

Potencijal energije sunca i vetra za strateško planiranje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji

Solar and Wind Energy Potential for Strategic Planning of Decarbonisation of Electricity Production in Serbia

Željko Đurišić, Bojana Škrbić

Univerzitet u Beogradu -Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

Rezime -Postojeća struktura proizvodnje električne energije u Srbiji nije održiva i potrebno je sagledati mogućnosti dekarbonizacije proizvodnje električne energije u budućnosti. Obnovljivi izvori energije predstavljaju jedini održiv resurs za sprovođenje strategije dekarbonizacije. U ovom radu su prikazani rezultati istraživanja potencijala energije sunca i vetra na teritoriji Republike Srbije. Prikazana je prostorna disperzivnost ovih izvora i procenjen je energetska potencijal za svaki region. Na osnovu raspoloživih globalnih baza podataka sagledan je potencijal i definisana moguća instalirana snaga i godišnja proizvodnja električne energije za svaki region. Zaključeno je da tehnički iskoristiv potencijal energije vetra na teritoriji Republike Srbije (bez KiM) iznosi oko 11,500 MW iz kojeg bi se moglo proizvesti oko 29,5 TWh električne energije godišnje. Tehnički iskoristiv solarni potencijal u Srbiji je procenjen na oko 24 GW_p, od kojih je oko polovina na krovnim površinama. Procenjena proizvodnja električne energije iz solarnih kapaciteta je oko 30,5 TWh godišnje.

Glavne reči -energija sunca, energija vetra, proizvodnja električne energije, dekarbonizacija, energetska strategija

Abstract - The current structure of electricity production in Serbia is not sustainable and it is necessary to consider the possibilities of decarbonisation of electricity production in the future. Renewable energy sources are the only sustainable resource for implementing the decarbonisation strategy. This paper presents the results of research of the potential of solar and wind energy in the territory of the Republic of Serbia. The spatial depressiveness of these sources is presented and the energy potential is estimated for each region. Based on the available global databases, the potential was considered and the possible installed capacity and gross annual electricity production for each region were defined. It was concluded that the technically usable potential of wind energy in the territory of the Republic of Serbia (excluding Kosovo and Metohija) is about 11,500 MW, from which about 29.5 TWh of electricity could be produced annually. The technically usable solar potential in Serbia is estimated at about 24 GW_p, of which about half is on roof surfaces. The estimated production of electricity from solar capacities is about 30.5 TWh per year.

Index Terms - Solar energy, Wind energy, Electricity

production, Decarbonisation, Energy strategy

I UVOD

Energetika Republike Srbije se nalazi na prekretnici. Najveći izazovi i problemi su u oblasti elektroenergetike. Oko 70% električne energije Srbija trenutno dobija iz termoelektrana na ugalj, a preostalih oko 30% iz hidroelektrana, dok je učešće vetroelektrana i fotonaponskih elektrana manje od 4%.

Ovakva struktura proizvodnih kapaciteta dugoročno nije održiva i ne može se računati na ugalj kao osnovni energent u budućnosti, jedan od glavnih razloga su male rezerve ovog tradicionalnog energenta. Već danas je eksploatacija uglja u Srbiji mnogo skuplja nego pre deset godina. Danas je potrebno izmestiti pet-šest tona zemlje da bi se iskopala tona uglja, a ranije je to bilo 2:1 ili čak i manje. To govori o tome da su raspoložive rezerve uglja u Srbiji već iscrpljene u velikoj meri. Osim skupljih eksploatacionih troškova, ugalj je i sve lošijeg kvaliteta u pogledu energetske vrednosti i čistoće. U centralnoj Srbiji postoje izvesne rezerve, za 20–30 godina ako bi eksploatacija bila nastavljena sa postojećim intenzitetom iskopa. Na Kosovu i Metohiji su rezerve višestruko veće, ali, nažalost, pitanje je da li na njih možemo da računamo u doglednoj budućnosti. Osim iscrpljenih rezervi, kao glavnog ograničenja u pogledu eksploatacije uglja, postavlja se pitanje da li sadašnja generacija ima etičko pravo da sagori sve rezerve uglja u Srbiji. To nije princip održive energetike. Ugalj treba da čuvamo kao stratešku rezervu, a ne kao bazni energent kojeg treba sagorevati sa što jačim intenzitetom, kako se to danas radi u elektroenergetskom sistemu Srbije. Ako se uz prethodne argumente doda i uticaj proizvodnje uglja na životnu sredinu, starost postojećih termoelektrana, kao i ekološke takse na emisiju CO₂, jasno je da ugalj nema ni na srednjeročnom planu ekonomsku, ekološku i etičku opravdanost eksploatacije sa postojećom dinamikom.

Glavno pitanje u strateškom planiranju razvoja energetike Srbije je kako obezbediti zamenske kapacitete za termoelektrane na ugalj koji će obezbediti potrebe Srbije za električnom energijom u budućnosti. U tom pogledu, energetska nezavisnost treba da bude prioritetan strateški zadatak, a to znači da je potrebno planirati razvoj energetike Srbije sa resursima kojim raspolaže Srbija. Treba napomenuti da postoje strategije koje se oslanjaju na gasne i nuklearne elektrane kao glavne pravce razvoja

energetike. Ovaj pristup je tehnički verovatno najjednostavniji sprovesti i takvim sistemom bi bilo i najjednostavnije upravljati. Ipak, takav pristup vodi u energetske ropstvo, s obzirom na to da Srbija nema raspoložive resurse gasa niti je realno da se može proizvoditi nuklearno gorivo u Srbiji. Svaki poremećaj cena ovih energenata na berzi, kao što je trenutno stanje uzrokovano ratom u Ukrajini, doveo bi do poremećaja proizvodnje električne energije u Srbiji. Osim toga, političke konsekvence energetske zavisnosti i problemi prihvatljivosti nuklearnih elektrana kao objekata koji stvaraju nuklearni otpad i rizik od havarija u toku njihove eksploatacije su aspekti koji ne idu u prilog razvoju takvih strategija.

Polazeći od strateških pravaca energetske nezavisnosti, ekološke i energetske održivosti, glavni izvori električne energije u budućnosti u Srbiji treba da budu obnovljivi izvori energije, a to su: hidroelektrane, vetroelektrane i solarne elektrane. Investicioni troškovi za realizaciju ovakve strategije su veći od troškova izgradnje sistema sa konvencionalnim elektranama, ali ne treba zaboraviti da u slučaju obnovljivih izvora nema troškova goriva, niti problema njihove iscrpljenosti, pa je i ekonomija ovakve strategije dugoročno na strani obnovljivih izvora.

U ovom radu su izvršene analize energetskeg potencijala solarnog zračenja i vetra na teritoriji Republike Srbije. Na osnovu raspoloživih globalnih baza podataka i merenja sprovedenih na terenu izvršena je kvantifikacija tehničkog potencijala u pogledu mogućnosti konverzije u električnu energiju za sve regione u Srbiji osim Kosova i Metohije. Pored energetskeg potencijala, za izgradnju vetroelektrana i solarnih elektrana velikih snaga, sagledana su i ograničenja u pogledu zona zaštićenih područja, kvaliteta zemljišta, kao i pristupačnosti terena.

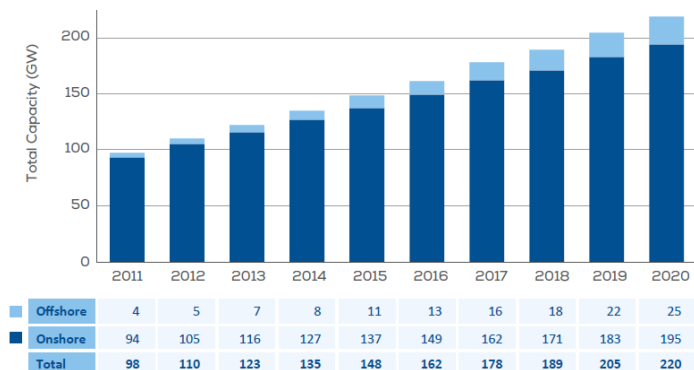
II TRENUTNO STANJE I TRENDOVI RAZVOJA KAPACITETA VETROELEKTRANA I SOLARNIH ELEKTRANA U EVROPI

Mehanizmi podsticaja izgradnje obnovljivih izvora energije u prethodnih dvadeset godina su imali za cilj da doprinesu razvoju tehnologije i industrije obnovljivih izvora energije. Razvoj industrije i konkurentnog tržišta fotonaponskih sistema i vetroagregata je doprineo drastičnom smanjenju investicionih i operativnih troškova. Prema Međunarodnoj agenciji za obnovljive izvore energije, troškovi proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana su u periodu 2010. -2021. sniženi gotovo 10 puta, a za vetroelektrane na kopnu su niži 2 puta. Specifični svedeni troškovi proizvodnje električne energije (*LCOE*) u solarnim i vetroelektranama pre svega zavise od potencijala energije vetra i sunca, ali su u mnogim regionima već na nivou da su vrlo konkurentni konvencionalnim elektranama. Razvoj tehnologija i sistemi podsticaja su doprineli intenzivnoj izgradnji vetroelektrana i solarnih elektrana u celom svetu.

Globalni instalirani kapaciteti vetroelektrana su do 2020. godine dostigli 743 GW [1,2]. Samo u 2020. godini, u pogon je stavljeno 93 GW. Razvoj vetroelektrana je prisutan na svim kontinentima, ali je najizraženiji u Evropi. Na slici 1 prikazan je trend porasta instaliranih kapaciteta vetroelektrana u zemljama Evropske unije (EU) u poslednjih 10 godina.

Zemlje EU već i sada postižu visok udeo proizvedene električne energije iz vetra. Tako Danska pokriva 48% godišnje potrošnje

električne energije iz vetroelektrana, Irska je dostigla 38%, a Nemačka 27% u 2020. godini. U toku 2020. godine EU je pokrivala oko 16% svoje potrošnje električne energije iz vetroelektrana.



Slika 1. Kumulativna instalirana snaga vetroelektrana u EU od 2011. do 2020. [2]

Pored vetroelektrana, intenzivan razvoj tehnologija i instaliranih kapaciteta je izražen u oblasti solarne energetike. Na slici 2 prikazan je trend i prognoze u pogledu porasta instaliranih kapaciteta fotonaponskih elektrana u EU. Tokom 2019. godine fotonaponske elektrane su bile najzastupljeniji tip tehnologije među novoizgrađenim elektranama na globalnom nivou. Izgrađeno je 6 puta više instalirane snage solarnih elektrana od termoelektrana, i gotovo duplo više od vetroelektrana. Udeo proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana u globalnoj proizvedenoj električnoj energiji tokom 2019. godine je iznosio 2,6%, [3,4].



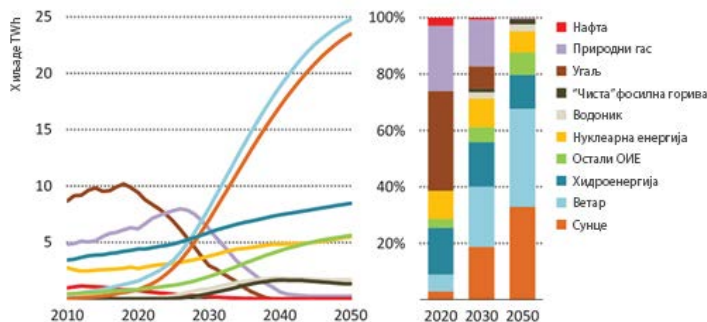
Slika 2. Istorijski i očekivani kapaciteti fotonaponskih elektrana u EU

Na osnovu datog pregleda instaliranih kapaciteta u zemljama EU i svetu, može se zaključiti da bi bilo potrebno da Srbija ima oko 3000 MW instalirano u vetroelektranama i oko 2500 MW_p instalirano u fotonaponskim elektranama da bi bila na nivou prosečnog elektroenergetskog sistema zemlja u Evropi.

Da bi se smanjio tempo globalnog zagrevanja, procena većine referentnih međunarodnih studija je da se udeo energije iz obnovljivih izvora mora povećati na najmanje 60% do kraja 2050. godine kako bi se postigao dogovoreni cilj Pariskog sporazuma o maksimalnom globalnom povećanju temperature ne

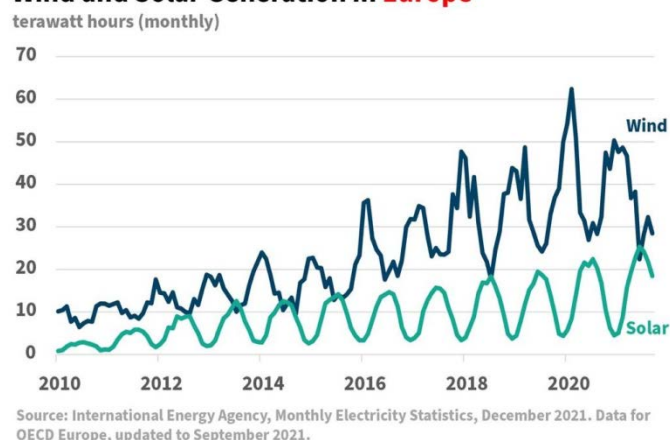
većem od 1,5 °C do kraja stoleća.

Međunarodna agencija za energetiku (*International Energy Agency - IEA*) je u maju 2021. godine publikovala studiju [5] u kojoj je analizirala scenario potpune dekarbonizacije u proizvodnji električne energije do 2050. godine. Na slici 3. je prikazana prognozirana struktura proizvodnje električne energije prema ovom scenariju, na osnovu kojeg bi u 2050. godini 90% električne energije na globalnom nivou bilo proizvedeno u vetroelektranama i fotonaponskim elektranama.



Slika 3. Prognozirani trend u strukturi globalne proizvodnje električne energije prema konceptu potpune dekarbonizacije do 2050.

Wind and Solar Generation in Europe



Slika 4. Profil proizvodnje električne energije iz vetroelektrana i fotonaponskih elektrana u Evropi u poslednjih 10 godina

Dakle, očekuje se da vetar i sunce budu glavni nosioci proizvodnje električne energije u budućnosti. Pri planiranju kapaciteta solarnih elektrana i vetroelektrana potrebno je iskoristiti njihovu komplementarnost. Vetar u proseku duva jače noću nego danju i jače zimi nego ljeti, što je komplementarno sa solarnim zračenjem. Iz tog razloga, treba optimalno planirati instalirane snage solarnih elektrana i vetroelektrana, tako da njihova zbirna proizvodnja bude što približnija potrebama potrošnje. Takvu vremensku varijabilnost i komplementarnost pokazuju postojeći instalirani kapaciteti u Evropi. Na slici 4. prikazane su srednje mesečne proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana i vetroelektrana u Evropi u poslednjih deset godina. Sezonski profili ova dva resursa su komplementarni i jasno je da postoji optimalan odnos instaliranih

kapaciteta pri kojem će postojati najbolja prirodna usklađenost profila potrošnje i proizvodnje električne energije iz ovih varijabilnih izvora.

III TRENUTNO STANJE INSTALISANIH KAPACITETA OIE U SRBIJI I REGULATORNI OKVIRI ZA NJIHOV DALJI RAZVOJ

Energetska politika Srbije usaglašava se sa energetsom politikom Evropske Unije posredstvom Energetske zajednice, kao regionalnog koordinatora. Sve zemlje Zapadnog Balkana su potpisivanjem Ugovora o osnivanju Energetske zajednice (*Energy Community Treaty - ECT*) preuzele obaveze u pogledu razvoja obnovljivih izvora energije kroz Nacionalne planove za razvoj obnovljivih izvora energije, koji definišu putanje ka postizanju zadatih ciljeva u pogledu povećanja učešća obnovljivih izvora energije u ukupnoj energetske slici, pri čemu su precizno definisani ciljevi za svaki sektor (električne energije, grejanja i klimatizacije i transporta). Takođe, sve zemlje Zapadnog Balkana su preuzele obaveze da razviju Nacionalne energetske i klimatske planove prema kojima će se definisati putanje dekarbonizacije. Ovi nacionalni planovi pokrivaju period od 2021. do 2030. godine sa perspektivama do 2050. i predstavljaju najbitniji okvir za sprovođenje direktiva Evropske unije u oblasti obnovljivih izvora energije i energetske efikasnosti.

U okviru "Evropskog zelenog dogovora" Evropska Unija je definisala "Zelenu agendu za Zapadni Balkan" i "Ekonomski i investicioni plan za Zapadni Balkan" sa kojima se Srbija saglasila na regionalnom samitu u Sofiji u novembru 2020, što znači da će Srbija aktivno učestvovati u dekarbonizaciji regiona. Nacionalnu strategiju razvoja OIE treba prilagoditi regionalnom solarnom i vetroenergetskom potencijalu, očekivanom rastu konzuma, perspektivnom razvoju cena fosilnih goriva, karbonskih emisija i tehnologija.

U Srbiji je u proteklom periodu bila relativno slaba izgradnja obnovljivi izvora u poređenju za zemljama EU. Na osnovu raspoloživih podataka dobijenih iz Godišnjeg izveštaja EMS a. d, [7], sagledani su instalirani kapaciteti varijabilnih obnovljivih izvora koji su priključeni na prenosnu mrežu Srbije. Podaci su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Kapaciteti varijabilnih obnovljivih izvora koji su priključeni na prenosni sistem, stanje 31.12.2020. godine

Tip elektrane	Ukupna instalirana snaga [MW]	Ukupna instalirana snaga elektrana u vlasništvu JP EPS [MW]	Ukupna instalirana snaga elektrana u privatnom vlasništvu [MW]
Vetroelektrane	374	0	374
PV elektrane	0	0	0
Ukupno	374	0	374

U tabeli 2 prikazani su podaci o ukupnim instalisanim snagama elektrana koje su priključene na distributivni sistem Srbije.

Tabela 2. Pregled instalisanih snaga obnovljivih izvora priključenih na distributivni sistem, stanje 31.12.2020. godine

Tip elektrane	Ukupna instalisana snaga [MW]	Ukupna instalisana snaga elektrana u vlasništvu JP EPS [MW]	Ukupna instalisana snaga elektrana u privatnom vlasništvu [MW]
Hidroelektrane	109,10	40,49	68,62
Kogeneracije	32,46	0	32,46
Biogas	28,51	0	28,51
Vetroelektrane	25,32	0	25,32
PV elektrane	11,53	0,33	11,20
Prirodni gas	3,41	0	3,41
Biomasa	2,38	0	2,38
Ukupno	212,71	40,82	171,89

Procena daljeg razvoja instalisanih kapaciteta obnovljivih izvora energije u Srbiji je povezana sa dosta neizvesnosti, te se ne može pouzdano sagledati. Neizvesnosti su pre svega posledica: nepostojanje političkog konsenzusa i jasnih nacionalnih strateških okvira razvoja obnovljivih izvora energije i dekarbonizacije proizvodnje električne energije, nedovoljno istraženih potencijala energije vetra, nedovoljno izgrađenih kapaciteta prenosne i distributivne mreže, kao i kapaciteta za balansiranje proizvodnje varijabilnih obnovljivih izvora, ali i nerešenih socijalnih pitanja koja su u vezi sa procesom dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji.

IV RESURSI ZA IZGRADNJU FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U SRBIJI

Prednost izgradnje solarnih elektrana u odnosu na sve ostale obnovljive izvore električne energije je što je ovaj resurs dostupan na svakoj lokaciji i što je njegova prostorna varijabilnost značajno manja nego što je slučaj sa energijom vetra.

Glavni ograničavajući faktor u pogledu instalisanja fotonaponskih sistema jeste relativno mala specifična snaga po jedinici površine, što zahteva zauzeće velikih površina. Dva su glavna pravca planiranja izgradnje fotonaponskih panela i to: instalacije na krovnim površinama industrijskih, komercijalnih, rezidencijalnih i drugih objekata i instalacije na namenskim konstrukcijama postavljenim na zemlji. Pored ovih površina, za instalaciju fotonaponskih sistema se mogu koristiti i vodene površine u mirnim veštačkim jezerima i akumulacijama.

Što se tiče solarnog potencijala, Srbija ima dobre predispozicije sa aspekta godišnje insolacije, tako da se očekivana godišnja proizvodnja fotonaponskih panela na krovnim površinama kreće od 1000 do 1300 kWh/kWp, u zavisnosti od orijentacije krovnih

površina, prisustva senki i regiona u kojem se instalira panel. Konstrukcije na zemlji se postavljaju tako da je optimizovan njihov azimutni i nagibni ugao, tako da je očekivana godišnja proizvodnja po jedinici instalisane snage veća u odnosu na prosečnu krovnu instalaciju i iznosi od 1200 do 1400 MWh/MWp, u zavisnosti od regiona u kojem se instalira. U novije vreme sve su popularnije konstrukcije koje obezbeđuju praćenje položaja Sunca. Najširu primenu su našle konstrukcije sa jednoosnim praćenjem sunca sa osovinom u horizontalnoj ravni. Ovakve konstrukcije obezbeđuju značajno veću specifičnu energiju i kod ovakvih sistema se može očekivati godišnja proizvodnja u opsegu 1500 do 1650 MWh/MWp, u zavisnosti od regiona u kojem je izgrađena elektrana.

4.1 Potencijal za instalacija fotonaponskih sistema na krovnim površinama objekata u Srbiji

Za sagledavanje potencijala za izgradnju fotonaponskih sistema na krovnim površinama u Srbiji izvršena je analiza potencijala energije sunca za svaki region u Srbiji, dok je procena ukupnih krovnih površina po regionima vršena na osnovu podataka o broju stanovnika u određenom regionu. Za svaki region je izvršena procena ukupne godišnje dozračene solarne energije na horizontalnoj površini na otvorenom prostoru bez senki okolnih objekata i topografskih elemenata. Za procene potencijala energije sunca korišćena je višegodišnja globalna baza meteoroloških podataka ERA 5.

Prema raspoloživim podacima ukupna površina krovova objekata u Srbiji se procenjuje na oko 600 km². Procene adekvatnih krovnih površina za instalaciju fotonaponskih sistema na nivou Srbije su urađene samo za školske i predškolske objekte, a rezultati tih analiza su prikazani u monografiji [8], kao i u radovima [15, 16]. Metodologija i rezultati prikazani u [8] su korišćeni za procenu potencijala krovnih površina za izgradnju fotonaponskih sistema u Srbiji. Moguća instalisana snaga na određenoj krovnoj površini zavisi od efikasnosti korišćenih fotonaponskih modula. U pogledu geometrije, osnovna podela krovnih fotonaponskih sistema je vezana za nagib krovne površine, pa razlikujemo ravne i kose krovne površine. Kod ravnih krovnih površina celokupne površine se tehnički mogu koristiti za postavljanje fotonaponskih panela. Kod kosih krovova, delovi krovnih površina koje su orijentisane južno mogu biti ekonomski opravdane za postavljanje fotonaponskih panela. Uz pretpostavku da je orijentacija krovnih površina podjednako verovatna u svim smerovima, može se zaključiti da 25% kosih krovnih površina ima povoljnu prostornu orijentaciju za postavljanje fotonaponskih panela. Zbog postojanja senki, kompleksnosti geometrije krova i drugih krovnih instalacija (prozori, dimnjaci,...) može se pretpostaviti da je realna aktivna površina fotonaponskih panela koja se može postaviti na krovnim površinama oko 15% ukupnih površina krovova. Uz ovu pretpostavku data je procena tehničkog potencijala za izgradnju fotonaponskih elektrana na krovnim površinama za sve regione u Srbiji. Pri proceni raspoloživog potencijala krovnih površina po regionima kao ulazni parametri korišćeni su podaci o ukupnom broju stanovnika i broju stanovnika koji žive u užim gradskim jezgrima, gde postoje višespratni stambeni objekti. Treba napomenuti da gradska jezgra obično nemaju povoljne uslove za instalaciju fotonaponskih panela zbog pravno-tehničkih

poteškoća za korišćenje krovnih površina u višespratnim objektima sa većim brojem stambenih jedinica. Ipak, gradske sredine obično predstavljaju i industrijske i trgovinske centre, tako da u prigradskim zonama postoje industrijske hale, skladišta, sportske hale i stadioni koji predstavljaju značajne kapacitete za instalaciju fotonaponskih panela. Osim toga, gradske sredine predstavljaju i jaka energetska čvorišta, sa dobro razvijenom elektroenergetskom infrastrukturom koja može apsorbovati značajno veće količine energije iz fotonaponskih sistema nego što je to slučaj u ruralnim predelima sa slabom distributivnom mrežom.

Moguća instalisana snaga fotonaponskih panela na određenoj krovnoj površini zavisi od efikasnosti fotonaponske konverzije. Komercijalni silicijumski fotonaponski moduli imaju efikasnost (STC) od oko 20%. Dalji razvoj tehnologija fotonaponske konverzije će dovesti do povećanja efikasnosti, a time i do

efikasnijeg iskorišćenja krovnih površina.

U tabeli 3. prikazani su rezultati proračuna potencijala fotonaponskih panela instalisanih na krovnim površinama objekata u Srbiji po regionima. U četvrtoj koloni tabele prikazani su podaci o specifičnoj godišnjoj proizvodnji prosečnog krovno integrisanog fotonaponskog panela za svaki region u Srbiji. U petoj koloni su prikazani podaci o procenjenim mogućim instalisanim snagama fotonaponskih sistema na krovnim površinama u Srbiji. U poslednjoj koloni tabele su prikazani podaci o očekivanoj godišnjoj proizvodnji kada bi svi kapaciteti bili izgrađeni.

Treba napomenuti da se podaci odnose na proizvodnju novih fotonaponskih panela. Tokom eksploatacije njihova efikasnost degradira, tako da bi prosečna proizvodnja u toku životnog veka bila oko 10% niža u odnosu na podatke prikazane u tabeli 3.

Tabela 3. Potencijal za izgradnju PV panela na krovovima objekata u Srbiji

Broj regiona	Region	Broj stanovnika	Specifična godišnja proizvodnja PV sistema na krovnim površinama (MWh/MWp)	Tehnički potencijal za instalaciju PV sistema na krovnim površinama (MWp)	Godišnja proizvodnja PV sistema na krovnim površinama (GWh/god)
1	Zapadnobačka oblast	173213	1175	328	385
2	Severnobačka oblast	179380	1179	239	282
3	Severnobanatska oblast	136918	1178	272	320
4	Južnobačka oblast	618388	1184	970	1148
5	Srednjobanatska oblast	175623	1185	282	334
6	Sremska oblast	299060	1177	644	758
7	Južnobanatska oblast	279281	1187	528	627
8	Mačvanska oblast	280290	1169	571	667
9	Beogradski region	1690193	1186	1699	2015
10	Kolubarska oblast	163657	1162	400	465
11	Podunavska oblast	187003	1178	330	389
12	Braničevska oblast	167922	1183	321	380
13	Zlatiborska oblast	268393	1228	400	491
14	Moravička oblast	200205	1178	346	408
15	Šumadijska oblast	283235	1182	406	480
16	Pomoravska oblast	199698	1187	360	427
17	Borska oblast	113000	1227	233	286
18	Raška oblast	305147	1196	607	726
19	Rasinska oblast	224191	1188	429	510
20	Nišavska oblast	362331	1224	554	678
21	Zaječarska oblast	107835	1247	200	249
22	Toplička oblast	84252	1231	147	181
23	Jablanička oblast	201024	1220	290	354
24	Pirotska oblast	84827	1248	170	212
25	Pčinjska oblast	197538	1268	370	469
	SRBIJA (bez KiM)	6982604	1198	11096	13241

4.2 Potencijal za izgradnju fotonaponskih elektrana na konstrukcijama na tlu

Izgradnja fotonaponskih elektrana na površinama na tlu je ograničena pre svega upotrebom vrednosti zemljanih površina i raspoloživom elektroenergetskom infrastrukturom za evakuaciju proizvedene električne energije. Izgradnjom fotonaponskih elektrana na klasičnim konstrukcijama se bitno umanjuje ili onemogućava korišćenje zemljišta za poljoprivrednu proizvodnju. Iz tog razloga, izgradnju fotonaponskih panela treba planirati na devastiranom zemljištu i poljoprivrednom zemljištu lošeg kvaliteta (kao što su pašnjaci, livade i njive lošeg kvaliteta).

U tehnološkom pogledu danas se razvijaju sistemi sa solarnim trakerima i sistemi sa fiksnim konstrukcijama. Sistemi sa solarnim trakerima zahtevaju relativno ravno zemljište sa nagibom manjim od 10^0 , dok fiksne konstrukcije mogu biti postavljene i na terenu složenije topografije.

Bitno ograničenje za izgradnju fotonaponskih elektrana velikih snaga su zaštićena područja. Zaštićena područja su u ovom radu identifikovana na osnovu raspoloživih podataka preuzetih sa geoportala Zavoda za zaštitu prirode Republike Srbije, kao i Pokrajinskog zavoda za zaštitu prirode Vojvodine. Na slici 5. prikazana su mape sa naznačenim zaštićenim područjima.

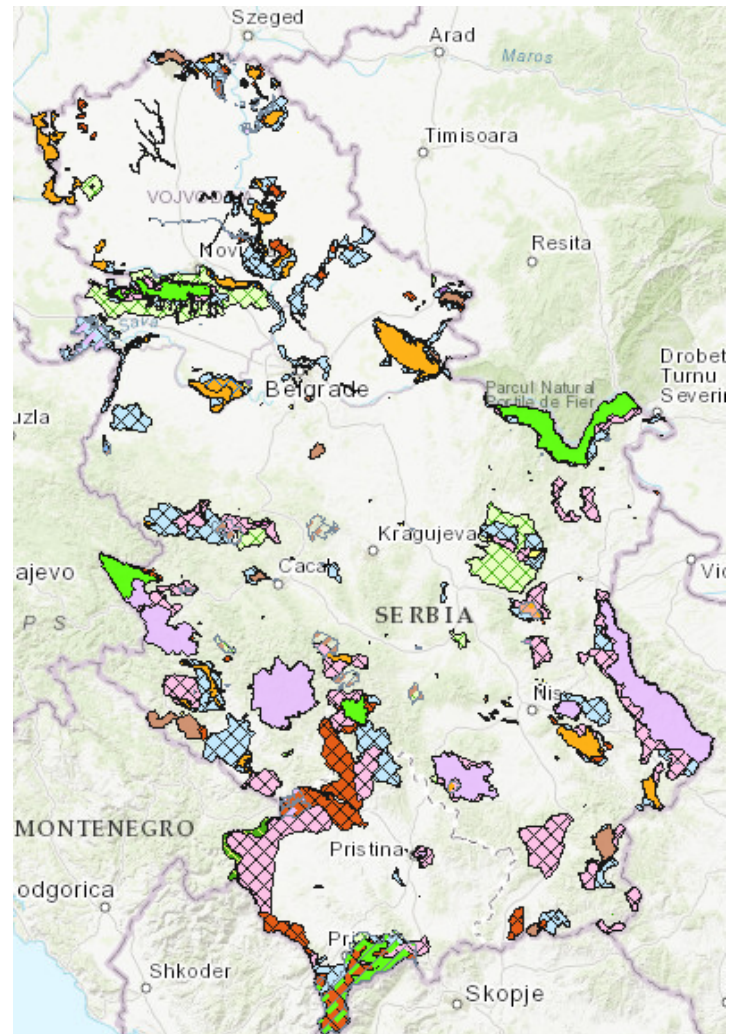
Zaštićena područja koja su naznačena na slici 5. obuhvataju:

- Zaštićena područja
- Područja u postupku zaštite
- Ramsar područja
- Značajna područja za leptire (PBA)
- Značajna područja za biljke (IPA)
- Značajna područja za ptice (IBA)
- Ekološka mreža
- EMERALD područja

S obzirom na činjenicu da su značajne površine pašnjaka, naročito u Vojvodini, zaštićena područja, potrebno je razmatrati i prihvatljivost izgradnje ovakvih sistema na obradivom zemljištu. Za izgradnju fotonaponskih elektrana na kvalitetnom obradivom zemljištu treba analizirati mogućnosti izgradnje tzv. agrofotonaponskih elektrana čije konstrukcije omogućavaju nesmetanu poljoprivrednu proizvodnju. Za neke poljoprivredne kulture ovakav koncept može omogućiti i veće poljoprivredne prinose. Ovaj koncept može biti od posebnog interesa za zemljište u Vojvodini, ali i ostalim poljoprivrednim regijama u Srbiji. U analizama u ovom radu nije razmatran ovakav tip elektrane i on može biti sagledan kao dodatni resurs.

Uvažavajući date pretpostavke i ograničenja, za svaki region u Srbiji je procenjen potencijal za izgradnju fotonaponskih elektrana. Najveći potencijal za izgradnju predstavlja devastirano zemljište u površinskim kopovima uglja u Kolubarskom regionu, kao i u regionu ugljenokopa Drmno. Takođe, pepelišta i drugo uzurpirano zemljište od strane termoelektrana može biti iskorišćeno za izgradnju fotonaponskih elektrana. Osim devastiranog zemljišta, u ciljnim regionima postoji dobra elektroenergetska infrastruktura koja je razvijana za potrebe

evakuacije energije iz termoelektrana, što omogućava priključivanje elektrana velikih snaga.



Slika 5. Zaštićena područja na teritoriji Republike Srbije

U tabeli 4. prikazani su rezultati proračuna potencijala fotonaponskih panela instaliranih na konstrukcijama na tlu u Republici Srbiji po regionima (bez KiM). U četvrtoj koloni tabele prikazani su podaci o specifičnoj godišnjoj proizvodnji prosečne elektrane za svaki region u Srbiji. Pri ovoj analizi pretpostavljeno je da će pola kapaciteta biti realizovano na konstrukcijama sa praćenjem azimutnog ugla Sunca, a pola na fiksnim južno orijentisanim konstrukcijama. U petoj koloni su prikazani podaci o procenjenim mogućim instaliranim snagama elektrana u pojedinim regionima. U poslednjoj koloni tabele su prikazani podaci o očekivanoj godišnjoj proizvodnji kada bi svi kapaciteti bili izgrađeni.

Treba napomenuti da se podaci odnose na proizvodnju novih fotonaponskih panela. Tokom eksploatacije njihova efikasnost degradira, tako da bi prosečna proizvodnja u toku životnog veka bila oko 10% niža u odnosu na podatke prikazane u tabeli 4.

Tabela 4. Potencijal za izgradnju PV elektrana na konstrukcijama na tlu u Srbiji

Broj regiona	Region	Površina regiona (km ²)	Specifična godišnja proizvodnja fotonaponskih sistema na konstrukcijama na tlu (MWh/MWp)	Tehnički potencijal za instalaciju fotonaponskih sistema na konstrukcijama na tlu (MWp)	Godišnja proizvodnja fotonaponskih sistema na konstrukcijama na tlu (GWh/god)
1	Zapadnobačka oblast	2488	1412	50	71
2	Severnobačka oblast	1784	1417	200	283
3	Severnobanatska	2328	1416	200	283
4	Južnobačka oblast	4026	1423	200	285
5	Srednjobanatska	3257	1424	250	356
6	Sremska oblast	3485	1413	50	71
7	Južnobanatska oblast	4246	1426	120	171
8	Mačvanska oblast	3270	1399	80	112
9	Beogradski region	3234	1418	150	213
10	Kolubarska oblast	2474	1416	3000	4248
11	Podunavska oblast	1250	1402	50	70
12	Braničevska oblast	3857	1423	800	1138
13	Zlatiborska oblast	6140	1459	150	219
14	Moravička oblast	3016	1411	200	282
15	Šumadijska oblast	2388	1415	200	283
16	Pomoravska oblast	2614	1426	100	143
17	Borska oblast	3507	1483	600	890
18	Raška oblast	3923	1412	250	353
19	Rasinska oblast	2668	1408	200	282
20	Nišavska oblast	2728	1472	350	515
21	Zaječarska oblast	3624	1479	300	444
22	Toplička oblast	2231	1469	50	73
23	Jablanička oblast	2770	1473	500	736
24	Pirotska oblast	2761	1494	300	448
25	Pčinjska oblast	3520	1526	400	610
	SRBIJA (bez KiM)	77589	1436	8750	12579

4.3 Potencijal za izgradnju fotonaponskih elektrana na vodenim površinama

Problem uzurpacije zemljišta za izgradnju fotonaponskih elektrana je doveo do razvoja tehnologija plutajućih fotonaponskih elektrana koje se postavljaju na namenskim platformama na mirnim vodenim površinama, kao što su: jezera, ribnjaci, akumulacije. Prednost ovakvih sistema je što smanjuju isparavanje vode, a mogu doprineti i poboljšanju kvaliteta vode jer usporavaju rast algi, te postoje primeri u svetu gde su ovakve elektrane instalirane na akumulacionim jezerima za vodosnabdevanje gradova. Ovakva postrojenja se mogu planirati na veštačkim jezerima, dok na prirodnim jezerima uslovno može

biti prihvatljiva njihova izgradnja ako pokrivenost ne prelazi 5% površine jezera. U tabeli 5. date su preporuke koje se odnose na maksimalno prihvatljivu pokrivenost različitih vodenih površina pri izgradnji plutajućih solarnih elektrana.

Tabela 5. Preporuke o izgradnji plutajućih solarnih elektrana

Vrsta vodene površine	Veštački ribnjaci	Veštačka jezera	Prirodna jezera
Pokrivenost	do 90%	do 60%	0–5%

Prirodni potencijal za izgradnju plutajućih solarnih elektrana na teritoriji Srbije je analiziran u radu [9]. Rezultati tog istraživanja su prikazani u tabeli 6. Podaci dati u tabeli 6. se odnose na prirodni potencijal, koji uvažava samo površinu jezera i data ograničenja. Procena specifične proizvodnje je izvršena pod pretpostavkom da su paneli montirani na konstrukcijama pod nagibnim uglom od 12°.

Tehnički iskoristiv potencijal se može procenti tek nakon detaljnih studijskih istraživanja koja treba da obuhvate tehničke uslove izgradnje platformi na svakoj pojedinačnoj vodenoj

površini, ekološke i socijalne uslove izgradnje, uslove plasmana proizvedene energije i druge uslove, kao i uticaje izgradnje ovakvih postrojenja.

Treba napomenuti da se podaci u Tabeli 6. odnose na proizvodnju standardnih fotonaponskih panela na fiksnim konstrukcijama. Istraživanja [10, 11] pokazuju da se proizvodnja ovakvih sistema može bitno povećati ako bi se koristile rotacione platforme i fotonaponski moduli sa dvostranim aktivnim površinama, kao i platforme sa reflektorima.

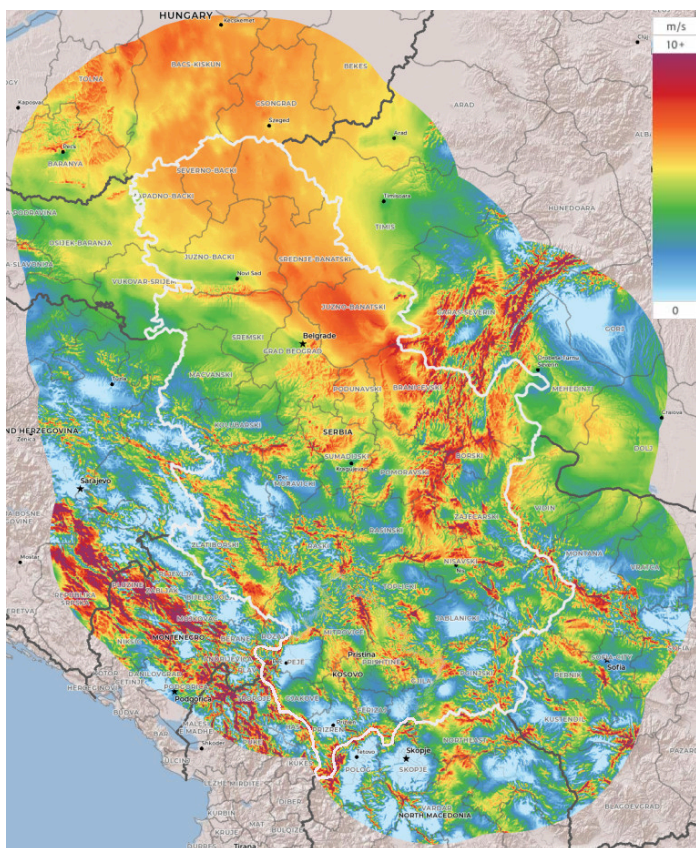
Tabela 6. Prirodni potencijal za izgradnju fotonaponskih elektrana na vodenim površinama u Srbiji

Broj regiona	Region	Specifična godišnja proizvodnja fotonaponskih sistema na vodenim površinama (MWh/MWp)	Prirodni potencijal za instalaciju fotonaponskih sistema na vodenim površinama (MWp)	Potencijalna godišnja proizvodnja fotonaponskih sistema na vodenim površinama (GWh/god)
1	Zapadnobačka oblast	1196	16	19
2	Severnobačka oblast	1200	143	172
3	Severnobanatska oblast	1199	311	373
4	Južnobačka oblast	1205	1.2	1
5	Srednjobanatska oblast	1206	222	268
6	Sremska oblast	1198	151	181
7	Južnobanatska oblast	1208	121	146
8	Mačvanska oblast	1191	227	270
9	Beogradski region	1207	60	72
10	Kolubarska oblast	1183	139	164
11	Podunavska oblast	1199	7	8
12	Braničevska oblast	1204	167	201
13	Zlatiborska oblast	1249	813	1015
14	Moravička oblast	1199	20	24
15	Šumadijska oblast	1203	348	419
16	Pomoravska oblast	1209	1	1
17	Borska oblast	1248	10	12
18	Raška oblast	-	0	0
19	Rasinska oblast	1209	100	121
20	Nišavska oblast	1246	171	213
21	Zaječarska oblast	1270	53	67
22	Toplička oblast	-	0	0
23	Jablanička oblast	1243	437	543
24	Pirotska oblast	1271	214	272
25	Pčinjska oblast	1290	517	667
	SRBIJA (bez KiM)	1219	4249	5229

V RESURSI ZA IZGRADNJU VETROELEKTRANA U SRBIJI

Za sagledavanje kapaciteta za izgradnju vetroelektrana potrebno je poznavati vetroenergetski potencijal regiona, topografske elemente terena, uključujući uslove transporta, uticaj na životnu sredinu i mogućnosti evakuacije proizvedene električne energije.

Na slici 6. prikazana je mapa potencijala energije vetra u Srbiji estimirana na visini od 100 m. Data mapa može poslužiti za orijentacionu identifikaciju vetrovitih regiona, ali ne i za procenu kapaciteta za izgradnju vetroelektrana.



Slika 6. Mapa potencijala energije vetra u Srbiji estimirana na visini od 100 m, [12]

Na osnovu raspoložive mape potencijala energije vetra, ortografskih karakteristika terena, putne i elektroenergetske infrastrukture i ograničenja koja nameću zaštićena područja, identifikovani su regioni u kojima postoji potencijal za izgradnju vetroelektrana. Treba napomenuti da pored naznačenih zaštićenih područja, koja su prikazana na slici 5., mogu postojati i druga ograničenja u pogledu uticaja na životnu sredinu koja se identifikuju kroz izrade studijskih istraživanja i monitoringa na terenu. Takođe, izgradnja vetroelektrana nije predviđena kao mogućnost u pojasu širine 1 km oko naseljenih mesta zbog akustičkih zagađenja, treperenja senke i opasnosti od razletanja turbine i ledenica.

Za procenu potencijala energije vetra u identifikovanim regionima u izradi ove strategije korišćena je baza raspoloživih mernih podataka sa namenskih mernih stubova i globalni podaci (*mesoscale data*) sa virtuelnih stubova lociranih u 21 tačku u

identifikovanim vetrovitim regionima u Srbiji. Virtuelni merni podaci pokrivaju jednogodišnji period sa satnom rezolucijom zapisa na mernim visinama od 100, 120 i 140 m. Podaci se baziraju na ERA 5 globalnoj meteorološkoj bazi koja se pokazala kao najbolja u pogledu procene vetroenergetskog potencijala. Na slici 7. prikazana je satelitska mapa teritorije Republike Srbije sa naznačenim pozicijama mernih tačaka koje su korišćene za procenu proizvodnje vetroelektrana u identifikovanim vetrovitim regionima u Srbiji.



Slika 7. Pozicija ispitnih tačaka u identifikovanim vetrovitim regionima u Srbiji (bez KiM)

Na osnovu raspoloživih topografskih podloga, urbanističkih planova i zona zaštite životne sredine procenjen je raspoloživi prostor za izgradnju vetroelektrana u svakom od identifikovanih regiona. Na osnovu parametara modernih vetroagregata i podataka o potencijalu energije vetra izvršena je procena mogućih instalisanih kapaciteta i očekivane neto godišnje proizvodnje vetroelektrana u identifikovanim regionima u Srbiji. Rezultati proračuna su dati u tabeli 7.

Sprovedene analize u ovom radu nisu obuhvatile KiM. Procena potencijala energije vetra u ovom regionu Srbije može se pronaći u prezentaciji [13].

Tabela 7. Procena tehničkog potencijala za izgradnju vetroelektrana na teritoriji Republike Srbije

Pozicija merne tačke	Region	Koordinate merne tačke	Maksimalni instalirani kapacitet (MW)	Godišnji faktor kapaciteta	Očekivana godišnja proizvodnja električne energije (GWh)
1.	Vlasinski region	42.630402°, 22.351410°	300	0,23	604,44
2.	Medveđa - Sijerinska banja	42.744032°, 21.700192	300	0,27	709,56
3.	Kuršumlja - Kopaonik	43.166227, 21.068085	200	0,20	350,40
4.	Sokobanja - Boljevac	43.690319°, 22.052176°	350	0,28	858,48
5.	Vranje - Bujanovac	42.581659°, 21.84849°	300	0,33	867,24
6.	Nova Varoš - Ivanjica	43.379707°, 20.125107°	300	0,24	630,72
7.	Zlatibor	43.738277°, 19.747049°	200	0,25	438,00
8.	Tutin -Pešterska visoravan	43.07063°, 20.29788°	300	0,24	630,72
9.	Beograd - Smederevo	44.636960°, 20.750840°	350	0,27	827,82
10.	Požarevac - Golubac-Kučevo	44.695554°, 21.252526°	1200	0,30	3153,60
11.	Južni Banat - Pančevo	44.891035°, 20.832648°	1800	0,32	5045,76
12.	Južni Banat - Bela Crkva	44.930052°, 21.405840°	300	0,27	709,56
13.	Srednji Banat	45.412857°, 20.742172°	1000	0,28	2452,80
14.	Sjeverni Banat	45.899215°, 20.354914°	600	0,26	1366,56
15.	Sjeverna Bačka	45.828923°, 19.715525°	1800	0,29	4572,72
16.	Južna Bačka	45.391719°, 19.371972°	600	0,24	1261,44
17.	Bor-Majdanpek-Negotin	44.179440°, 21.94357°	600	0,33	1734,48
18.	Kragujevac - Jagodina	44.023020° , 21.11047°	150	0,29	381,06
19.	Niš - Prokuplje	43.345336°, 21.48325°	300	0,32	840,96
20.	Paraćin - Boljevac	43.885314°, 21.71861°	100	0,33	289,08
21.	Aleksinac - Ražanj	43.632383°, 21.62856°	500	0,32	1401,60
REPUBLIKA SRBIJA (bez KiM)			11550	0,29	29127

VI ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati istraživanja tehničkog potencijala energije sunca i vetra u Srbiji na koji se može računati kao na

glavni resurs za dekarbonizaciju proizvodnje električne energije u Srbiji. Analize nisu obuhvatile Kosovo i Metohiju. Potencijal energije sunca i vetra na ovom delu Srbije je procenjen u prezentaciji [13].

Na osnovu sprovedenih analiza utvrđeno je da tehnički potencijal za izgradnju fotonaponskih elektrana na teritoriji Srbije (bez KiM) iznosi oko 24 GW, od čega je procenjeno da je polovina ovog potencijala raspoloživa na krovnim površinama objekata u Srbiji. Procenjena moguća godišnja proizvodnja je oko 31 TWh.

Tehnički potencijal za izgradnju vetroelektrana na teritoriji Srbije (bez KiM) je značajan i iznosi oko 11,5 GW. Ukupna neto godišnja energija koja odgovara utvrđenom potencijalu vetroelektrana u Srbiji iznosi oko 29,1 TWh.

Takođe, zaključeno je da Srbija poseduje značajne resurse za izgradnju fotonaponskih elektrana i vetroelektrana. Ukupni resursi ovih obnovljivih izvora energije prevazilaze trenutne potrebe za električnom energijom u Srbiji. Ipak, njihova eksploatacija zahteva integraciju odgovarajućih kapaciteta za balansiranje, kao i razvoj prenosne i distributivne mreže.

Sprovedene analize predstavljaju podlogu za izradu strategije razvoja energetike Republike Srbije, koje su predstavljene u okviru studije [14].

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanja koja su predmet ovog rada je finansijski pomoglo Ministarstvo nauke Republike Srbije.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Global Wind Energy Council, Global Wind Report 2021, <https://gwec.net/global-wind-report-2021/> [pristupljeno 05.06.2022]
- [2] Wind Europe, Wind energy in Europe -2020 Statistics and the outlook for 2021 -2025, <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2020-statistics-and-the-outlook-for-2021-2025/> [pristupljeno 05.06.2022]
- [3] Solar Power Europe, *Global Market Outlook For Solar Power 2020 -2024*, <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-solar-power-2020-2024> [pristupljeno 05.06.2022]
- [4] EU Market Outlook For Solar Power 2020 -2024, Solar Power Europe, 2020, <https://www.gensed.org/assets/attachments/dosyalar/EU-Market-Outlook-2020-2024-SolarPowerEurope.pdf> [pristupljeno 05.06.2022]
- [5] D'Aprile, P., Engel, H., van Gendt, G., Helmcke, S., Hieronimus, S., Naucier, T., Pinner, D., Walter, D., Witteveen, M. *Net-Zero Europe: Decarbonization pathways and socioeconomic implications*, McKinsey&Company, 2020.
- [6] IRENA, Renewable energy prospects for Central and South-Eastern Europe Energy Connectivity (CESEC), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020., <https://www.irena.org/publications/2020/Oct/Renewable-Energy-Prospects-for-Central-and-South-Eastern-Europe-Energy-Connectivity-CESEC> [pristupljeno 05.06.2022]
- [7] AD Elektromreža Srbije. Plan razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2021-2030 godine, Beograd, 2020. https://www.aers.rs/FILES/JavnaKonsultacija/Plan%20razvoja%20pren.%20sistema%202021-2030_JavnaKonsultacija.pdf [pristupljeno 13.05.2022]
- [8] Jovanović Popović, M., Ignjatović, D., Zeković, B., Bakić, V., Đurišić, Ž., Batić, I., Mirkov, N., Kljajić, M., Konstantinović, D. *Primena obnovljivih izvora energije na zgradama škola, fiskulturnih sala i predškolskih ustanova*, GIZ - Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit, 2019.
- [9] Radivojević, S. *Potencijal za izgradnju plivajućih solarnih elektrana u Srbiji*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2019.
- [10] Durković, V., Đurišić, Ž. Efficiency increase analysis of large RFPV power plants using reflectors between PV rows, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 12, 063703, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0020233>
- [11] Durković, V., Đurišić, Ž. Analysis of the Potential for Use of Floating PV Power Plant on the Skadar Lake for Electricity Supply of Aluminium Plant in Montenegro, *Energies*, Vol. 10, No.10, pp. 1505, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10101505>
- [12] Global Wind Atlas <https://globalwindatlas.info/> [pristupljeno 10.03.2022]
- [13] Đurišić, Ž. Potencijal za izgradnju fotonaponskih i vjetroelektrana na prostoru Kosova i Metohije, in *Proc. Naučni skup Energetski resursi na Kosovu i Metohiji*, SANU, Beograd, 17-18. January 2022.
- [14] Đurišić, Ž., Škrbić, B. *Analiza potencijala energije sunca i vetra i strateško planiranje scenarija dekarbonizovane proizvodnje električne energije u Srbiji: elaborat*, Institut Nikola Tesla, Beograd, 2021.
- [15] 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/EEE21-4.085>
- [16] 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>

AUTORI/AUTHORS

dr Željko Đurišić - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2048-0606](https://orcid.org/0000-0003-2048-0606)
msr Bojana Škrbić - asistent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, bskrbic@etf.rs, ORCID [0000-0002-0948-8351](https://orcid.org/0000-0002-0948-8351)