

Integracija vjetroelektrana u energetske sustav Republike Hrvatske

Juratović, Vladimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:552871>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vladimir Juratović

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Vladimir Juratović

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Goranu Krajačiću na uloženom trudu i pomoći prilikom pisanja ovog rada.

Vladimir Juratović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| |
|--|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje |
| Datum 19-09-2016 og |
| Klasa: 602-04/16-6/13 |
| Ur.broj: 15-1703-16-308 |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Vladimir Juratović Mat. br.: 0035190522

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Integracija vjetroelektrana u energetski sustav Republike Hrvatske**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Integration of wind power plants into Croatian power system**

Opis zadatka:

U Republici Hrvatskoj je trenutno u pogonu 417,95 MW vjetroelektrana, a Hrvatski operator tržišta energije ima još sklopljenih ugovora za projekte ukupne instalirane snage 326 MW. Prema projekcijama iz Stručnih podloga za izradu strategije niskouglijičnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje do 2030. s pogledom na 2050. godinu predviđeno je da će biti instalirano vjetroelektrana ukupne snage 2.000 MW u 2030. i 3.618 MW u 2050. Ostale dostupne studije i analize predviđaju i veće instalirane snage za 2050. godinu.

U radu je potrebno:

- Prikupiti i analizirati podatke o satnoj proizvodnji električne energije iz vjetroelektrana na različitim geografskim lokacijama u Republici Hrvatskoj za minimalno dvije kalendarske godine,
- usporediti prikupljene satne podatke o ostvarenoj proizvodnji električne energije s podacima o predviđenoj proizvodnji, proračunatoj na temelju prosječnih satnih brzina vjetera i ostalih meteoroloških podataka,
- računalnim programom EnergyPLAN, analizirati mogućnost integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske prema dostupnim planovima i strategijama za gradnju vjetroelektrana, analizu provesti sa satnim krivuljama za različite godine,
- predložiti minimalno dvije mjere za smanjenje „kritičnog viška proizvodnje električne energije“ za 2030. i 2050.


Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. travnja 2016.


Rok predaje rada:
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Položaj vjetroelektrana u energetsom sustavu Republike Hrvatske | 1 |
| 1.2. Problematika integracije vjetroelektrana u energetska sustav | 1 |
| 2. METODE I PODATCI..... | 4 |
| 2.1. Prikupljanje, analiza i usporedba korištenih podataka ostvarene i predviđene proizvodnje | 4 |
| 2.2. Grafički prikaz postupka prikupljanja, analize i usporedbe podataka ostvarene i predviđene proizvodnje..... | 5 |
| 2.3. Analiza mogućnosti integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske programom EnergyPLAN | 6 |
| 3. REZULTATI | 9 |
| 3.1. Analiza podataka ostvarene proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana..... | 9 |
| 3.1.1. Analiza ostvarene proizvodnje iz vjetroelektrana u 2015. godini..... | 9 |
| 3.1.2. Analiza ostvarene proizvodnje iz vjetroelektrana u prvih šest mjeseca 2016. godine..... | 11 |
| 3.2. Analiza podataka predviđene proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana | 14 |
| 3.2.1. Analiza predviđene proizvodnje za 2007. godinu..... | 14 |
| 3.2.2. Analiza predviđene proizvodnje za 2008. godinu..... | 19 |
| 3.2.3. Analiza predviđene proizvodnje za 2009. godinu..... | 24 |
| 3.3. Usporedba prikupljenih satnih podataka o ostvarenoj proizvodnji električne energije s podacima o predviđenoj proizvodnji, proračunatoj na temelju prosječnih satnih brzina vjetra i ostalih meteoroloških podataka | 29 |
| 3.3.1. Usporedba ostvarene proizvodnje iz vjetroelektrana za razdoblje 1.1.2015. – 30.6.2016. s predviđenom proizvodnjom za razdoblje 1.6.2007. – 30.3.2009. ... | 29 |
| 3.4. Analiza mogućnosti integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske | 32 |
| 3.4.1. Utjecaj povećanja snage vjetroelektrana na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske | 32 |
| 3.4.2. Analiza elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske prema scenarijima iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske | 35 |
| 3.5. Mjere smanjenja „kritičnog viška proizvodnje električne energije“ za 2030. i 2050. godinu | 39 |
| 3.5.1. Korištenje pametnog punjenja baterijskih vozila..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 3.5.2. Pohrana energije reverzibilnim hidroelektranama kao mjera smanjenja CEEP-a | |
| 41 | |
| 4. ZAKLJUČAK..... | 43 |
| LITERATURA..... | 44 |
| PRILOZI..... | 45 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Lokacije vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj [2] | 2 |
| Slika 2. | Grafički prikaz procesa rješavanja problema | 5 |
| Slika 3. | Krivulje trajanja korištenih distribucija proizvodnje vjetroelektrana..... | 7 |
| Slika 4. | Očitana dnevna proizvodnja 2015. godine | 9 |
| Slika 5. | Krivulja trajanja dnevne proizvodnje 2015. godine | 10 |
| Slika 6. | Mjesečni faktor iskorištenja snage 2015. godine | 10 |
| Slika 7. | Standardna devijacija dnevne proizvodnje 2015. godine | 11 |
| Slika 8. | Dnevna proizvodnja u prvih šest mjeseca 2016. godine | 11 |
| Slika 9. | Mjesečna proizvodnja prvih šest mjeseca 2016. godine | 12 |
| Slika 10. | Mjesečni faktor iskorištenja snage prvih šest mjeseca 2016. godine | 12 |
| Slika 11. | Prosječna dnevna proizvodnja za prvih šest mjeseca 2016. godine | 13 |
| Slika 12. | Prosječna, najveća i najmanja standardna devijacija satne proizvodnje za prvih šest mjeseca 2016. godine | 13 |
| Slika 13. | Predviđena satna i satna prosječna proizvodnja 2007. godine | 14 |
| Slika 14. | Kumulativno predviđanje proizvodnje 2007. godine | 14 |
| Slika 15. | Krivulja trajanja angažirane snage 2007. godine | 15 |
| Slika 16. | Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje za svaki promatrani mjesec 2007. godine | 15 |
| Slika 17. | Najveće pozitivne i negativne razlike u predviđanju proizvodnje u dva uzastopna sata..... | 16 |
| Slika 18. | Proračunata dnevna proizvodnja 2007. godine | 16 |
| Slika 19. | Proračunata mjesečna proizvodnja 2007. godine | 17 |
| Slika 20. | Proračunati faktor iskorištenja snage 2007. godine..... | 17 |
| Slika 21. | Predviđena proizvodnja u svakom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu za 2007. godinu | 18 |
| Slika 22. | Mogući udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju električnog opterećenja 2007. godine | 18 |
| Slika 23. | Predviđena satna i satna prosječna proizvodnja 2008. godine | 19 |
| Slika 24. | Kumulativno predviđanje proizvodnje 2008. godine | 19 |
| Slika 25. | Krivulja trajanja angažirane snage 2008. godine | 20 |
| Slika 26. | Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje za svaki promatrani mjesec 2008. godine | 21 |
| Slika 27. | Najveće pozitivne i negativne razlike u predviđanju proizvodnje u dva uzastopna sata..... | 21 |
| Slika 28. | Proračunata dnevna proizvodnja 2008. godine | 22 |
| Slika 29. | Mjesečna proizvodnja 2008. godine..... | 22 |
| Slika 30. | Proračunati faktor iskorištenja snage 2008. godine..... | 23 |
| Slika 31. | Predviđena proizvodnja u svakom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu za 2008. godinu | 23 |
| Slika 32. | Mogući udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju električnog opterećenja 2008. godine | 24 |
| Slika 33. | Predviđena satna i satna prosječna proizvodnja 2009. godine | 24 |
| Slika 34. | Kumulativno predviđanje proizvodnje 2009. godine | 25 |
| Slika 35. | Krivulja trajanja angažirane snage 2009. godine | 25 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 36. | Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje za svaki promatrani mjesec 2009. godine | 26 |
| Slika 37. | Najveće pozitivne i negativne razlike u predviđanju proizvodnje u dva uzastopna sata..... | 26 |
| Slika 38. | Proračunata dnevna proizvodnja 2009. godine | 27 |
| Slika 39. | Proračunata mjesečna proizvodnja 2009. godine | 27 |
| Slika 40. | Proračunati faktor iskorištenja snage 2009. godine..... | 28 |
| Slika 41. | Predviđena proizvodnja u svakom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu za 2009. godinu | 28 |
| Slika 42. | Mogući udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju električnog opterećenja 2009. godine | 29 |
| Slika 43. | Faktor iskorištenja snage predviđene i ostvarene proizvodnje..... | 30 |
| Slika 44. | Standardna devijacija predviđene i ostvarene proizvodnje | 30 |
| Slika 45. | Krivulja trajanja predviđene i ostvarene proizvodnje | 31 |
| Slika 46. | Kumulativna proizvodnja predviđene i ostvarene proizvodnje..... | 31 |
| Slika 47. | Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora..... | 32 |
| Slika 48. | „Kritični višak“ proizvodnje električne energije | 32 |
| Slika 49. | Emisije CO ₂ | 33 |
| Slika 50. | Uvoz električne energije..... | 35 |
| Slika 51. | Proizvodnja vjetroelektrana prema različitim scenarijima | 36 |
| Slika 52. | CEEP prema različitim scenarijima | 37 |
| Slika 53. | CO ₂ emisije prema različitim scenarijima..... | 38 |
| Slika 54. | Uvoz električne energije prema različitim scenarijima | 38 |
| Slika 55. | Smanjenje CEEP-a za NUR scenarij ovisno o potrošnji baterijskih vozila | 39 |
| Slika 56. | Smanjenje CEEP-a za NU1 scenarij ovisno o potrošnji baterijskih vozila..... | 40 |
| Slika 57. | Smanjenje CEEP-a za NU2 scenarij ovisno o potrošnji baterijskih vozila..... | 40 |
| Slika 58. | Smanjenje CEEP-a za NUR scenarij ovisno o skladištu energije i snazi pumpa RHE | 41 |
| Slika 59. | Smanjenje CEEP-a za NU1 scenarij ovisno o skladištu energije i snazi pumpa RHE | 42 |
| Slika 60. | Smanjenje CEEP-a za NU2 scenarij ovisno o skladištu energije i snazi pumpa RHE | 42 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Predviđena snaga vjetroelektrana za sve scenarije..... | 6 |
| Tablica 2. Bilanca sustava za dva različita sata u godini | 34 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------------|----------|--|
| $C_{Imp/exp}$ | MW | Kapacitet transmisijskih veza |
| C_{V2G} | MW | Kapacitet punjenja i pražnjenja baterija vozila |
| d_{Total} | MWh | Potrošnja električne energije |
| e_{CHP2} | MWh | Proizvodnja energije iz grupe 2 industrijskih CHP postrojenja |
| e_{CHP3} | MWh | Proizvodnja energije iz grupe 3 industrijskih CHP postrojenja |
| e_{CSHP} | MWh | Proizvodnja energije iz industrijskih CHP postrojenja |
| $e_{Geothermal}$ | MWh | Proizvodnja energije iz geotermalnih elektrana |
| e_{Hydro} | MWh | Proizvodnja energije iz hidroelektrana |
| e_{M-CHP} | MWh | Proizvodnja energije iz CHP postrojenja |
| $e_{Nuclear}$ | MWh | Proizvodnja energije iz nuklearnih elektrana |
| e_{PP} | MWh | Proizvodnja energije iz termoelektrana |
| e_{Res} | MWh | Proizvodnja energije iz obnovljivih izvora |
| e_{Res1} | MWh | Proizvodnja energije iz grupe 1 obnovljivih izvora |
| e_{Res2} | MWh | Proizvodnja energije iz grupe 2 obnovljivih izvora |
| e_{Res3} | MWh | Proizvodnja energije iz grupe 3 obnovljivih izvora |
| e_{Res4} | MWh | Proizvodnja energije iz grupe 4 obnovljivih izvora |
| e_{Total} | MWh | Proizvodnja električne energije bez termoelektrana |
| $e_{Turbine}$ | MWh | Proizvodnja energije iz reverzibilnih hidroelektrana |
| e_{V2G} | MWh | Energija prenesena iz baterija vozila u mrežu |
| e_w | MWh | Proizvodnja energije iz otpada |
| e_{w1} | MWh | Proizvodnja energije iz otpada, grupa 1 |
| e_{w2} | MWh | Proizvodnja energije iz otpada, grupa 2 |
| e_{w3} | MWh | Proizvodnja energije iz otpada, grupa 3 |
| $Stab_{Res1}$ | - | Udio proizvodnje iz grupe 1 obnovljivih izvora energije namjenjen za stabilizaciju |
| $Stab_{Res2}$ | - | Udio proizvodnje iz grupe 2 obnovljivih izvora energije namjenjen za stabilizaciju |
| $Stab_{Res3}$ | - | Udio proizvodnje iz grupe 3 obnovljivih izvora energije namjenjen za stabilizaciju |
| $Stab_{Res4}$ | - | Udio proizvodnje iz grupe 4 obnovljivih izvora energije namjenjen za stabilizaciju |
| $Stab_{Total}$ | - | Najmanji udio ukupne proizvodnje namjenjen za stabilizaciju mreže |
| $Stab_{TRANS}$ | - | Udio kapaciteta transmisijskih veza koje mogu sudjelovati u stabilizaciji |
| $Stab_{V2G}$ | - | Udio kapaciteta baterija namjenjen za stabilizaciju |
| $Stab_{Waste}$ | - | Udio proizvodnje iz otpada namjenjen za stabilizaciju |

SAŽETAK

Od prve vjetroelektrane u Republici Hrvatskoj puštene u pogon 2005. godine do sada vjetroelektrane su postale značajan proizvođač električne energije. Trenutna snaga instaliranih vjetroelektrana iznosi 428,15 MW, a dostupni planovi i strategije predviđaju veliko povećanje njihove snage, čak do 2000 MW za 2030. godinu i do 3618 MW za 2050. godinu. Stoga se u ovom radu analizira ostvarena proizvodnja energije iz vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj te se uspoređuje s proizvodnjom predviđenom mjerenjima brzine vjetra. Nakon toga se u programu EnergyPLAN analizira elektroenergetski sustav Republike Hrvatske prema planovima gradnje vjetroelektrana do 2030. i 2050. godine. Analizirana su kretanja CEEP-a, CO₂ emisija, udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji te uvoza električne energije, a za smanjenje CEEP-a su predložene i analizirane dvije mjere njegovog smanjenja kako bi se omogućio nesmetan razvoj vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj. Kao prva mjera njegovog smanjenja predložena je i analizirana upotreba pametnog punjenja električnih vozila za koje je pokazano da povećanje potrošnje električnih vozila koje koriste pametne mreže značajno smanjuje CEEP. Druga predložena i analizirana mjera smanjenja CEEP-a je povećanje snage i kapaciteta skladišta reverzibilnih hidroelektrana. Njihovim korištenjem kao skladišta energije i povećanjem njihove snage također se je postiglo smanjenje CEEP-a koje je nužno za provedbu planiranih strategija gradnje vjetroelektrana.

Ključne riječi: Vjetroelektrane, EnergyPLAN, CEEP, Energija, Predviđanje proizvodnje

SUMMARY

From 2005, when the first wind power plant was installed in the Republic of Croatia, until now, wind power plants have become significant suppliers of electricity. Currently, the capacity of installed wind power plants amounts to 428,15 MW, and the available plans and strategies predict big increase in their capacity, up to 2000 MW till 2030 and up to 3618 MW till 2050. For this reason, the wind power plant electricity production in the Republic of Croatia is analyzed and compared with the prediction for energy production based on the field wind measurements in this paper. Furthermore, Croatian power system based on current wind power plants building plans for year 2030 and 2050 is analyzed with the EnergyPLAN program. For that years CEEP, CO₂ emissions, import of electricity and renewable energy sources production are analyzed, and for reduction of CEEP two measures for reducing it are proposed in order to allow the unobstructed development of wind power plants in the Republic of Croatia. The first proposed measure of reducing it is using smart charging of electrical vehicles which is proven to reduce CEEP significantly with increase of electricity consumption of battery vehicles. The other proposed and analyzed measure of reducing CEEP is an increase in power and storage capacity of reversible hydro power plants. Their ability to store energy also resulted in reducing CEEP, that is necessary to carry out planned strategies of wind power plants integration.

Key words: Wind power plants, EnergyPLAN, CEEP, Energy, Prediction of power production

1. UVOD

1.1. Položaj vjetroelektrana u energetsom sustavu Republike Hrvatske

Republika Hrvatska je kao članica Europske Unije obvezna ispuniti ciljeve do 2030. godine u vidu smanjenja emisije stakleničkih plinova za 40 % u odnosu na 1990. godinu i udjela obnovljivih izvora u potrošnji od 27 %. Time je na značaju dobila izgradnja vjetroelektrana jer bi upravo one uz hidroelektrane i fotonaponske ćelije trebale proizvoditi najveći udio električne energije [1]. U lipnju 2016. u Hrvatskoj je u redovnom pogonu bilo 16 vjetroelektrana ukupne snage 428,15 MW, a s obzirom da je još ugovorom sklopljeno projekata snage 326 MW vidljiv je sve veći prodor vjetroelektrana u Hrvatskoj [2]. Prema različitim scenarijima iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougličnog razvoja Republike Hrvatske predviđa se između 1200 i 2000 MW snage instaliranih vjetroelektrana do 2030. godine i između 3158 i 3618 MW snage vjetroelektrana do 2050. godine čime vjetroelektrane postaju najveći proizvođač energije iz obnovljivih izvora.

1.2. Problematika integracije vjetroelektrana u energetska sustav

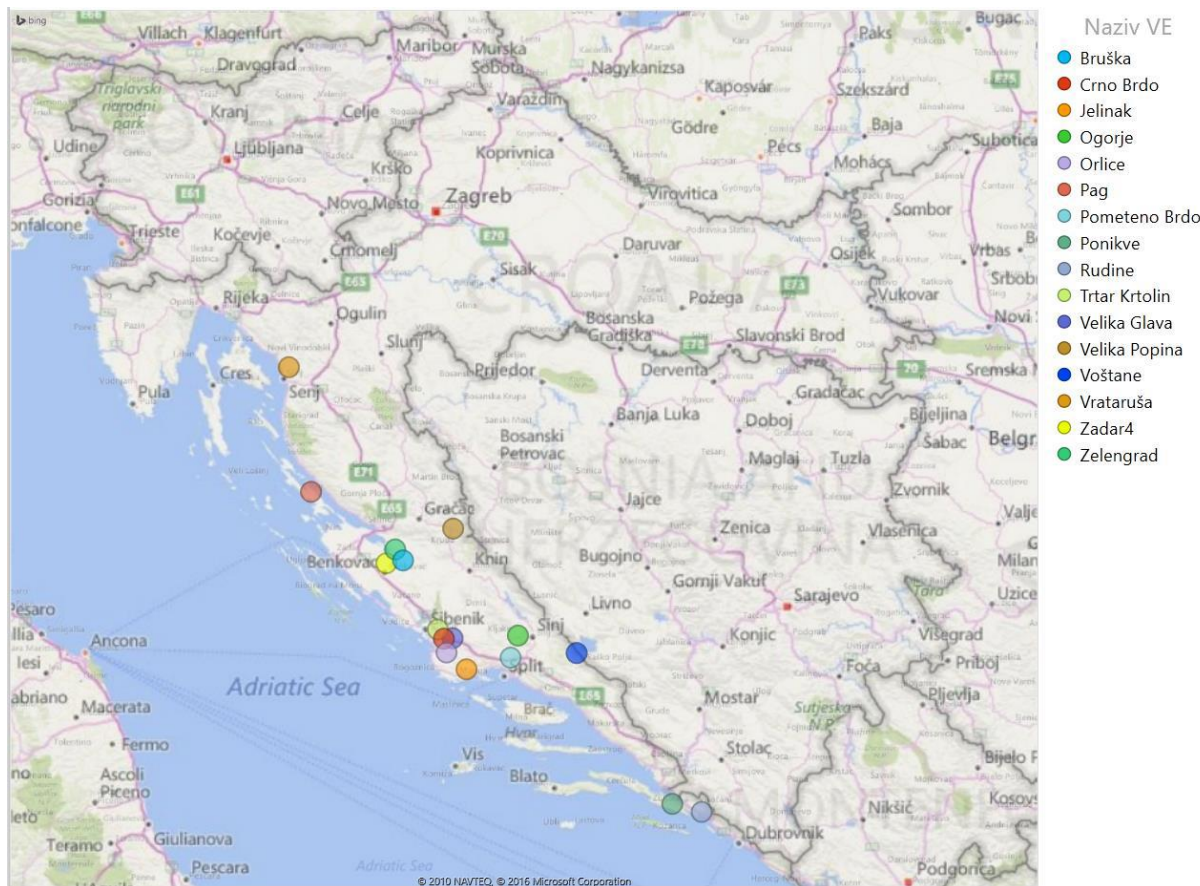
Pravilna integracija vjetroelektrana u energetska sustav izuzetno je bitna jer je kod njihovog uključivanja u sustav potrebno voditi računa o brojnim parametrima zbog specifičnosti proizvodnje energije iz vjetroelektrana.

Prvi čimbenik koji je bitan investitorima je vjetropotencijal lokacije na kojoj se gradi vjetropark. Prema atlasu vjetra Hrvatske [3] kojeg je izradio Državni hidrometeorološki zavod najveći vjetropotencijal postoji na području primorske i gorske Hrvatske, a tu se i nalaze sve vjetroelektrane u Hrvatskoj [Slika 1]. Kontinuiran i dovoljno jak vjetar nužan je za optimalan rad vjetroelektrana, ne samo zbog financijske isplativosti, nego i zbog stabilnijeg rada elektroenergetskog sustava.

Poznavanje precizne i pouzdane prognoze vjetra za dovoljno vremena unaprijed nužno je za izračun planirane proizvodnje. Na temelju toga se pravodobno rezervira sekundarna i tercijarna regulacija elektroenergetskog sustava te se dogovara prekogranična razmjena električne energije.

Povećavanjem kapaciteta vjetroelektrana nužno je osigurati dovoljne kapacitete primarne, sekundarne i tercijarne regulacije. Za to je vrlo dobra kombinacija vjetroelektrana sa hidroelektranama, a posebno akumulacijskim. Njihov rad se može planirati na svim

vremenskim razinama kako bi se optimirala ukupna proizvodnja. Ukoliko su nepovoljni hidrološki uvjeti zadatak uravnoteženja može pasti na termoelektrane čime se znatno povećavaju troškovi regulacije. Zbog toga što povećanjem instalirane snage vjetroelektrana može rasti cijena proizvodnje iz ostalih tipova elektrana, potrebno je to poskupljenje pripisati radu vjetroelektrana.



Slika 1. Lokacije vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj [2]

Cilj pisanja ovog rada je prepoznati probleme koji nastaju povećanom integracijom vjetroelektrana u energetski sustav Republike Hrvatske. U prvom koraku izvršila se analiza prikupljenih podataka o ostvarenoj proizvodnji i podataka o predviđenoj proizvodnji na temelju izmjerenih meteoroloških podataka. Nakon toga ti se podatci uspoređuju kako bi se saznala pouzdanost podataka iz povijesnih mjerenja brzine vjetra. U sljedećem dijelu ovog rada napravljena je analiza elektroenergetskog sustava po dostupnim strategijama za gradnju vjetroelektrana i utjecaj planirane izgradnje vjetroelektrana na „kritični višak“ proizvodnje električne energije (CEEP), proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, uvoz električne energije i CO₂ emisije. Svi proračuni su napravljeni za satne krivulje proizvodnje vjetroelektrana iz nekoliko različitih godina kako bi se ispitaio utjecaj meteoroloških prilika na

proizvodnju vjetroelektrana i na cijeli elektroenergetski sustav. Na kraju su predložene i analizirane dvije mjere smanjenja „kritičnog viška“ električne energije čime se otvara put još većoj integraciji vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske.

2. METODE I PODATCI

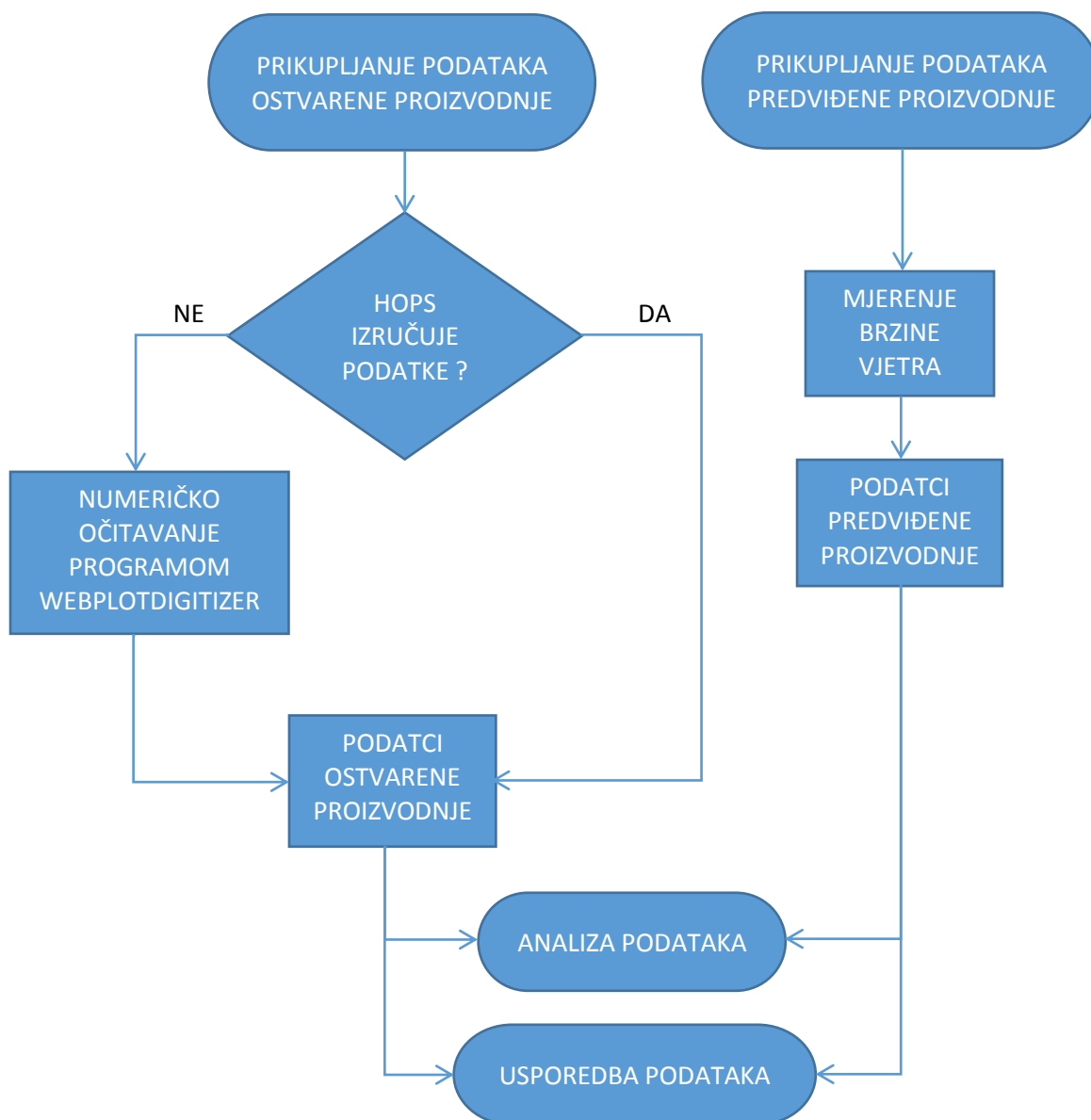
2.1. Prikupljanje, analiza i usporedba korištenih podataka ostvarene i predviđene proizvodnje

Za potrebe analize ostvarene proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana nije bilo moguće pribaviti podatke o satnoj proizvodnji iz vjetroelektrana za Republiku Hrvatsku, nego su korišteni pribavljeni podatci dnevnih proizvodnja. Na traženi upit HOPS (Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.) nije dostavio podatke, već su naveli baze u kojima bi podatci trebali biti objavljeni te su odgovorili da nisu nadležni za izdavanje tih podataka. Analiza je provedena iz podataka o dnevnim proizvodnjama energije iz vjetroelektrana, koji su očitani iz izvještaja proizvodnje objavljenih na internet stranicama HOPS-a. U tim izvještajima mogu se pronaći podatci proizvodnje iz vjetroelektrana za 2015. godinu [4] te za prvih šest mjeseca 2016. godine [2], [5], [6], [7], [8], [9] te će ti podatci biti analizirani. Kako bi dobili točne numeričke vrijednosti proizvedene energije koristio se besplatan program WebPlotDigitizer. Nakon postavljanja referentnih točaka, program automatski ili ručno očita tražene vrijednosti iz dostupnih dijagrama. Vrijednosti se spremaju u .CSV formatu te su analizirane programom Microsoft Excel.

Za analizu ostvarene proizvodnje koristili su se satni podatci temeljeni na terenskim mjerenjima brzine vjetra i ostalih podataka [10]. Ti meteorološki podaci su mjereni u vremenskim koracima od 10 minuta na visinama od 10, 30, 44 i 46 metra i odnose se na razdoblje od 1.6.2007. do 30.3.2009. Mjerenja vjetra su vršena na 10 lokacija u sklopu programa AWSERCRO, ali su mjerenja za jednu lokaciju odbačena zbog nedostatka mjerenih podataka. Lokacije se nalaze na području srednje i južne Dalmacije i nisu mjerodavne za cijelu Republiku Hrvatsku već samo za to područje. Ipak, to je područje na kojem je najveći vjetropotencijal i tu se nalazi većina vjetroelektrana pa će se kasnije ti podatci usporediti s ostvarenom proizvodnjom energije na području cijele Republike Hrvatske. Pretpostavljeno je da se na svakoj lokaciji nalazi vjetroagregat snage 3 MW te tada ukupna instalirana snaga iznosi 27 MW. S obzirom da je na kraju 2007. i 2008. godine bilo instalirano 17,2 MW vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj, kapacitet za koji je računato predviđanje proizvodnje iznosi 156,98 % kapaciteta koji su bili instalirani u tom trenutku. Na kraju 2009. godine je bilo instalirano 26,8 MW vjetroelektrana u Hrvatskoj, što približno odgovara kapacitetu od 27 MW za koji je računato predviđanje proizvodnje.

Kako bi se mogli usporediti podatci ostvarene i predviđene proizvodnje koji se ne odnose na isto razdoblje i isti instalirani kapacitet vjetroelektrana, svi podatci su svedeni na odgovarajući kapacitet vjetroelektrana („per unit“), a za svaki mjesec iz pojedine grupe podataka napravljena je prosječna vrijednost s kojom su vršene daljnje usporedbe.

2.2. Grafički prikaz postupka prikupljanja, analize i usporedbe podataka ostvarene i predviđene proizvodnje



Slika 2. Grafički prikaz procesa rješavanja problema

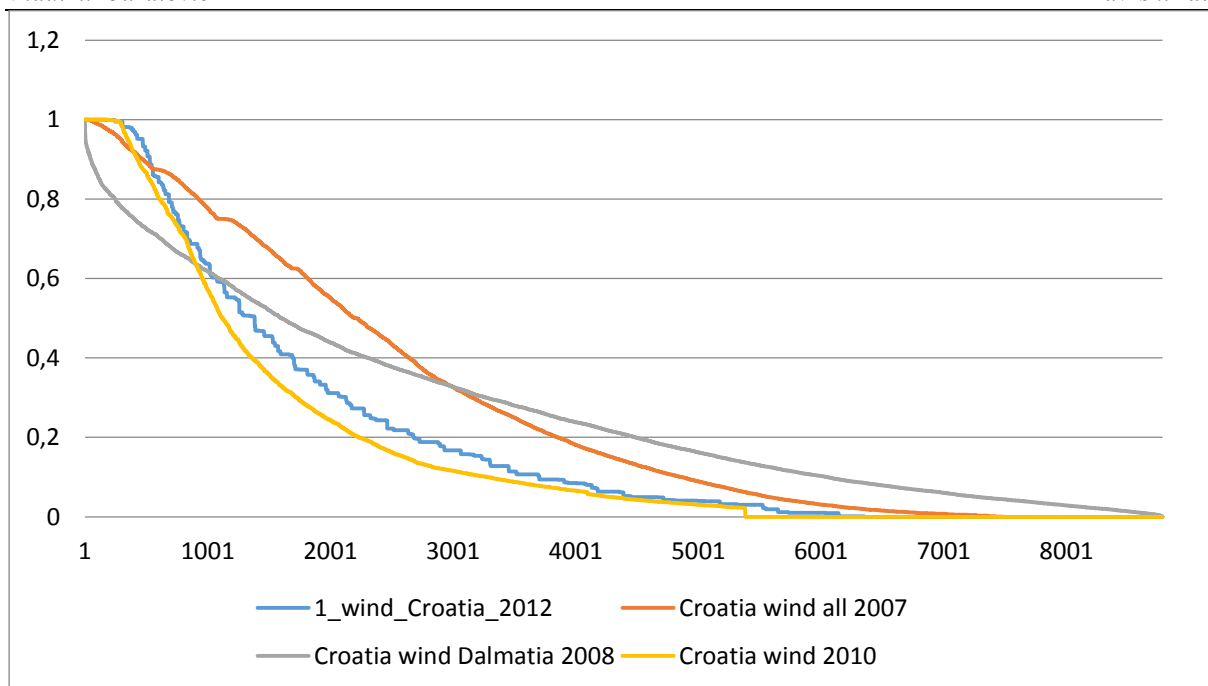
2.3. Analiza mogućnosti integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske programom EnergyPLAN

Analiza integracije vjetroelektrana napraviti će se prema predviđanjima iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougličnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje do 2030. s pogledom na 2050. godinu. Prema tome dokumentu postoje tri scenarija koji pretpostavljaju različite zakonodavne mjere, mogućnosti primjene novih tehnologija, kretanja gospodarske situacije, mjera energetske učinkovitosti, kretanja cijene CO₂ i drugih parametara koji utječu, između ostalog, i na različitu prodornost vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske. Ti svi parametri objedinjeni su u tri različita smjera, a to su Referentni scenarij (NUR), Scenarij postupne tranzicije (NU1) i Scenarij snažne tranzicije (NU2). Pregled predviđenih snaga instaliranih vjetroelektrana za sva tri scenarija dan je u Tablica 1.

Tablica 1. Predviđena snaga vjetroelektrana za sve scenarije

| Scenarij | Godina | Snaga [MW] |
|----------|--------|------------|
| NUR | 2020. | 744 |
| | 2030. | 1200 |
| | 2050. | 3168 |
| NU1 | 2020. | 744 |
| | 2030. | 1600 |
| | 2050. | 3158 |
| NU2 | 2020. | 744 |
| | 2030. | 2000 |
| | 2050. | 3618 |

Mogućnost integracije vjetroelektrana analizirana je u programu EnergyPLAN koji se koristi za analize elektroenergetskih sustava. Program vrši proračun na satnoj analizi za odabranu godinu te je pogodan za analize sustava s velikim udjelom obnovljivih izvora energije. Kao bazna godina odabrana je 2012. godina zbog toga što za nju postoje novi podaci o bilanci elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske. Različite krivulje satne distribucije korištene su kako bi se ispitala osjetljivost sustava na promjene meteoroloških uvjeta značajnih za proizvodnju energije iz vjetroelektrana, a na Slika 3 je popis korištenih krivulja i prikaz njihovih krivulja trajanja angažirane snage.



Slika 3. Krivulje trajanja korištenih distribucija proizvodnje vjetroelektrana

Model u EnergyPLAN-u je postavljen tako da je isključena mogućnost prekogranične razmjene energije te je sustav promatran kao zatvoreni. Udio proizvodnje namjenjen za stabilizaciju mreže u ukupnoj proizvodnji ($Stab_{Total}$) je postavljen na 50 %. Kapacitet vjetroelektrana je promatran u koracima od 100 MW za snagu do 1000 MW, u koracima od 200 MW za veće snage te za karakteristične točke vezane uz različite scenarije.

Prilikom analize utjecaja povećanja snage vjetroelektrana na elektroenergetski sustav, povećanje snage vjetroelektrana odnosi se na baznu 2012. godinu, a prilikom analize elektroenergetskog sustava prema dostupnim scenarijima iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske izrađeni su modeli za 2020., 2030. i 2050. godinu za svaki scenarij. Modeli za te scenarije odstupaju od stvarnih predviđanja zbog nedostatka informacija o pojedinim postrojenjima. Tako nije uzeta u obzir izgradnja novih postrojenja na biomasu, biopljin, geotermalnu energiju te su CCS termoelektrane promatrane kao obične termoelektrane. Uz to nije poznat raspored zamjene starih postrojenja novima i njihovo povećanje učinkovitosti. Te razlike najviše utječu na CO_2 emisije koje ovise o strukturi goriva i mogućnosti odvajanja i skladištenja CO_2 .

Osim što je analizirana mogućnost integracije vjetroelektrana prema različitim scenarijima, analizirano je i kretanje CEEP-a uz primjenu dviju mjera njegovog smanjenja. Prva mjera koja je analizirana je korištenje pametnog punjenja baterijskih vozila te je prikazano

smanjenje CEEP-a za sve scenarije ovisno o potrošnji energije baterijskih vozila. Maksimalni postotak automobila koji su u prometu je podešen na 20 %, postotak parkiranih automobila koji su povezani na mrežu je 70 %, a učinkovitost punjenja baterija je 90 %. Rezultati su pokazani za potrošnje električnih vozila od 2, 4, 6 i 8 TWh, a EnergyPLAN iz tih podataka izračuna snagu koja se može spremati u baterije i ona iznosi redom 229, 456, 684 i 912 MW za ove potrošnje električnih vozila.

Druga analizirana mjera smanjenja CEEP-a je povećanje snage i kapaciteta skladišta energije reverzibilnih hidroelektrana. Prikazani su rezultati za snage pumpa i turbina koje iznose 257,1/293,1 MW, 350/400 MW, 500/570 MW, 700/800 MW, 1000/1140 MW, 1300/1480 MW, dok kapaciteti skladišta energije iznose redom 2,93, 20, 30, 50, 100, 100 GWh.

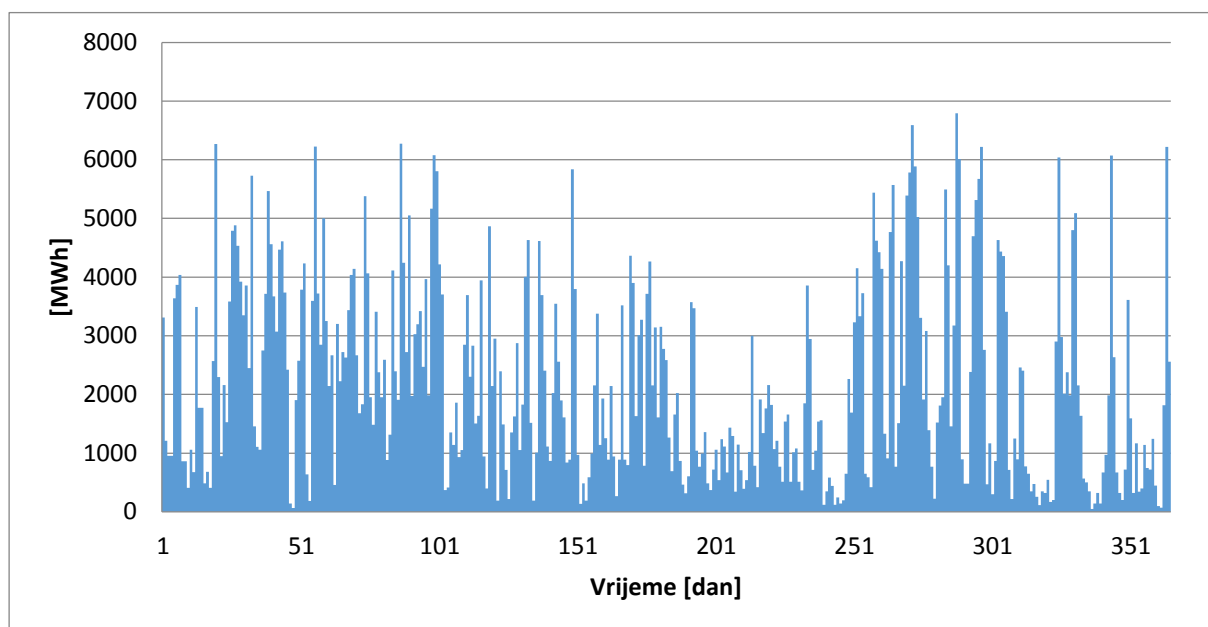
3. REZULTATI

3.1. Analiza podataka ostvarene proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana

3.1.1. Analiza ostvarene proizvodnje iz vjetroelektrana u 2015. godini

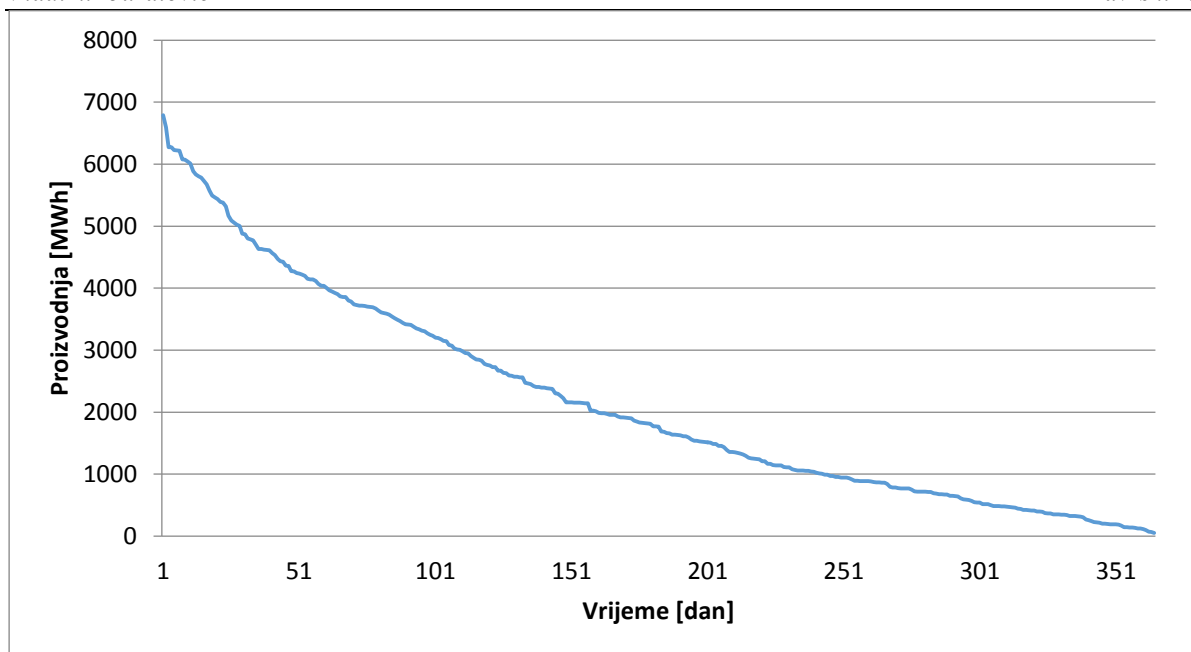
Na kraju 2015. godine u pogonu je bilo 428,2 MW vjetroelektrana, od čega je 81,7 MW instalirano tokom 2015. godine. Ukupno je proizvedeno 787,93 GWh energije. Najveća ostvarena satna proizvodnja iznosi 324,1 MWh a najmanja 0 MWh. Prosječna standardna devijacija satne proizvodnje iznosi 0,192 p.u.

Na Slika 4 je dan prikaz očitane dnevne proizvodnje 2015. godine na temelju kojeg su vršene daljnje analize proizvodnje za tu godinu. Najveća dnevna proizvodnja iznosi 6770 MWh.



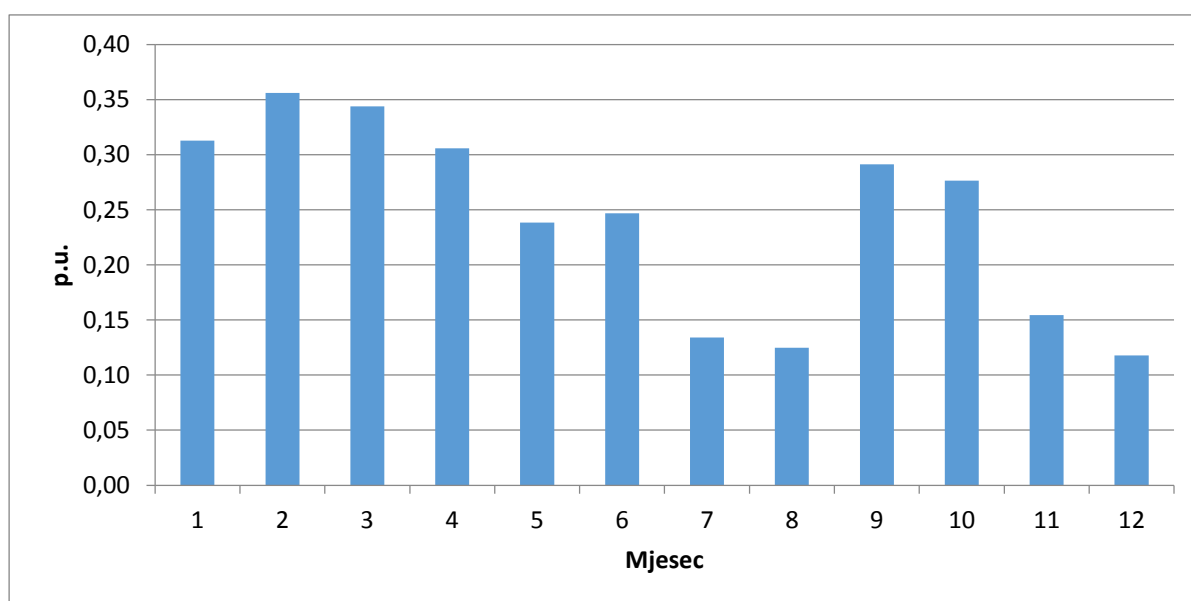
Slika 4. Očitana dnevna proizvodnja 2015. godine

Krivulja trajanja dnevne proizvodnje izračunata je iz očitanih podataka dnevne proizvodnje [Slika 5].



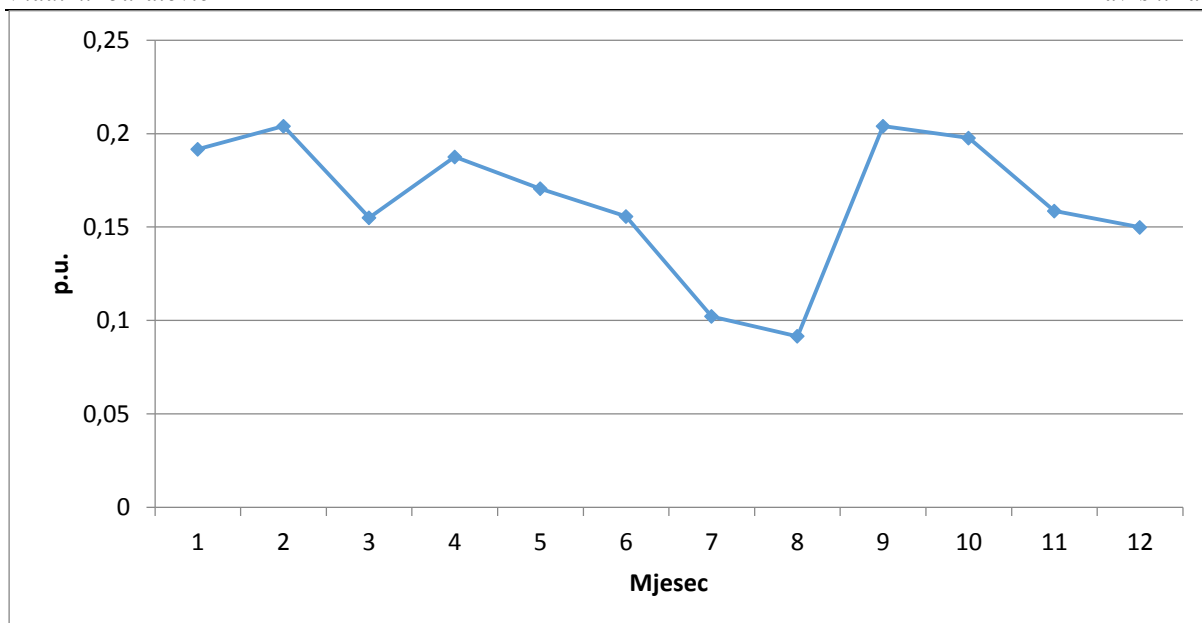
Slika 5. Krivulja trajanja dnevne proizvodnje 2015. godine

Očitano je mjesečni faktor iskorištenja snage te je prikazan na Slika 6. Osim što je nizak za srpanj i kolovoz, u studenom i prosincu je niži od predviđanja, što će biti prikazano kasnije.



Slika 6. Mjesečni faktor iskorištenja snage 2015. godine

Iz očitane dnevne proizvodnje izračunata je standardna devijacija dnevnih podataka i prikazana na Slika 7.

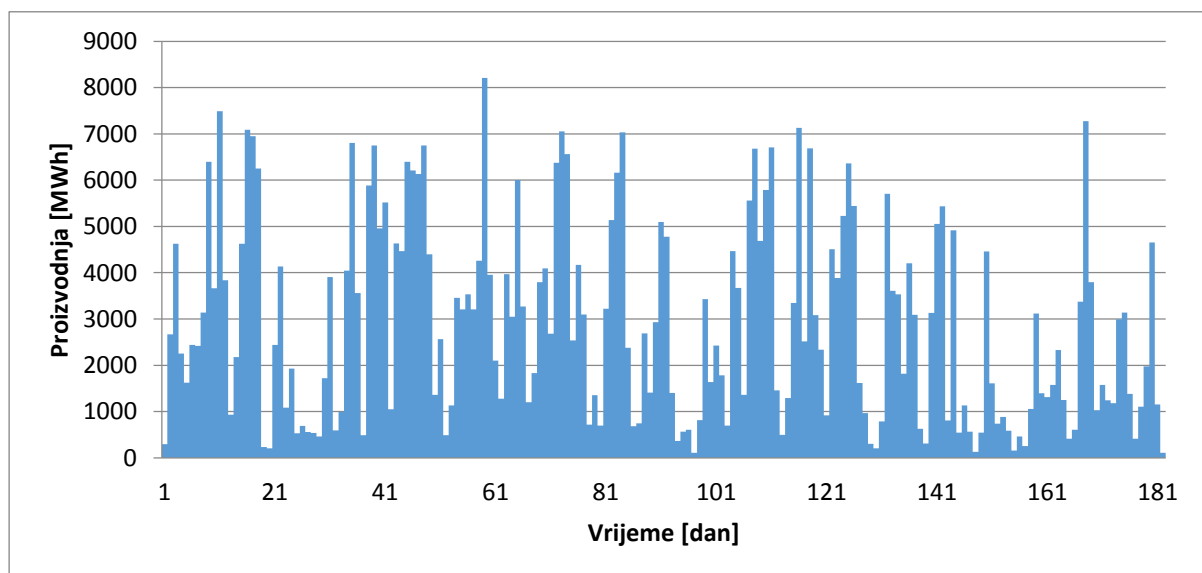


Slika 7. Standardna devijacija dnevne proizvodnje 2015. godine

3.1.2. Analiza ostvarene proizvodnje iz vjetroelektrana u prvih šest mjeseca 2016. godine

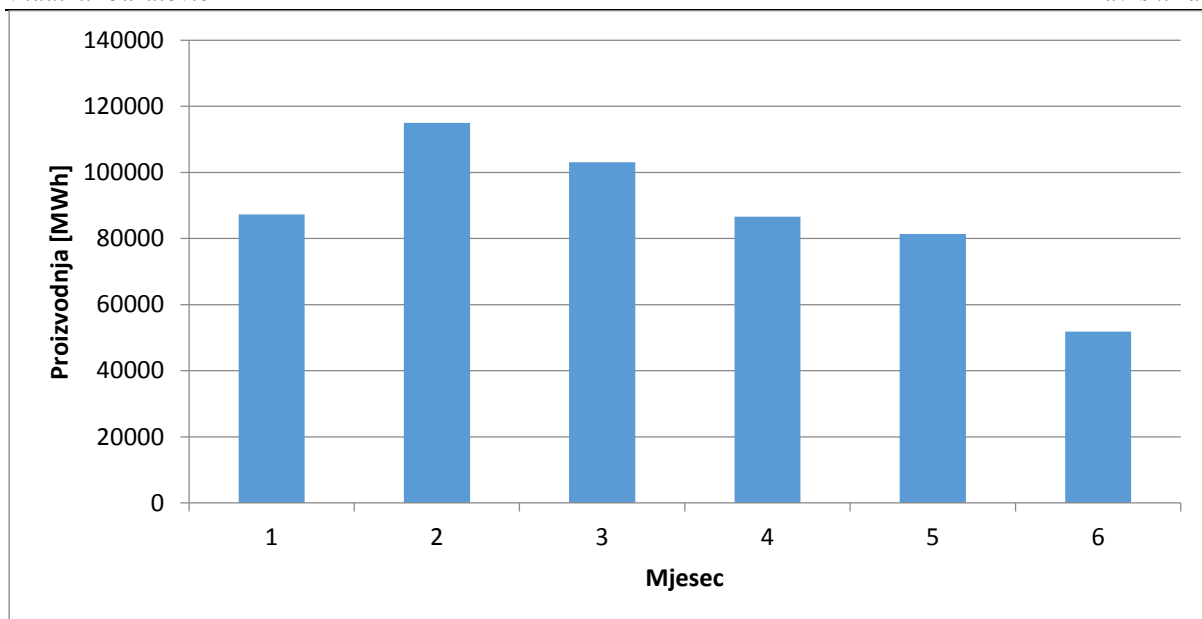
Tokom cijelog razdoblja instalirana snaga se nije mijenjala i iznosila je 428,15 MW.

Na Slika 8 prikazan je dijagram dnevne proizvodnje koja se kretala u rasponu od 0 MWh do 8210 MWh.



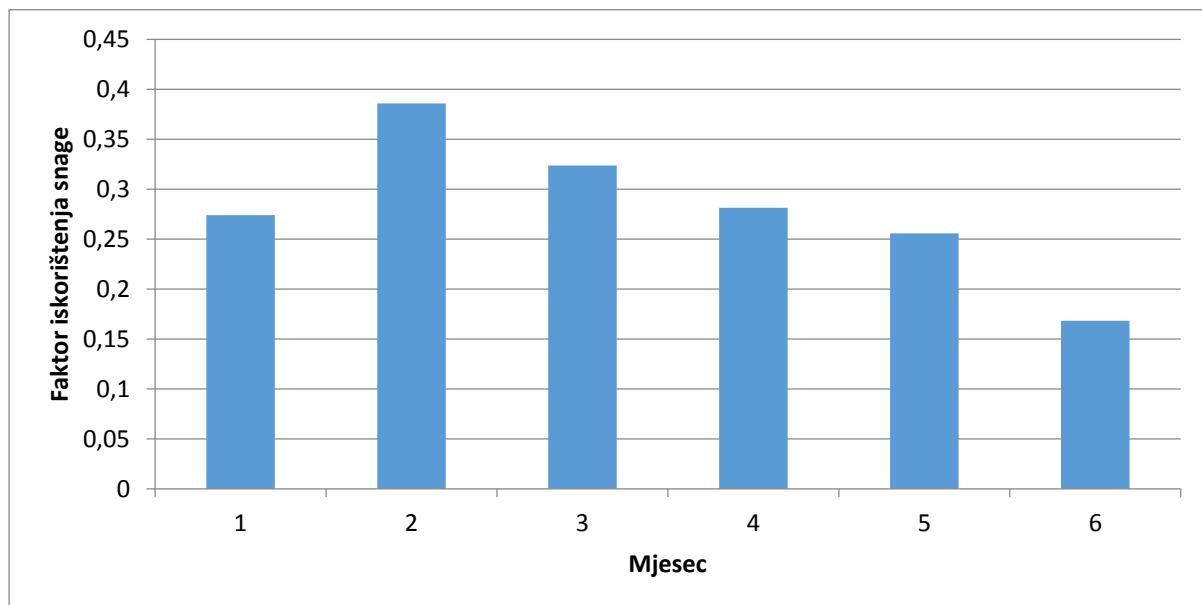
Slika 8. Dnevna proizvodnja u prvih šest mjeseca 2016. godine

Mjesečna proizvodnja se kretala od najmanjih 51832,51 MWh u lipnju do najvećih 114982 MWh u veljači.



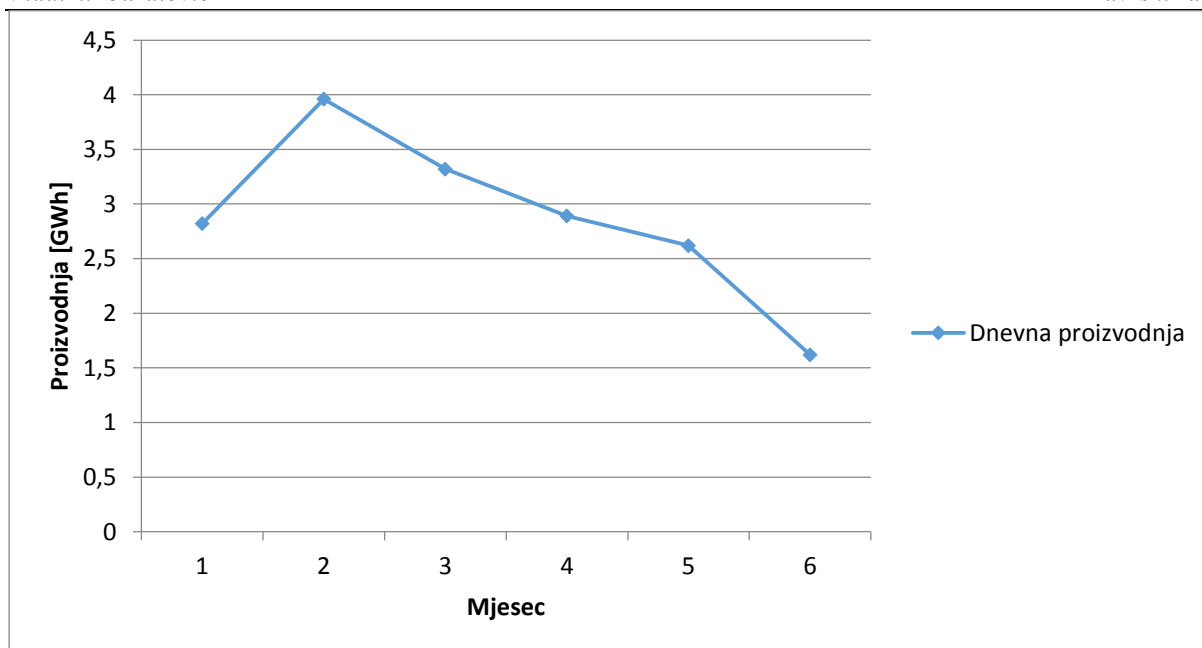
Slika 9. Mjesečna proizvodnja prvih šest mjeseca 2016. godine

Također je prikazan i mjesečni faktor iskorištenja snage [Slika 10]. Najveći je bio u veljači i iznosio je 0,3859.



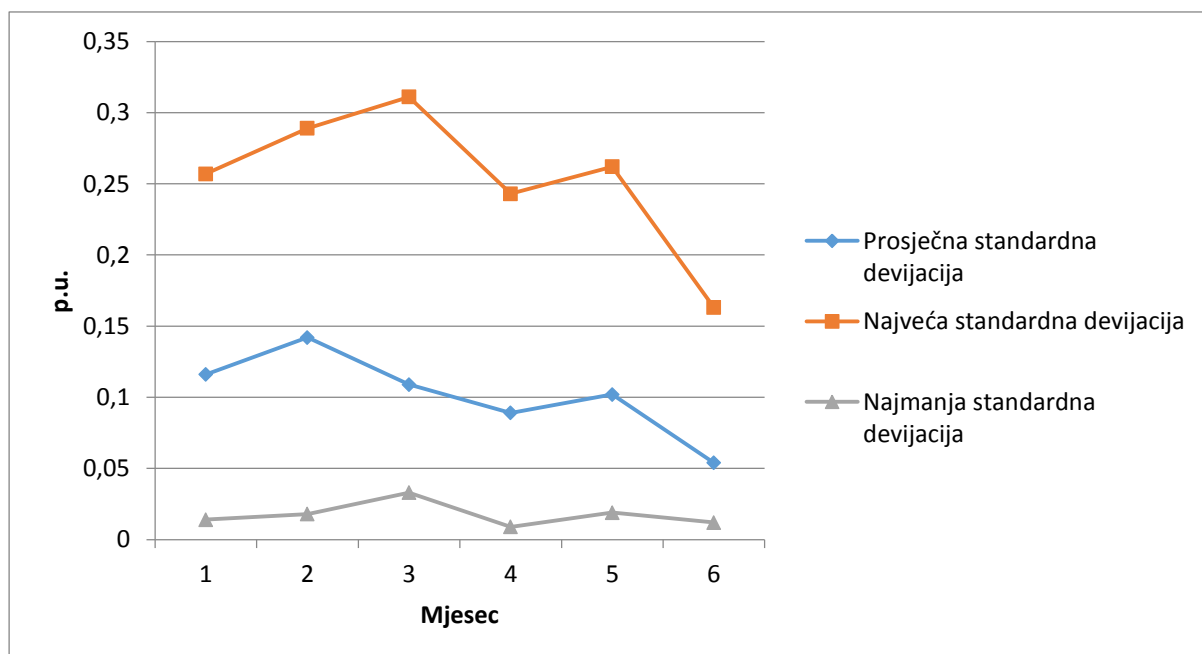
Slika 10. Mjesečni faktor iskorištenja snage prvih šest mjeseca 2016. godine

Prosječna dnevna proizvodnja je prikazana na Slika 11.



Slika 11. Prosječna dnevna proizvodnja za prvih šest mjeseca 2016. godine

Na Slika 12 su prikazane prosječna, najveća i najmanja standardna devijacija satne proizvodnje u svakom mjesecu. Za cijelo razdoblje prosječna standardna devijacija iznosi 0,102 p.u. što je gotovo dvostruko manje od prosječne standardne devijacije 2015. godine.



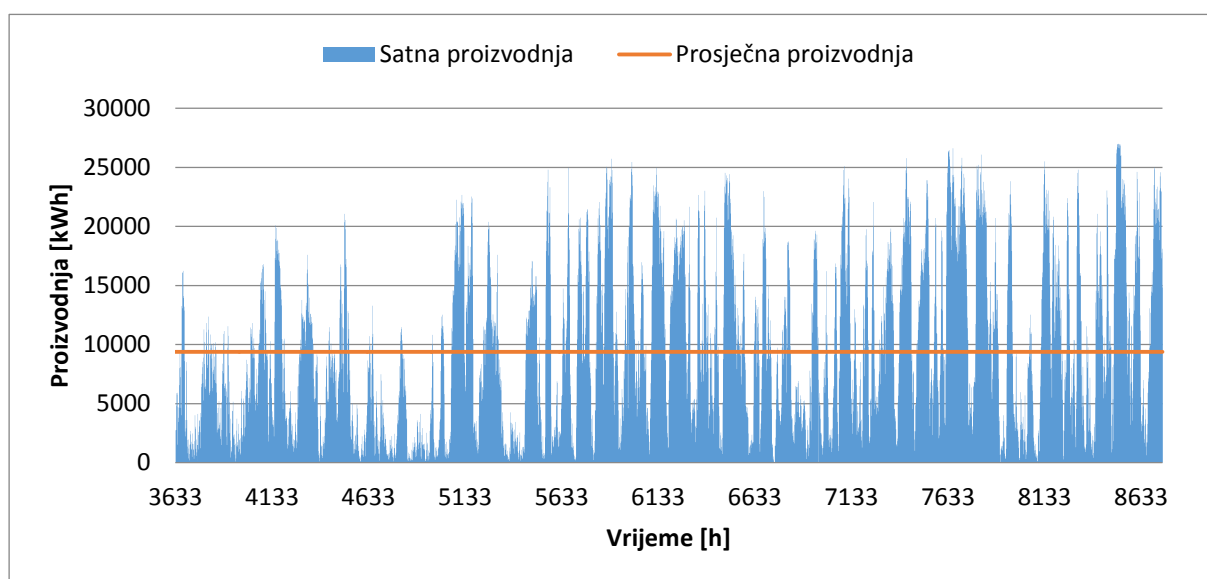
Slika 12. Prosječna, najveća i najmanja standardna devijacija satne proizvodnje za prvih šest mjeseca 2016. godine

3.2. Analiza podataka predviđene proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana

3.2.1. Analiza predviđene proizvodnje za 2007. godinu

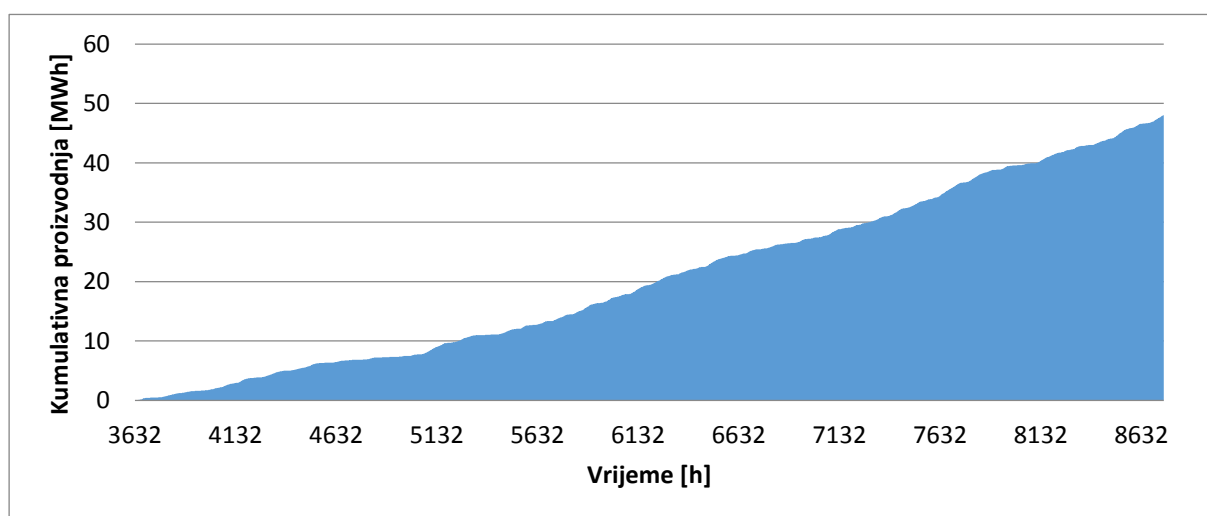
U 2007. godini postoje podatci o predviđenoj proizvodnji za ukupno 5111 sati te je u tom vremenu proizvedeno 48022,55 MWh energije, dok prosječna satna proizvodnja iznosi 9395,92 kWh. Maksimalno i minimalno predviđanje satne proizvodnje iznosi 26994,91 kWh i 8,73 kWh.

Podatci predviđene satne proizvodnje i prosječne satne proizvodnje prikazani su na Slika 13.



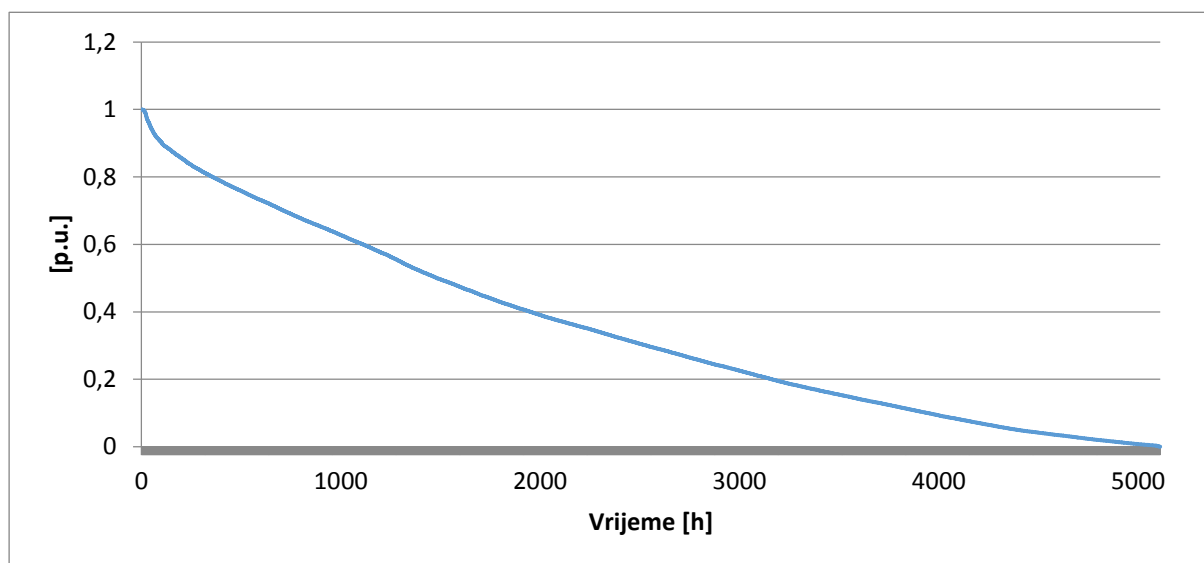
Slika 13. Predviđena satna i satna prosječna proizvodnja 2007. godine

Dijagram kumulativne predviđene proizvodnje [Slika 14] prikazuje energiju proizvedenu do svakog trenutka u godini, a u njemu se vidi i brzina proizvodnje energije u svakom trenutku.



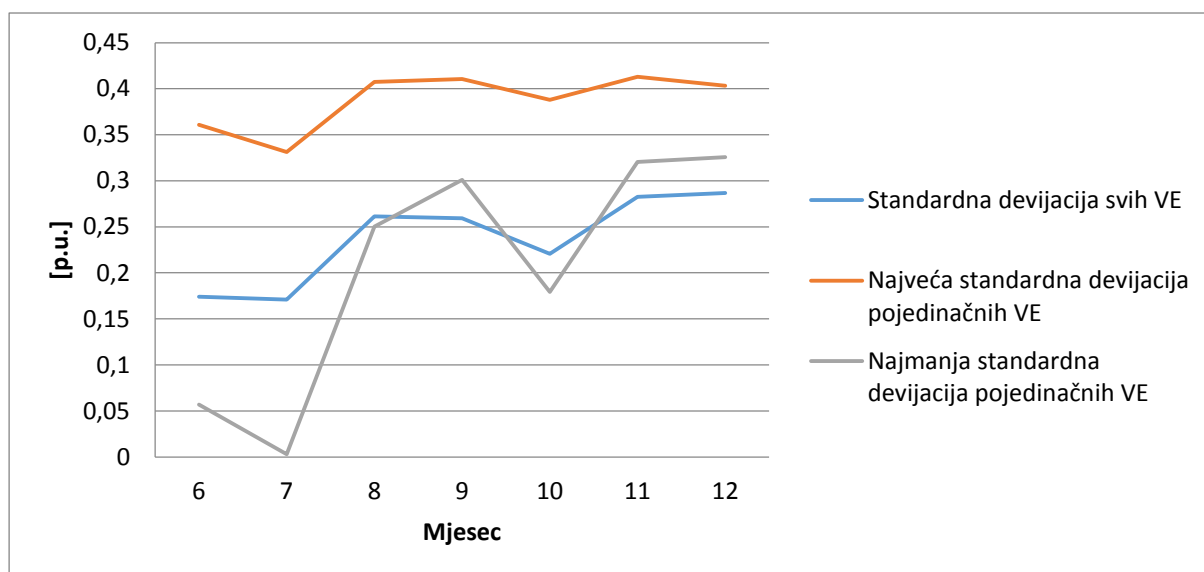
Slika 14. Kumulativno predviđanje proizvodnje 2007. godine

Krivulja trajanja angažirane snage [Slika 15] prikazuje angažiranost određenog kapaciteta vjetroelektrana kroz godinu. Vrijednosti su prikazane relativno u odnosu na ukupan kapacitet („per unit“). U 2007. godini predviđena proizvodnja je iznad 60% snage čak 21,7% vremena.



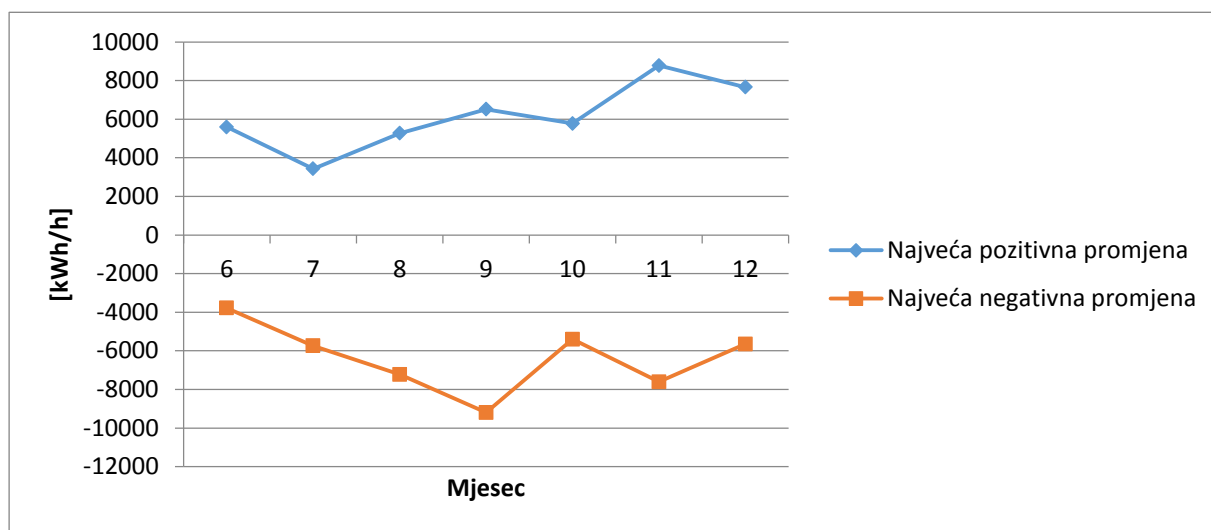
Slika 15. Krivulja trajanja angažirane snage 2007. godine

Na Slika 16 prikazana je standardna devijacija predviđene satne proizvodnje svih vjetroelektrana te najveća i najmanja standardna devijacija pojedinačnih vjetroelektrana za svaki mjesec u 2007. godini. Najmanje standardne devijacije u 6. i 7. mjesecu su nerealno male zbog nedovoljno mjerenih podataka u tim mjesecima za dva mjerna mjesta. Standardna devijacija za cijelo razdoblje iznosi 0,264 p.u.



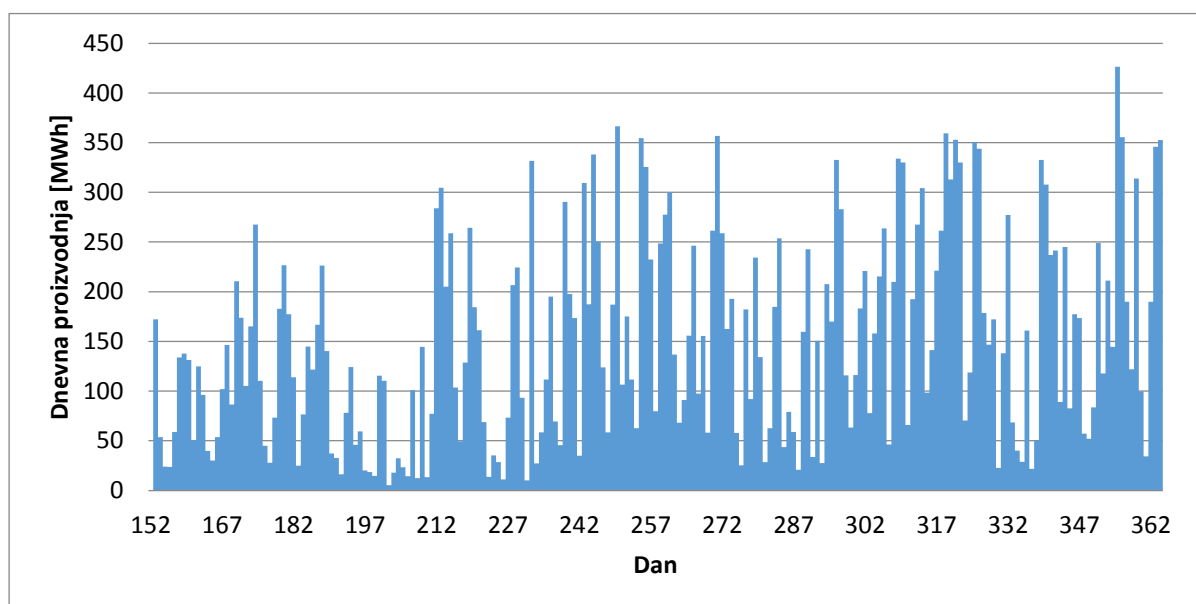
Slika 16. Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje za svaki promatrani mjesec 2007. godine

Osim pomoću standardne devijacije, promjenjivost proizvodnje je opisana najvećim pozitivnim i negativnim razlikama u predviđanju proizvodnje između dva uzastopna sata te je prikazana za svaki promatrani mjesec na Slika 17.

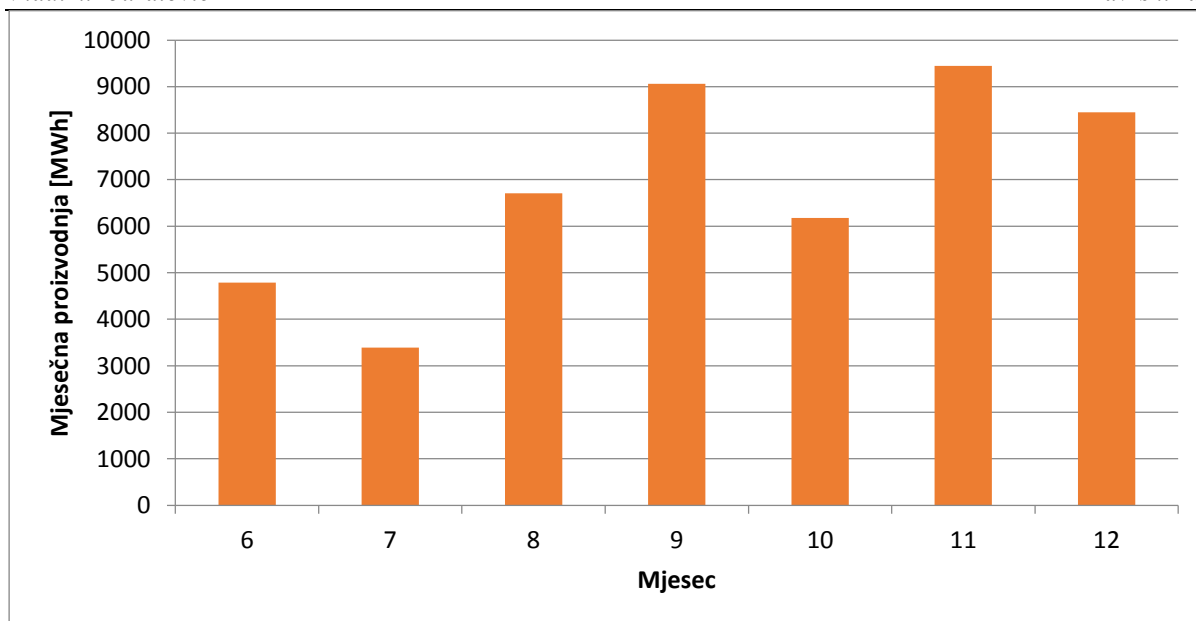


Slika 17. Najveće pozitivne i negativne razlike u predviđanju proizvodnje u dva uzastopna sata

U nastavku su prikazani dijagrami proračunate dnevne [Slika 18] i mjesečne [Slika 19] proizvodnje. Maksimalna i minimalna proračunata dnevna proizvodnja iznose 426227,22 kWh i 5356,09 kWh.

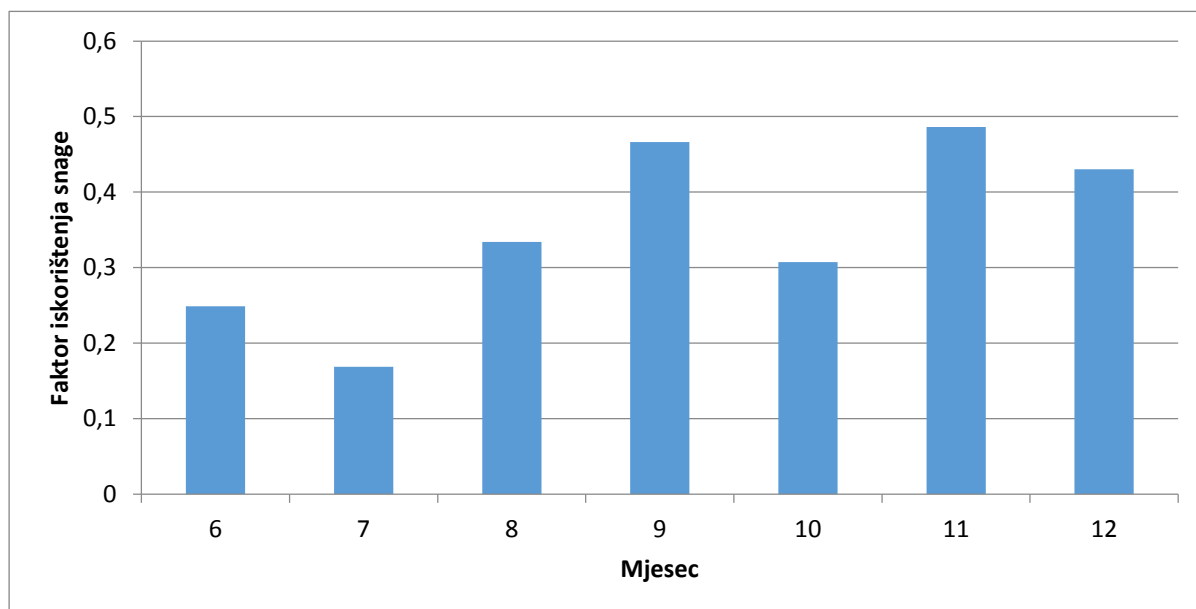


Slika 18. Proračunata dnevna proizvodnja 2007. godine



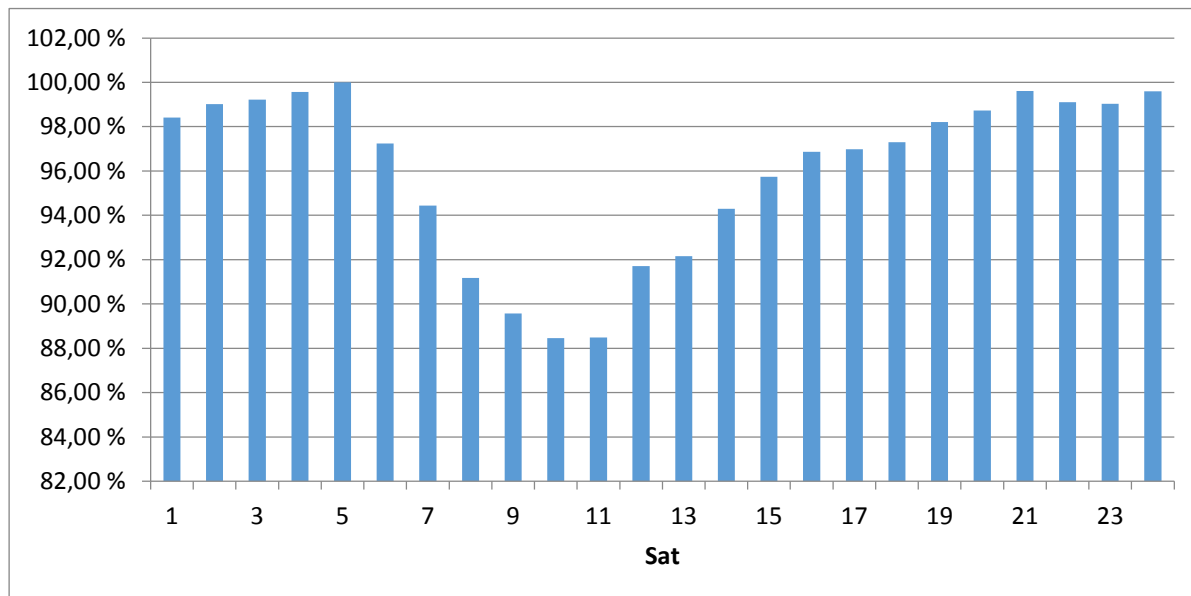
Slika 19. Proračunata mjesečna proizvodnja 2007. godine

Važan pokazatelj proizvodnosti vjetroelektrana je proračunati faktor iskorištenja snage [Slika 20] koji predstavlja omjer predviđanja proizvodnje energije i energije koja bi se proizvela uz neprestan rad vjetroelektrana pri nazivnom kapacitetu. Najmanji proračunati faktor iskorištenja snage u 2007. godini je u 7. mjesecu i iznosi 0,1687, a najveći u 11. mjesecu i iznosi 0,4861.



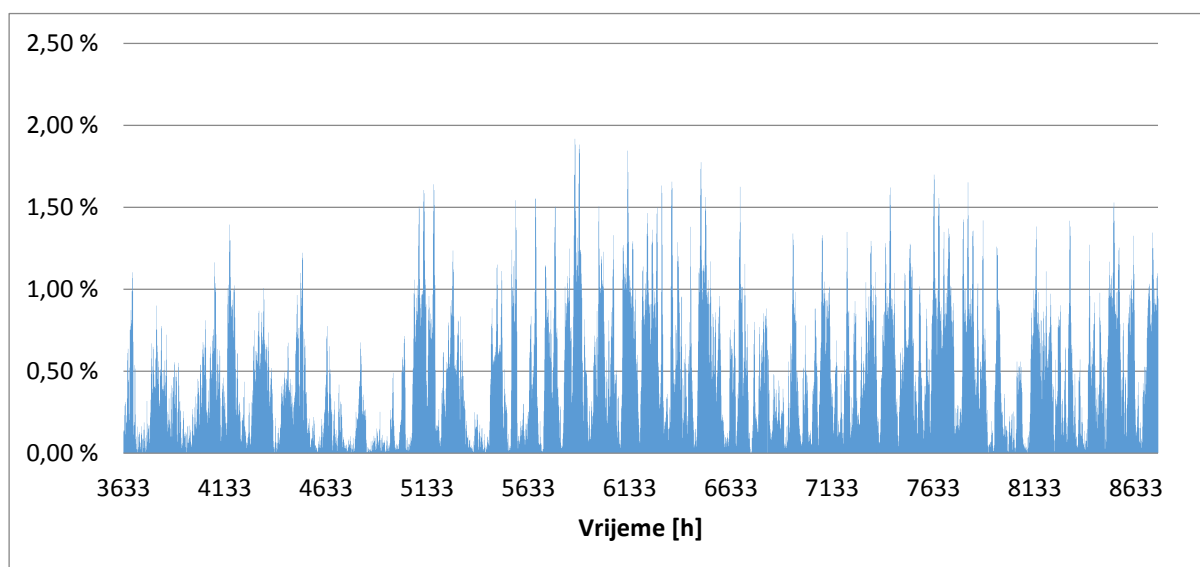
Slika 20. Proračunati faktor iskorištenja snage 2007. godine

Izračunato je i koliko je predviđene energije proizvedeno u svakoj godini u pojedinom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu [Slika 21]. Osjetno manje energije se proizvodi od 7 do 14 sati gdje predviđena proizvodnja pada ispod 95 % proizvodnje 5. sata, u kojem je predviđena proizvodnja najveća.



Slika 21. Predviđena proizvodnja u svakom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu za 2007. godinu

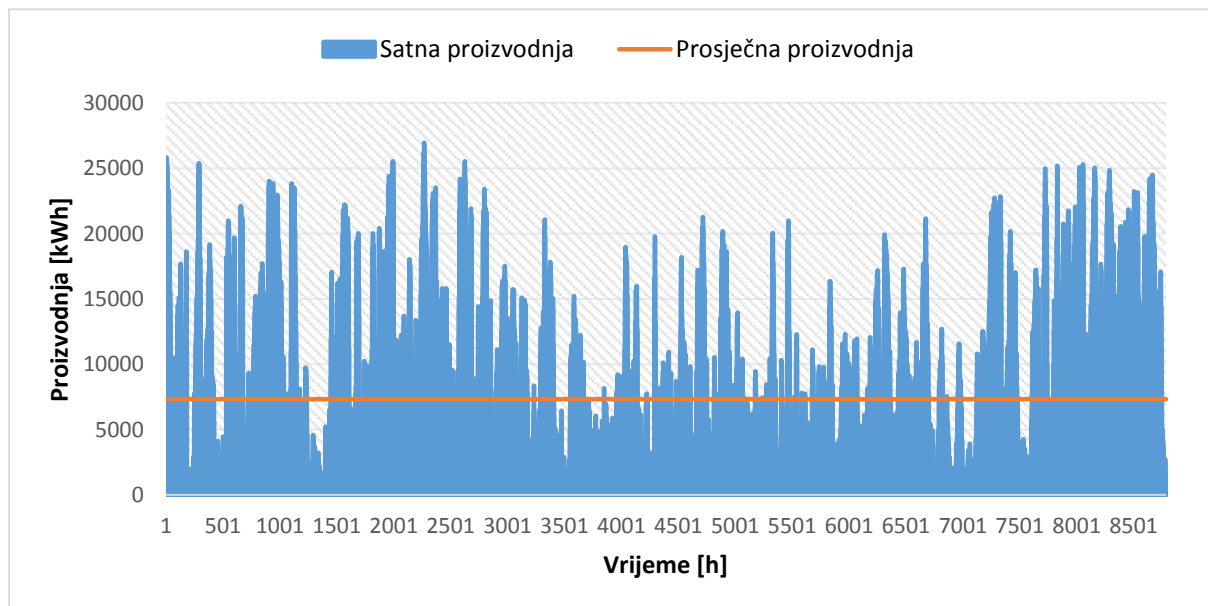
Izrađen je i dijagram moguće pokrivenosti električnog opterećenja Republike Hrvatske energijom proizvedenom vjetroelektranama [Slika 22]. Najveća moguća pokrivenost iznosi 1,92 % i bila je 1.9.2007. u 6 sati.



Slika 22. Mogući udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju električnog opterećenja 2007. godine

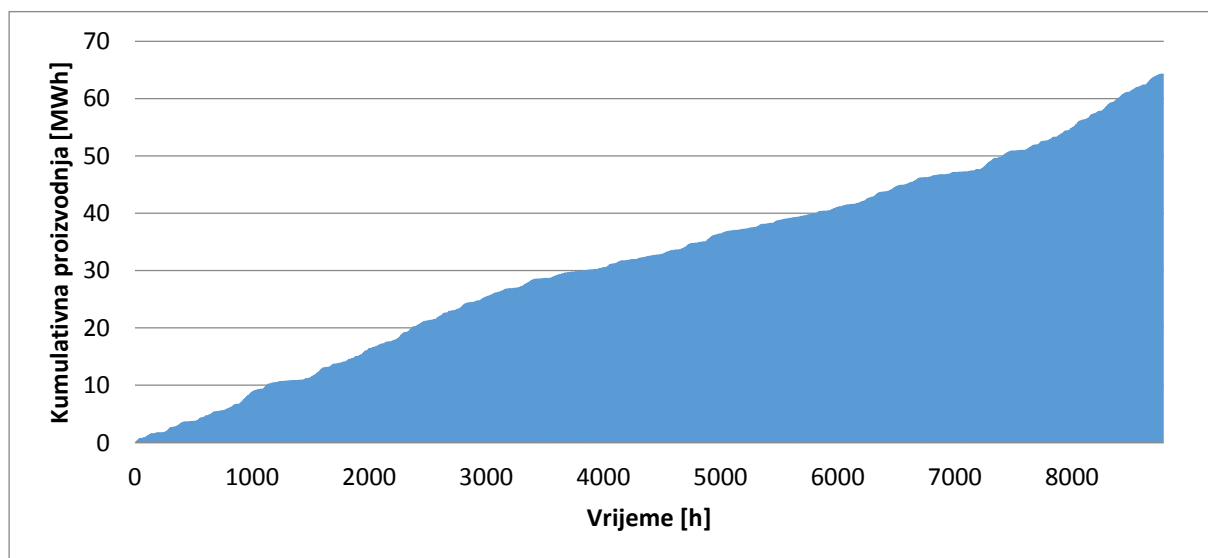
3.2.2. Analiza predviđene proizvodnje za 2008. godinu

U 2008. godini mjerenja su trajala kroz cijelu godinu, odnosno kroz 8784 sata te ukupno predviđanje proizvodnje iznosi 64358,8 MWh, dok je prosječna satna proizvodnja 7326,821 kWh. Maksimalna satna predviđena proizvodnja je 26948,29 kWh, a minimalna 8,96 kWh.



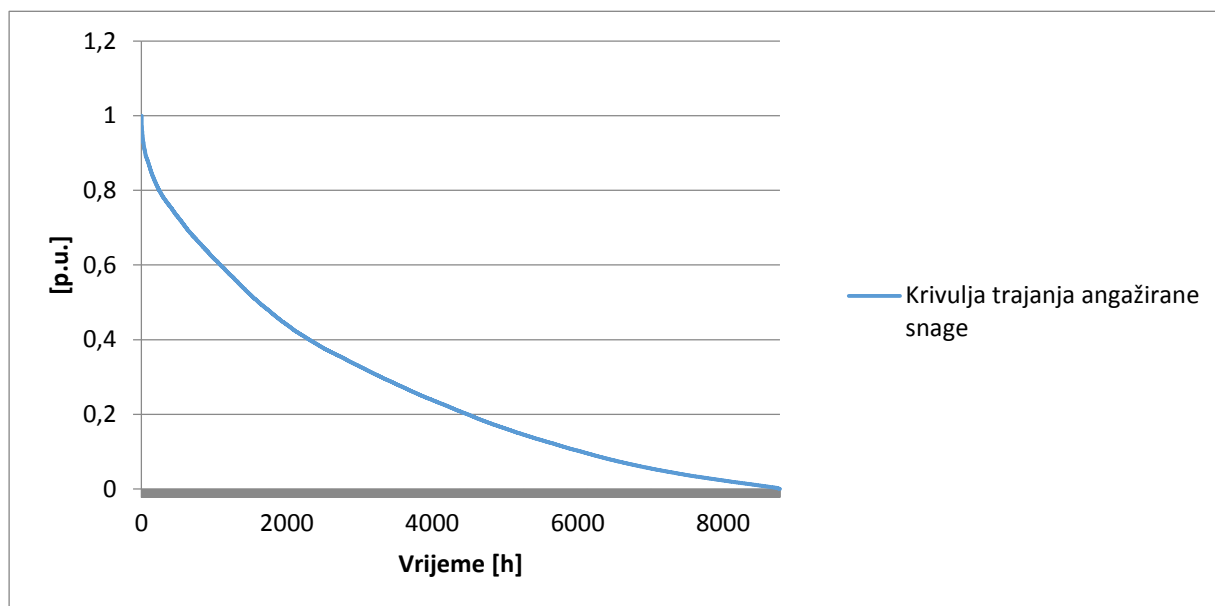
Slika 23. Predviđena satna i satna prosječna proizvodnja 2008. godine

U nastavku je prikazan dijagram kumulativnog predviđanja proizvodnje čiji drugi dio (6.-12. mjesec) kvalitativno odgovara dijagramu kumulativnog predviđanja proizvodnje za 2007. godinu.



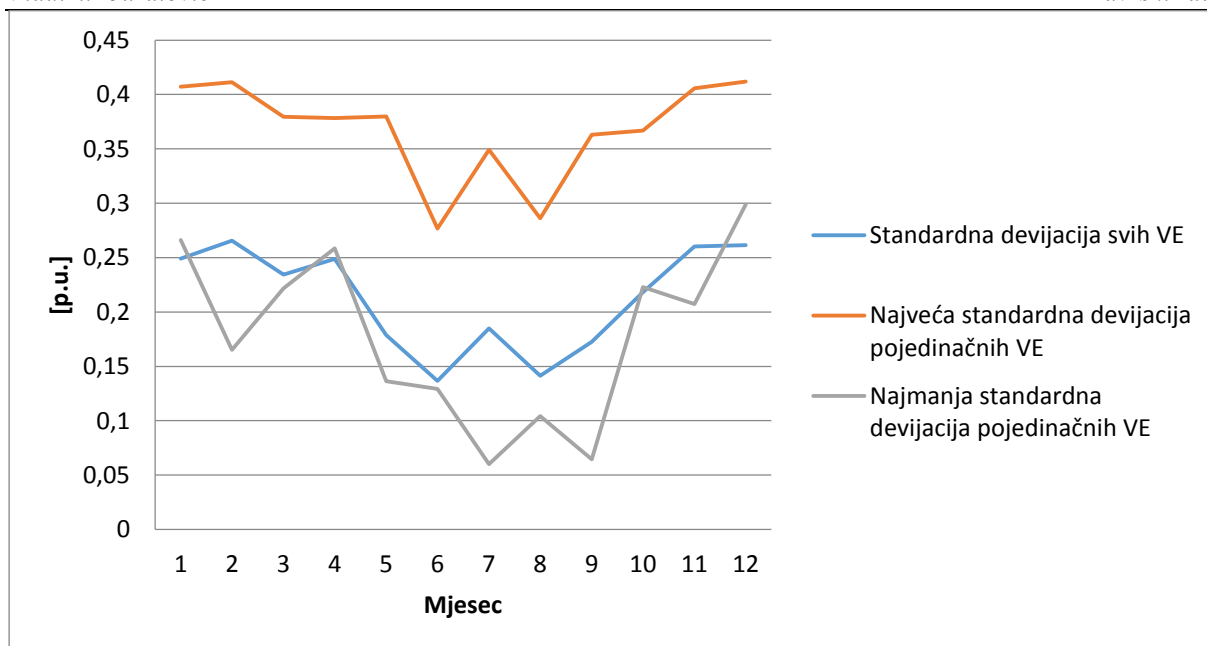
Slika 24. Kumulativno predviđanje proizvodnje 2008. godine

Krivulja trajanja angažirane snage [Slika 25] prikazuje da vjetroelektrane rijetko rade na nazivnom kapacitetu, a također i samo 12,4% vremena rade s 60 % i više nazivnog kapaciteta.



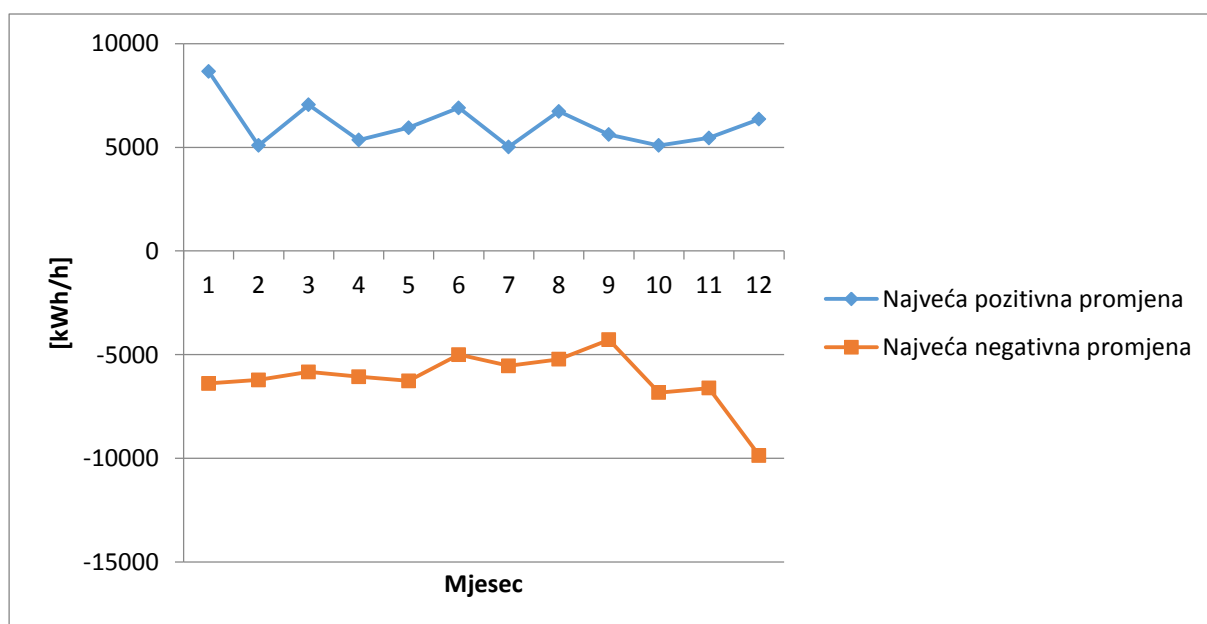
Slika 25. Krivulja trajanja angažirane snage 2008. godine

U prikazu standardnih devijacija predviđene satne proizvodnje [Slika 26] vidi se da je u nekim mjesecima najmanja standardna devijacija pojedinačnih vjetroelektrana čak i veća od standardne devijacije zajedničke proizvodnje svih vjetroelektrana, dok je najveća standardna devijacija pojedinačnih vjetroelektrana za svaki mjesec značajno veća od standardne devijacije zajedničke proizvodnje. To ukazuje na činjenicu da se povećanjem broja vjetroelektrana, odnosno njihovom raspodjelom na širem području osigurava kontinuiranija proizvodnja energije te se smanjuju vremenske oscilacije proizvodnje energije što pozitivno utječe na regulaciju energetskog sustava. Standardna devijacija svih vjetroelektrana za cijelu 2008. godinu iznosi 0,231 p.u.



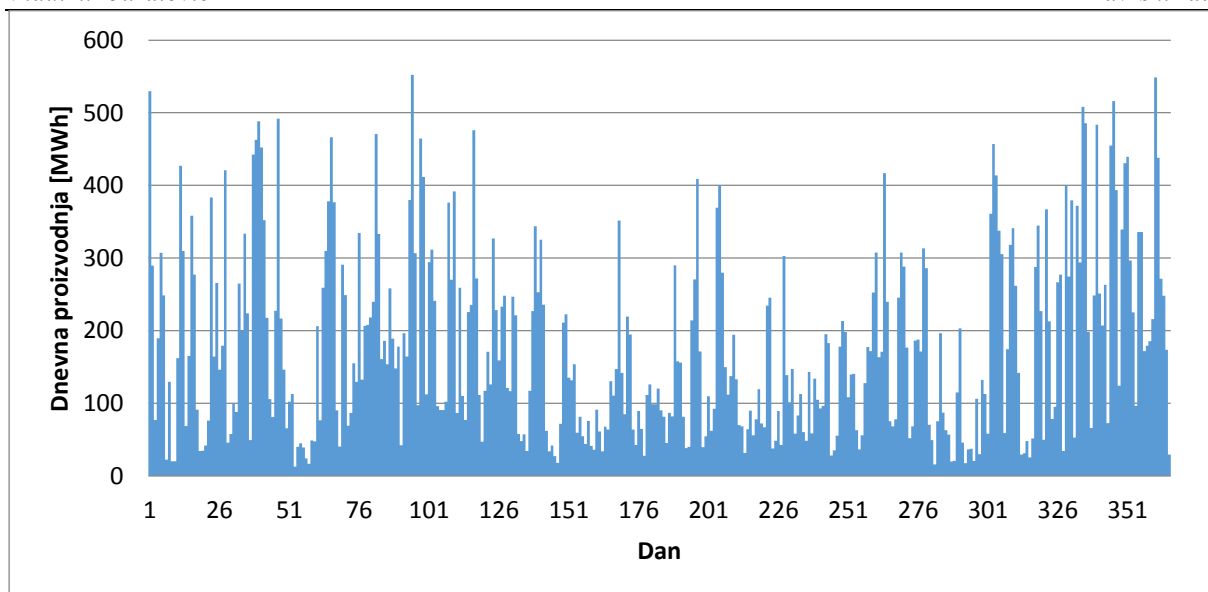
Slika 26. Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje za svaki promatrani mjesec 2008. godine

Najveća promjenjivost predviđene proizvodnje između dva uzastopna sata je prikazana na Slika 27.



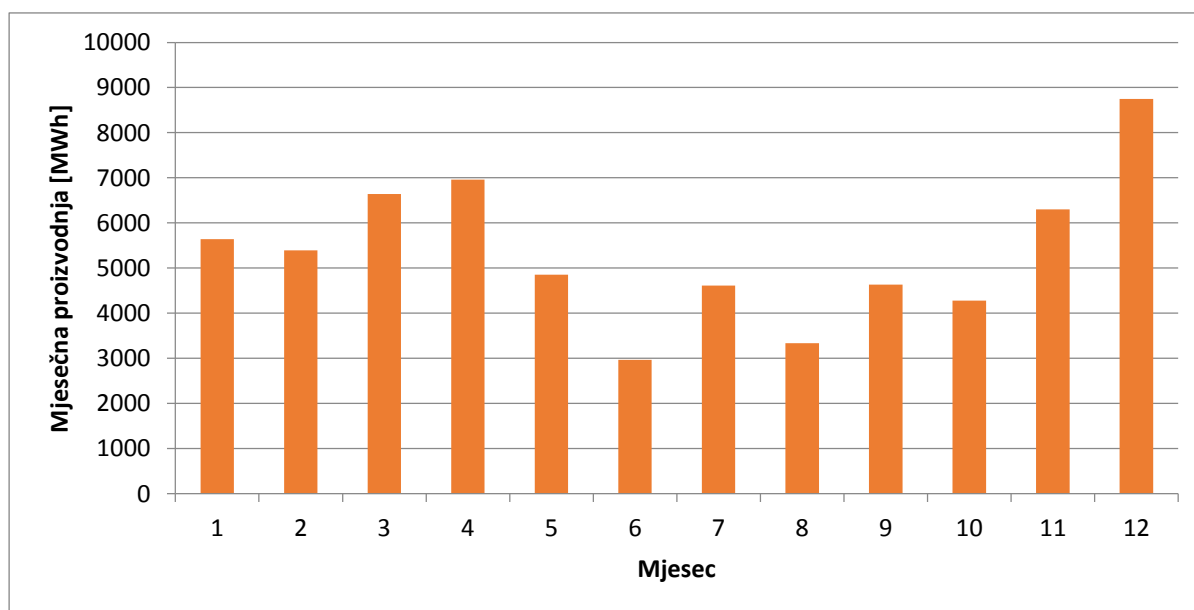
Slika 27. Najveće pozitivne i negativne razlike u predviđanju proizvodnje u dva uzastopna sata

Najveća proračunata dnevna proizvodnja u 2008. godini je 552069,77 kWh, a najmanja proračunata dnevna proizvodnja je 12745,15 kWh [Slika 28].



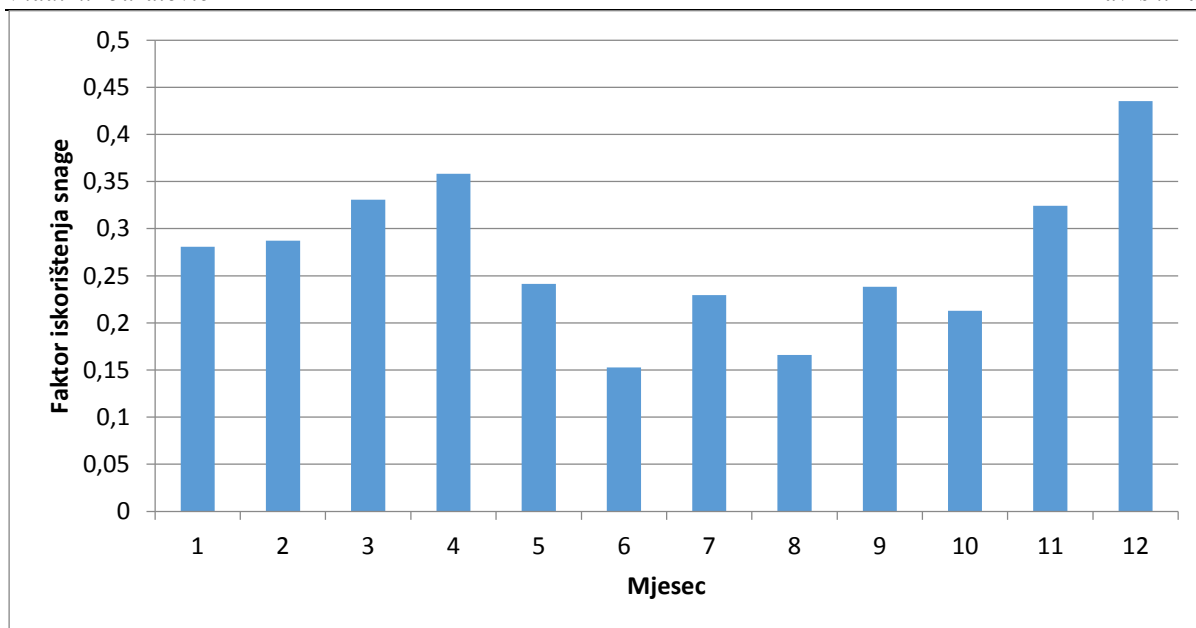
Slika 28. Proračunata dnevna proizvodnja 2008. godine

Dijagram proračunate mjesečne proizvodnje [Slika 29] pokazuje već poznatu činjenicu da je na području srednje i južne Dalmacije proizvodnja iz vjetroelektrana najmanja u ljetnim mjesecima. Proizvodnja je daleko najveća u 12. mjesecu i iznosi 8746,12 MWh.



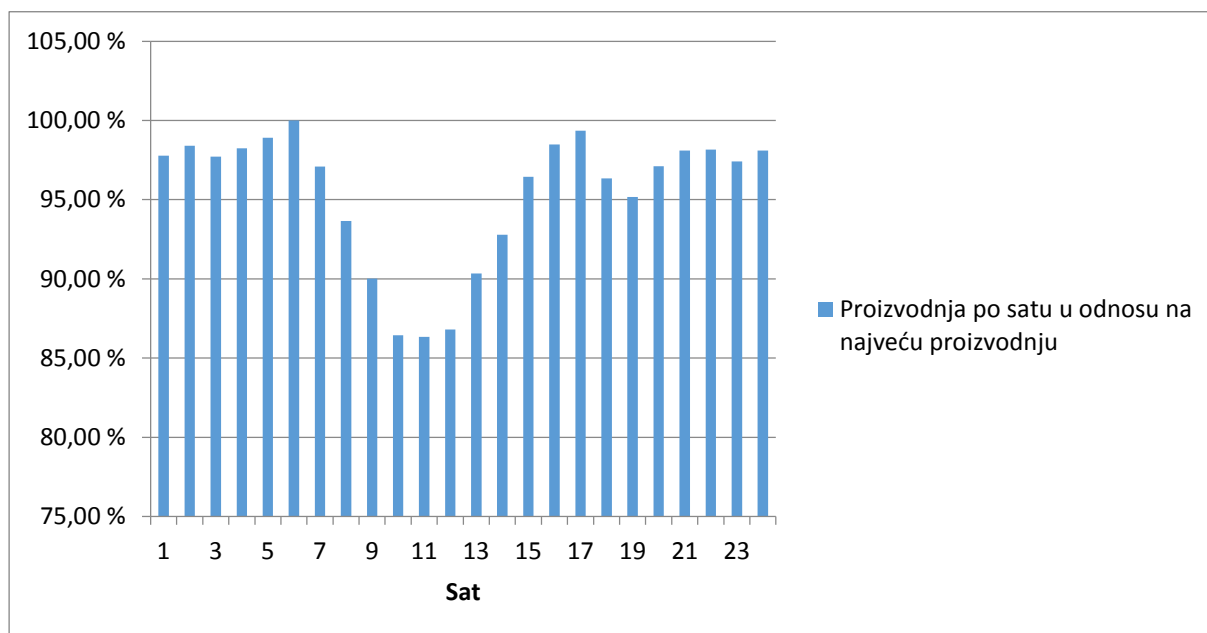
Slika 29. Mjesečna proizvodnja 2008. godine

U 2008. godini proračunati faktor iskorištenja snage kretao se u rasponu od 0,1661 (kolovoz) do 0,4354 (prosinac).



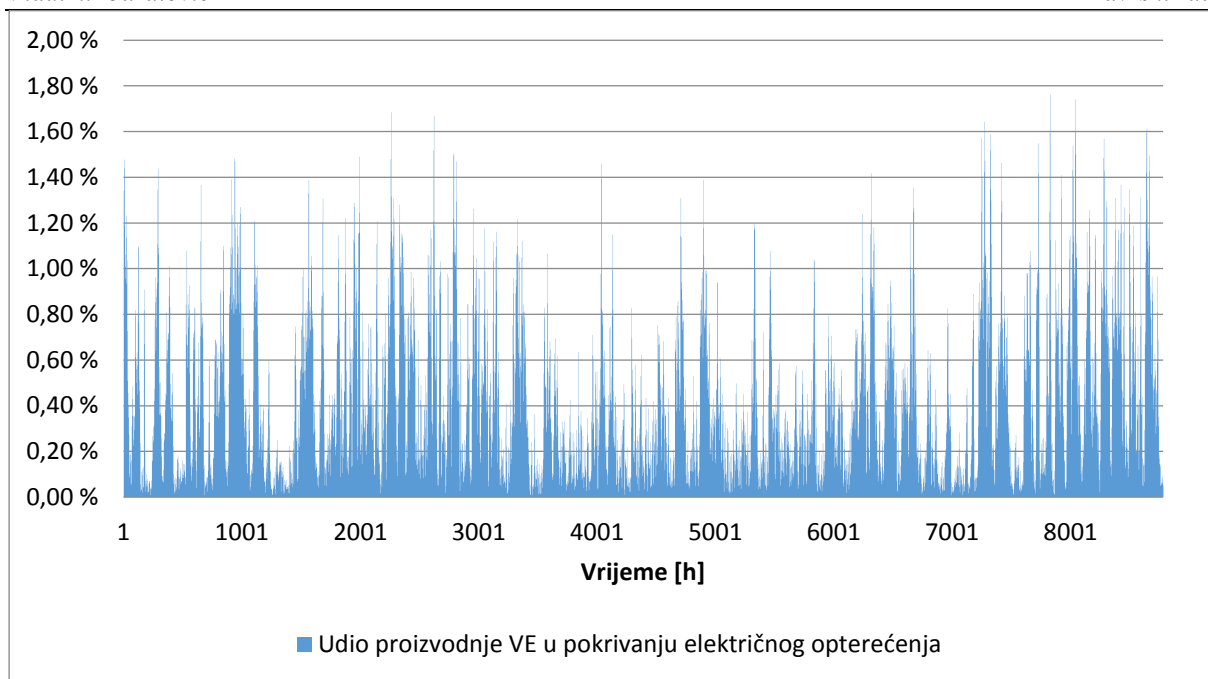
Slika 30. Proračunati faktor iskorištenja snage 2008. godine

U 2008. godini najviše predviđene proizvodnje energije je u 6. satu, a od 8 do 14 sati je predviđena proizvodnja pala ispod 95 % proizvodnje u 6. satu [Slika 31].



Slika 31. Predviđena proizvodnja u svakom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu za 2008. godinu

Najveći mogući udio energije proizvedene iz vjetroelektrana u potrošnji električne energije Republike Hrvatske u 2008. godini je 1,76 % i zabilježen je 22.11.2008. godine u 5 sati.

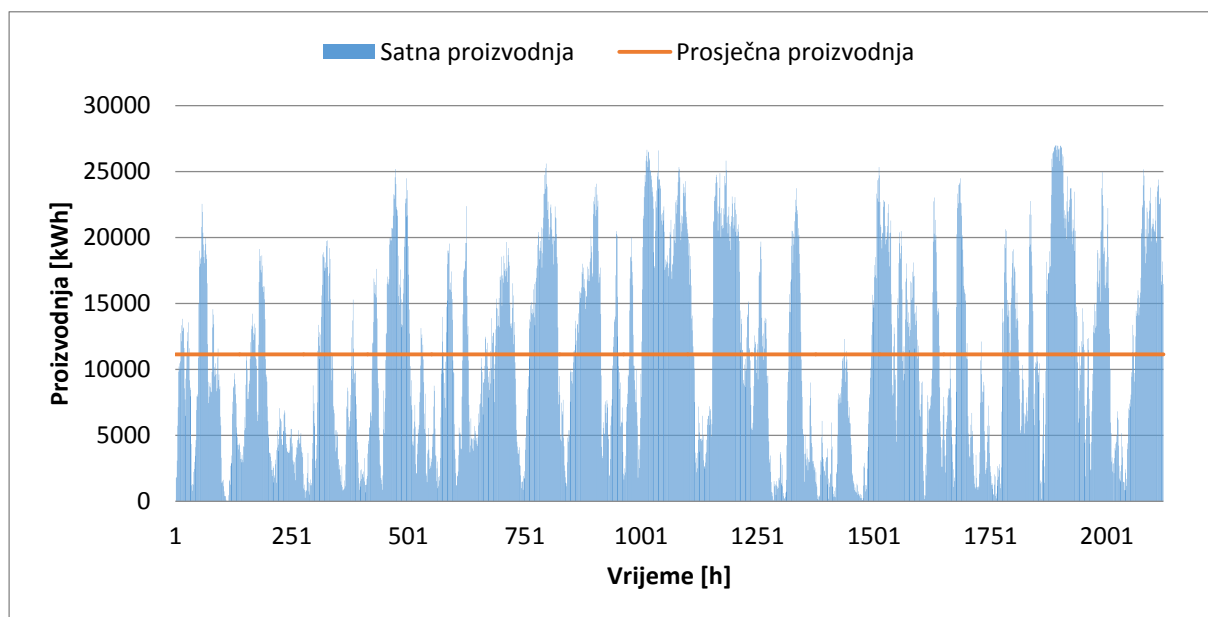


Slika 32. Mogući udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju električnog opterećenja 2008. godine

3.2.3. Analiza predviđene proizvodnje za 2009. godinu

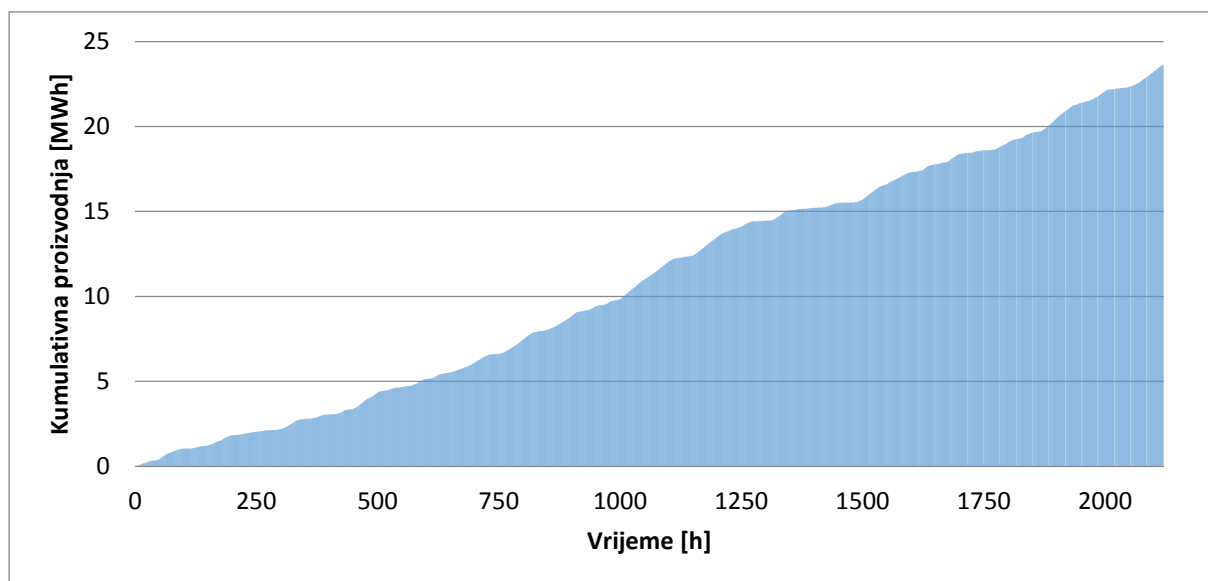
U 2009. godini postoje podatci za otprilike 3 mjeseca, odnosno za 2122 sata. Predviđa se proizvodnja 23643,47 MWh energije dok je prosječna satna proizvodnja 11142,07 kWh.

Maksimalno i minimalno predviđanje satne proizvodnje u 2009. godini iznose 26989,45 kWh i 6,28 kWh [Slika 33].



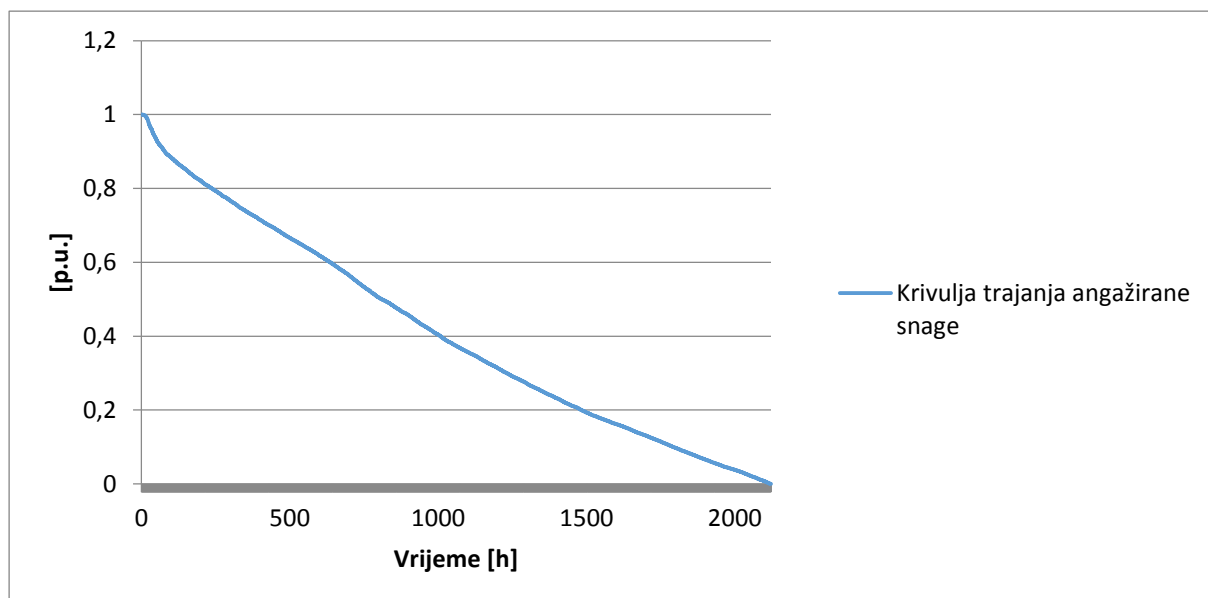
Slika 33. Predviđena satna i satna prosječna proizvodnja 2009. godine

Kumulativno predviđanje proizvodnja je prikazano na Slika 34.



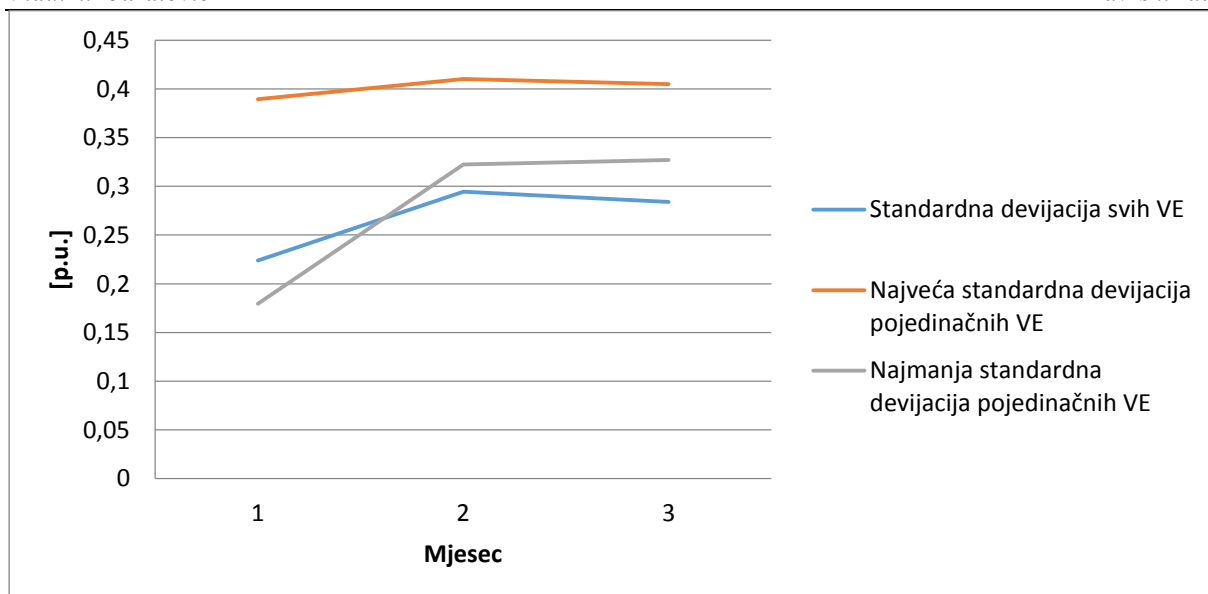
Slika 34. Kumulativno predviđanje proizvodnje 2009. godine

Krivulja trajanja angažirane snage [Slika 35] prikazuje veliku angažiranost vjetroelektrana pri većim kapacitetima (60 % - 100 % p.u.). U tome području vjetroelektrane su radile gotovo 30 % vremena.



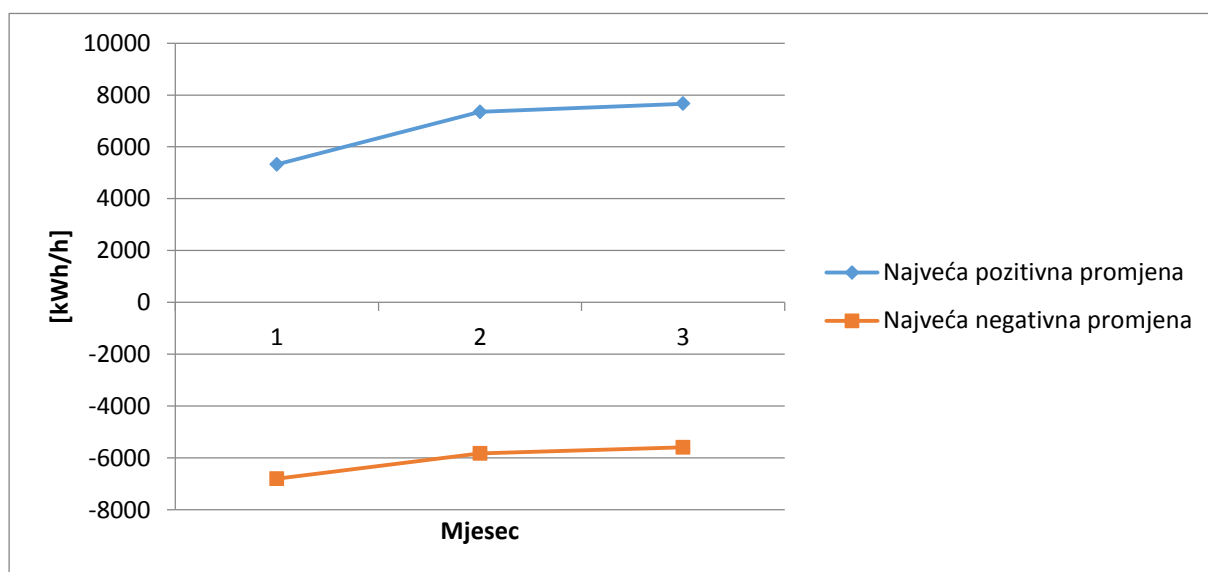
Slika 35. Krivulja trajanja angažirane snage 2009. godine

Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje potvrđuje zaključke donesene kod analize za 2008. godinu. Za cijelo promatrano razdoblje 2009. godine standardna devijacija svih vjetroelektrana iznosi 0,275 p.u.



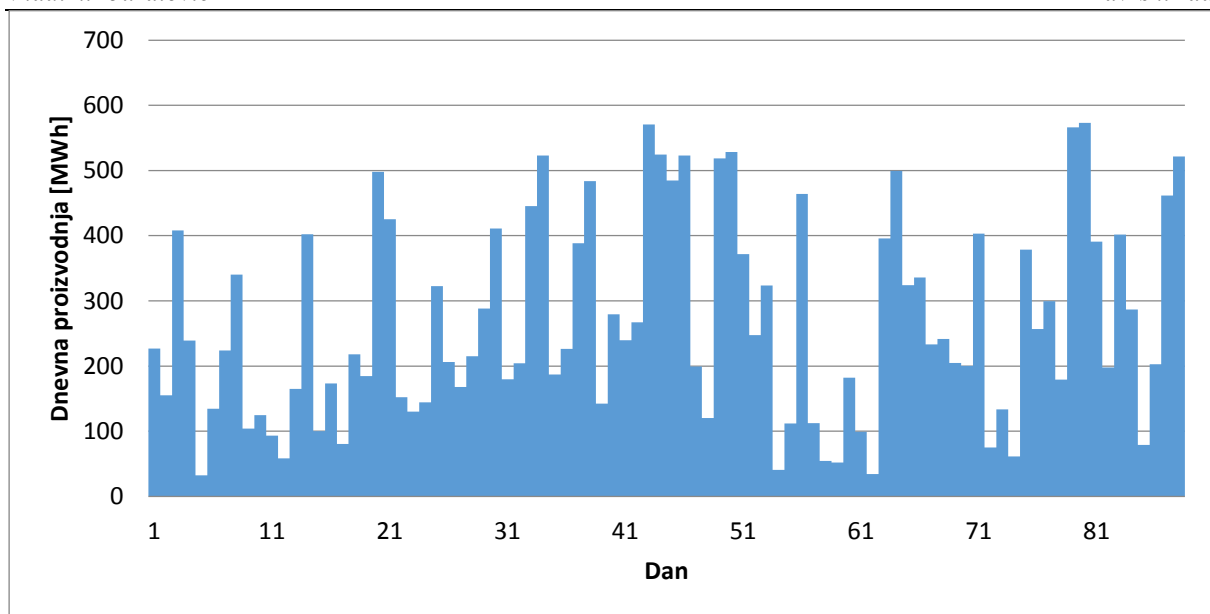
Slika 36. Standardna devijacija predviđene satne proizvodnje za svaki promatrani mjesec 2009. godine

Promjenjivost predviđene proizvodnje za dva uzastopna sata je prikazana na Slika 37 te se vidi da su najveća i najmanja vrijednost promjene proizvodnje slične u svim mjesecima.

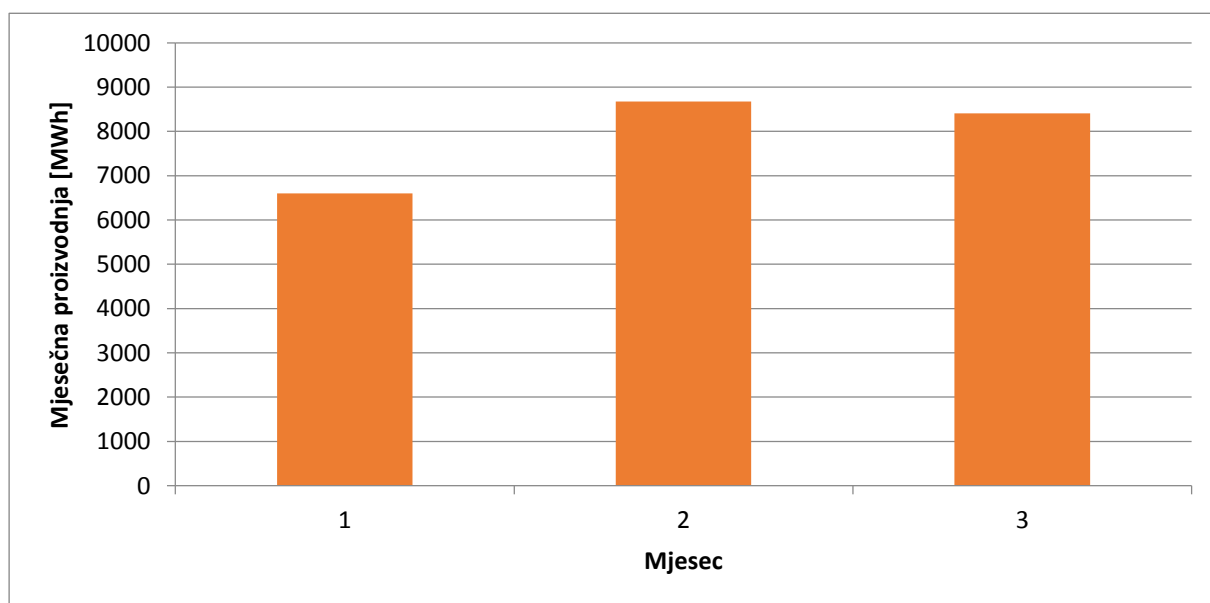


Slika 37. Najveće pozitivne i negativne razlike u predviđanju proizvodnje u dva uzastopna sata

U nastavku su prikazani dijagrami proračunate dnevne proizvodnje [Slika 38] gdje najveća proračunata dnevna proizvodnja iznosi 573111,8 kWh, a najmanja 32282,98 kWh i dijagram predviđene proizvodnje energije po mjesecima za 2009. godinu [Slika 39].

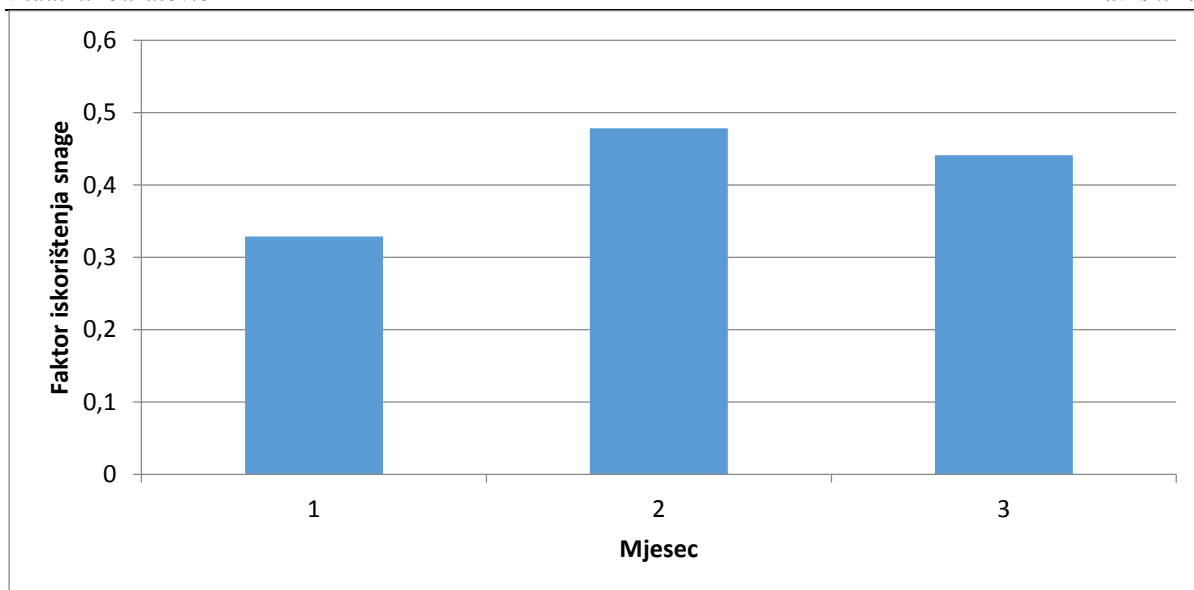


Slika 38. Proračunata dnevna proizvodnja 2009. godine



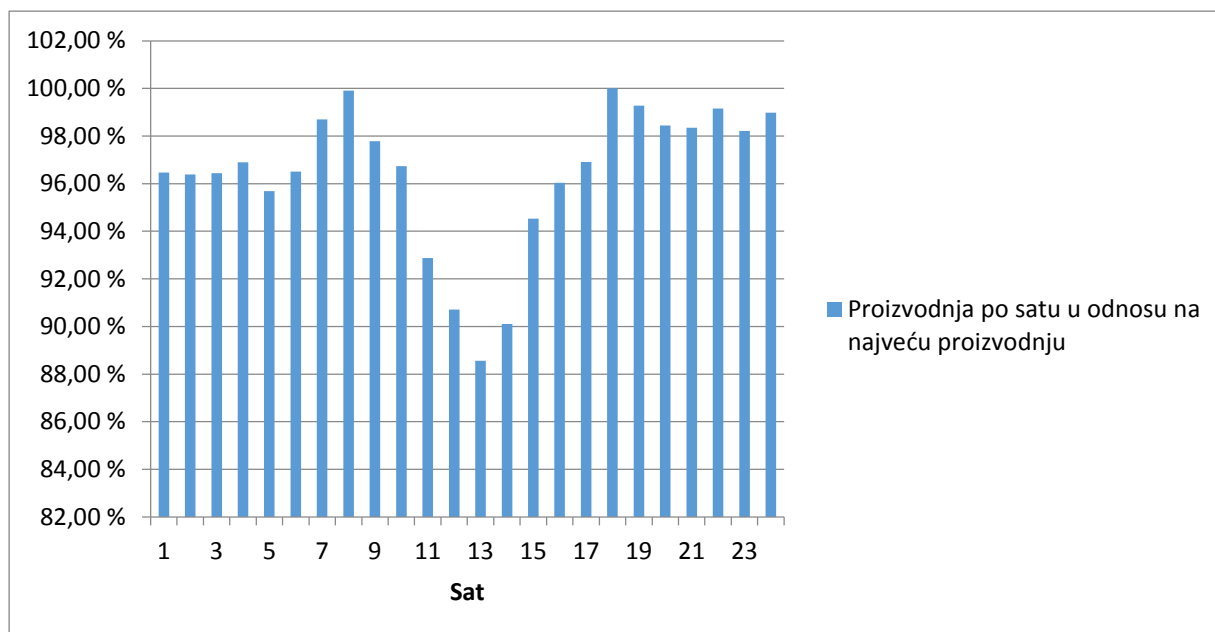
Slika 39. Proračunata mjesečna proizvodnja 2009. godine

U 2009. godini najmanji proračunati faktor iskorištenja snage je bio u siječnju i iznosio je 0,3287, a najveći u veljači (0,4780).



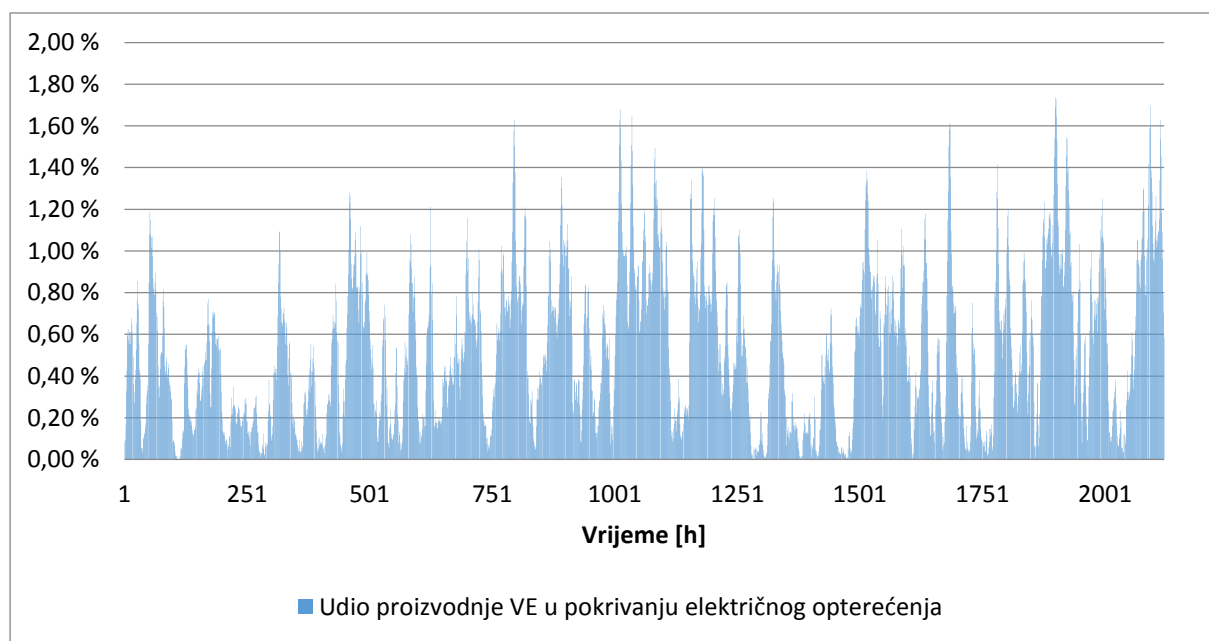
Slika 40. Proračunati faktor iskorisćenja snage 2009. godine

U 2009. godini mjerenja su se vršila samo kroz prva tri mjeseca, ali se rezultati predviđene proizvodnje po satu podudaraju sa onima iz 2008. i 2009. godine. Najveća je predviđena proizvodnja u 8. i 18. satu, a predviđena proizvodnja pada ispod 95 % najveće proizvodnje od 11. do 15. sata [Slika 41].



Slika 41. Predviđena proizvodnja u svakom satu u odnosu na najveću predviđenu proizvodnju u pojedinom satu za 2009. godinu

Najveći mogući udio u pokrivanju opterećenja sustava proizvodnjom energije iz vjetroelektrana u 2009. godini iznosi 1,74 % i javlja se 21.3.2009. godine u 4 sata. Jasno je da se najveća pokrivenost u svim analiziranim godinama pojavljuje u ranojutarnjim satima kad je (predviđena) proizvodnja energije iz vjetroelektrana najveća, a električno opterećenje sustava još ne poraste zbog buđenja stanovništva [Slika 42]. To nepovoljno utječe na regulaciju sustava i javljanje CEEP-a.

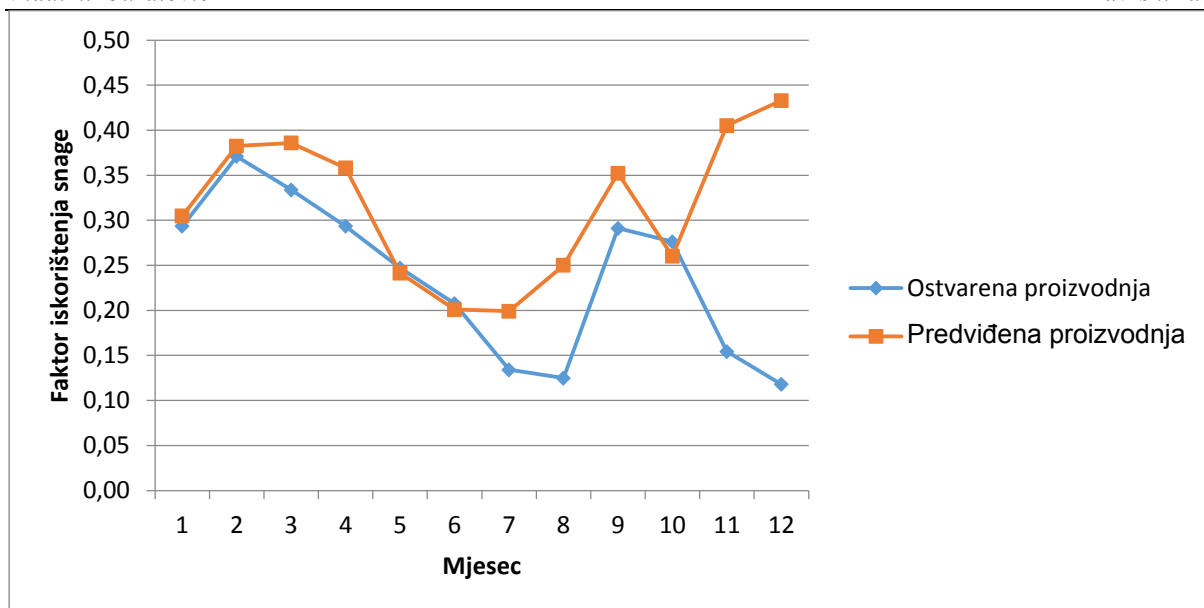


Slika 42. Mogući udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju električnog opterećenja 2009. godine

3.3. Usporedba prikupljenih satnih podataka o ostvarenoj proizvodnji električne energije s podacima o predviđenoj proizvodnji, proračunatoj na temelju prosječnih satnih brzina vjetra i ostalih meteoroloških podataka

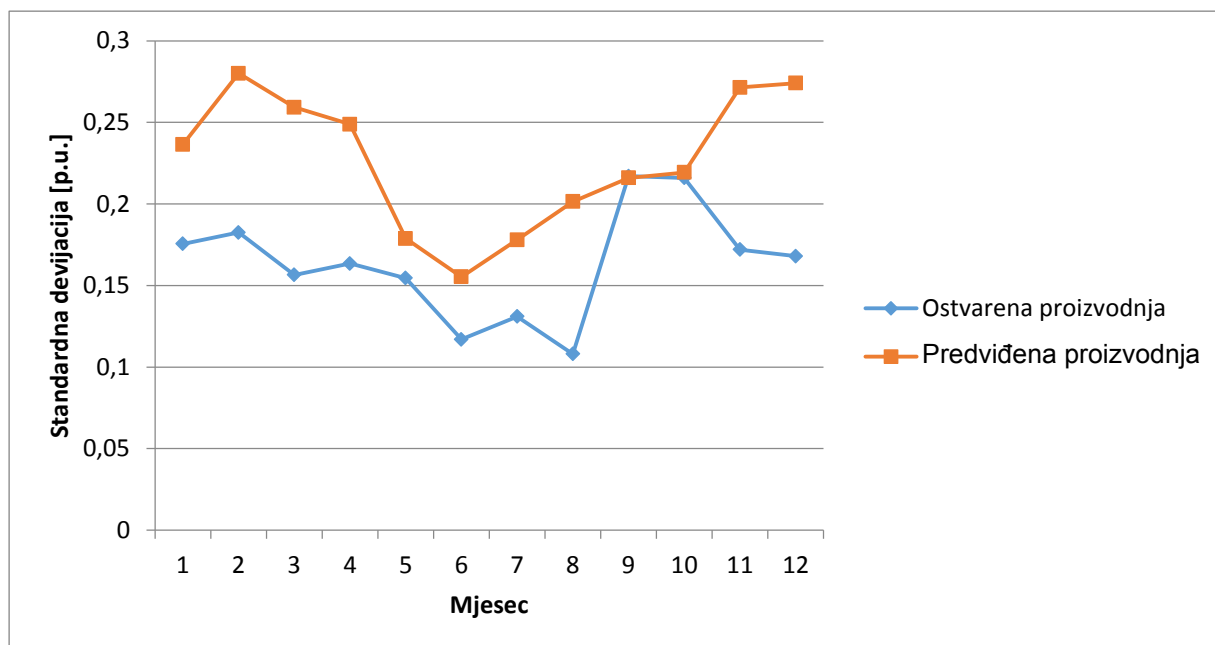
3.3.1. Usporedba ostvarene proizvodnje iz vjetroelektrana za razdoblje 1.1.2015. – 30.6.2016. s predviđenom proizvodnjom za razdoblje 1.6.2007. – 30.3.2009.

Kao prvi usporedni podatak prikazan je faktor iskorištenja snage [Slika 43] koji je izračunat na način da je za svaki mjesec napravljen prosjek iz svih dostupnih godina. Faktor iskorištenja snage je važan usporedni pokazatelj jer u promatranim razdobljima kapacitet vjetroelektrana nije bio isti. Veća odstupanja vidljiva u studenom i prosincu javila su se zbog niske ostvarene proizvodnje u 2015. godini koja nije uobičajena za to razdoblje [Slika 6].



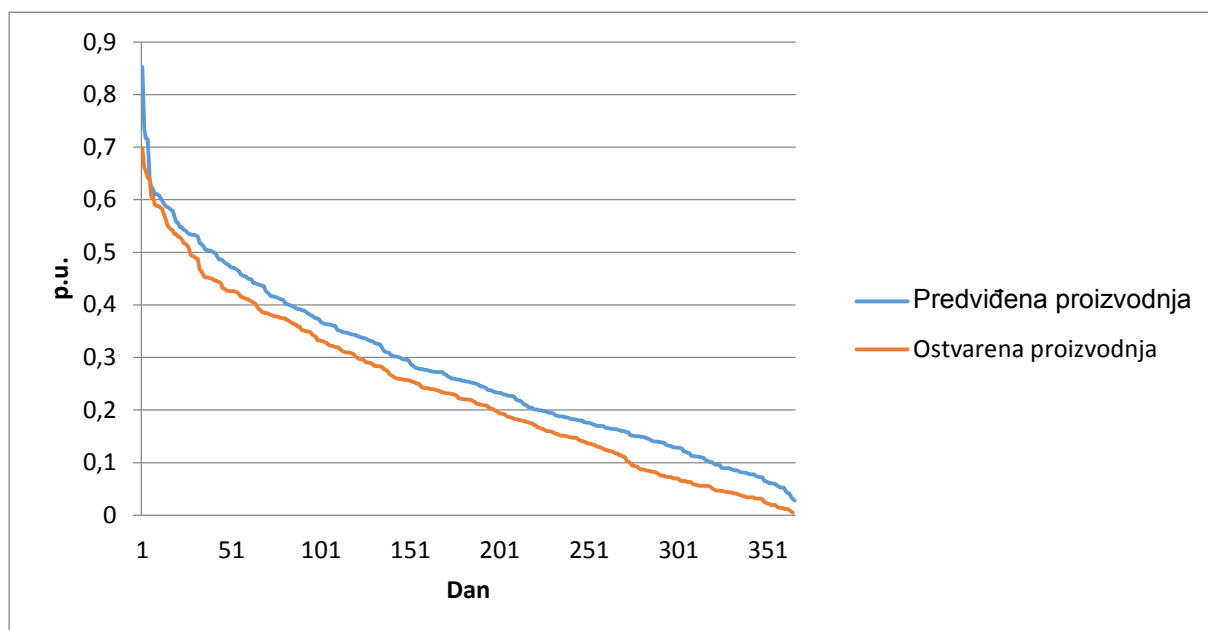
Slika 43. Faktor iskorištenja snage predviđene i ostvarene proizvodnje

Na isti način napravljena je usporedba standardnih devijacija satne proizvodnje za svaki mjesec u promatranim razdobljima. Vide se podudarnosti u mjesečnim kretanjima, a standardna devijacija ostvarene proizvodnje je niža zbog većeg broja instaliranih vjetroelektrana u tom vremenskom razdoblju i veće geografske raspodjele tih vjetroelektrana.



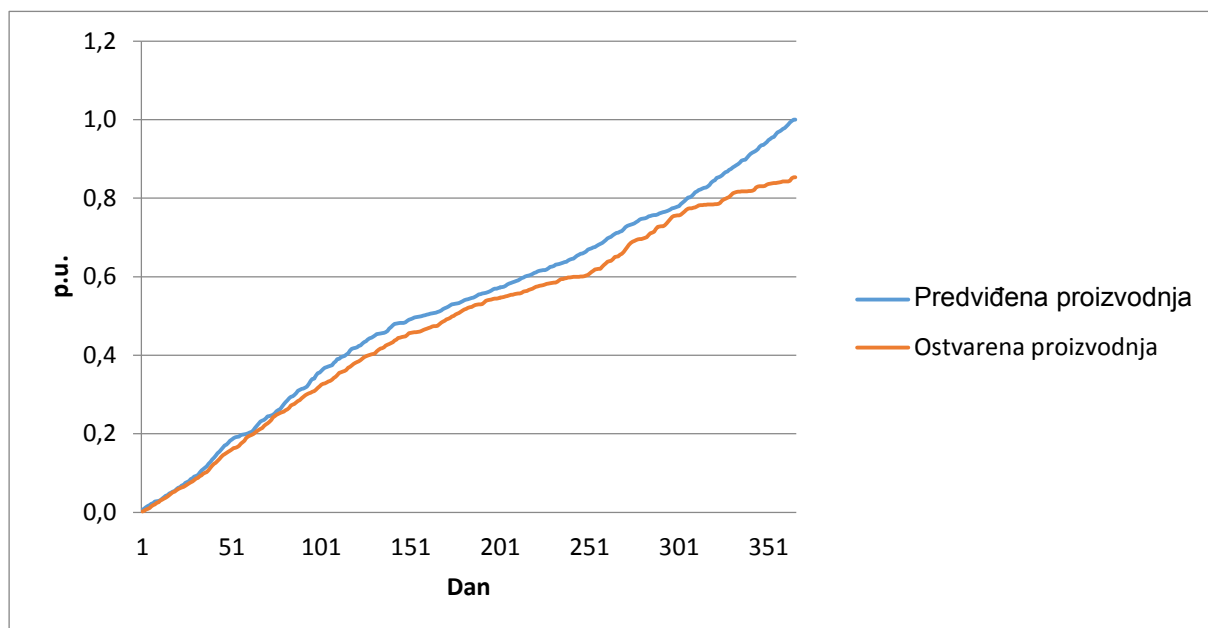
Slika 44. Standardna devijacija predviđene i ostvarene proizvodnje

Na sljedećoj slici su usporedno prikazane krivulje trajanja predviđene i ostvarene proizvodnje, gdje su podatci računati prosječno za sve promatrane godine i to na bazi dnevne proizvodnje te prikazani relativno u odnosu na instaliranu snagu u svakom trenutku.



Slika 45. Krivulja trajanja predviđene i ostvarene proizvodnje

Na isti način prikazana je i usporedba kumulativne proizvodnje [Slika 46], koja je zbog različite instalirane snage prikazana relativno u odnosu na predviđenu proizvodnju.

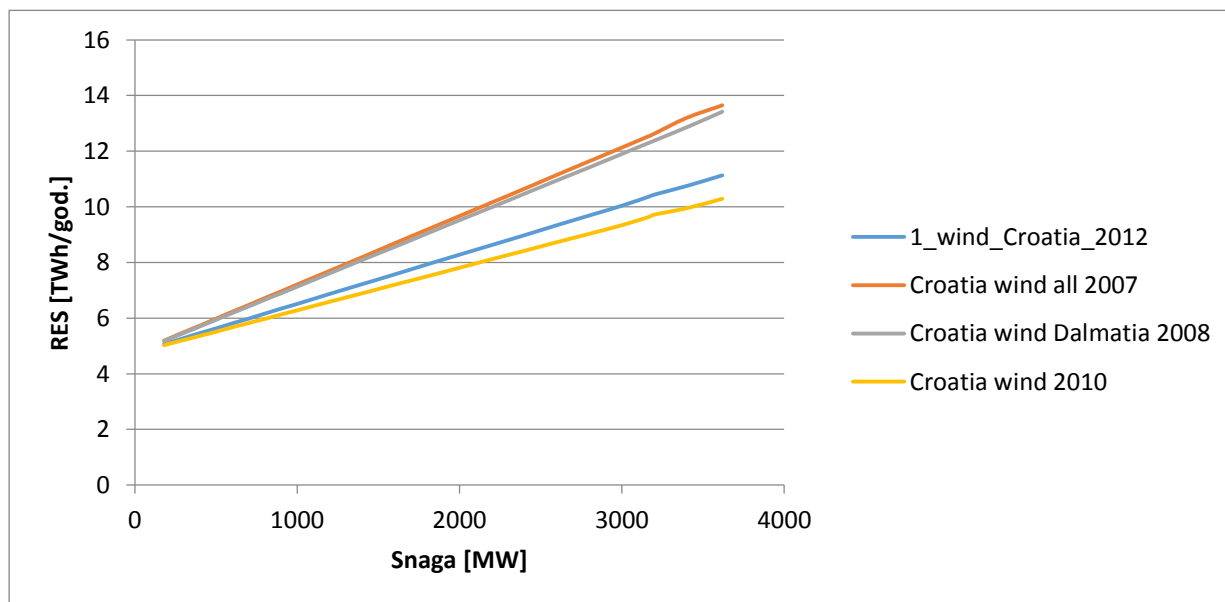


Slika 46. Kumulativna proizvodnja predviđene i ostvarene proizvodnje

3.4. Analiza mogućnosti integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske

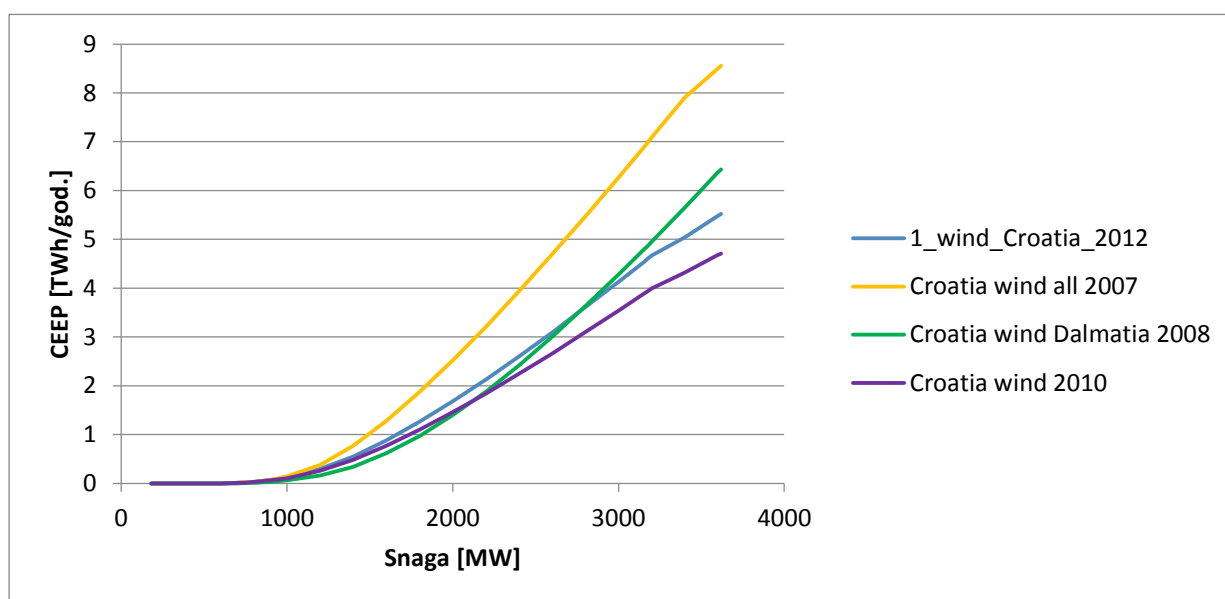
3.4.1. Utjecaj povećanja snage vjetroelektrana na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske

Na Sliku 47 je prikazana proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora u ovisnosti o instaliranoj snazi vjetroelektrana.



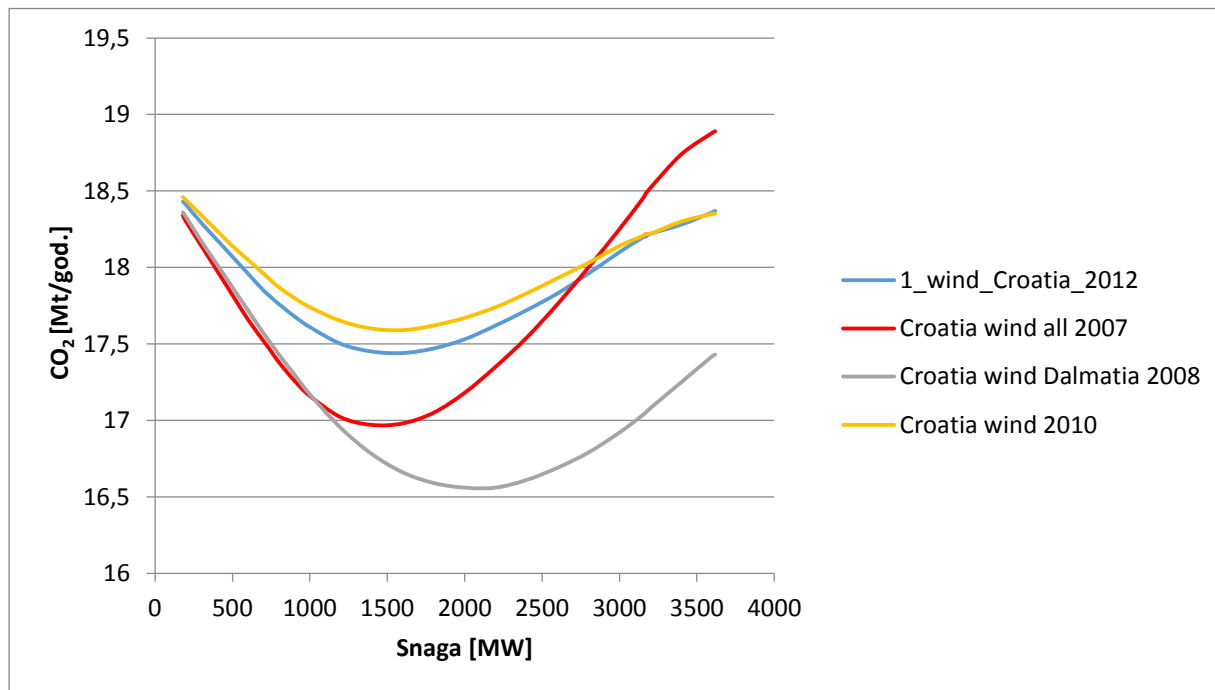
Slika 47. Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora

„Kritični višak“ proizvodnje električne energije (CEEP) je prikazan na Sliku 48 u ovisnosti o kapacitetu vjetroelektrana.



Slika 48. „Kritični višak“ proizvodnje električne energije

Emisija CO₂ prikazana je na Slika 49. Zbog ovakvog modela korištenog u EnergyPLAN-u minimum emisije CO₂ nije kod najvećih snaga vjetroelektrana, nego se emisije CO₂ prvo smanjuju prema minimumu, a zatim rastu daljnjim povećanjem snage. To je zbog dodatnog angažiranja termoelektrana za balansiranje sustava, kao što je objašnjeno u nastavku.



Slika 49. Emisije CO₂

Prema dokumentaciji EnergyPLAN-a [11], proizvodnja termoelektrana (e_{pp}) jednaka je većoj vrijednosti između proizvodnje termoelektrana prema jednadžbi 1 i prema jednadžbi 3. Prema prvom uvjetu u jednadžbi 1 proizvodnja termoelektrana jednaka je razlici ukupne potrošnje električne energije d_{Total} i proizvodnje električne energije bez termoelektrana e_{Total} koja se računa prema jednadžbi 2.

Jednadžba 1. Proizvodnja termoelektrana prema uvjetu zadovoljavanja potrebe za električnom energijom

$$e_{pp} = d_{Total} - e_{Total} \quad (1)$$

Jednadžba 2. Proizvodnja električne energije bez termoelektrana

$$e_{Total} = e_{Res} + e_{M-CHP} + e_{Hydro} + e_{Nuclear} + e_{Geothermal} + e_{V2G} + e_W + e_{CSHP} + e_{CHP2} + e_{CHP3} + e_{Turbine} \quad (2)$$

Prema drugom uvjetu iz jednadžbe 3 proizvodnja termoelektrana jednaka je minimumu proizvodnje potrebne za stabilizaciju mreže.

Jednadžba 3. Proizvodnja termoelektrana prema uvjetu stabilnosti mreže

$$e_{PP} = (e_{Total} * Stab_{total} - e_{CHP2} * Stab_{CHP2} - (e_{W1} + e_{W2} + e_{W3}) * Stab_{Waste} - e_{Res1} * Stab_{Res1} - e_{Res2} * Stab_{Res2} - e_{Res3} * Stab_{Res3} - e_{Res4} * Stab_{Res4} - e_{CHP3} - e_{Nuclear} - e_{Geothermal} - e_{Hydro} - e_{Turbine} - e_{V2G} - c_{V2G} * Stab_{V2G} - C_{Imp/exp} * Stab_{TRANS}) / (1 - Stab_{total}) \quad (3)$$

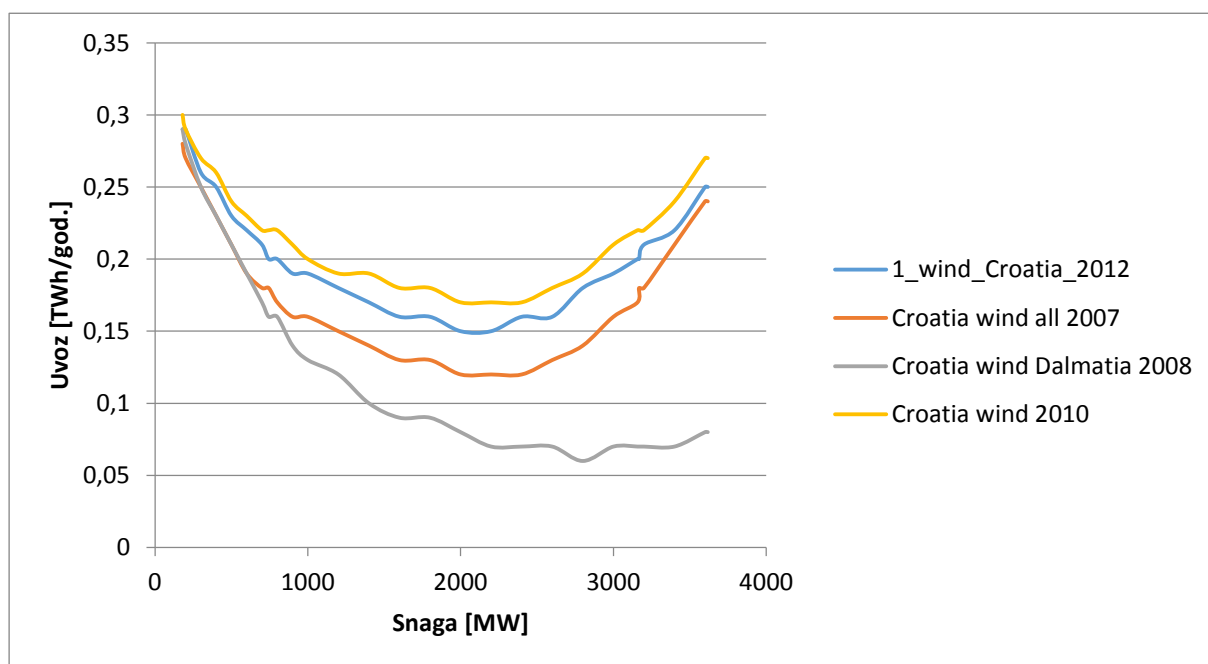
Za ilustraciju načina izračuna proizvodnje termoelektrana, u Tablica 2 su prikazani podatci za dva različita sata u godini uz kapacitet vjetroelektrana od 3618 MW. Sve mjerne jedinice su prikazane u MWh.

Tablica 2. Bilanca sustava za dva različita sata u godini

| Sat | 1 | 134 |
|--|------------|-------------|
| Electr. Demand | 2112 | 2137 |
| Fixed Exp/Imp | 0 | 0 |
| Wind Electr. | 109 | 2178 |
| PV Electr. | 0 | 1 |
| River Electr. | 130 | 129 |
| Hydro Electr | 178 | 132 |
| CHP Electr. | 478 | 618 |
| PP Electr. | 920 | 948 |
| PP2 Electr. | 0 | 96 |
| Nuclear Electr. | 298 | 298 |
| Turbine Electr. | 0 | 216 |
| Stabil. Load (%) | 177 | 102 |
| Import Electr. | 0 | 0 |
| Export Electr. | 0 | 2223 |
| CEEP Electr. | 0 | 2223 |
| e_{Total} ; jednadžba 2 | 1193 | 3572 |
| e_{pp} ; jednadžba 1 | 919 | -1435 |
| e_{pp} ; jednadžba 3 | -715 | 1044 |
| max e_{pp} (potrebna proizvodnja termoelektrana) | 919 | 1044 |

Kao što se vidi u situaciji kakva je u 134. satu gdje je ostvarena velika proizvodnja iz vjetroelektrana, potreba za električnom energijom je namirena i bez uključivanja termoelektrana, ali velika proizvodnja vjetroelektrana uvjetuje i veliku proizvodnju termoelektrana za održavanje stabilnosti mreže prema jednadžbi 3.

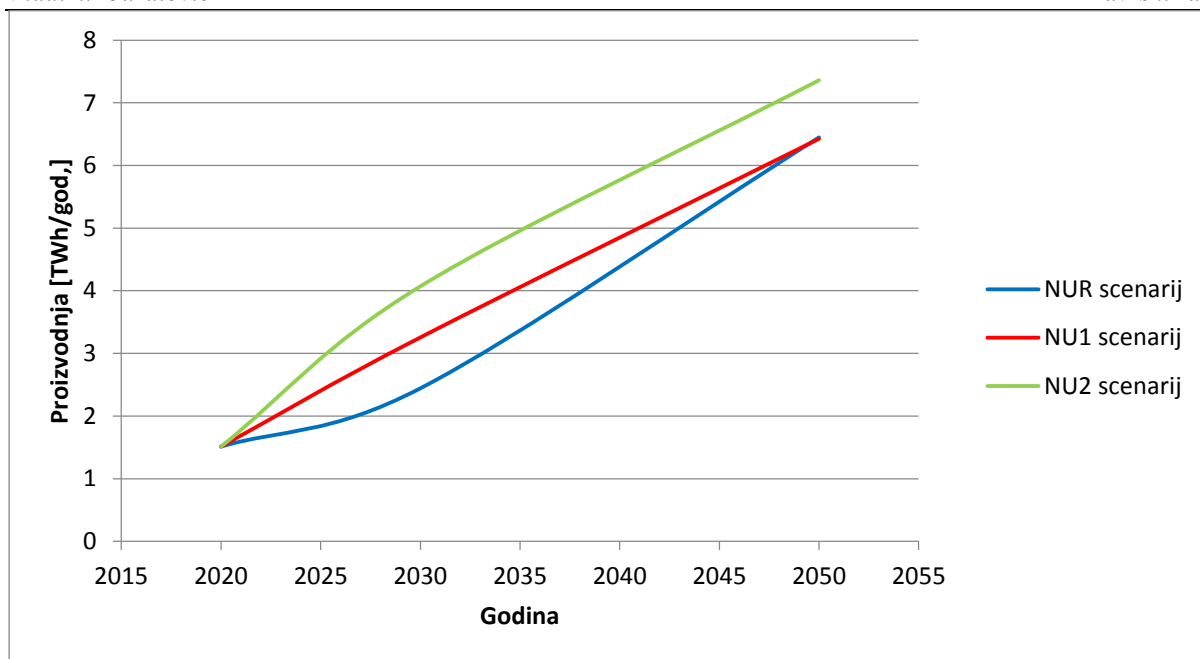
Uvoz električne energije je prikazan na Slika 50. Kad proizvodnja termoelektrana zbog održavanja stabilnosti mreže prekorači instalirane kapacitete termoelektrana, EnergyPLAN ostatak energije potrebne za balansiranje sustava namiri preko uvoza energije, iako je isključena mogućnost prekogranične izmjene električne energije. Zato kod velikih snaga vjetroelektrana uvoz počinje rasti. No kod krivulje „Croatia wind Dalmatia 2008“ uvoz ne raste povećanjem snage vjetroelektrana kao kod ostalih krivulja, pa ima dobre pokazatelje za smanjenje uvoza i kod većih instaliranih snaga. Na prikazu usporedbe krivulja [Slika 3] vidi se da je to zbog kraćeg rada vjetroelektrana na niskom faktoru iskorištenja snage.



Slika 50. Uvoz električne energije

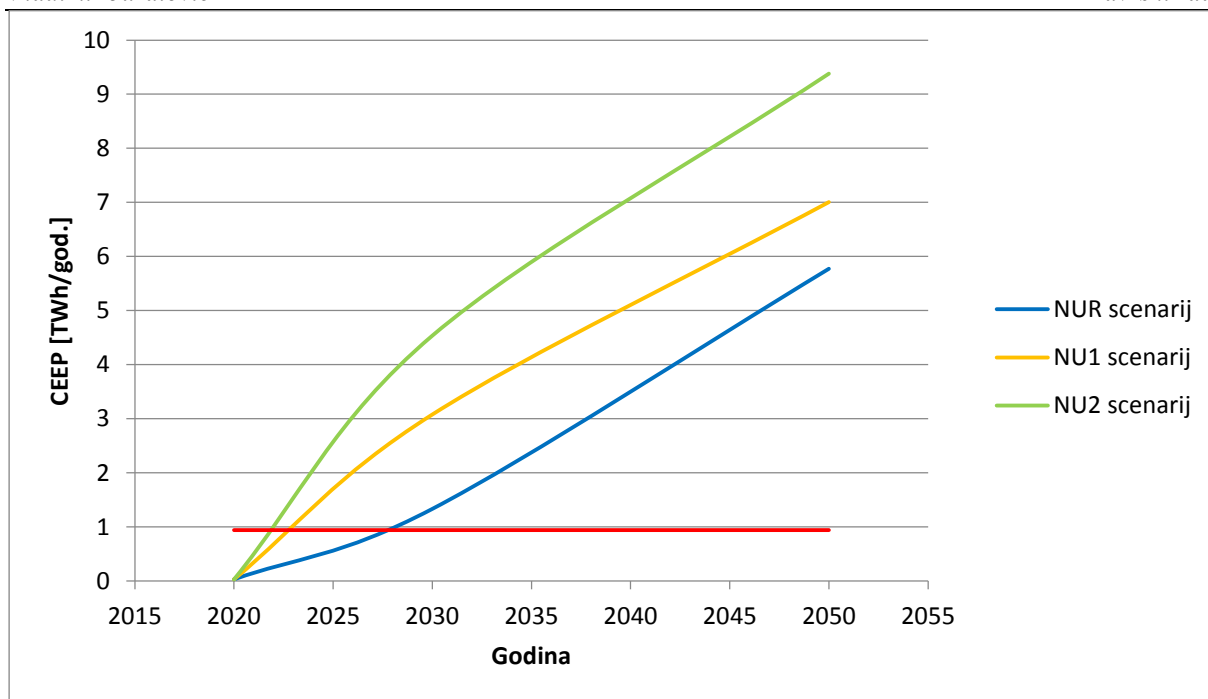
3.4.2. Analiza elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske prema scenarijima iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougličinog razvoja Republike Hrvatske

Na Slika 51 je prikazana predviđena proizvodnja iz vjetroelektrana za razdoblje od 2020. do 2050. godine za sva tri scenarija. Prikazani podatci u svim grafovima predstavljaju prosječne vrijednosti za sve analizirane krivulje.



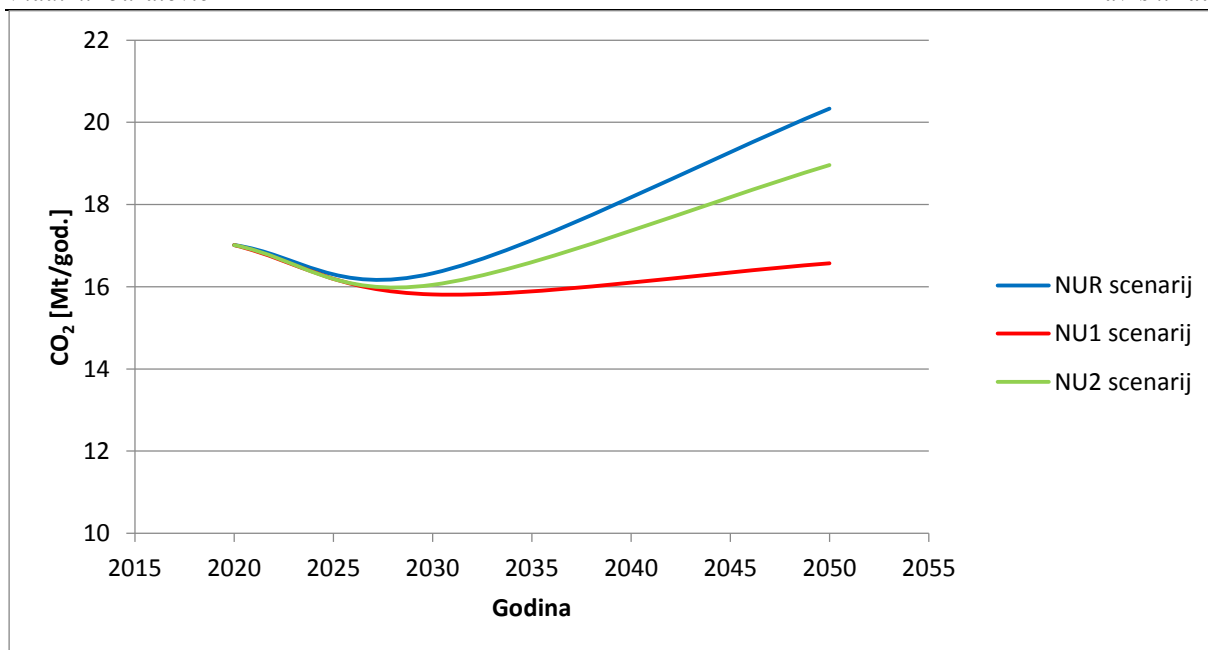
Slika 51. Proizvodnja vjetroelektrana prema različitim scenarijima

CEEP [Slika 52] prema Scenariju snažne tranzicije raste najbrže, a prema Referentnom scenariju najsporije. Granica dopuštenog CEEP-a ovisi o konfiguraciji elektroenergetskog sustava te je uobičajeno da se uzima oko 5 % potrošnje električne energije jer je to iznos koji se može regulirati te je na Slika 52 crvenoj linijom prikazana okvirna granica CEEP-a od 5 % potrošnje koja se odnosi za 2012. godinu. CEEP dostiže tu okvirnu granicu oko 2028. godine za NUR scenarij i oko 2022. godine za NU2 scenarij. Važno je napomenuti da se ovi rezultati odnose na energetske sustav bez primjene dodatnih mjera smanjenja CEEP-a u odnosu na sadašnje, te bez mogućnosti smanjivanja CEEP-a pomoću izvoza električne energije. CEEP je u rezultatima veći zbog postavljenog minimuma proizvodnje namjenjene za stabilizaciju mreže od 50 % bez mogućnosti regulacije sustava ostalim elektranama. U dobro reguliranom sustavu to nije potrebno, a primjer je Danska koja u pojedinim satima ima proizvodnju iz vjetroelektrana iznad 100 % uz potpuno ugašene termoelektrane i malen postotak ostalih elektrana koje mogu pružiti regulaciju.



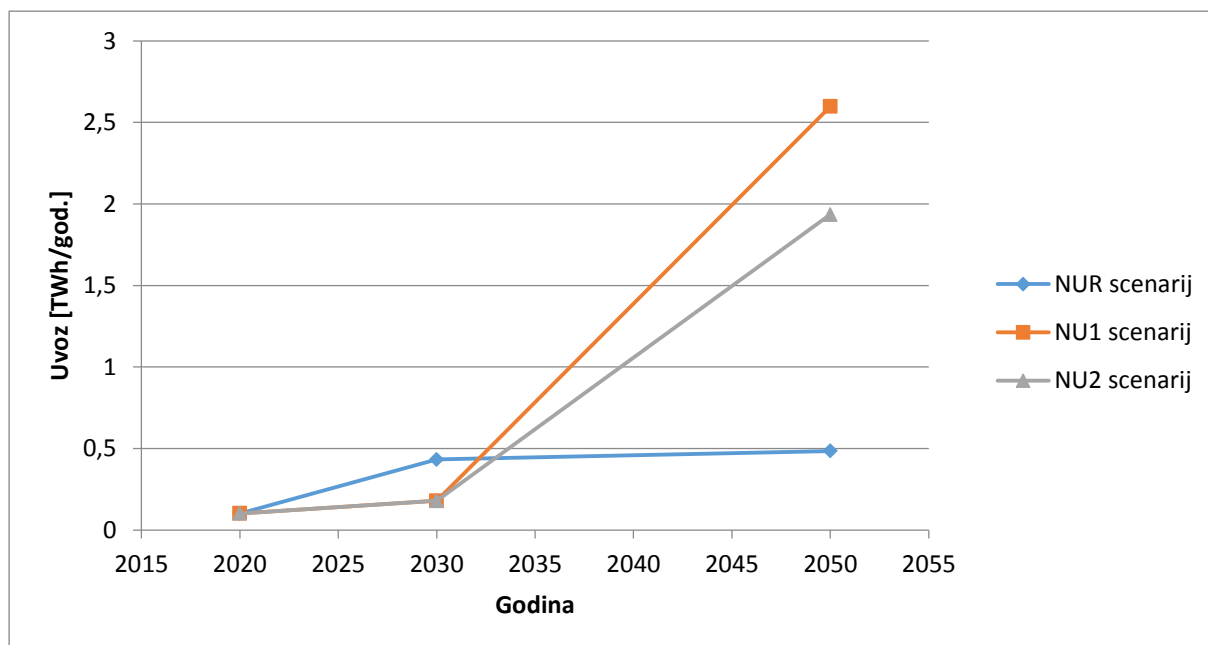
Slika 52. CEEP prema različitim scenarijima

Emisije CO₂ [Slika 53] su najveće kod NUR scenarija, ali su kod NU2 scenarija veće nego kod NU1 scenarija. To je zbog toga što u modelu nisu računane termoelektrane s tehnologijom odvajanja i skladištenja CO₂ koje su prema strategiji dostupne za 2050. godinu. Također su emisije veće u 2050. godini nego u 2030. godini zbog postavki modela u kojem se mreža regulira termoelektranama kao što je ranije objašnjeno. U modelu je udio stabilizacijske proizvodnje podešen na 50 %, no to bi do 2050. moglo biti niže. Na primjeru Danske [12] vidi se da je već sada udio stabilizacijske proizvodnje iz CHP postrojenja i termoelektrana oko 10 % proizvodnje. Uz pravilnu regulaciju sustava nebi dolazilo do porasta emisije CO₂.



Slika 53. CO₂ emisije prema različitim scenarijima

Uvoz električne energije je prikazan za različite scenarije na Slika 54. U 2050. godini uvoz je najmanji kod NUR scenarija zbog najvećeg kapaciteta termoelektrana prema tom scenariju, a najveći kod NU1 scenarija zbog najmanjeg kapaciteta termoelektrana. Veći uvoz kod NUR scenarija u 2030. godini objašnjava se najvećom potrošnjom električne energije.

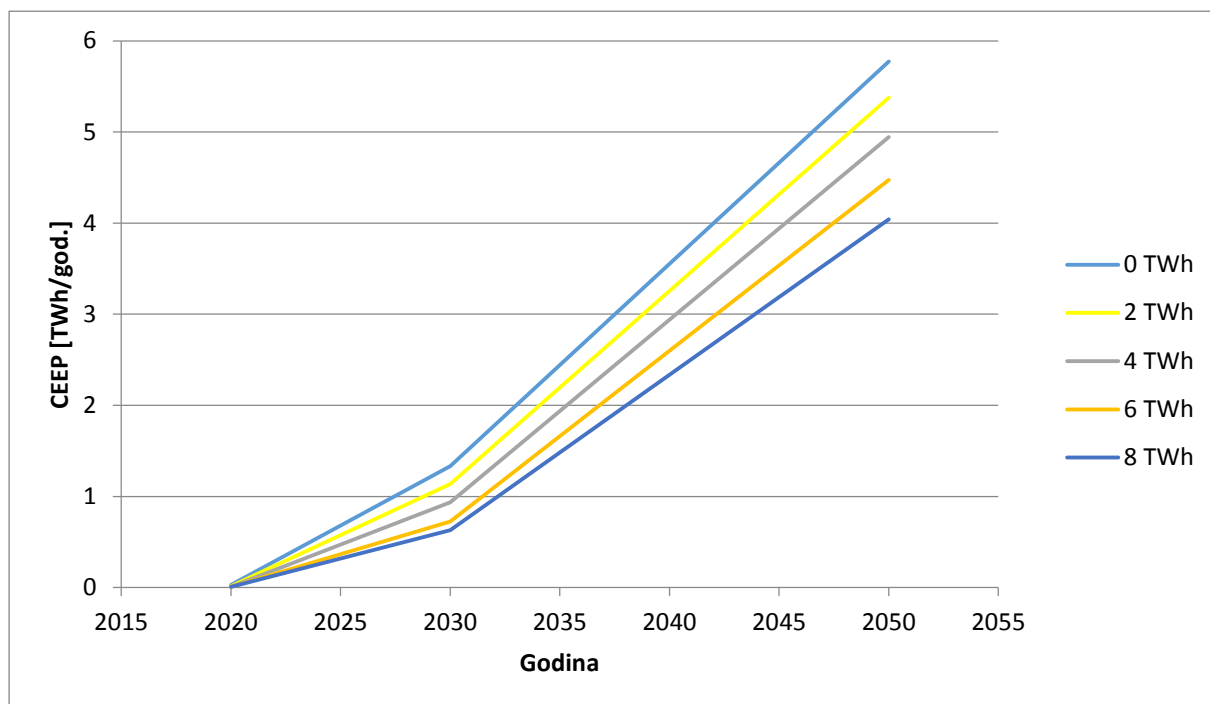


Slika 54. Uvoz električne energije prema različitim scenarijima

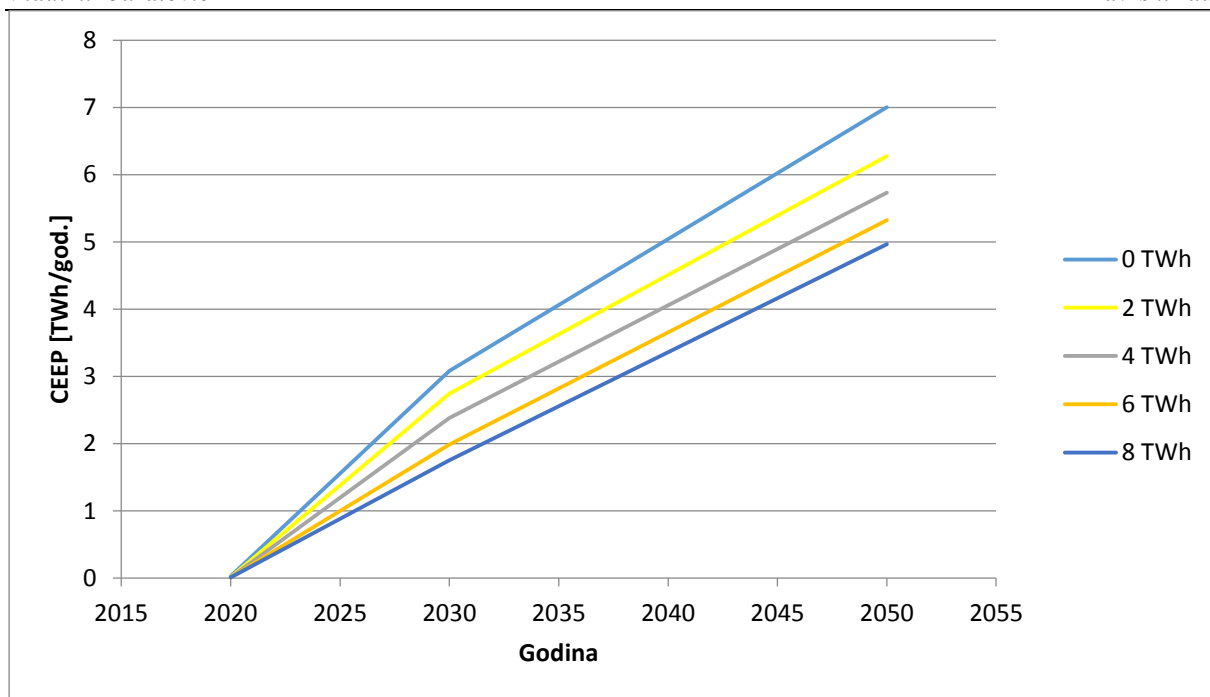
3.5. Mjere smanjenja „kritičnog viška proizvodnje električne energije“ za 2030. i 2050. godinu

3.5.1. Korištenje pametnog punjenja baterijskih vozila

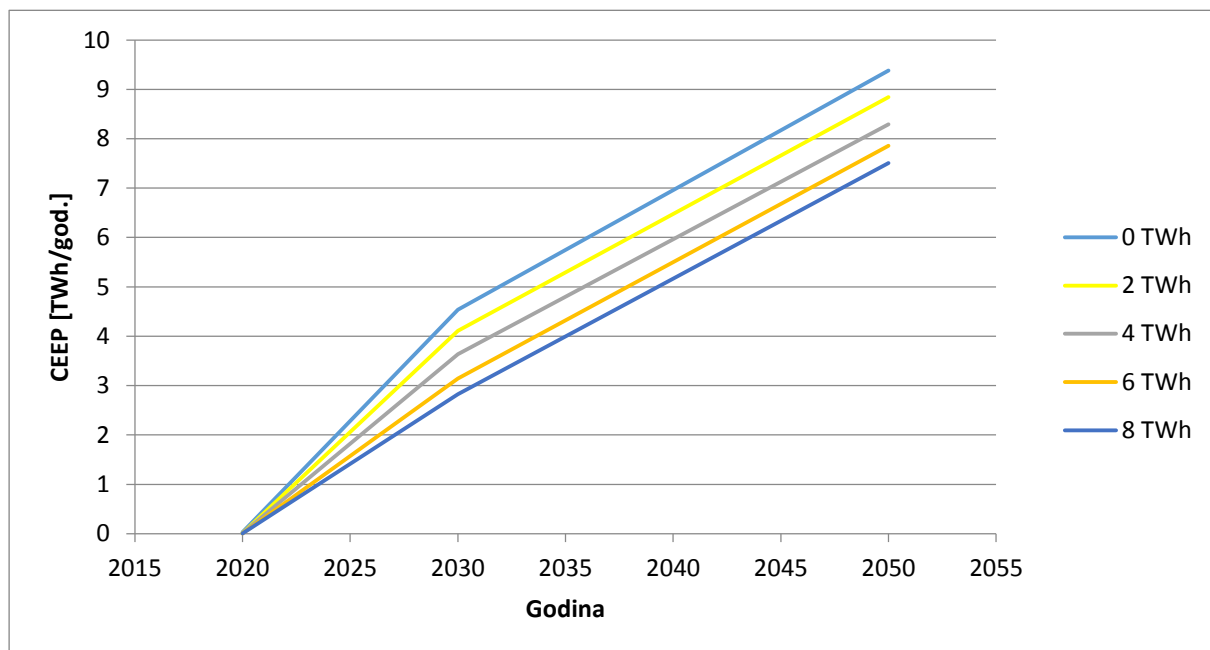
Pametno punjenje baterijskih vozila omogućuje prilagodbu potrebe za električnom energijom kako bi se baterije punile u trenutcima kad je proizvodnja najveća. Time baterijska vozila priključena na pametne mreže aktivno sudjeluju u regulaciji sustava. Prikazano je kako se mijenja CEEP ovisno o potrošnji baterijskih vozila spojenih na takve mreže za različite scenarije, a podatci predstavljaju prosjek svih korištenih satnih distribucija proizvodnje vjetra.



Slika 55. Smanjenje CEEP-a za NUR scenarij ovisno o potrošnji baterijskih vozila



Slika 56. Smanjenje CEEP-a za NU1 scenarij ovisno o potrošnji baterijskih vozila

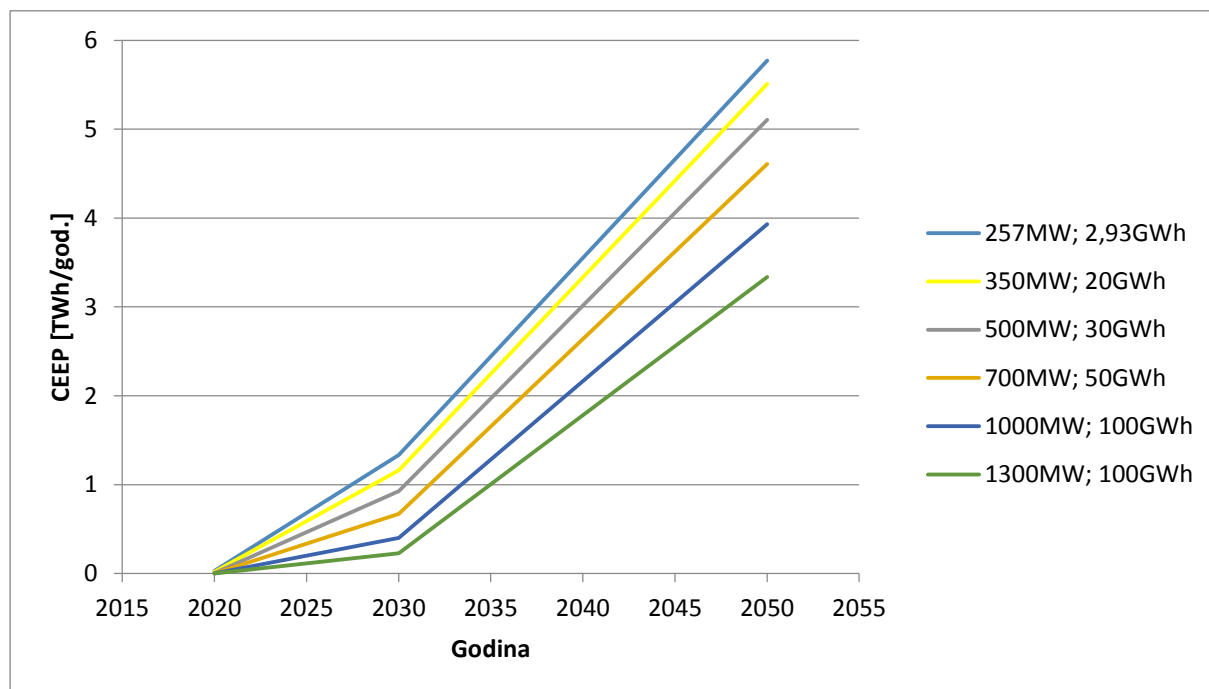


Slika 57. Smanjenje CEEP-a za NU2 scenarij ovisno o potrošnji baterijskih vozila

Kod potrošnje električnih vozila od 8 TWh u 2030. godini CEEP je smanjen za 0,70 TWh kod NUR scenarija, 1,33 TWh kod NU1 scenarija i za 1,71 TWh prema NU2 scenariju. Za 2050. godinu to smanjenje CEEP-a iznosi 1,73 TWh prema NUR scenariju, 2,04 TWh prema NU1 scenariju i 1,87 TWh prema NU2 scenariju.

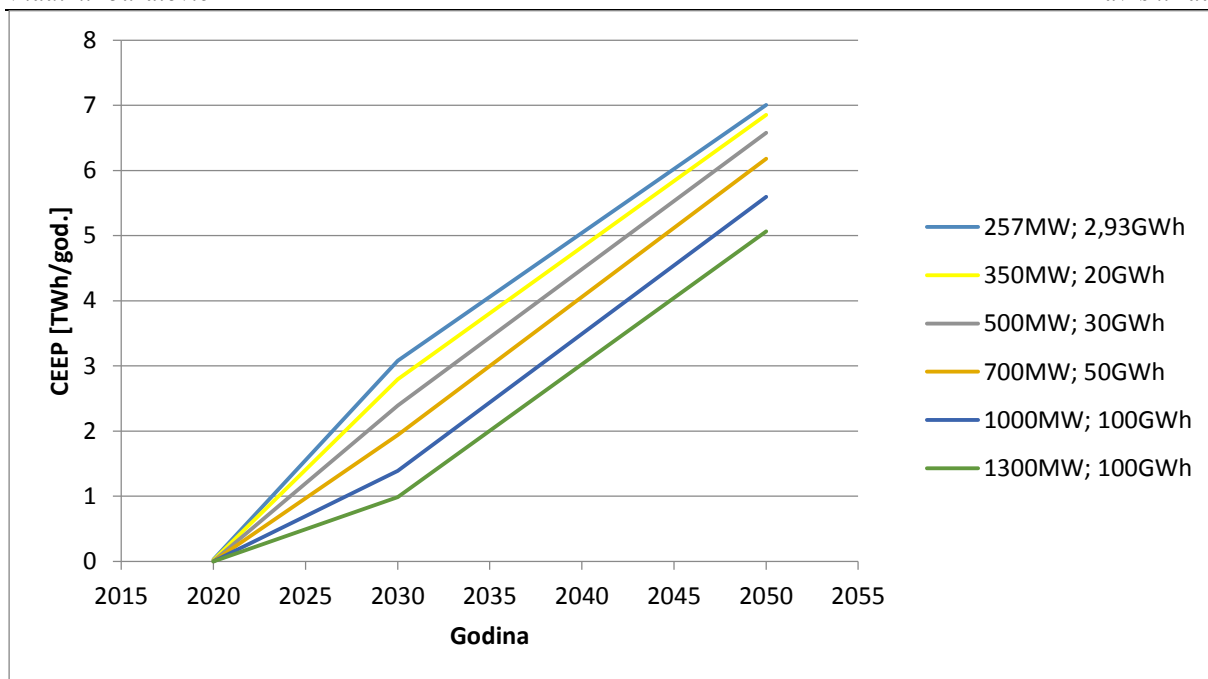
3.5.2. Pohrana energije reverzibilnim hidroelektranama kao mjera smanjenja CEEP-a

Povećanjem kapaciteta reverzibilnih hidroelektrana omogućuje se njihovo angažiranje za uravnoteženje sustava. Mogućnost mijenjanja i skladištenja potencijalne energije vode koristi se za pozitivno i negativno uravnoteženje sustava u slučaju potrebe za tim. Na Slika 58 je prikazan CEEP za različite snage pumpi reverzibilnih hidroelektrana i različite kapacitete spremišta energije za NUR scenarij. Snaga turbina je mijenjana linearno s snagom pumpi od 293,1 MW na dalje, a svaka krivulja predstavlja prosjek svih satnih distribucija snage vjetra.

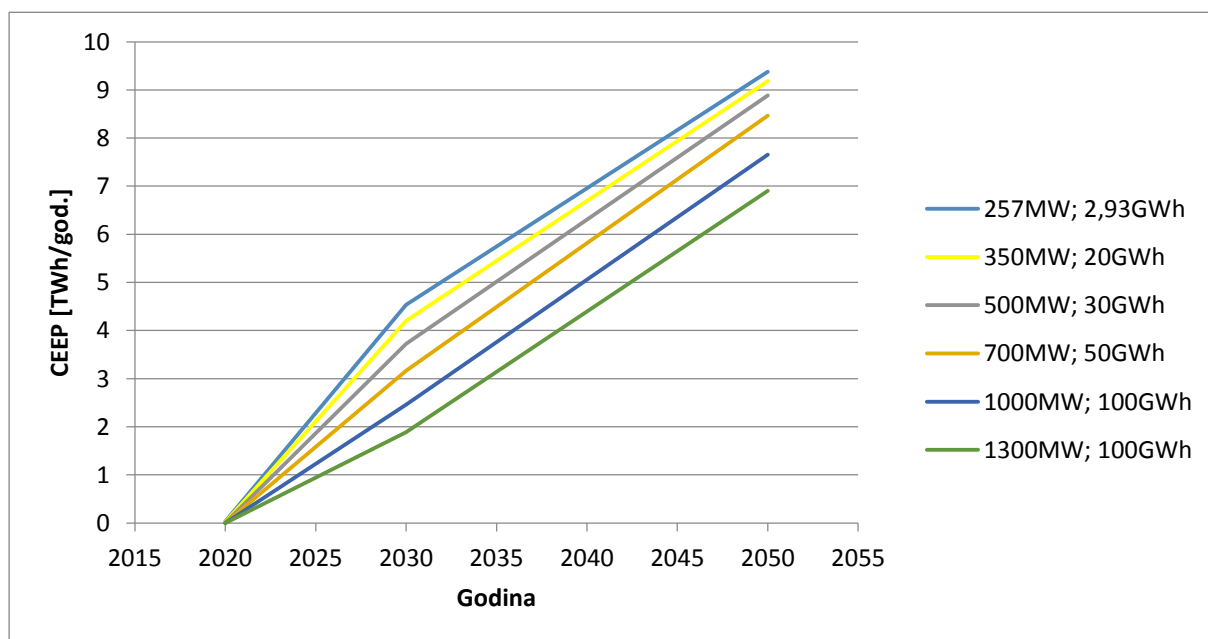


Slika 58. Smanjenje CEEP-a za NUR scenarij ovisno o skladištu energije i snazi pumpa RHE

Na isti način izračunati je smanjenje CEEP-a za NU1 [Slika 59] i NU2 [Slika 60].



Slika 59. Smanjenje CEEP-a za NU1 scenarij ovisno o skladištu energije i snazi pumpa RHE



Slika 60. Smanjenje CEEP-a za NU2 scenarij ovisno o skladištu energije i snazi pumpa RHE

Kod snage pumpi od 1300 MW i kapaciteta skladišta energije od 100 GWh za NUR scenarij smanjenje CEEP-a u 2030. godini iznosi 1,11 TWh, a u 2050. godini 2,44 TWh. Kod NU1 scenarija smanjenje CEEP-a iznosi 2,09 TWh u 2030. godini i 1,94 TWh u 2050. godini, a kod NU2 scenarija 2,65 TWh u 2030. godini i 2,48 TWh u 2050. godini.

4. ZAKLJUČAK

Snažan razvoj vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj predviđa se po svim scenarijima te se zbog specifičnosti proizvodnje energije iz vjetroelektrana stvara potreba analize te proizvodnje. Osim što je važna količina proizvedene energije, još je važnije poznavanje promjenjivosti njihove proizvodnje. Zbog promjenjivosti proizvodnje i nepoznavanja potpuno točnih predviđanja proizvodnje potrebne su veće mogućnosti regulacije sustava. Usporedba podataka predviđene proizvodnje za razdoblje od lipnja 2007. do ožujka 2009. godine s onim ostvarenim od siječnja 2015. do lipnja 2016. godine pokazala je korelacije faktora iskorištenja snage na mjesečnoj razini, krivulja trajanja angažirane snage i kumulativnih proizvodnja, a do najvećih odstupanja je došlo u 11. i 12. mjesecu. Za pet mjeseca u godini je razlika faktora iskorištenja snage predviđene i ostvarene proizvodnje manja od 2 %, a u 12. mjesecu je ostvarena proizvodnja 3,58 puta manja od predviđene temeljene na povijesnim mjerenjima.

U ovom radu je također pokazano da će razina CEEP-a, ukoliko će se pratiti scenariji iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske, dostići približne granične vrijednosti od 5 % potrošnje u 2012. godini između 2022. i 2028. godine ovisno o različitim scenarijima u slučaju nekorištenja dodatnih mjera smanjenja CEEP-a. Brojne su mjere smanjenja CEEP-a, a predložena mjera korištenja pametnog punjenja baterijskih vozila snižava CEEP za do 1,71 TWh u 2030. godini i do 2,04 TWh u 2050. godini kod potrošnje električnih vozila od 8 TWh. Korištenje skladištenja energije reverzibilnih hidroelektranama kao mjere smanjenja CEEP-a snižava CEEP za do 2,65 TWh u 2030. godini i do 2,48 TWh u 2050. godini uz snagu pumpi od 1300 MW i kapacitet skladišta energije od 100 GWh. Važna je i analiza kretanja CO₂ emisija koje se prvo snižavaju povećanjem kapaciteta vjetroelektrana, no zbog postavka regulacije mreže u EnergyPLAN-u daljnim rastom vjetroelektrana emisije počinju rasti što treba izbjeći pravilnom regulacijom elektroenergetskog sustava.

LITERATURA

- [1] Jelavić, V.: Stručne podloge za izradu strategije niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje do 2030. s pogledom na 2050. godinu, Zagreb, 2015.
- [2] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – lipanj 2016.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [3] Državni hidrometeorološki zavod - Atlas vjetra Hrvatske
<http://mars.dhz.hr/web/index.htm>
- [4] Godišnji izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – 2015.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [5] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – siječanj 2016.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [6] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – veljača 2016.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [7] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – ožujak 2016.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [8] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – travanj 2016.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [9] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj – svibanj 2016.
<http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/dokumenti/Publikacije/izvjestajive>
- [10] Krajačić, G., Šakić, N., Duić, N., Lončar, D.: Prediction of wind power plants energy production by use of the publicly available wind measurement data, Zagreb, 2011.
- [11] Lund, H.: EnergyPLAN Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 12, Denmark, 2015.
<http://www.energyplan.eu/>
- [12] <http://www.emd.dk/el/>

PRILOZI

I. CD-R disc