

Idejno rešenje zelenog PV - vodonik kompleksa na postojećoj infrastrukturi termoelektrane „Morava“

Conceptual Solution of the Green PV - Hydrogen Complex on the Existing Infrastructure of the Thermal Power Plant “Morava”

Mina Dimić*, Željko Đurišić*, Perica Stančević**

* Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički Fakultet

** Go2Power Consulting

Rezime - U radu je predstavljen koncept zamene postojeće termoelektrane Morava sa postrojenjima za proizvodnju, skladištenje i sagorevanje zelenog vodonika. Postrojenja za proizvodnju vodonika bi se sastojala od elektrolizera i fotonaponske elektrane koja je planirana na postojećem pepelištu u okviru termoelektrane Morava. Sistemi za skladištenje vodonika i bi takođe bili u sklopu kompleksa postojeće termoelektrane. Proizvodnja električne energije bi se vršila u termoenergetskom postrojenju sa gasnom turbinom koja bi bila pogonjena mešavinom vodonika i prirodnog gasa, a koja bi bila izgrađena i priključena na elektroenergetski sistem na mestu postojećeg priključnog razvodnog postrojenja 110 kV. Bilo bi predviđeno i korišćenje toplotne energije koja bi služila za grejanje naselja u blizini termoelektrane. Ovakav kompleks bi omogućio da se postojeća infrastruktura termoelektrane “Morava” preorijentiše na proizvodnju upravljive zelene energije.

Cljučne reči - Solarna Elektrana, Termoelektrana “Morava”, Zeleni Vodonik, Zelena energija

Abstract - The paper presents the concept of replacing the existing thermal power plant Morava with facilities for the production, storage and combustion of green hydrogen. The facilities for the production of hydrogen would consist of an electrolyzer and a photovoltaic power plant, which is planned at the existing ash pit within the Morava thermal power plant. Hydrogen storage systems would also be part of the existing thermal power plant complex. The production of electricity would be carried out in a thermal power plant with a gas turbine powered by a mixture of hydrogen and natural gas, which would be built and connected to the power system at the site of the existing 110 kV substation. It would also be foreseen to use thermal energy that would serve for heating the households near the thermal power plant. Such a complex would enable the existing infrastructure of the Morava thermal power plant to be reoriented to the production of manageable green energy.

Index Terms - Solar power plant, “Morava” thermal power plant Green hydrogen, Green energy

I UVOD

Dearbonizacija predstavlja ključni proces u srednjoročnom i dugoročnom planiranju proizvodnje električne energije u svetu. Sa ovim procesom je suočen veliki broj zemalja koje svoju proizvodnju električne energije baziraju na sagorevanju fosilnih goriva, pre svega lignita. Jedna od takvih zemalja je i Srbija. Trenutna proizvodnja električne energije u Srbiji se dominantno oslanja na lignit. U 2020. godini u Srbiji je preko 70% električne energije proizvedeno u termoelektranama na lignit. Postojeća struktura proizvodnje električne energije u Srbiji nije održiva iz više razloga, pre svega male rezerve uglja i njegov relativno loš kvalitet, dotrajale termoelektrane, povećano zagađenje životne sredine i sve izvesnije nametanje taksi za emisiju ugljen-dioksida. Srbija poseduje značajan potencijal za izgradnju obnovljivih izvora energije koji mogu nadomestiti proizvodnju postojećih termoelektrana [1].

Za integraciju ovakvih varijabilnih izvora neophodne su ogromni kapaciteti za skladištenje koji će obezbediti balansiranje i bilansiranje snaga proizvodnje i potrošnje. Gašenje termoelektrana dovodi do problema gubitka inercionih masa u sistemu [2], pa je potrebno voditi računa da u sistemu u svakom trenutku postoji dovoljna kinetička energija zamajnih masa. Izgradnja fotonaponskih elektrana stvara značajne tehničke probleme u prenosnom sistemu, pre svega zato što je prenosna mreža projektovana prema postojećim centralizovanim izvorima. Osim toga, prosečni faktor kapaciteta za solarne elektrane je 12 - 16% (u zavisnosti od tehnologije). Prosečni faktor kapaciteta termoelektrana u Srbiji u 2020. godini je bio 60%. Zaključuje se da bi zamena termoelektrana na ugalj sa fotonaponskim elektranama zahtevala izgradnju oko 4 - 5 puta veće instalisane snage u solarnim elektranama. Velika instalisana snaga novih izvora može stvarati udare na sistem pri sunčanim danima zbog velike jednovremenosti rada. Predikcija proizvodnje inetermitentnih izvora je značajna i zahteva relativno velike kapacitete sekundarne i tercijarne rezerve za njihov balansiranje, [3,4].

II IDEJNO REŠENJE ENERGETSKOG SOLAR -VODONIK KOMPLEKSA NA POSTOJEĆOJ INFRASTRUKTURI TERMoeLEKTRANE “MORAVA”
Kao optimalan kompromis između iznetih problema strateške

energetske nezavisnosti, pouzdanosti i sigurnosti napajanja konzuma, održavanja tehničkih performansi sistema i prihvatljivih investicija u prenosnu mrežu, u ovom radu je predložen koncept prevođenja termoelektrane na ugalj u gasnu termoelektranu koja bi u početku sagorevala mešavinu zelenog vodonika i prirodnog gasa, a kasnije samo zeleni vodonik, [5,6].

Jedna od najvećih mana fotonaponskih elektrana jeste njihova relativno mala površinska gustina energije, jer zahtevaju pokrivanje velikih površina solarnim panelima. Radi minimizacije negativnih uticaja na životnu i socijalnu sredinu potrebno je fotonaponske elektrane graditi na devastiranim površinama na zemlji. Termoelektrane su kroz višedecenijsku eksploataciju uglja, odlaganje jalovine i pepela, stvorile ogromne površine uglavnom neplodnog i ruiniranog zemljišta. Osnovna ideja je da se na ovim površinama izgrade fotonaponske elektrane. U krugu postojećih termoelektrana bila bi izgrađena postrojenja za proizvodnju i skladištenje vodonika. Umesto kotlovskih postrojenja i parnih turbina bila bi izgrađena gasno-turbinska postrojenja koja bi sagorevala smešu vodonika i prirodnog gasa i pogonile postojeće generatore. Bitna karakteristika predloženog koncepta je da su zadržano postojeće priključno razvodno postrojenje, čime se zadržavaju i tokovi snaga u prenosnom sistemu.

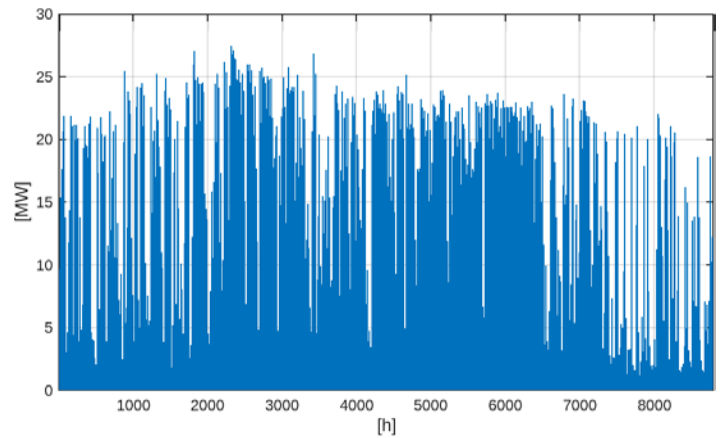
Solarna elektrana bi imala priključak direktno na prenosnu mrežu, u postojećim čvorištima termoelektrana, ali bi imala i priključak na sistem za proizvodnju vodonika. Sistem za skladištenje vodonika bi bio projektovan da vrši unutar dnevna i nedeljna balansiranje snaga u sistemu.

Ključni elementi predložene strategije su:

- izgradnja fotonaponskih panela na uzurpiranom zemljištu u okviru kompleksa termoelektrane,
- izgradnja sistema za proizvodnju zelenog vodonika na lokaciji termoelektrane,
- izgradnja sistema za lokalno kratkoročno skladištenje vodonika na lokaciji termoelektrane,
- izgradnja gasno-turbinskih postrojenja na lokaciji postojećeg bloka u termoelektrani,
- korišćenje postojećih priključno-razvodnih postrojenja za priključenje energetskih kompleksa na prenosnu mrežu,
- izgradnja sistema za korišćenje otpadne toplotne energije za grejanje.

A. Solarna elektrana

Kako bi se što više neutralisao negativni uticaj na životnu sredinu za postavljanje solarnih panela odabrana je na površina pepelišta termoelektrane "Morava". Na osnovu [7] predviđena je solarna elektrana instalisane snage 30 MWp gde su paneli postavljeni kao što je prikazano u [7]. Smatrano je da su paneli monofacijali, južno orijentisani i fiksno postavljeni pod uglom od 31° . Procena godišnje proizvodnje solarne elektrane na datoj lokaciji pepelišta procenjena je pomoću alata PVGIS. Procena proizvodnje je urađena na osnovu vrednosti iz baze podataka solarne iradijacije PVGIS-SARAH2 za 2020. godinu. Na slici 1 je prikazana proizvodnja solarne elektrane instalisane snage 30 MWp na satnom nivou za jednu godinu. Dobijena je ukupna godišnja proizvodnja od 38.828 GWh.



Slika 1. Proizvodnja solarne elektrane instalisane snage 30 MWp

B. Proizvodnja i skladištenje vodonika

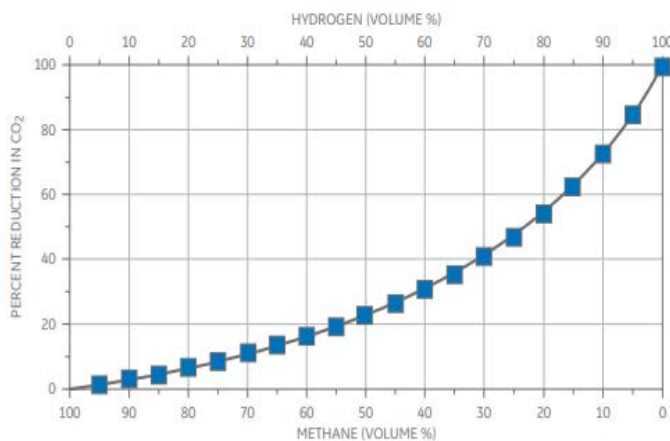
Za proizvodnju vodonika koristi se energija proizvedena iz solarne elektrane koja je locirana na pepelištu. Celokupan proizvedeni vodonik u toku godine biva iskorišćen u gasnoj elektrani. Elektroliza, odnosno proizvodnja vodonika u PLEXOS softveru modelovana je pomoću Power2X klase. Maksimalna snaga elektrolizera jednaka je instalisanoj snazi solarne elektrane i iznosi 30 MW. Kao što se vidi na slici 1, solarna elektrana uvek proizvodi manje od 30 MW što je posledica gubitaka u PV sistemu. Samim tim ni elektrolizer nikada neće dostići svoju maksimalnu snagu od 30 MW. Detaljnijim analizama gubitaka u PV sistemu može se postići smanjenje maksimalne snage elektrolizera, tako da se ne utiče na ukupni proizvedeni vodonik, a da se pri tome ostvari određena ušteda novca. Za efikasnost elektrolize uzeta je vrednost od 62%, iako su, već sada, komercijalno dostupni elektrolizeri efikasnosti i do 75%. Moderni elektrolizeri imaju definisan minimalan nivo opterećenja, koji se uglavnom iznosi oko 5% nominalne snage elektrolizera. Kako je solarna elektrana povezana samo na ulaz elektrolizera, u momentima niske proizvodnje električne energije, manje od 1,5 MW, usled pomenutog ograničenja minimalnog opterećenja elektrolizera došlo bi do restrikcije proizvodnje električne energije solarne elektrane. Kako bi se izbegao gubitak energije na ovaj način u ovom radu smatrano je da je minimalan nivo opterećenja 0%. Treba napomenuti da je, u opštem slučaju, ovaj kompleks zamišljen tako da solarna elektrana ima priključak i na mrežu, onda će pri maloj proizvodnji, nedovoljnoj za aktivaciju elektrolizera ta energija biti injektirana u mrežu. Alternativno, povezivanjem i elektrolizera direktno na mrežu može se postići da se u trenucima vršne proizvodnje svih solarnih elektrana u sistemu taj višak energije direktno injektira u elektrolizer i iskoristi za proizvodnju vodonika, kada je na primer, cena za izvoz električne energije niska. Vodonik bi bio skladišten kao gas pod pritiskom, što bi zbog njegove male gustine moglo dovesti do velikih dimenzija datog skladišta. U PLEXOS softveru maksimalni kapacitet skladištenog vodonika iznosi 5 TJ, što je ekvivalentno 1,46 GWh. U ovoj analizi zanemareni su gubici energije usled skladištenja vodonika.

C. Gasna elektrana

Sve više svetskih proizvođača počinje da razvija turbine koje mogu da sagorevaju mešavinu prirodnog gasa i vodonika. Cilj je da se udeo vodonika u mešavini koja se uvodi u gasnu turbinu vremenom povećava, dok se ne postigne potpuna nezavisnost ovog kompleksa od neobnovljivih izvora, kao što je prirodni gas. U ovom radu pretpostavljeno je da gasna elektrana može da radi samo u satima večernjeg maksimuma konzuma, između 17 i 23 h, kako bi se podmirila vršna potrošnja. Termoelektrana "Morava" je snage 125 MW. U cilju što boljeg iskorišćenja već postojeće infrastrukture predviđena je gasna turbina iste maksimalne snage. Minimalna snaga kojom turbina može da radi jeste 60 MW, dok je minimalno vreme koje turbina mora da bude u pogonu 3 h. Efikasnost gasne turbine izražena je preko toplotne brzine sagorevanja goriva iznosi 10.7 GJ/MWh. U procentima ova efikasnost iznosi 33,64%. U PLEXOS softveru je urađena analiza u dužini od jedne godine koja daje optimalan raspored rada gasne elektrane uzimajući u obzir proizvodnju vodonika elektrolizom vode korišćenjem električne energije proizvedene u solarnoj elektrani. Razmatrana su 3 scenarija sa različitim udelom vodonika u mešavini gasova.

Važno je istaći da će korišćenje 100% vodonika kao goriva za gasnu turbinu dovesti do značajnog smanjenja emisije ugljen-dioksida u odnosu na pogon na prirodni gas ili druga ugljovodonična goriva. U slučaju mešanja vodonika i prirodnog gasa količina smanjenja CO₂ biće funkcija procentualnog udela vodonika u gorivu. Procentat vodonika u mešavini gasa može se meriti na bazi zapremine, mase ili uložene toplote. Postoji značajna razlika između ovih metoda zbog razlike u gustini energije vodonika na bazi mase i zapremine.

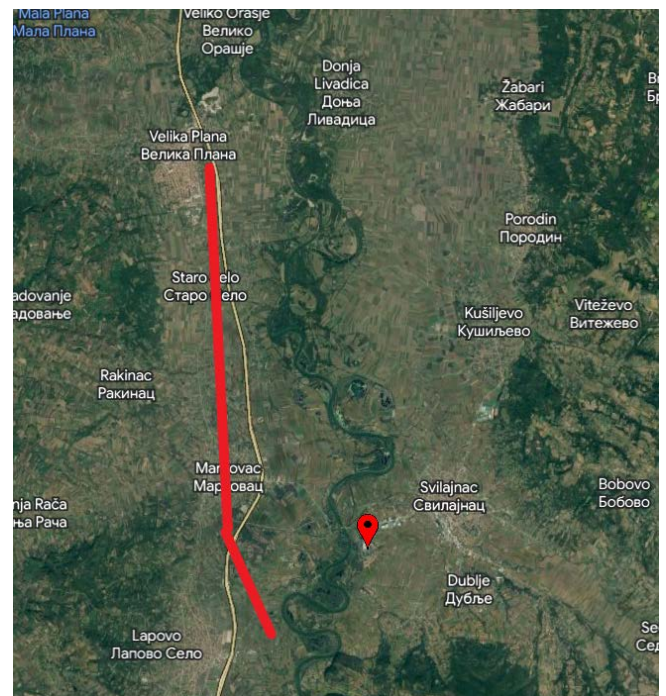
Tipično, tokovi gasa u turbinu se navode na zapreminskom nivou. Kako metan i vodonik imaju veoma različite gustine energije, to će dovesti do toga da će dodavanje malih količina vodonika gorivu (na zapreminskoj osnovi) imati manji uticaj na smanjenje emisije ugljen-dioksida [8,9]. Uzimajući to u obzir, može se definisati odnos količine vodonika u gorivu (po zapremini) i smanjenja emisije CO₂. Ova zavisnost, koja je očigledno nelinearna prikazana je na slici 2 [9].



Slika 2. Zavisnost smanjenja emisije CO₂ od količine vodonika u gorivu

D. Snabdevanje prirodnim gasom

Tranzicija sa neobnovljivih na obnovljive izvore je postepena. Dok se ne steknu uslovi da se gasna turbina pogoni isključivo zelenim vodonikom, turbini se mora omogućiti i dotok prirodnog gasa. Kako bi se gasnoj elektrani "Morava" mogao dopremiti gas moralo bi se izvršiti priključenje elektrane na gasovod JP "Srbijagas". Na slici 2 dat je deo mape gasovoda između Velike Plane i Lapova prikazan crvenom linijom, dok je lokacija peplišta TE "Morava" prikazana crvenom iglicom. Dakle, može se primetiti da je posmatrana lokacija veoma povoljna sa aspekta blizine trase gasovoda. U softver PLEXOS cena prirodnog gasa se uvodi kao ulazni parametar i u ovom radu ona iznosi 5\$/GJ.



Slika 3. Mapa dela gasovoda između Velike Plane i Lapova

E. Priključno-razvodna postrojenja

Termoelektrana „Morava“ locirana je na desnoj obali Velike Morave, na 2,8 km od mesta Svilaјnac. Ovu lokaciju je uslovio najpovoljniji položaj za dopremu otpadnog uglja iz okolnih rudnika, kao i blizina reke Morave iz koje se koristi voda za potrebe rashladnog sistema termoelektrane. S obzirom da lokacija elektrane neće biti promenjena biće zadržan priključak na postojeće razvodno postrojenje 110kV. Na ovaj način obezbeđuje se značajna ušteda novca.

F. Upotreba otpadne toplotne energije

Sagorevanjem mešavine gasova u gasnoj turbini stvara se velika količina otpadne toplote. Kako bi se poboljšala efikasnost ovakvog postrojenja i postigla što bolja ekonomska isplativost planirano je iskorišćenje ove toplote za zagrevanje domaćinstava grada Svilaјnca. Uzimajući u obzir efikasnost gasne turbine, 66,36% uložene energija biće pretvoreno u toplotu. Potrebe za toplotnom energijom zavise od upotrebe sanitarne tople vode i energije potrebne za grejanje domaćinstva. U ovom radu biće dat prikaz dobijene otpadne toplotne energije koja kasnije može da se skladišti i iskoristi, ali neće biti prikazana detaljna analiza i proračun samog skladišta toplotne energije.

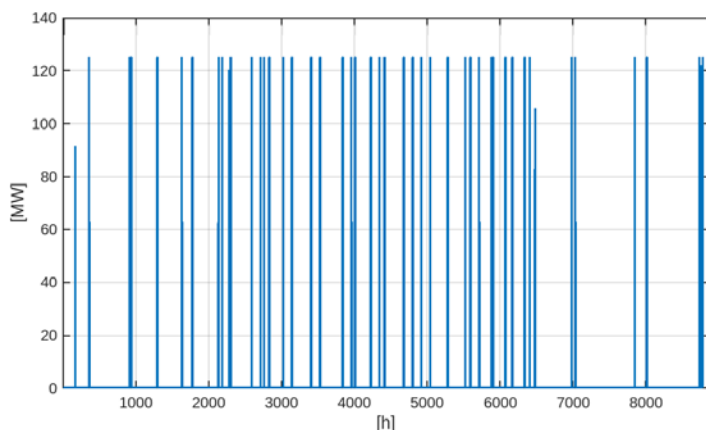
III REZULTATI SIMULACIJE

Simulacija je rađena u softveru PLEXOS, gde su sve vrednosti dobijene na satnom nivou. U nastavku teksta biće prikazani rezultati simulacije za različiti udeo vodonika u mešavini sa prirodnim gasom koja se dovodi turbini. Biće prikazana 3 scenarija:

- scenario 1: udeo vodonika u mešavini gasova je 30%,
- scenario 2: udeo vodonika u mešavini gasova je 50%,
- scenario 3: udeo vodonika u mešavini gasova je 70%.

Scenario 1

Scenario 1 podrazumeva da je udeo vodonika u ukupnoj zapremini mešavine gasova 30%. Na slici 4 prikazana je godišnja proizvodnja gasne elektrane sa satnim odbirkom, dok je u tabeli 1 dat prikaz brojnih vrednosti ukupne godišnje proizvodnje električne i toplotne energije, kao i utrošak goriva i broj radnih sati gasne elektrane. Ukupna proizvodnja gasne elektrane uslovljena je ukupnom proizvodnjom vodonika.



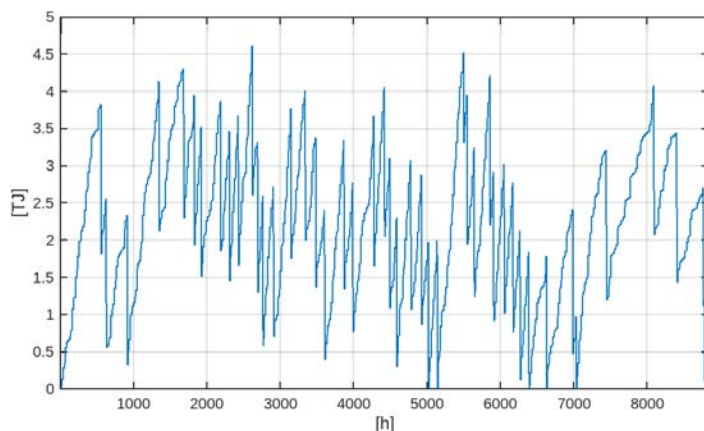
Slika 4. Scenario 1 - Proizvodnja električne energije gasne elektrane "Morava"

Kako je ukupna proizvodnja gasne elektrane uslovljena ukupnom proizvedenom količinom vodonika, očekivano je da ukupna proizvodnja električne energije u scenariju 1 bude najveća u poređenju sa scenarijima 2 i 3, što će i biti pokazano u nastavku teksta.

Tabela 1. Godišnja proizvodnja električne i toplotne energije gasne elektrane "Morava" i godišnji utrošak goriva u Scenariju 1

Godišnja proizvodnja gasne elektrane (GWh)	Godišnji utrošak vodonika (TJ)	Godišnji utrošak prirodnog gasa (TJ)	Broj radnih sati u toku godine (h)	Godišnja proizvodnja toplotne energije (TJ)
26,998	86,664	202,216	228	191,686

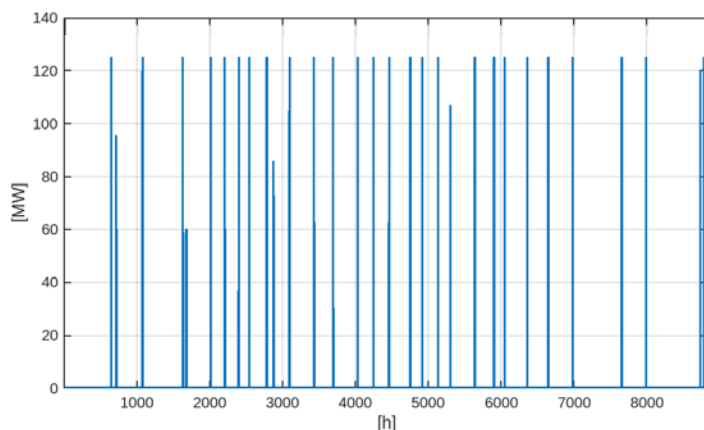
Na slici 5 je prikazana dinamika punjenja i pražnjenja skladišta vodonika. Može se primetiti da je brzina punjenja skladišta veća leti u odnosu na zimu, što odgovara većoj proizvodnji solarne elektrane. Maksimalni kapacitet skladišta u ovom scenariju se nikada ne dostiže.



Slika 5. Scenario 1 - Energetski bilans skladišta vodonika kapaciteta 5 TJ

Scenario 2

U ovom odeljku prikazani su rezultati simulacije kada je zapreminski udeo vodonika u mešavini gasova 50%. Na slici 5 prikazana je proizvodnja gasne elektrane tokom jedne godine.

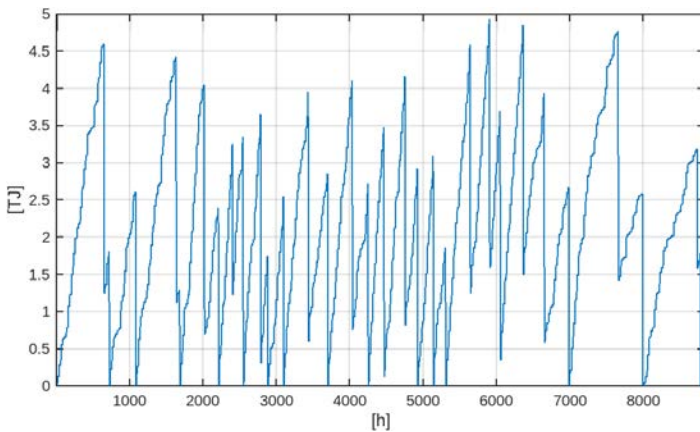


Slika 6. Scenario 2 - Proizvodnja električne energije gasne elektrane "Morava"

Sa povećanjem udela vodonika i smanjenjem udela prirodnog gasa u mešavini gasova koja se dovodi gasnoj turbini, dolazi do očekivanog smanjenja proizvodnje gasne elektrane. U tabeli 2 dat je prikaz brojnih vrednosti ukupne godišnje proizvodnje električne i toplotne energije, kao i utrošak goriva i broj radnih sati gasne elektrane.

Tabela 2. Godišnja proizvodnja električne i toplotne energije gasne elektrane "Morava" i godišnji utrošak goriva u Scenariju 2

Godišnja proizvodnja gasne elektrane (GWh)	Godišnji utrošak vodonika (TJ)	Godišnji utrošak prirodnog gasa (TJ)	Broj radnih sati u toku godine (h)	Godišnja proizvodnja toplotne energije (TJ)
16,169	86,505	86,505	151	114,801

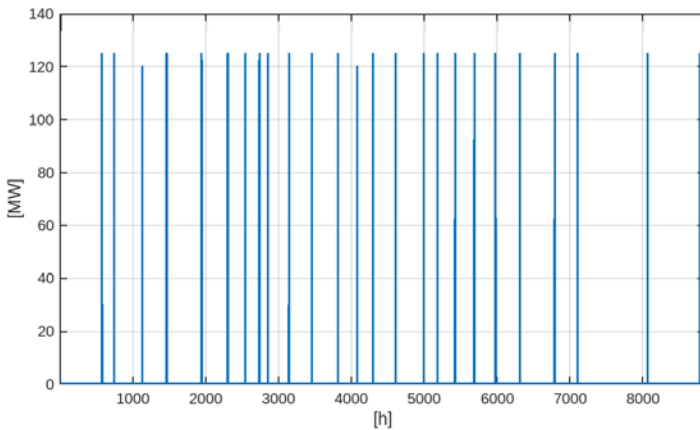


Slika 7. Scenario 2 - Energetski bilans skladišta vodonika kapaciteta 5 TJ

Utrošak vodonika zavisi od izlazne snage gasne turbine. Ako se posmatra scenario 2, maksimalni utrošak vodonika za 6 sati (između 17h i 23h) je 1926 GJ, ako turbina sve vreme radi sa minimalnom snagom od 60 MW, odnosno 4012,5 GJ, ako radi sa maksimalnom snagom 125 MW. Dakle, promenom izlazne snage turbine može se bitno uticati na energetski bilans skladišta vodonika.

Scenario 3

Na slici 8 prikazan je godišnja proizvodnja gasne elektrane sa satnim odbirkom kada je zapreminski udeo vodonika u mešavini gasova 70%.



Slika 8. Scenario 3 - Proizvodnja električne energije gasne elektrane "Morava"

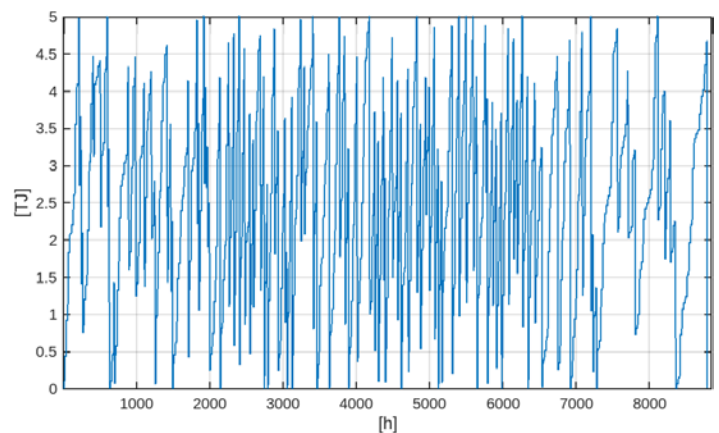
Tabela 3. Godišnja proizvodnja električne i toplotne energije gasne elektrane "Morava" i godišnji utrošak goriva u Scenariju 3

Godišnja proizvodnja gasne elektrane (GWh)	Godišnji utrošak vodonika (TJ)	Godišnji utrošak prirodnog gasa (TJ)	Broj radnih sati u toku godine (h)	Godišnja prizvednja toplotne energije (TJ)
11,549	86,505	37,073	107	82

U tabeli 3 prikazane su brojne vrednosti ukupne godišnje proizvodnje električne i toplotne energije, kao i utrošak goriva i

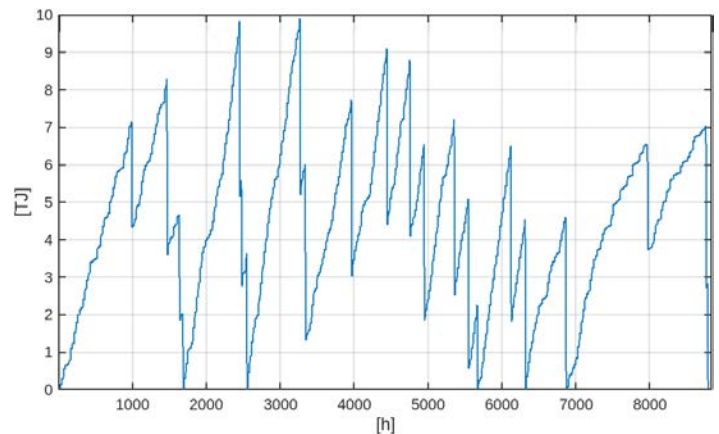
broj radnih sati gasne elektrane. Kao što je očekivano, u ovom scenariju dobija se najmanja količina električne i toplotne energije, što je posledica ograničene proizvodnje vodonika. Povećanje proizvodnje vodonika može se ostvariti povećanjem instalisane snage solarne elektrane, što će biti opisano u nastavku teksta. Drugi način da se ostvari veća proizvodnja vodonika je korišćenje efikasnijih modela elektrolizera, solarnih panela, ali i upotreba bifacijalnih modula.

Treba primetiti da se povećanjem udela vodonika u mešavini gasova dolazi do učestalijeg punjenja i pražnjenja skladišta, što se može videti na slici 9. Ako se pogleda letnji period može se videti da do uključenja elektrane u pogon dolazi na svakih 3-4 dana. U cilju ostvarenja stabilnosti elektroenergetskog sistema od interesa bi bilo postići dugoročnije skladištenje energije. To se može postići povećanjem skladišta vodonika, ali treba napomenuti da je to veoma skupo.

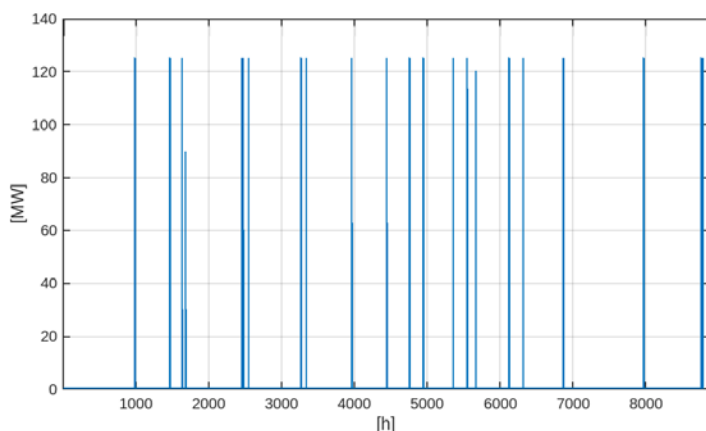


Slika 9. Scenario 3 - Energetski bilans skladišta vodonika kapaciteta 5 TJ

Poređenja radi, na slici 10 prikazan je energetski bilans skladišta vodonika kada je njegov maksimalni energetski kapacitet 10 TJ. Na slici 11 vidi se i godišnji raspored proizvodnje gasne elektrane. Primećuje se da se sa povećanjem skladišta dobija manji broj uključenja elektrane i samim tim postiže se dugoročnije skladištenje energije, dok ukupna proizvedena električna energija ostaje ista.



Slika 10. Energetski bilans skladišta vodonika kapaciteta 10 TJ u Scenariju 3



Slika 11. Proizvodnja električne energije gasne elektrane “Morava” u Scenariju 3, sa kapacitetom skladišta vodonika od 10 TJ

IV MOGUĆNOST PROŠIRENJA PROIZVODNIH KAPACITETA SOLARNE ELEKTRANE

Ako proizvodni kapaciteti solarne elektrane na pepelištu ostanu nepromenjeni, postepenim povećanjem udela vodonika u mešavini goriva i smanjenjem udela prirodnog gasa doći će do smanjenja ukupne godišnje proizvodnje elektrane “Morava”. Kako bi se povećala količina električne energije proizvedene iz zelenog vodonika mora se obezbediti proizvodnja veće količine zelene energije. U ovom delu teksta predloženo je povećanje instalisane snage solarne elektrane na 50 MWp.

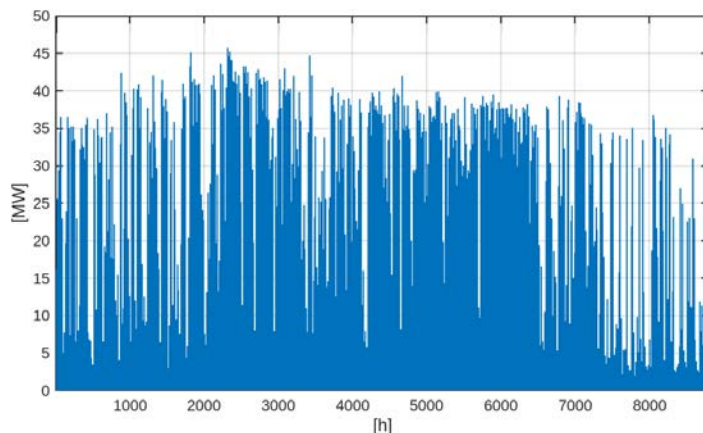
Biće predstavljena dva scenarija koja se koja će se bazirati na velikom udelu vodonika u mešavini korišćenog goriva, i to:

- scenario A - podrazumeva slučaj kada će udeo vodonika biti 70%,
- scenario B - podrazumeva da se gasna elektrana pogoni isključivo zelenim vodonikom.

Proširenje proizvodnih kapaciteta zahtevao bi da se obezbedi dodatna površina u blizini pepelišta termoelektrane “Morava” kako bi se instalisana snaga solarne elektrane povećala za 20 MWp. Sa istočne strane pepelišta nalazi uglavnom poljoprivredno zemljište čiju bi uzurpaciju trebalo izbeći. Dakle, treba razmotriti iskorišćenje zemljišta zapadno od pepelišta do Velike Morave. Tu se ne smeju zanemariti i mogući problemi koji mogu nastati usled izlivanja reke i mogućnost plavljenja tog područja, kao i postojanje biljnog rastinja. Uzimajući u obzir navedene poteškoće koje se mogu javiti na datoj lokaciji, kao i to da bi bilo potrebno uzurpirati neprihvatljivo veliku površinu zemljišta može se pribeci sledećem rešenju. Pretpostavljajući jednovremenu proizvodnju većeg broja solarnih elektrana njihova zbirna proizvodnja od 50 MW može se dovesti na ulaz elektrolizera i time povećati proizvodnja vodonika. S obzirom na novu solarnu elektranu u blizini Lapova, koja je nedavno puštena u pogon, a čija snaga iznosi 9,9 MW, može se očekivati da bi ovakvo proširenje bilo realno ostvarivo. Naravno, povećanjem energije dobijene iz solarnih izvora mora se povećati i proizvodni kapacitet vodonika kako bi se dodatna solarna energija iskoristila. S tim u vezi, snaga kompleksa za proizvodnju vodonika povećana je sa 30 na 50 MW. Usled već napomenutih gubitaka u PV sistemu i u ovom slučaju se može u određenoj

meri smanjiti maksimalna snaga elektrolizera bez da se utiče na proizvodnju vodonika.

Proizvodnja solarne elektrane u PLEXOS softveru se modeluje pomoću .csv datoteke koja sadrži vrednosti u relativnim jedinicama sa satnom rezolucijom. Jednostavnom promenom maksimalnog kapaciteta solarne elektrane sa 30MWp na 50MWp dobija se novi godišnji dijagram proizvodnje solarne elektrane sa slike 12. Ukupna godišnja proizvodnja solarne elektrane iznosi 64,713GWh.

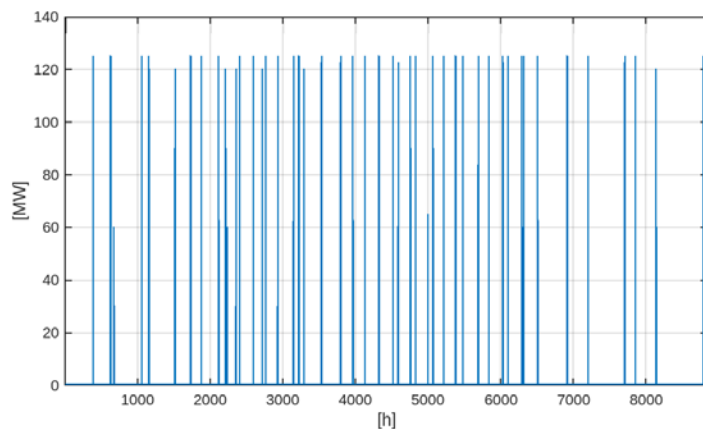


Slika 12. Proizvodnja solarne elektrane instalisane snage 50 MWp

Scenario A

Proširenje proizvodnih kapaciteta ima za cilj da se postigne karbon neutralna proizvodnja električne energije. Zato će u scenariju A biti prikazan slučaj kada udeo vodonika čini 70% mešavine gasa, što predstavlja veliki korak u tranziciji ka potpuno obnovljivoj energiji.

Na slici 13 je prikazana proizvodnja električne energije u gasnoj elektrani, dok su u tabeli 4 prikazane ukupna godišnja proizvodnja gasne elektrane i utrošak goriva, kao i broj radnih sati i ukupna godišnja proizvedena toplotna energija. U odnosu na scenario 3, gde je zapreminski udeo vodonika takođe bio 70%, ostvareno je povećanje proizvedene električne energije za 7,735 GWh, a broj radnih sati je povećan za 87.

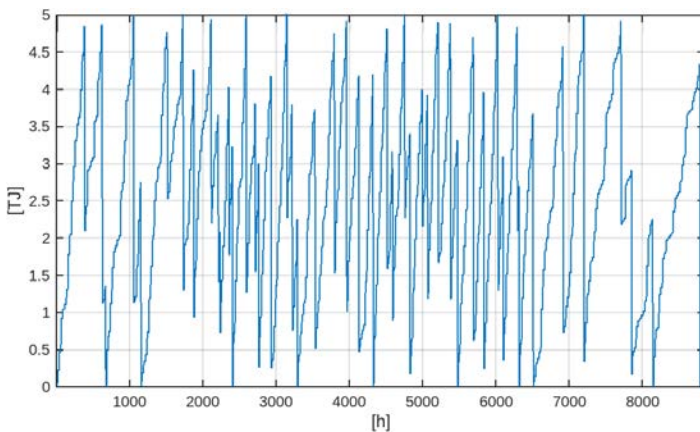


Slika 13. Scenario A - Proizvodnja električne energije gasne elektrane “Morava”

Tabela 4. Godišnja proizvodnja električne i toplotne energije gasne elektrane “Morava” i godišnji utrošak goriva u Scenariju A

Godišnja proizvodnja gasne elektrane (GWh)	Godišnji utrošak vodonika (TJ)	Godišnji utrošak prirodnog gasa (TJ)	Broj radnih sati u toku godine (h)	Godišnja proizvodnja toplotne energije (TJ)
19,284	144,44	61,902	194	136,919

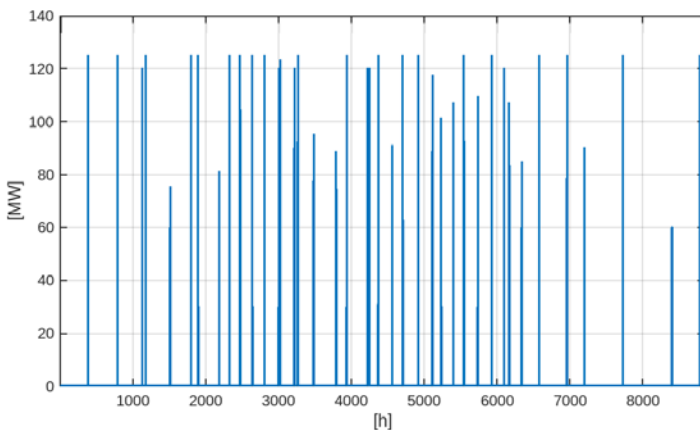
Celokupan, elektrolizom dobijen, vodonik koji je proizveden će biti utrošen u toku jedne godine. Bilans skladišta vodonika maksimalnog kapaciteta 5TJ prikazan je na slici 15. Za dalju analizu bilo bi od koristi uraditi simulaciju na duži vremenski period od 1 godine kako bi se sagledalo ponašanje ovakvog kompleksa u budućnosti.



Slika 15. Scenario A - Energetski bilans skladišta vodonika kapaciteta 5TJ

Scenario B

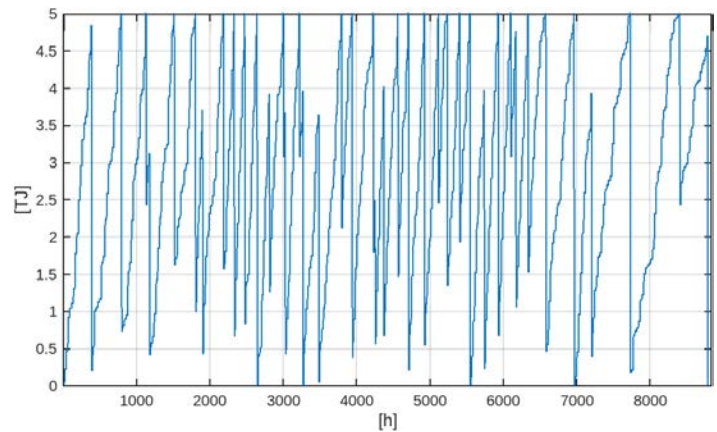
U ovom odeljku biće prikazana analiza scenarija u kojem je ostvarena proizvodnja zelenog vodonika i proizvodnja potpuno zelene energije dobijene sagorevanjem tog vodonika u gasnoj elektrani. Na slici 16 data je proizvodnja gasne elektrane sa satnim odbirkom.



Slika 16. Scenario B - Proizvodnja električne energije gasne elektrane “Morava”

Usled oblačnosti koja je izražena tokom poslednjih meseci

posmatrane 2020. godine proizvodnja solarne elektrane je niska, što za posledicu ima i nisku proizvodnju vodonika. Na slici 17, gde je prikazan energetski bilans skladišta vodonika, može se videti da je potreban vremenski period da se skladište napuni veoma dug, stoga nije neočekivano što je gasna elektrana u tom period puštena u pogon svega nekoliko puta.



Slika 17. Scenario B - Energetski bilans skladišta vodonika kapaciteta 5TJ

Ako se pogleda tabela 5 može se primetiti da se u ovom scenariju ostvaruje veća godišnja proizvodnja gasne elektrane u poređenju sa scenariom 3 gde je udeo vodonika bio 70%. Ovo je direktna posledica proširenja kapaciteta solarne elektrane. Takođe se vidi da je usled drugačijeg rasporeda uključenja i isključenja elektrane u ovom scenariju postignut veći broj radnih sati nego u scenariju 2, kada je udeo vodonika 50%.

Tabela 5. Godišnja proizvodnja električne i toplotne energije gasne elektrane “Morava” i godišnji utrošak goriva u Scenariju B

Godišnja proizvodnja gasne elektrane (GWh)	Godišnji utrošak vodonika (TJ)	Godišnji utrošak prirodnog gasa (TJ)	Broj radnih sati u toku godine (h)	Godišnja proizvodnja toplotne energije (TJ)
13,499	144,44	0	159	95,843

V ZAKLJUČAK

U ovom radu dat je predlog koncepta iskorišćenja postojeće infrastrukture TE “Morava” i okolnog zemljišta koje je poljoprivredno neupotrebljivo nakon njegovog dugogodišnjeg korišćenja za odlaganje i skladištenje uglja. Osnovne komponente ovakvog sistema su: solarne elektrane na mestu pepelišta, sistem za elektrolizu vode i proizvodnju vodonika, skladište vodonika i sistem gasna turbina - generator za proizvodnju električne energije. Koncept takođe podrazumeva sakupljanje i iskorišćenje toplotne energije kako bi se povećala efikasnost datog kompleksa. U poglavlju III prikazana je analiza postepenog prelaska sa fosilnih goriva na zeleni vodonik. Može se ostvariti značajna proizvodnja električne energije koja se može plasirati u periodu večernjeg vršnog opterećenja. Sa trenutnim trendom porasta instalisanih kapaciteta solarnih panela može se očekivati da će doći do naglog pada cene električne energije proizvedene iz solarnih panela zbog jednovremenosti njihove

proizvodnje. Konačni cilj ovog rada je da pokaže da ovakav kompleks može proizvoditi potpuno zelenu energiju i pomoći u dekarbonizaciji elektroenergetskog sistema.

U cilju sagledavanja uticaja koji različiti udeo vodonika u smeši gasova može imati na proizvodnju gasne elektrane u poglavlju III analizirana su tri scenarija. Može se zaključiti da se učestanost puštanja gasne elektrane u pogon, kao i ukupna proizvedena električna energija, smanjuje sa povećanjem procentualnog udela vodonika u smeši gasova. Utrošak vodonika direktno zavisi od izlazne snage gasne turbine. S obzirom na to da gasna turbina ima širok opseg izlazne snage, detaljnijim modelovanjem potrošnje može se dobiti drugačiji dijagram proizvodnje gasne turbine što će uticati na promenu dijagrama energetskog bilansa skladišta vodonika. Glavni nedostatak pristupa u poglavlju III jesu veoma učestalo punjenje i pražnjenje skladišta vodonika, čime se postiže samo kratkoročno skladištenje električne energije.

U poglavlju IV, predložena su dva scenarija koja podrazumevaju proširenje solarne elektrane, a da pri tome skladište vodonika ostane istog kapaciteta. Zaključuje se da se na ovaj način može postići veća proizvodnja električne energije, ali ne i njeno dugoročnije skladištenje. Šta više, fluktuacije energije skladišta vodonika postaju učestalije i intenzivnije.

Kao potpuno karbon neutralan scenario, analiziran je scenario B, u poglavlju IV, gde je primenjeno gorivo za pogon gasne turbine bio isključivo zeleni vodonik. Analiza je dala sledeće rezultate:

- ukupna proizvodnja gasne elektrane: 13,5 GWh,
- ukupna godišnja proizvedena toplotna energija: 95,8 TJ,
- ukupan proizvedeni i utrošeni vodonik: 144,4 TJ.

Treba istaći da se dugoročno skladištenje, od nekoliko meseci ne može postići skladištenjem vodonika u vidu gasa, kao što je opisano na početku teksta. Dva su razloga za to. Prvi je ekonomska neisplativost, a drugi je nedostupnost odgovarajućeg prostora koji bi bio potreban za to sezonsko skladište. Sezonsko skladište moglo bi se postići upumpavanjem vodonika u podzemne iscrpljene naftne bušotine koje se mogu naći u Braničevkom okrugu ili proizvodnjom i skladištenjem zelenog amonijaka koji ima bolje hemijske karakteristike od vodonika.

Na osnovu dobijenog broja radnih sati gasne elektrane može se konstatovati da investicija za izgradnju infrastrukture ne bi bila opravdana. Kako bi se taj nedostatak kompenzovao gasna elektrana bi mogla raditi isključivo na prirodni gas u bilo kom periodu dana, kada to sistemu bude bilo potrebno. Takođe, maksimalni kapacitet elektrolizera bi se mogao koristiti u toku obdanice kada postoji višak energije u sistemu zbog agregiranih solarnih panela. Tako uskladišten vodonik mogao bi se trošiti u

toku noći čime bi se postiglo izmeštanje proizvodnje iz dnevnog perioda u noćni.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] 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>
- [2] Aščerić, M., Džodić, K., Đurišić, Ž. Uticaj integracije vetroelektrana na smanjenje inercije u elektroenergetskom sistemu Srbije, in *Proc. 22nd IEEE International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 98-103, 15-17 March 2023.
- [3] Radovanović, M., Đurišić, Ž. Optimalno planiranje balansne rezerve za pokrivanje debalansa u proizvodnji vetroelektrana u Južnom Banatu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 38-46, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.38R>
- [4] Koprivica, M., Đurišić, Ž. Poboljšanje predikcije proizvodnje vetroelektrana u Južnom Banatu kombinovanjem pojedinačnih prognoza pomoću modela veštačke inteligencije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 54-60, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.54K>
- [5] Nasser, M., Hassan, H. Thermo-economic performance maps of green hydrogen production via water electrolysis powered by ranges of solar and wind energies, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 60, 103424, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103424>
- [6] Nasser, M., Megahed, T. F., Ookawara, S., Hassan, H. Performance evaluation of PV panels/wind turbines hybrid system for green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic, *Energy Conversion and Management*, Vol. 267, 115870, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115870>
- [7] Mićović, M., Stojanović, M., Aščerić, M., Lazović, Đ., Đurišić, Ž. Komparativna analiza različitih tehnoloških rešenja fotonaponske elektrane na pepelištu TE Morava, in *Proc. XXI Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, Jahorina, Istočno Sarajevo, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, pp. 39-44, 16-18. mart 2022. <https://infotech.etf.ues.rs.ba/zbornik/2022/radovi/O-2-3.pdf> [pristupljeno 08.06.2023]
- [8] Manigandan, S., Praveenkumar, T.R., Ryu, J. I., Nath Verma, T., Pugazhendhi, A. Role of hydrogen on aviation sector: A review on hydrogen storage, fuel flexibility, flame stability, and emissions reduction on gas turbines engines, *Fuel*, Vol. 352, 129064, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129064>
- [9] Goldmeer, J. Power to Gas: Hydrogen for Power Generation, GEA33861, https://www.ge.com/content/dam/gepower/global/en_US/documents/fuel-flexibility/GEA33861%20Power%20to%20Gas%20-%20Hydrogen%20for%20Power%20Generation.pdf [pristupljeno 08.06.2023]

AUTORI/AUTHORS

Mina Đimić - dipl. inž. elektrotehnike i računarstva, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, dm223190m@student.etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0009-0019-462X](https://orcid.org/0009-0009-0019-462X)

dr Željko Đurišić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2048-0606](https://orcid.org/0000-0003-2048-0606)

Perica Stančević - dipl. inž. elektrotehnike i računarstva, Go2Power Consulting, perica.stancevic@go2power.eu, ORCID [0009-0000-6366-8874](https://orcid.org/0009-0000-6366-8874)