributivnu mrežu ima povoljan uticaj na smanjenje gubitaka u prenosnoj mreži [3]. Ukoliko snaga malih solarnih elektrana u domaćinstvima i kod malih poslovnih potrošača ne prelazi minimalnu snagu niskonaponskog voda može se očekivati da će se gubici u niskonaponskoj mreži smanjiti. Povećanje gubitaka se može očekivati samo kad solarne elektrane imaju veću proizvodnju snage od snage potrošnje na delu niskonaponske mreže. Domaćinstva i mali poslovni potrošači na niskonaponskoj distributivnoj mreži će zbog niže cene uglavnom koristiti sisteme na mreži (*on grid*). Sistemi na mreži rade paralelno sa mrežom i zavisni su od električne mreže. Ovakve solarne elektrane čine 90 % tržišta kod privatnih, ali i poslovnih objekata [4].

U radu je dat pretpostavljeni dnevni dijagram simetričnog opterećenja pretpostavljenog prosečnog niskonaponskog izvoda. Dat je i pretpostavljeni dnevni dijagram proizvodnje električne snage solarnih elektrana priključenih na niskonaponski izvod. Ovime se prave greške u odnosu na stvarno stanje. Sve prethodno navedene pretpostavke odudaraju od stvarnih parametara pojedinih niskonaponskih izvoda, dijagrami opterećenja niskonaponskog izvoda su različiti, postoji nesimetrija opterećenja, proizvodnja električne snage solarnih elektrana je zavisna od godišnjeg doba i o osunčanosti, tj. o vremenskim prilikama (oblačnost) i atmosferskom stanju (zagađenost vazduha prašinom i dimom). Bez obzira na greške može da se sagleda mogućnost i proceni veličina smanjenja gubitaka električne snage i električne energije sa i bez prisustva solarnih elektrana na NN izvodima.

Takođe treba da se detaljno sagledaju i vrednuju uticaji solarnih elektrana na smanjenje gubitaka električne energije na višim nivoima napajanja: transformatorima x/0.4 kV, 35/x kV i 110/x i srednjenaponskim vodovima.

II PRETPOSTAVKE, ZANEMARENJA I OPIS MODELA PRORAČUNA

Pretpostavke za izradu modela proračuna su sledeće:

- napon na početku voda (0,4 kV sabirnice transformatorske stanice (u daljem tekstu: TS)) je simetričan i po fazi i po veličini,
- razmatraju se samo ustaljeni režimi bez kvarova,
- struja potrošača se zadaje sa faktorom snage, tj. faznim uglom struje potrošača u odnosu na početni napon na 0,4 kV sabirnicama TS x/0,4 kV. Time je stvarni fazni ugao između napona i struje potrošača različit od zadatog i u proračunu se izračunava i prikazuje,
- neutralni provodnik je iste vrste provodnika i preseka kao fazni provodnici (što je stvarno stanje na najvećem delu mreže) i za gubitke je bitno u slučaju nesimetričnog opterećenja,
- podaci o radnom otporu i induktivnom otporu provodnika su dobijeni iz softverske aplikacije¹.

Zanemarenja koja su korišćena za pojednostavljenje modela proračuna:

- zanemaruju se kapacitivnosti vodova zbog malog uticaja na rezultat proračuna,
- zanemaruje se uticaj višestrukog uzemljenja neutralnog provodnika zbog malog uticaja na struju kroz neutralni provodnik u ustaljenom režimu bez kvara [5],
- ne razmatra se povećanje gubitaka usled povećanja temperature provodnika,
- kod nadzemnih vodova se zanemaruje uticaj na nesimetriju od faznog provodnika (posebno izvedenog) za javno osvetljenje koji je obično manjeg preseka od provodnika voda, a javno osvetljenje koristi nulti provodnik niskonaponskog izvoda.

Model proračuna je prikazan u [6], s tim da se koristi jedna deonica, tj. ekvivalentni vod sa pola dužine i punim satnim opterećenjem potrošača i punom satnom snagom proizvodnje solarne elektrane za dnevni dijagram (24 sata).

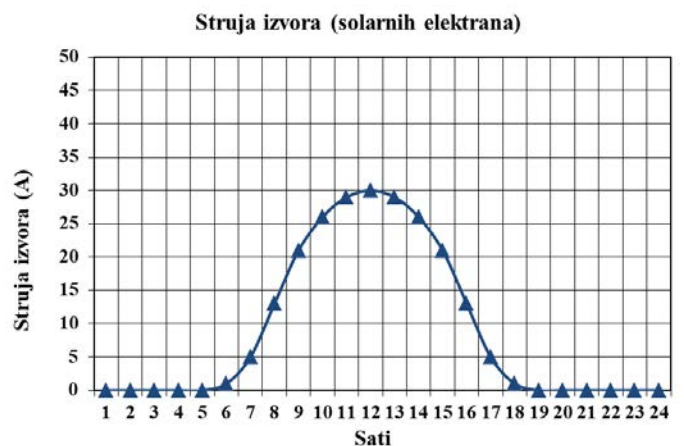
III PODACI I REZULTATI PRORAČUNA

Pretpostavka je da će se najveći broj malih solarnih panela napraviti u domaćinstvima tipa porodična kuća u gradu ili porodična kuća sa pomoćnim objektima na selu. Ova domaćinstva su najvećim delom priključena na niskonaponsku nadzemnu mrežu češće izvedenu golim provodnicima ili ređe samonošivim kablovskim snopom. U manjem delu su priključena na NN kablovsku (podzemnu) mrežu. U proračun su ubačeni podaci o NN nadzemnom vodu sa presekom aluminijumskog provodnika od 50 mm² i za fazne i za neutralni provodnik što je još uvek najčešća vrsta NN nadzemnog voda. Pretpostavljeni NN izvod je dužine 400 m (10 deonica po 40 m), a u proračun ulazi 200 m. Procenjeno je da je prosečna potrošnja električne energije pojedinačnog potrošača iz kategorije domaćinstvo (uvećano za uticaj potrošača iz kategorije ostala potrošnja) oko 500 kWh mesečno odnosno 6000 kWh godišnje. Maksimalna snaga svih potrošača je 34,6 kVA sa pretpostavljenim faktorom snage potrošača je 0,95. Maksimalna snaga solarnih panela je 20 kW.

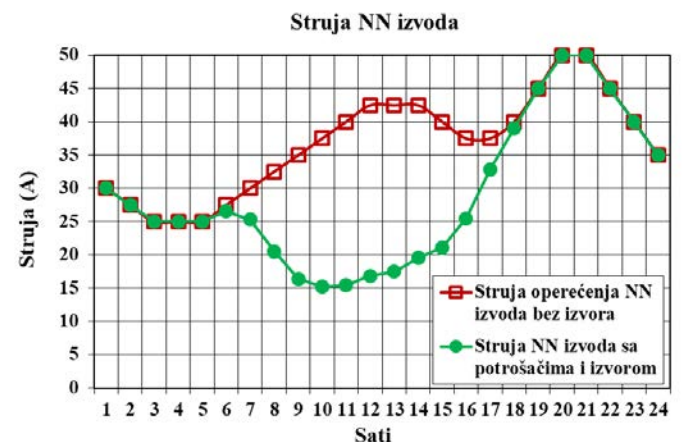
¹ Paket računarskih programa (Fortran aplikacije) za izračunavanje gubitaka u elementima mreže, J.P. Elektrovojvodina, 1992.



Slika 1. Dijagram struje niskonaponskog (NN) izvoda bez izvora



Slika 2. Dijagram struje izvora (solarnih elektrana)

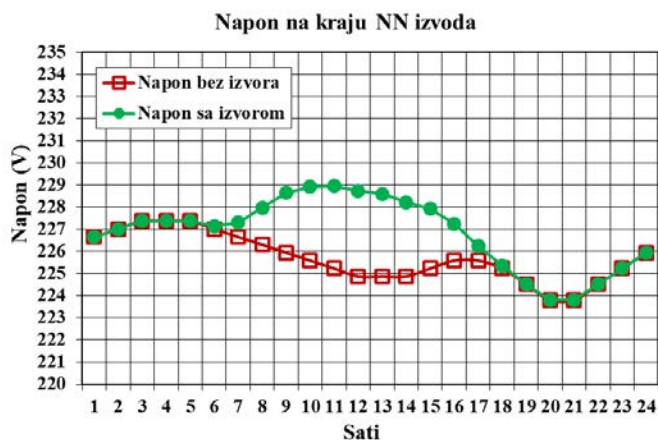


Slika 3. Dijagram struja niskonaponskog (NN) izvoda bez izvora i sa potrošačima i izvorom

Na slici 1 je prikazan pretpostavljeni prosečan dijagram simetričnog opterećenja niskonaponskog izvoda bez izvora, tj. solarnih panela. Maksimalna struja opterećenja je 50 A u večernjim satima, a minimalna 25 A u posleponoćnim satima. Na slici 2 je prikazan pretpostavljeni dijagram simetričnih struja

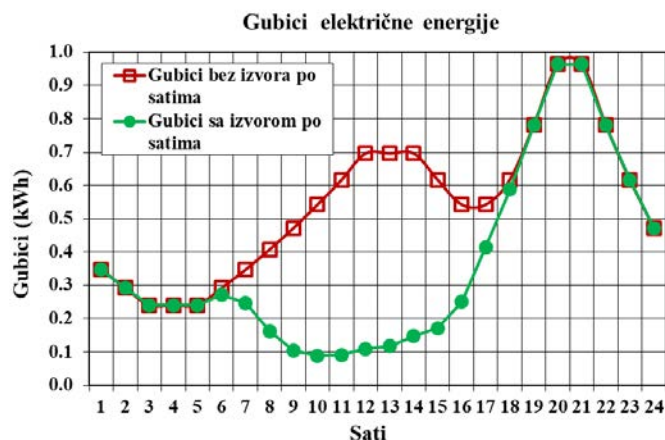
izvora (solarnih panela) sa faktorom snage jednakim 1. Vidi se da proizvodnja solarne elektrane postoji 13 sati. Na slici 3 je prikazan dijagram sa strujom potrošača i zajedničkom strujom potrošača i izvora (solarnih elektrana).

Na slikama 1 i 2 se vidi da je maksimalna struja izvora veća od minimalne struje potrošača. Maksimalna struja izvora i minimalna struja potrošača su u različitim vremenskim periodima tako da prema prikazanim dijagramima neće doći do toka struje (snage) sa niskonaponskog izvoda u sredjenaponsku mrežu preko transformatora $x/0,4$ kV. Na slici 4 je prikazan dijagram vrednosti napona na kraju izvoda u toku 24 sata.



Slika 4. Dijagram napona na kraju niskonaponskog (NN) izvoda bez izvora i sa izvorom

U periodu kada izvor daje struju (snagu) u niskonaponsku mrežu dolazi do osetnog poboljšanja veličine napona. U vreme kada su najveća opterećenja na niskonaponskom izvodu i time najniži naponi izvor ne može da utiče na poboljšanje napona. Ovo bi bilo moguće samo u slučaju da solarni paneli imaju mogućnost skladištenja energije. Uskladištena energija bi se onda mogla koristiti u vreme većih opterećenja. Time bi se na niskonaponskom izvodu tokom čitavog dana dobile ujednačene vrednosti napona. Prema prethodnim pretpostavkama naponi su u standardom predviđenim granicama dozvoljenih vrednosti.



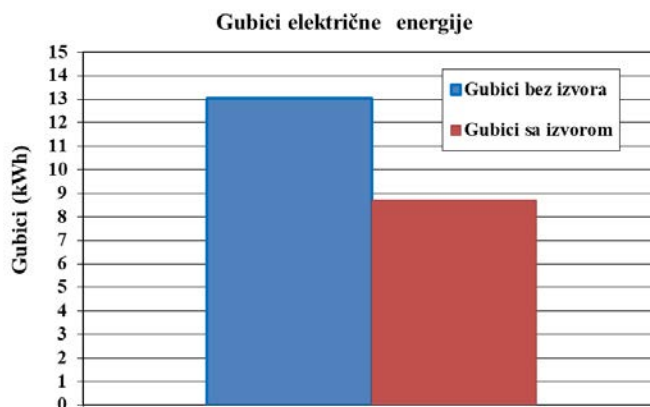
Slika 5. Dijagram satnih gubitaka električne energije na niskonaponskom izvodu u toku 24 sata

Na slici 5 je prikazan dijagram satnih gubitaka električne energije na niskonaponskom izvodu u toku 24 sata.

Ovaj dijagram je sličan dijagramu struje sa slike 3, jer su gubici snage i električne energije proporcionalni sa kvadratom struje.

S obzirom da su prethodno prikazani dijagrami za pretpostavljeno usrednjeno opterećenje pretpostavljenog prosečnog niskonaponskog izvoda kod ovakvog niskonaponskog izvoda bi bilo mnogo dana sa značajno većim opterećenjem. Time bi i gubici mogli biti značajno veći, a vrednosti napona značajno niže od onih prikazanih na slikama 4 i 5. Moguće je da bude i obrnuto, manja opterećenja, manji gubici i veće vrednosti napona. U stvarnosti postoji mnogo niskonaponskih izvoda sa značajno većim dužinama i/ili sa značajno većim opterećenjima. Tada su gubici električne energije značajno veći od ovde prikazanih, a vrednosti napona duž i na kraju niskonaponskog izvoda su značajno manji od ovde prikazanih i u određenim vremenskim razdobljima odstupaju od dozvoljenih prema standardu.

Na slici 6 su prikazane vrednosti dnevnih gubitaka električne energije za prethodne proračune slučajeva bez i sa izvorom.



Slika 6. Dnevni gubici električne energije na niskonaponskom izvodu bez izvora i sa izvorom

Proračun je obavljen sa zadatim naponom na početku niskonaponskog izvoda vrednosti $400/\sqrt{3}$ V. Napon na početku se stvarno menja zbog promene opterećenja i posledično padova napona u transformatoru $x/0,4$ kV i sredjenaponskoj mreži. Takođe i zbog rada automatske regulacije napona i promene položaja regulacione sklopke pod opterećenjem na transformatoru $110/x$ kV. Prikličenje solarnih panela na niskonaponske izvode treba da bude praćeno. U slučaju prikličenja veće snage solarnih panela na TS $x/0,4$ kV treba prethodno proračunima, a kasnije merenjima proveriti potrebu promene položaja besteretnog menjača transformatora $x/0,4$ kV. Ukoliko se na nekom većem području koje napaja TS $110/x$ kV prikličuje veća snaga solarnih panela moguće je da će se ukazati potreba za prepodešavanjem parametara automatske regulacije napona. U svakom slučaju je neophodno da odgovarajuće stručne službe prate uticaj solarnih panela na dnevne promene opterećenja i napona po radnim i neradnim danima i po sezonama. Neophodno je sagledati i uticaje vremenskih prilika i

atmosferskog stanja.

Dnevni gubici električne energije na niskonaponskom nadzemnom izvodu bez izvora (solarnih panela) iznose 13,033 kWh, a sa izvorom 8,71 kWh. Smanjenje gubitaka sa izvorom iznosi 4,323 kWh, tj. gubici električne energije su manji za 33,17%. Procentualno najveći deo gubitaka u elektrodistributivnoj mreži je u niskonaponskim nadzemnim vodovima, tako da se priključenjem solarnih panela u domaćinstvima može ostvariti velika ušteda na gubicima električne energije.

Naredna istraživanja treba da obuhvate složenije proračune i uključe uticaje na transformatore višeg nivoa i srednjenaponske vodove. Neophodno je podrobno sagledati mogućnosti skladištenja električne energije iz solarnih panela u vreme moguće veće proizvodnje solarnih panela od potrošnje na niskonaponskim izvodima i korišćenje iste u vreme vršnih opterećenja. Ovo bi moglo imati dodatni značajan povoljan uticaj na smanjenje gubitaka i poboljšanje naponskih prilika. Zbog dodatnih troškova ulaganja u akumulatorske baterije potrebno je dodatno potaknuti vlasnike solarnih panela. Potrebno je ustanoviti i način praćenja uticaja priključenih solarnih panela na čitavom elektrodistributivnom području na svim naponskim nivoima. Ovo se odnosi na veličine napona, tokove struja (snaga), veličine faktora snage, gubitke električne energije i parametre kvaliteta električne energije. Razvijanje pametne mreže (*smart grid*) u ovom pravcu bi pomoglo u mogućnosti praćenja i analize.

IV ZAKLJUČAK

Priključenje solarnih panela prema prikazanom proračunu može da ima značajan uticaj na smanjenje gubitaka i poboljšanje napona na niskonaponskim izvodima elektrodistributivne mreže.

Određena sredstva se odvajaju kao podrška i podsticaj većem korišćenju solarnih panela, ali su ta sredstva do sada bila mala. U slučaju da solarni paneli potrošača isporučuju električnu energiju

u niskonaponsku distributivnu mrežu neophodno je zbog koristi usled smanjenja gubitaka i zbog povoljnog uticaja na životnu sredinu podstaći potrošače na priključenje solarnih panela.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Grujić, A., Todorović, S. Kvalitet električne energije generisane iz krovne PV elektrane stabenog objekta u Vranju, in Proc. *XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija)*, Kopaonik, R-2.12, 24-28. septembar 2018.
- [2] Čorba, Z., Milićević, D., Dumnić, B., Katić, V., Popadić, B. Ispunjenje kriterijuma dozvoljenih struja viših harmonika pri priključenju fotonaponskih elektrana na distributivni sistem, in Proc. *XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija)*, Kopaonik, R-2.13, 24-28. septembar 2018.
- [3] Simović, V., Žerajić, M. Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 81-83, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.81S>
- [4] Vuković, M., Ostojić, B. Koncept korišćenja mini solarnih centrala u domaćinstvima, in Proc. *36. Savetovanje Energetika 2021*, Zlatibor, Srbija, 22-25 Jun 2021.
- [5] Ćirić, R., Ochoa, L.F., Feltrin, A.P., Nouri, H. Analiza kvarova u četverožičnim distributivnim mrežama, *Elektrodistribucija: bilten o distribuciji električne energije*, No. 1, pp. 34-42, 2006.
- [6] Spremić, S., Obradović, D. Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.68S>

AUTORI/AUTHORS

Siniša Spremić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad, sinisa.spremic@ods.rs, ORCID [0000-0003-3669-3999](https://orcid.org/0000-0003-3669-3999)

Aleksandar Antonić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad, aleksandar.antonc@ods.rs, ORCID [0009-0003-0633-8926](https://orcid.org/0009-0003-0633-8926)

Numerička analiza toplotnih performansi geotermalne toplotne pumpe za potrebe grejanja i hlađenja stambene zgrade

Numerical Analysis of the Ground Source Heat Pump Thermal Performances for Heating and Cooling of the Residential Building

Aleksa Savić, Vanja Šušteršič, Mladen Josijević, Aleksandar Nešović, Nebojša Jurišević, Vladimir Vukašinović

Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu

Rezime - U ovom radu izvršena je numerička analiza (uz korišćenje softvera EnergyPlus) primene geotermalne toplotne pumpe za grejanje i hlađenje trospratne stambene zgrade locirane u Kragujevcu. Geotermalna toplotna pumpa je na primarnoj strani povezana sa geotermalnim vertikalnim sondama, dok je na sekundarnoj strani povezana sa podnim panelnim grejačima. Rezultati simulacija pokazali su da je potrošnja električne energije za grejanje 6122,7 kWh/god, dok se za hlađenje utroši 1842,41 kWh/god. U radu su prikazane mesečne vrednosti faktora grejanja i hlađenja, kao i ekološki indikatori koji su na strani ovakvih termo-tehničkih sistema. Za zemlje u razvoju, poput Srbije, korišćenje geotermalne energije je od još većeg nacionalnog značaja, jer je energetska tranzicija u toku.

Ključne reči - geotermalna energija, toplotna pumpa, vertikalna sonda, podni panelni grejač, simulacija, EnergyPlus.

Abstract - In this paper, a numerical analysis (using EnergyPlus software) of the ground source heat pump for heating and cooling in a three-story residential building located in Kragujevac was performed. The ground source heat pump is connected to geothermal vertical probes on the primary side, while on the secondary side, it is connected to floor panel heaters. The simulation results showed that the electricity consumption for heating is 6122.7 kWh/a, while 1842.41 kWh/a is used for cooling. The paper presents monthly values of heating and cooling factors, as well as ecological indicators that are on the side of such thermos-technical systems. For developing countries, such as Serbia, geothermal energy use is of even greater national importance, because the ongoing energy transition.

Index Terms - Geothermal energy, Heat pump, Vertical probe, Floor panel heater, Simulation, EnergyPlus.

1 UVOD

Ograničenost zaliha fosilnih goriva za ispunjavanje energetskih zahteva dovela je do sve veće potrebe za primenom obnovljivih izvora energije (OIE). Za zemlje koje su energetski zavisne, implementacija OIE može povećati njihovu nezavisnost od stranih uticaja [1]. U Evropskoj Uniji građevinski sektor je odgovoran za 40% potrošnje ukupne finalne energije u stambenim i poslovnim zgradama [2], od koje se veliki deo troši

za zagrevanje i hlađenje domaćinstava i objekata [3]. Zadatak energetskog sektora Srbije u budućnosti jeste povećanje održivosti kroz veće učešće obnovljivih izvora u proizvodnji energije, kao i putem poboljšanja energetske efikasnosti, što bi uticalo na povećanje energetske sigurnosti zemlje i unapređenje održivosti ovog sektora, a time i cele privrede [4]. Procenjeno je da, ukoliko Republika Srbija ne započne sa unapređenjem energetske efikasnosti u svim sektorima privrede i društva, za 50 do 60 godina bi se mogla suočiti sa energetskim i ekološkim kolapsom, uz ubrzano trošenje postojećih neobnovljivih energenata, kao i masovno korišćenje energetski neefikasnih tehnologija [5].

Geotermalne toplotne pumpe (GTP), teorijski i praktično, nude mnoge pogodnosti, u odnosu na druge tehnologije, kada je u pitanju grejanje i hlađenje zgrada raznih namena [6]. Pored toga, GTP su široko prihvaćene kao tehnologija koja može smanjiti emisiju CO₂ pri zagrevanju stambenih zgrada, pogotovo u kombinaciji sa fotonaponskim (FN) panelima [7]. Agencija za zaštitu životne sredine [8] je GTP ocenila kao najefikasniju i ekološki najpogodniju tehnologiju za grejanje i hlađenje.

Sa druge strane, primena GTP u stambenom sektoru Srbije još uvek nije dovoljna, bez obzira što sama tehnologija nije nova [9]. Prema proceni, trenutno se u Srbiji koristi oko 1.005 GTP instaliranih snaga u opsegu 10-40 kW. Na godišnjem nivou, njihovo prosečno angažovanje je oko 2860 sati pri punom kapacitetu [10].

Osnovni prioriteti prilikom izbora načina grejanja predstavlja investicija u sistem i troškovi energenta [11], dok su ekološki faktor i svest o potrebi energetske tranzicije relativno slabo izraženi. Ekonomski aspekt nabavke modernih sistema je identifikovan i kao najveća prepreka za zamenu postojećih sistema, a oko polovine domaćinstava u Srbiji ima pozitivan stav prema potencijalnom subvencionisanju troškova za zamenu postojećih sistema novim i efikasnijim [12]. Kombinacija zagrevanja i hlađenja upotrebom toplotne pumpe je efikasnija od upotrebe tradicionalnih sistema ukoliko je u pitanju ugradnja u novi objekat. U slučaju zamene postojećeg sistema, isplativost toplotne pumpe zavisi od različitih faktora na individualnom slučaju [13].

Upotreba GTP svakako ima rastući trend u Srbiji, jer se nalazi u umereno kontinentalnom pojasu. Tokom grejne sezone, GTP

treba da obezbedi toplotnu energiju [14] za grejanje prostora i pripremu tople potrošne vode, a tokom sezone hlađenja javljaju se potrebe za rashladnom energijom.

Zbog svega navedenog, u ovom radu analizirana je potencijalna implementacija GTP unutar trospratne stambene zgrade koja se nalazi na području grada Kragujevca - studija slučaja. Praćenjem glavnih toplotnih parametara GTP (potrošnja finalne, tj. električne energije, faktor grejanja, faktor hlađenja, emisija CO₂) tokom cele godine, cilj rada je skretanje pažnje stručnoj javnosti na značaj korišćenja geotermalne energije, posebno u nacionalnom stambenom sektoru.

II METODOLOGIJA

Prilikom proračuna potrebne energije za grejanje i hlađenje, pažnja je fokusirana na sve energetske tokove u analiziranoj zgradi (Sl. 1). Poznato je da parametri, poput unutrašnje projektne temperature, toplotnih dobitaka (unutrašnji: ljudi, uređaji, rasveta, ventilacija, itd., kao i spoljašnji: solarno zračenje [15]) i spoljašnji vremenski uslovi (spoljašnja projektna temperatura) utiču na krajnji rezultat [16].

Prema Direktivi EU [17] o energetskej efikasnosti zgrade, potrebna količina toplotne energije određuje se prema jednačini (1), dok se energija potrebna za hlađenje određuje prema jednačini (2):

$$E_H = \sum_{Z=1}^n E_{Z,H} = \sum_{Z=1}^n (E_T + E_V - E_{SUN} - E_{INT}) \quad (1)$$

$$E_C = \sum_{Z=1}^n E_{Z,C} = \sum_{Z=1}^n (E_T + E_V + E_{SUN} + E_{INT}) \quad (2)$$

gde su:

E_H [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za grejanje zgrade tokom godine,

E_C [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za hlađenje zgrade tokom godine,

$E_{Z,H}$ [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za grejanje jedne zone unutar zgrade tokom godine,

$E_{Z,C}$ [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za hlađenje jedne zone unutar zgrade tokom godine,

E_T [kWh/god] - količina toplotne energije koja se transmisijom putem odvodi (grejanje) ili dovodi (hlađenje) zgradi tokom godine,

E_V [kWh/god] - količina toplotne energije koja se ventilacionim (prirodna ili veštačka) putem odvodi (grejanje) ili dovodi (hlađenje) zgradi tokom godine,

E_{SUN} [kWh/god] - količina toplotne energije koja se tokom godine dovodi zgradi putem solarnog zračenja,

E_{INT} - [kWh/god] količina toplotne energije koja se oslobađa u zgradi tokom godine zbog prisustva ljudi, rada uređaja i rasvete.

III MATERIJAL

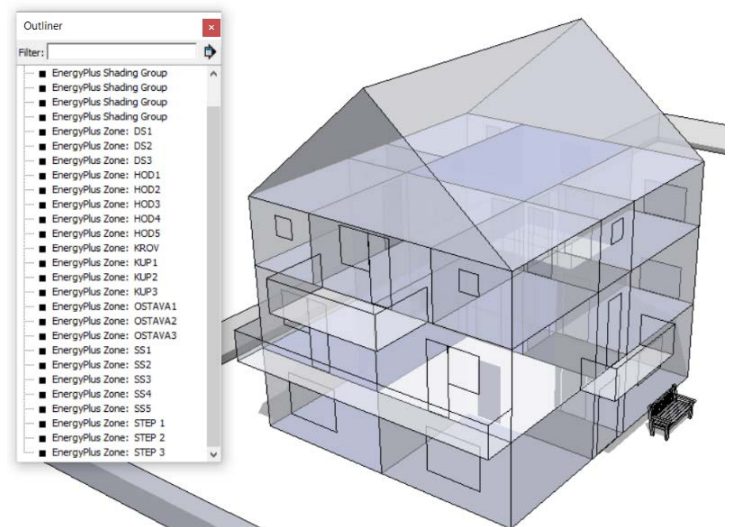
Analiziranju energetskih tokova u zgradi prethodi njeno modeliranje u softveru Google SketchUp (Slika 1.). Ovaj program omogućava relativno jednostavan način za kreiranje svih građevinskih elemenata (transparentnih i netransparentnih)

zgrade, odnosno zona (prostorija) od kojih se zgrada sastoji. Značaj ovog softvera je u preglednom vizuelnom prikazu, kao i mogućnost predstavljanja dvodimenzionalnog plana zgrade. Takođe, veoma bitna činjenica na strani softvera je čuvanje modela zgrade u formatu koji se može koristiti u okviru drugih programa [18]. Svi podaci u okviru izrađenog modela zgrade predstavljaju ulazne podatke za softver EnergyPlus [19] koji je u ovom slučaju korišćen za simuliranje pomenutih energetskih tokova.

Nakon izrade modela zgrade u softveru Google SketchUp, u okviru programa EnergyPlus, pre samog proračuna, neophodno je definisati materijale i sastav svih građevinskih elemenata. Sem toga, treba definisati i rasporede prisustva ljudi, rasporede korišćenja uređaja i rasvete, kao i rasporede korišćenja drugih termo-tehničkih sistema (ukoliko postoje u zgradi). Uz odgovarajuću vremensku datoteku, EnergyPlus će odrediti potrošnju energije, za bilo koju namenu (grejanje, hlađenje, ventilacija, uređaji, rasveta, itd.), za bilo koji vremenski period tokom godine (cela godina, sezona, mesec, dan, sat, minut).

IV STUDIJA SLUČAJA

U okviru ovog rada, a na osnovu opisane metodologije, proračunata je potrebna količina toplotne energije, kao i energija neophodna za hlađenje postojeće stambene zgrade (Slika 1) koja se nalazi na teritoriji grada Kragujevca.



Slika 1. Izometrijski prikaz analizirane zgrade

Zgrada je namenjena stalnom boravku osmočlane porodice. Sastoji se od 22 zona (prostorija) na tri etaže, sa karakteristikama prikazanim u Tabeli 1. Ukupna neto površina analizirane zgrade $A_Z = 364,2 \text{ m}^2$, od čega se u termičkom smislu tretira (greje i hladi) $193,5 \text{ m}^2$. Ostatak ($170,7 \text{ m}^2$) predstavlja negrejani prostor.

Tabela 1. Zonske geometrijske karakteristike

Zona	$A_Z [\text{m}^2]$	$H_Z [\text{m}]$	$Z_Z [\text{m}^3]$	Termički tretman
DS1	27,65	2,67	73,83	DA
STEP1	10,56	2,67	28,20	NE
KUP1	4,07	2,67	10,87	DA
HOD1	4,39	2,67	11,72	DA

Zona	A_z [m ²]	H_z [m]	Z_z [m ³]	Termički tretman
HOD2	7,42	2,67	19,81	DA
SS1	18,54	2,67	49,50	DA
SS2	18,42	2,67	49,18	NE
DS2	27,65	2,67	73,83	DA
STEP2	10,56	2,67	28,20	NE
KUP2	4,07	2,67	10,87	DA
HOD3	4,39	2,67	11,72	DA
HOD4	7,42	2,67	19,81	DA
SS3	18,54	2,67	49,50	DA
SS4	18,42	2,67	49,18	DA
OST1	9,80	2,10	20,58	NE
OST2	9,48	2,10	19,91	NE
OST3	10,22	2,10	21,46	NE
DS3	25,27	2,10	53,07	DA
HOD5	4,39	2,10	9,22	DA
SS5	17,26	2,10	36,25	DA
STEP3	10,56	2,10	22,18	NE
KUP3	4,07	2,10	8,55	DA
KR	91,05	-	-	NE
Σ	364,20	-	677,41	-

Legenda: DS - dnevna soba, STEP - stepenište, KUP - kupatilo, HOD - hodnik, SS - spavaća soba, OST - ostava, KR - krov.

U Tabeli 2 dat je prikaz instalisanih snaga električnih uređaja $Q_{Z,U}$ [W/m²] i svetiljki, tj. rasvete $Q_{Z,R}$ [W/m²] po zonama u analiziranoj zgradi (Sl. 1).

Tabela 2. Zonska instalisana snaga uređaja i svetiljki

Zona	$Q_{Z,U}$ [W/m ²]	$Q_{Z,R}$ [W/m ²]
SS1	16,18	4,05
KUP1	638,82	24,57
DS1	72,33	4,34
SS3	16,18	4,05
SS4	16,29	4,07
KUP2	638,82	24,57
DS2	72,33	4,34
KUP3	638,82	24,57
DS3	79,15	4,75
SS5	17,38	4,35

U Tab. 3 prikazane su fizičke karakteristike (debljina, toplotna provodljivost, gustina i specifična toplota) svih materijala korišćenih za geometrijsko definisanje analizirane zgrade (Sl. 1).

Tabela 3. Fizičke karakteristike korišćenih materijala

Materijal	δ [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
Krečni malter	0,025	0,81	1600	1050
Cementna košuljica	0,04	1,4	2100	1050
PVC folija	0,002	0,19	1100	1460
Staklena vuna	0,1	0,03	50	840
Ekstrud. polistiren	0,1	0,03	33	1260
Fasadni malter	0,012	0,7	1700	1050
Eksp. polistiren	0,1	0,03	33	1260
Keramičke pločice	0,015	0,87	1700	920
Parket	0,02	0,21	700	1670
Crep	0,01	0,99	1900	880
Gipsane ploče	0,12	0,19	800	1090
Giter blok	0,25	0,52	1200	920

Materijal	δ [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
Nearmirani beton	0,15	0,93	1800	960
Armirani beton 1	0,04	2,04	2400	960
Armirani beton 2	0,25	2,04	2400	960
Šljunak	0,2	0,81	1700	840
Heraklit	0,012	0,052	700	1500
Monta	0,16	0,6	1200	920
Borovina	0,07	0,14	550	2090

Sezona grejanja u Republici Srbiji traje od 15. oktobra do 15. aprila. Sa druge strane, usvojeno je da sezona hlađenja bude u periodu od 15. aprila do 15. oktobra. Unutrašnja projektna temperatura za sezonu grejanja iznosi 20°C, dok za sezonu hlađenja iznosi 24°C.

V REZULTATI I DISKUSIJA

Zonska izmena vazduha putem prirodne ventilacije, tj. zonsko provetranje n_z [h⁻¹], zonska instalisana snaga sistema grejanja $Q_{Z,H}$ [W], zonska instalisana snaga sistema hlađenja $Q_{Z,C}$ [W], kao i zonska dužina cevni zmiya u konstrukciji podnih panelnih grejača L_z [m], u analiziranoj zgradi (Slika 1), prikazane su u Tabeli 4. Broj izmena vazduha po zonama, određen je prema Pravilniku o energetske efikasnosti zgrada [20]. GTP tipa HOTTERM EARTH EVI 19 [21], nominalne snage 18,7 kW, usvojena je prethodnim sumiranjem vrednosti $Q_H = \Sigma Q_{Z,H}$ i $Q_C = \Sigma Q_{Z,C}$.

Mesečna potrošnja finalne (električne) u analiziranoj zgradi za potrebe grejanja (rad kompresora) tokom grejne sezone (E_{KOMP} [kWh]) prikazana je u Tabeli 5. Ova vrednost određuje se kao razlika toplotne energije koja se putem kondenzatora (E_{KOND} [kWh]) isporučuje termički tretiranim zonama (Tabela 1, Tabela 4) i toplotne energije koja se preko vertikalnih geotermalnih soni dovodi isparivaču GTP (E_{ISP} [kWh]).

Može se primetiti da je potrošnja električne energije najveća u januaru (1589,94 kWh/mes), a potom u decembru (1434,68 kWh/mes), kada su spoljašnje temperature najniže. Ukupna potrošnja električne energije, tokom sezone grejanja, iznosila je 6122,7 kWh/god.

Tabela 4. Opis sistema grejanja i hlađenja u termički tretiranim zonama

Zona	n_z [h ⁻¹]	$Q_{Z,H}$ [W]	$Q_{Z,C}$ [W]	L_z [m]
DS1	1,5	3306,25	1071,68	184,32
KUP1	1,5	570,04	181,25	27,14
HOD1	0,5	469,26	50,02	29,26
HOD2	0,5	538,25	63,29	49,44
SS1	0,5	1257,99	298,71	123,60
DS2	1,5	3568,69	1233,76	184,32
KUP2	1,5	529,18	154,56	27,14
HOD3	0,5	450,87	53,90	29,26
HOD4	0,5	504,55	67,99	49,44
SS3	0,5	1328,99	291,34	123,60
SS4	0,5	1338,69	303,12	122,78
DS3	1,5	2663,40	895,47	168,44
HOD5	0,5	419,35	48,99	29,26
SS5	0,5	1097,52	264,44	115,09
KUP3	1,5	506,66	148,25	27,14
Σ	-	18549,69	5178,00	1290,23

Tabela 5. Mesečna potrošnja finalne (električne) energije u analiziranoj zgradi za potrebe grejanja tokom grejne sezone

Mesec	E_{KOND} [kWh]	E_{ISP} [kWh]	E_{KOMP} [kWh]
Oktobar	409,09	277,29	131,81
Novembar	2411,36	1609,33	802,03
Decembar	4121,36	2686,68	1434,68
Januar	4491,08	2901,15	1589,94
Februar	3576,69	2309,45	1267,24
Mart	2259,34	1469,73	789,61
April	311,9	204,51	107,39
Σ	17580,82	11458,13	6122,7

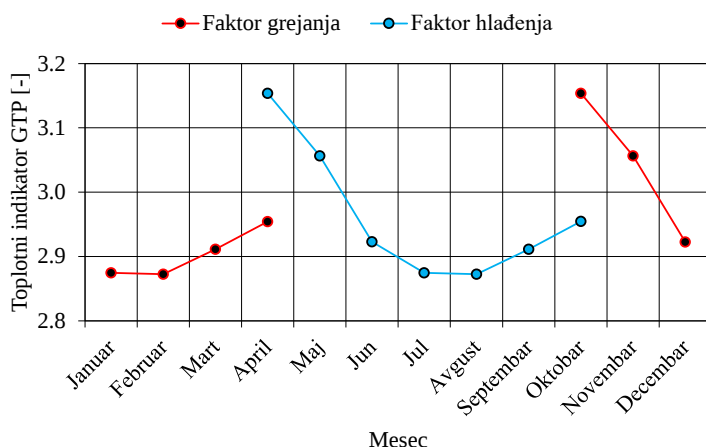
Mesečna potrošnja finalne (električne) energije u analiziranoj zgradi za potrebe hlađenja tokom sezone hlađenja prikazana je u Tabeli 6. Sada se potrošnja električne energije određuje kao razlika toplotne energije koja se putem kondenzatora (E_{KOND} [kWh]) predaje zemljištu i toplotne energije koja se iz prostorija odvodi preko podnih panelnih grejača, i dalje predaje isparivaču GTP (E_{ISP} [kWh]).

Najveća količina toplotne energije predaje se zemljištu tokom jula, kada se utroši 476,16 kWh električne energije. Na drugom mestu je avgust ($E_{KOMP}=444,36$ kWh). Ukupna količina električne energije, koja se za potrebe hlađenja, utroši tokom sezone hlađenja, iznosila je 1842,41 kWh/god.

Tabela 6. Mesečna potrošnja finalne (električne) energije u analiziranoj zgradi za potrebe hlađenja

Mesec	E_{KOND} [kWh]	E_{ISP} [kWh]	E_{KOMP} [kWh]
April	249,74	188,88	60,86
Maj	859,01	644,61	214,4
Jun	1421,04	1054,1	366,94
Jul	1821,15	1345	476,16
Avgust	1698,53	1254,17	444,36
Septembar	934,97	692,84	242,14
Oktobar	146,65	109,09	37,56
Σ	7131,1	5288,69	1842,41

Na narednom dijagramu (Sika. 2), prikazane su mesečne varijacije faktora grejanja ε_H [-] i faktora hlađenja ε_C [-].

**Slika 2.** Mesečne varijacije faktora grejanja i faktora hlađenja

Faktor grejanja ε_H tokom sezone grejanja kretao se u granicama od 2,82 (januar i februar) do 3,1 (oktobar). Sa druge strane,

faktor hlađenja bio je u istim granicama: od 2,82 (jul i avgust) do 3,1 (maj). Prosečna godišnja (sveobuhvatna) vrednost toplotnog indikatora GTP bila je 2,91.

Ako se usvoji da faktor emisije CO_2 iznosi 0,7662 kgCO_2/kWh (preporuka dostupna u [22]), godišnja emisija gasova staklene bašte u slučaju korišćenja GTP iznosila bi 6069,42 kgCO_2/god . Redukcija gasova staklene bašte odgovarala bi vrednostima faktora grejanja i faktora hlađenja. Drugim rečima, u slučaju korišćenja električnog kotla, godišnja emisija CO_2 , bila bi 17662 kgCO_2/god (2,91 puta veća u odnosu na GTP).

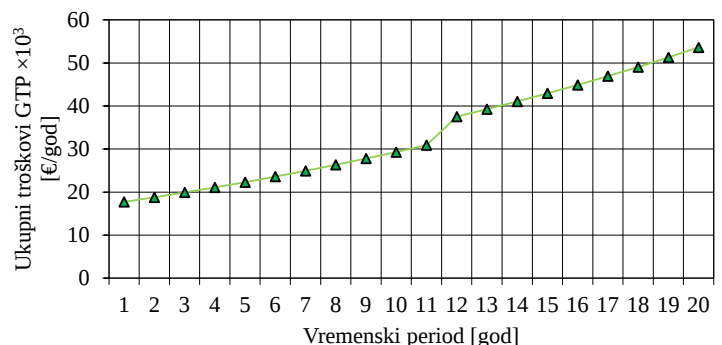
Tabela 7. Ekonomska analiza geotermalne toplotne pumpe u sistemu grejanja i hlađenja stambene zgrade [23]

Parametar	Cena [din]	Cena [€] (1 € = 117,6 din)
Geotermalna toplotna pumpa	959.500	8.159,01
Dodatna oprema	370.000	3.146,26
Ugradnja	100.000	850,34
Bušotine	531.000	4.515,31
Ukupni investicioni troškovi	1.960.500	16.670,92
Troškovi grejanja	95.185	809,40
Troškovi hlađenja	26.689	226,95
Ukupni eksploatacioni troškovi	121.874	1.036,34

U ekonomskom smislu, ukupni investicioni troškovi ovakvog termo-tehničkog sistema (GTP sa svim pratećim elementima) iznosili bi oko 2 miliona dinara (Tabela 7). U slučaju jednotarifnog brojila, troškovi grejanja tokom grejne sezone procenjeni su na 95.185 dinara, a troškovi hlađenja na 26.689 dinara [24].

Analizom je dobijeno da bi ukupna dužina sonde bila 296 m. Ove uslove mogle bi da zadovolje 4 bušotine, pri čemu bi dubina svake bušotine iznosila 74 m. U svaku bušotinu bila bi položena po jedna U-sonda.

Ako se u obzir uzmu varijabilnost tržišne cene energenata, i varijabilnost potrošnje električne energije zbog narušavanja termičkih performansi GTP kroz vreme, može se napraviti predikcija ekonomskih troškova GTP za očekivani tehnički vek projekta od 20 godina (Slika 3).

**Slika 3.** Predikcija ukupnih godišnjih troškova GTP za period od 20 godina

Na dijagramu troškova (Slika 3) može se uočiti blagi ekonomski diskontinuitet koji nastaje nakon 10 godina eksploatacije, zbog dodatnih ulaganja (30% od vrednosti investicionih troškova) u skladu sa preporukama serviseru ovakvih instalacija.

VI ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada, razmatrana je mogućnost primene GTP za potrebe grejanja i hlađenja postojeće trospratne zgrade u Kragujevcu. U okviru programa Google SketchUp, izrađen je model pomenute zgrade, koji je dalje simuliran u softverskom paketu EnergyPlus. U ovoj fazi, korišćen je i odgovarajući vremenski fajl, kako bi simulacioni rezultati bili što bliži realnim uslovima.

Rezultati simulacija pokazali su da bi potrošnja električne energije za grejanje tokom grejne sezone, bila 3,3 puta veća od električne energije za hlađenje.

Iako su početni investicioni troškovi GTP viši od početnih investicionih troškova drugih termo-tehničkih sistema za grejanje i hlađenje, primena GTP donosi ekonomske i ekološke benefite na duže vremenske staze.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Atam, E., Helsen, L. Ground-coupled heat pumps: Part 2 - Literature review and research challenges in optimal design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 1668-1684, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.009>
- [2] Menegazzo, D., Lombardo, G., Bobbo, S., De Carli, M., Fedele, L. State of the art, perspective and obstacles of ground-source heat pump technology in the european building sector: a review, *Energies*, Vol. 15, No. 7, pp. 2685, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15072685>
- [3] Cvetanović, L., Šušteršič, V. Proračun toplotnih gubitaka i analiza isplativosti sistema grejanja sa toplotnom pumpom tipa zemlja-voda u poređenju sa drugim sistemima grejanja na konkretnom slučaju, *Traktori i pogonske mašine*, Vol. 23, No. 3/4, pp. 81-89, 2018.
- [4] Kokeza, G. Doprinos energetskeg sektora ostvarenju održivog razvoja privrede, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 20, No. 1-2, pp. 54-59, 2018.
- [5] Babić, M. Istraživanje mogućih scenarija energetske budućnosti Republike Srbije uz pomoć backcasting methodology i softvera Energovizija MB, *Energija, ekonomija, ekologija*, No. 1-2, pp. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.001B>
- [6] Rees, S.J. An introduction to ground-source heat pump technology, in: Rees S. (Ed.), *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing, pp. 1-25, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03840-3>
- [7] Rosenow, J., Gibb, D., Nowak, T., lowers, R. Heating up the global heat pump market, *Nature Energy*, Vol. 7, pp. 901-904, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01104-8>
- [8] Geothermal Heating and Cooling Technologies (EPA), <https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies> [pristupljeno 04.04.2023]
- [9] Šušteršič V., Gordić D., Josijević M., Đonović K. Legislativa i mogućnost primene geotermalnih toplotnih pumpi u Srbiji i zemljama okruženja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 18, No. 1-2, pp. 314-320, 2016.
- [10] Pešić, A.M., 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>
- [11] Damette, O., Delacote, P., Del Lo, G. Households energy consumption and transition toward cleaner energy sources, *Energy Policy*, Vol. 113, pp. 751-764, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.060>
- [12] Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M. Izazovi energetske tranzicije u sektoru individualnog grejanja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 17-21, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.17P>
- [13] Sarbu, I., Sebarchievici, C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings, *Energy and buildings*, Vol. 70, pp. 441-454, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- [14] Gaur, A.S., Fitiwi, D.Z., Curtis, J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review, *Energy Research & Social Science*, Vol. 71, 101764, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>
- [15] Ružić, S., Opačić, B. Metodologija za proračun korisne toplotne energije potrebne za intermitentno i parcijalno grejanje objekata, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 20, No. 1-2, pp. 222-235, 2018.
- [16] Dodoo, A., Tettey, U.Y.A., Gustavsson, L. On input parameters, methods and assumptions for energy balance and retrofit analyses for residential buildings, *Energy and buildings*, Vol. 137, pp. 76-89, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.033>
- [17] Directive 2010/31/EU. Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May2010 on the energy performance of buildings (Recast).<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:E N:PDF> [pristupljeno 06.04.2023]
- [18] Ellis, P.G., Torcellini, P.A., Crawley, D.B. Energy design plugin: an EnergyPlus plugin for SketchUp. in *Proc. IBPSA-USA SimBuild 2008 Conference*, Berkeley, California, pp. 238-245, 30 July - 1 August 2008.
- [19] EnergyPlus™ Version 22.2.0 Documentation: EnergyPlus Essentials. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/22-2/essentials/index.html> [pristupljeno 04.04.2023]
- [20] "Službeni glasnik RS", br. 61/2011, Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskej_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 02.12.2023. god.].
- [21] HOTTERM, <https://hotterm.pl/> [pristupljeno 15.05.2023]
- [22] Gordić, D., Nikolic, J., Vukasinovic, V., Josijević, M., Aleksic, A.D. Offsetting carbon emissions from household electricity consumption in Europe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 175, 113154, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113154>
- [23] Savić, A. *Tehno-ekonomska analiza sistema za grejanje i hlađenje u stambenom objektu koji koristi toplotnu pumpu zemlja-voda - master rad*, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2022.
- [24] Elektroprivreda Srbije, Kalkulator potrošnje za domaćinstva, <http://kalkulator.eps-snaabdevanje.rs/kalkulator> [pristupljeno 15.05.2023]

AUTORI/AUTHORS

msr Aleksa Savić - mas. inž. maš., Fakultet inženjerskih nauka, aleksa.savic.fin@gmail.com, ORCID [0009-0008-7157-3996](https://orcid.org/0009-0008-7157-3996)
dr Vanja Šušteršič* - red. prof., Fakultet inženjerskih nauka, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991), *autor za korespondenciju
dr Mladen Josijević - docent, Fakultet inženjerskih nauka, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)
msr Aleksandar Nešović - istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, aca.nesovic@gmail.com, ORCID [0000-0002-1690-2389](https://orcid.org/0000-0002-1690-2389)
dr Nebojša Jurišević - naučni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, jurisevic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1609-6313](https://orcid.org/0000-0002-1609-6313)
dr Vladimir Vukašinović - vanr. prof., Fakultet inženjerskih nauka, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)

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