

**PROGNOZA PROIZVODNJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA OSNOVU METEOROLOŠKIH PARAMETARA****FORECAST OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT PRODUCTION BASED ON METEOROLOGICAL PARAMETERS**Marija Milivojević, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratka sadržaj** – Predmet istraživanja ovog rada jeste praćenje prognoze meteoroloških parametara, stvaranje modela korelacije meteoroloških parametara i proizvodnje i određivanje modela za prognozu proizvodnje fotonaponske elektrane FTNI u Novom Sadu.

**Ključne reči:** Solarna energija, Fotonaponska elektrana, Prognoza proizvodnje

**Abstract** – The aim of this paper is monitoring the meteorological parameters forecast, creating the correlation model of meteorological parameters and production and determination of the model of generation forecast.

**Keywords:** Solar energy, PV power plant, Generation forecast.

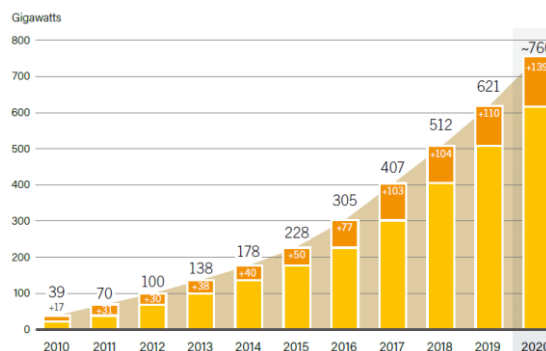
**1. UVOD**

Obnovljivi izvori energije (OIE) predstavljaju oslonac čovečanstva u borbi sa negativnim efektima gasova staklene bašte (posebno CO<sub>2</sub>), koji se očituju u sve većim klimatskim promenama. Najčešće se koriste hidroenergija, energija vetra sunca, biomase, mora i geotermalna energija. Njihova transformacija u električnu energiju omogućava da se sve energetske potrebe ljudi obezbeđuju na ekološki prihvatljiv način i bez izraženih nuzefekata [1].

Za brzu popularizaciju i široko korišćenje, najpogodnija je solarna energija, koja se na jednostavan i jeftin način može transformisati u električnu ili toplotnu energiju. U ovom radu će biti razmatrana njena konverzija u električnu energiju, čiju osnovu čini foto-električni efekat, odnosno foto-naponska (FN) ćelija.

Rapidan napredak industrije i tehnologije proizvodnje FN ćelija poslednjih godina, rezultirao je tržišno prihvatljivim cenama komponenti FN sistema, a takođe i velikim rastom instaliranih kapaciteta.

Trenutno u svetu ima 760 GW FN elektrana sa dobrim daljim perspektivama razvoja (slika 1), dok se u Srbiji planira do 100 MW u narednih desetak godina [2,3]. Stoga je proizvodnja iz solarnih FN elektrana jedna od najperspektivnijih i najviše razvijajućih područja primene obnovljive energije.



Slika 1. Instalirani kapaciteti FN elektrana u svetu [2]

Sa tehnno-ekonomskog aspekta, solarna energija je najbrže rastuća obnovljiva tehnologija i sektor sa najvećim stepenom investicija [4]. Ulaganje u solarne elektrane je isplativo, jer ova postrojenja imaju niske troškove održavanja, male zahteve za dodatno angažovanje radnika, visoku pouzdanost, dugotrajn životni vek (25-30 god.), te stabilan i predvidiv rad, pa sigurno donosi prihod [5].

Iz gore pomenutih razloga vidi se da FN elektrane dobijaju sve veći značaj u savremenim elektroenergetskim sistemima (EES) i da se njihovom pravilnom i pouzdanom radu poklanja sve veća pažnja. Jedan od aspekata rada u EES-u predstavlja i pouzdano planiranje proizvodnje bazirano na kratkoročnim ili dugoročnim prognozama.

U svetu je razvijeno više različitih metoda za prognoziranje rada FN elektrana, a tri najpoznatije su statistička-hronološka (statistical-time series), fizička (physical) i kombinovana (ensemble) metoda. One koriste savremene metode veštačke inteligencije (statistička), satelitskog snimanja i obrade slike (fizička) [6,7]. Međutim, one su veoma kompleksne, zahtevaju složene algoritme i precizne ulazne podatke. Stoga su potrebne neke jednostavnije metode prihvatljive tačnosti.

Cilj ovog rada je da se na osnovu posmatranja raspoloživih meteoroloških parametara utvrdi stepen njihove korelacije sa proizvodnjom FN elektrane, odrede najrelevantniji parametri i razvije dovoljno dobar model za prognozu proizvodnje FN elektrane koristeći kratkoročnu ili dugoročnu meteorološku prognozu.

**2. SOLARNI POTENCIJAL SRBIJE**

Broj časova sunčevog zračenja na teritoriji Srbije iznosi između 1.500 i 2.200 časova godišnje. Prosečan intenzitet sunčevog zračenja je od 1,1 kWh/m<sup>2</sup>/dan na severu do 1,7 kWh/m<sup>2</sup>/dan na jugu – tokom januara, a od 5,9 kWh/m<sup>2</sup>/dan do 6,6 kWh/m<sup>2</sup>/dan – tokom jula.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red.prof.

Prosečna vrednost energije zračenja iznosi od 1.200 kWh/m<sup>2</sup>/godišnje u severozapadnoj Srbiji, do 1.550 kWh/m<sup>2</sup>/godišnje u jugoistočnoj Srbiji, dok u centralnom delu iznosi oko 1.400 kWh/m<sup>2</sup>/godišnje. Srbija ima znatno veći broj časova sunčevog zračenja nego većina evropskih zemalja, a najbolji uslovi su u jugoistočnom delu naše zemlje [8,9].

### 3. ZNAČAJ KVALITETNOG I JEDNOSTAVNOG MODELA PROGNOZE

Potrebe za preciznom prognozom proizvodnje FN elektrane povećavaju se razvojem FN elektrana i njihovim sve većim udelom u energetske bilansima. Time se postiže povećanje pozdanosti i smanjenje troškova, sigurnije upravljanje elektroenergetskim mrežama, efikasnije trgovanje električnom energijom dobijenom iz FN elektrane i dr. [10]. Dodatno, predviđanje dovodi do smanjenja broja jedinica u stanju pripravnosti i smanjenju operativnih troškova rada u celom sistemu [11]. Posebno, ono predstavlja mogućnost adekvatnijeg upravljanja u slučaju agregiranja više manjih FN elektrana u virtuelne elektrane, jer se tada može umanjiti negativan uticaj promenljivosti sunčevog zračenja [11,12]. Takođe, na tržištu električne energije greška u prognozi može da ima velike finansijske posledice ukoliko znatno odstupa od prijavljenih količina proizvodnje za dan unapred. Zato je odvelike važnosti da prognostički modeli budu kvalitetni, odnosno da ih odlikuje tačnost i preciznost.

Osim što je kvalitet prognostičkog modela izuzetno bitan, od velikog je značaja i njegova jednostavnost. Cilj je da se stvori model koji zadovoljava po kvalitetu, a koji će funkcionisati sa malim brojem ulaznih parametara, odnosno meteoroloških podataka (temperatura, oblačnost, vlažnost, iradijacija, itd.). Veliki broj ulaznih parametara, zbog svoje brojnosti, predstavljaju opterećenje za računarski model, bazu podataka i zahtevaju veoma skup hardver.

Tačnost modela predviđanja proizvodnje FN energije može se povećati korišćenjem velikog broja ulaznih vektora. Međutim, računski troškovi i složenost će takođe biti povećani zbog agregacije velikog broja ulaznih parametara. Stoga je dizajniranje modela predviđanja sa optimalnim brojem ulaznih parametara na osnovu korelacije od najveće je važnosti [13].

### 4. PREDLOG MODELA ZA PROGNOZU PROIZVODNJE

Na osnovu podataka o solarnom potencijalu razmatrane lokacije, proračuna, ali i istorijskih podataka o promeni iradijacije tokom sunčanih sati u razmatranom periodu godine, kao i relevantnih meteoroloških podataka dobijenih prognozom, odnosno kombinacijom fizičkog i statističkog pristupa prognoze, može se uočiti određeni šablon promene solarne iradijacije i tako pretpostaviti vrednosti solarne iradijacije za neki određeni dan za koji treba izvršiti prognozu proizvodnje.

Te vrednosti, kao i vrednosti temperature vazduha, predstavljaju ulazne podatke u Matlab/Simulink model FN elektrane. Za ulazne podatke u model odabrani su upravo solarna iradijacija i temperature, jer se njihov uticaj na proizvodnju FN elektrane pokazao kao

najznačajniji među svim ostalim meteorološkim parametrima, odnosno pokazali su najsnažniju korelaciju sa izlaznom snagom elektrane.

Dakle, model za prognozu proizvodnje FN elektrane podrazumeva određivanje, odnosno prognozu, ulaznih parametara u Matlab/Simulink model date elektrane (temperatura vazduha i solarno zračenje). Zatim se, na osnovu unetih ulaznih podataka dobijaju izlazni podaci, odnosno tražena, prognozirana proizvodnja elektrane.

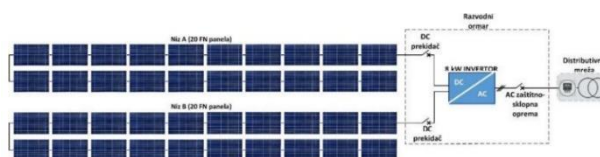
### 5. FN ELEKTRANA FTN1 KAO MESTO ZA PRIMENU I PROVERU METODA

Predloženi model za prognozu proizvodnje FN elektrane primenjen je, a zatim i proveren, u slučaju FN elektrane FTN1. Ova elektrana nalazi se u Novom Sadu i puštena je u rad oktobra 2011. god., kao prva zvanično priključena FN elektrana na distributivnu mrežu EPS-a. Postavljena je na ravnom krovu zgrade Fakulteta tehničkih nauka (FTN), iznad dela u kojem se nalaze amfiteatri, biblioteka i čitaonica. Iako je raspoloživa površina krova 1.100 m<sup>2</sup>, usled problema senčenja od strane okolnih objekata, samo je severni deo pogodan za postavljanje panela. Realizovana je fiksna noseća konstrukcija, tako da su paneli okrenuti prema jugu sa nagibom od 30° [14]. Lokacija FN elektrane FTN1 prikazana je na slici 2.



Slika 2. Lokacija FN elektrane FTN1 i izgled ravnog krova na kom su postavljeni paneli [14]

FN elektrana FTN1 direktno je povezana na distributivnu mrežu. Sastoji se od FN panela, invertora i zaštitne i sklopne opreme sa DC i AC strane. FN paneli organizovani su u dva niza od po 20 polikristalnih FN panela koji su postavljeni pod uglom od 30° u odnosu na površinu krova. Paneli su preko DC prekidača povezani na posebne ulaze invertora. Na AC strani invertora (ka mreži) nalaze se AC zaštitna i sklopna oprema i dvosmerno brojilo aktivne snage [14]. Struktura opisane FN elektrane data je na slici 3.



Slika 3. Prikaz strukture FN elektrane FTN1 [14]

Pojedinačne nominalne snage panela su 240 Wp, dok je ukupna instalirana snaga ove elektrane 9,6 kW, a nominalna izlazna snaga invertora je 8 kW [14].

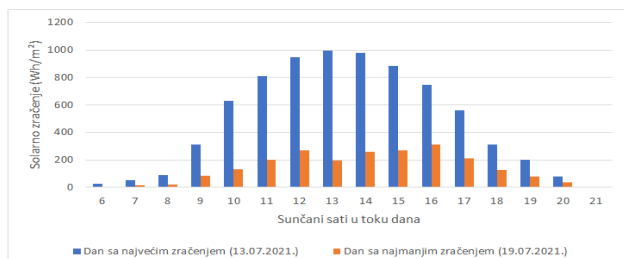
## 6. REZULTATI PRIMENJENOG METODA

Simulacija rada FN elektrane FTN1 izvršena je za period od sedam dana, počevši od 13.07.2021. i zaključno sa 19.07.2021. Tokom ovog perioda praćena je vremenska prognoza, odnosno meteorološki faktori, kao što su temperatura vazduha, brzina vetra, vlažnost, padavine i oblačnost, kao i solarna iradijacija na lokaciji razmatrane elektrane. Simulacija je izvršena pomoću Matlab/ Simulink modela FN elektrane FTN1 [15]. Kao ulazni podaci u model elektrane unose se izmerena solarna iradijacija i temperature vazduha, na osnovu kojih se kao odziv modela, odnosno izlazni podatak, dobija izlazna snaga FN elektrane.

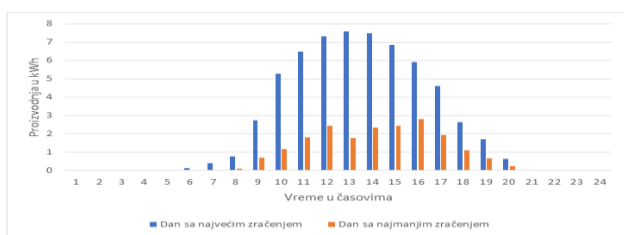
U razmatranom periodu, kao dan sa najvećim solarnim zračenjem, zabeležen je 13.07.2021. Ukupna vrednost intenziteta sunčevog zračenja u toku tog dana iznosila je 7,62 kWh/m<sup>2</sup>. Najviša temperatura vazduha u periodu dnevne svetlosti, odnosno u periodu kada je bilo sunčevog zračenja na panele, iznosila je 38°C, a najniža 25°C.

Dan 19.07.2021. zabeležen je kao dan sa najmanjim sunčevim zračenjem ukupne vrednosti 2,206 kWh/m<sup>2</sup>. Najviša temperatura vazduha u toku tog dana u period dnevne svetlosti iznosila je 25°C, a najniža 20°C.

Vrednosti solarnog zračenja tokom sunčanih sati i proizvodnja FN elektrane u danima sa najvećim i najmanjim zračenjem prikazane su na slikama 4 i 5, respektivno.



Slika 4. Solarno zračenje tokom sunčanih sati u danu sa najvećim i najmanjim zračenjem



Slika 5. Proizvodnja FN elektrane FTN1 dobijena simulacijom za dane sa najvećim i najmanjim solarnim zračenjem

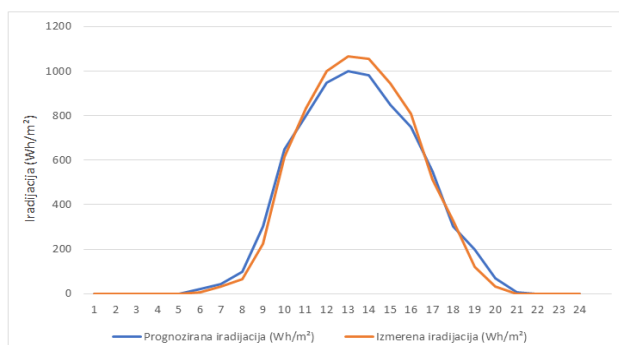
Na datim slikama se može uočiti da proizvodnja elektrane postoji isključivo tokom sunčanih sati i proporcionalna je iradijaciji.

## 7. PROCENA TAČNOSTI METODA

Sa ciljem provere verodostojnosti modela za prognozu proizvodnje FN elektrane FTN1 izvršeno je poređenje rezultata prognoze za određeni dan u budućnosti i

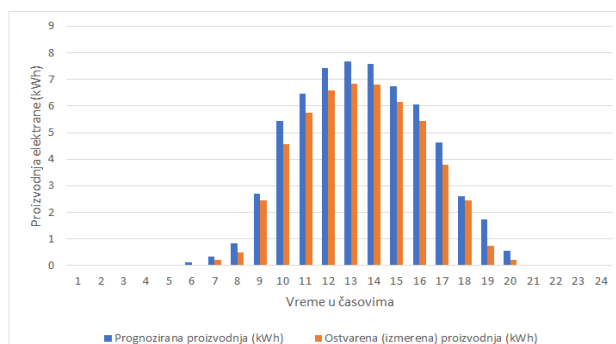
ostvarene proizvodnje za isti dan. Podaci o ostvarenoj proizvodnji dobijaju se merenjem ostvarene proizvodnje na samoj FN elektrani koja se razmatra. Kao dan za koji je vršena prognoza i provera dobijenih rezultata izabran je 31.07.2021. Vremenska prognoza za dati dan izvršena je pet dana ranije pre izabranog datuma, u cilju prikupljanja meteoroloških podataka potrebnih za prognozu proizvodnje.

Na slici 6 vidi se odnos prognozirane i stvarne, tj. izmerene solarne iradijacije za dan 31.07.2021. Prognozirana vrednost iradijacije bila je nešto veća od izmerene u prvim i poslednjim sunčanim satima tog dana, a nešto manja od merene iradijacije u toku sati sa najvećom iradijacijom. Takođe, se može videti da su se u pojedinim časovima prognozirana i merena iradijacija gotovo podudarale.



Slika 6. Prognozirana i izmerena iradijacija za dan 31.07.2021.

Na slici 7 prikazane su prognozirana i ostvarena, tj. merena proizvodnja elektrane, dana 31.07.2021. Proizvodnja dobijena pomoću modela za prognozu proizvodnje tokom svih sunčanih sati razmatranog dana je nešto veća od ostvarene proizvodnje čije su merenjem na elektrani. U pojedinim časovima odstupanja su bila veća, a u pojedinim neznatna.



Slika 7. Prognozirana i ostvarena (merena) proizvodnja za dan 31.07.2021.

Razlozi zbog kojih se javljaju određena odstupanja merenih i prognoziranih vrednosti, jesu i odstupanja merenih i prognoziranih veličina koje se koriste kao ulazni parametri u model, tj. iradijacije, temperature ambijenta, ali i ostalih meteoroloških parametara koji utiču na proizvodnju FN elektrane.

Radi određivanja tačnosti predloženog prognostičkog modela proračunata je srednja kvadratna greška, na osnovu prognoziranih vrednosti proizvodnje koje su dobijene pomoću predloženog modela i podataka o ostvarenoj



proizvodnji dobijenih merenjem (dana 31.07.2021.). Srednja kvadratna greška (RMSE, *Root-Mean-Square Error*) određena je izrazom:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{i\_prognozirano} - x_{i\_mereno})^2}{N}} \quad (1)$$

gde  $x_{i\_prognozirano}$  označava prognoziranu proizvodnju elektrane za svaki sat tokom razmatranog dana,  $x_{i\_mereno}$  označava merenu vrednost ostvarene proizvodnje elektrane za svaki sat tokom tog dana, a sa N je označen ukupan broj sati tokom dana kada je vršeno merenje.

Srednja kvadratna greška izračunata prema izrazu (1) iznosi 0,504.

Naravno, ova greška, a time i tačnost modela, dosta zavise od tačnosti meteorološke prognoze, koja može biti različita (pa i nedopustivo velika), a na osnovu koje se biraju vrednosti ulaznih parametara modela. Primenom predloženog modela prognoze za dan 31.07.2021., vidi se da je predviđena proizvodnja veća u odnosu na ostvarenu (slika 7). To odstupanje zavisi i od tačnosti meteorološke prognoze, koja u pojedinim danima može biti veća ili manja, pa to predstavlja rizik predložene metode. Kao posledica predviđanja veće proizvodnje od ostvarene, može doći do debalansa u EES, tj. dodatnih troškova u sistemu, pa i zahteva za plaćanje penala kao nadoknade štete kod kupaca električne energije. Za detaljniju analizu i ocenu nivoa pomenutog rizika, potrebno je posmatrati duži vremenski period (i do godinu dana), što je van opsega ovog rada, odnosno plan za dalje istraživanje.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu pokazano je da je moguće koristiti modele za prognozu proizvodnje FN elektrane sa ograničenim (manjim) brojem ulaznih parametara, koji su javno dostupni. Na osnovu rezultata simulacije, kao i na osnovu poređenja prognoziranih vrednosti proizvodnje, koji su dobijeni kao rezultat predloženog modela za proizvodnju, i merenih vrednosti ostvarene proizvodnje FN elektrane FTN1, predloženi prognostički model se ocenjuje kao dovoljno dobar za predviđanje približne proizvodnje FN elektrane za različite vremenske prilike.

Zaključuje se da je model FN elektrane FTN1 verifikovan, da dovoljno dobro opisuje stanje i ponašanje razmatrane elektrane i da se kao takav može koristiti u prediktivne svrhe, ali samo za približno predviđanje. Ipak, na osnovu proračunate greške, zaključuje se da je, kada je u pitanju tržište električne energije, veća tačnost prognoze ipak od velikog značaja.

## 9. LITERATURA

- [1] V. Katić, I. Kapetanović, N. Sarajlić, "Obnovljivi izvori električne energije", TEMPUS-CEFES, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [2] \*\*\*, "Renewables 2021 – Global status report", REN21, Paris, 2021. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf)
- [3] \*\*, "Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine", Sl. Glasnik RS br.101/2015, Beograd, 2015.

- [4] \*\*\*, "Global landscape of Renewable Energy Finance 2020", IRENA, Abu Dhabi, 2020.
- [5] G. Reikard, "Predicting solar radiation at high resolutions: a comparison of time series forecasts", Solar Energy, 2009; 83: pp.342–9.
- [6] S. Sobri et al., "Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review", Energy Conversion and Management, Vol.156, 2018, pp.459–497.
- [7] Ž. Stojanović, V.A. Katić, "Kratkoročna prognoza proizvodnje fotonaponske elektrane", Zbornik radova FTN, God. 36, br. 3, 2021, pp.468–471.
- [8] T. Pavlović et al., "Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia", Renewable and Sustainable Energy Rev., Vol.20, 2013, pp.201–218.
- [9] [http://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija\\_srbije.php](http://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_srbije.php)
- [10] Connecting the Sun-Solar Photovoltaics on the Road to Large Scale Grid Integration. EPIA, 2012.
- [11] J. Antonanzas, et al., "Review of photovoltaic power forecasting", Solar Energy, Vol.136, 2016, pp.78–111.
- [12] Mills, A.; Wiser, R. Implications of Wide-Area Geographic Diversity for Short-Term Variability of Solar Power; Technical Report LBNL-3884E; Lawrence Berkeley National Laboratory: Washington, DC, USA, Sept. 2010.
- [13] U.K. Das, et al., "Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review", Renewable and Sustainable Energy Review, Vol.88, 2017, pp.912–928
- [14] V.A. Katić, et al., "Realizacija krovne fotonaponske elektrane na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu", Tehnika, God.64, br.4, 2015, pp.655–662
- [15] Marija Joković, Vladimir Katić "Tehnike rekonstrukcije u fotonaponskim elektranama u slučaju senčenja panela", Zbornik radova FTN, God. 36, br. 3, 2021, pp.464–467.

## Kratka biografija:



**Marija Milivojević, dipl.inž.** rođena je 1995. god. u Novom Sadu. Srednju školu Gimnazija, završila je u Indiji, 2013. god. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije (OAS) upisala je školske 2013/2014. Na studijama se opredelila za modul Elektroenergetika elektroenergetski sistemi i diplomirala 2018. god. Master studije je upisala školske 2018/2019 god. na studijskom programu energetika, elektronika i telekomunikacije, modul Elektroenergetika distribuirani elektroenergetski resursi (MAS) i završila ih septembra 2021. god.



**Vladimir A. Katić, red.prof.** rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1978. god., a magistrirao i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. i 1991. god., respektivno. Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu, a oblasti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, kvalitet električne energije i električna vozila.