



Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.



## GODIŠNJI IZVJEŠTAJ O PROIZVODNJI VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ

## ANNUAL REPORT ON WIND POWER PLANT GENERATION IN CROATIA



2016

# SADRŽAJ



# CONTENTS

	stranica/ page	
<b>SADRŽAJ</b>		<b>CONTENTS</b>
<b>PREDGOVOR</b>	6	<b>FOREWORD</b>
1. PREGLED OSNOVNIH PARAMETARA VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ	8	1. BASIC PARAMETERS OVERVIEW OF WIND POWER PLANTS IN CROATIA
2. OSTVARENA PROIZVODNJA VJETROELEKTRANA	13	2. REALIZED WIND POWER PLANT GENERATION
3. PROMJENJIVOST PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA	22	3. WIND POWER PLANT GENERATION VARIABILITY
4. PROGNOZA PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA	25	4. WIND POWER PLANT GENERATION FORECASTING

<b>POPIS TABLICA</b>		stranica/ page	<b>LIST OF TABLES</b>	
TABLICA 1	OSNOVNI PARAMETRI VJETROELEKTRANA U REDOVNOM POGONU	10	TABLE 1	BASIC PARAMETERS OVERVIEW OF WIND POWER PLANTS IN NORMAL OPERATION
TABLICA 2	OSNOVNI PARAMETRI VJETROELEKTRANA U POKUSNOM RADU	11	TABLE 2	BASIC PARAMETERS OVERVIEW OF WIND POWER PLANTS IN TESTING OPERATION

<b>POPIS SLIKA</b>		stranica/ page	<b>LIST OF FIGURES</b>	
SLIKA 1	LOKACIJE VE U HRVATSKOJ	9	FIGURE 1	WPP LOCATIONS IN CROATIA
SLIKA 2	VREMENSKA DINAMIKA IZGRADNJE VE U HRVATSKOJ	12	FIGURE 2	TIME HORIZON OF WIND POWER PLANT CONSTRUCTION IN CROATIA
SLIKA 3	SATNA PROIZVODNJA SVIH VJETROELEKTRANA	14	FIGURE 3	HOURLY GENERATION OF ALL WIND POWER PLANTS
SLIKA 4	KRIVULJA TRAJANJA ANGAŽIRANE SNAGE SVIH VE U PROMATRANOM RAZDOBLJU U JEDINIČNIM VRIJEDNOSTIMA	15	FIGURE 4	DURATION CURVE OF ENGAGED CAPACITY OF ALL WIND POWER PLANTS IN GIVEN TIMEFRAME IN PER UNIT
SLIKA 5	STANDARDNA DEVIJACIJA SATNE PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA U JEDINIČNIM VRIJEDNOSTIMA	16	FIGURE 5	STANDARD DEVIATION OF HOURLY GENERATION OF ALL WIND POWER PLANTS IN PER UNIT
SLIKA 6	DNEVNA PROIZVODNJA SVIH VJETROELEKTRANA	17	FIGURE 6	DAILY GENERATION OF ALL WIND POWER PLANTS
SLIKA 7	KRIVULJA TRAJANJA DNEVNE PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA	17	FIGURE 7	AVERAGE DAILY WPP GENERATION DURATION CURVE
SLIKA 8	STANDARDNA DEVIJACIJA DNEVNE PROIZVODNJE SVIH VJETROELEKTRANA U JEDINIČNIM VRIJEDNOSTIMA	18	FIGURE 8	STANDARD DEVIATION OF DAILY GENERATION OF ALL WIND POWER PLANTS IN PER UNIT
SLIKA 9	MJESEČNA PROIZVODNJA SVIH VJETROELEKTRANA	19	FIGURE 9	MONTHLY OUTPUT OF ALL WIND POWER PLANTS
SLIKA 10	MJESEČNI FAKTOR ISKORIŠTENJA SNAGE SVIH VJETROELEKTRANA	20	FIGURE 10	MONTHLY CAPACITY FACTOR OF ALL WIND POWER PLANTS
SLIKA 11	USPOREDBA SATNOG DIJAGRAMA OPTEREĆENJA SUSTAVA I PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA	21	FIGURE 11	COMPARISON BETWEEN HOURLY SYSTEM DEMAND AND WPP GENERATION
SLIKA 12	UDIO PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA U POKRIVANJU SATNOG OPTEREĆENJA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA	21	FIGURE 12	WPP GENERATION SHARE IN COVERING POWER SYSTEM DEMAND
SLIKA 13	MAKSIMALNA POZITIVNA I MAKSIMALNA NEGATIVNA PROMJENA SATNE PROIZVODNJE VE U MJESECU	23	FIGURE 13	MAXIMUM POSITIVE AND MAXIMUM NEGATIVE WIND POWER PLANT HOURLY OUTPUT VARIATION DURING THE MONTH
SLIKA 14	STATISTIČKA RASPODJELA SATNIH PROMJENA PROIZVODNJE VE	24	FIGURE 14	STATISTICAL DISTRIBUTION OF WPP HOURLY OUTPUT VARIATIONS
SLIKA 15	PROGNOZIRANA I OSTVARENA SATNA PROIZVODNJA VJETROELEKTRANA	26	FIGURE 15	FORECASTED AND REALIZED WIND POWER PLANT GENERATION
SLIKA 16	RAZLIKA IZMEĐU PROGNOZIRANE I OSTVARENE SATNE PROIZVODNJE SVIH	27	FIGURE 16	DIFFERENCE BETWEEN FORECASTED AND REALIZED TOTAL WPP HOURLY

VE I PRIPADNA KRIVULJA TRAJANJA		GENERATION AND ITS DURATION CURVE
SLIKA 17 MAKSIMALNA POZITIVNA, MAKSIMALNA NEGATIVNA I PROSJEČNA APSOLUTNA POGREŠKA SATNE PROGNOZE PROIZVODNJE VE	28	FIGURE 17 MAXIMUM POSITIVE, MAXIMUM NEGATIVE AND AVERAGE ABSOLUTE FORECAST ERROR OF WIND POWER PLANT HOURLY OUTPUT
SLIKA 18 SUMA POZITIVNIH POGREŠKI PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE VE (NEGATIVNA ENERGIJA URAVNOTEŽENJA) I SUMA NEGATIVNIH POGREŠKI PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE VE (POZITIVNA ENERGIJA URAVNOTEŽENJA) U POJEDINOM MJESECU	29	FIGURE 18 SUM OF POSITIVE ERRORS (NEGATIVE BALANCING ENERGY) AND SUM OF NEGATIVE ERRORS (POSITIVE BALANCING ENERGY) OF WIND POWER PLANT HOURLY GENERATION IN EACH MONTH
SLIKA 19 POGREŠKE PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE VE I PROSJEČNE APSOLUTNE POGREŠKE PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE VE NA DNEVNOJ RAZINI ISKAZANE U POSTOCIMA INSTALIRANE SNAGE VE	30	FIGURE 19 FORECAST ERRORS OF WPP HOURLY OUTPUT AND AVERAGE ABSOLUTE FORECAST ERROR OF WPP HOURLY OUTPUT ON DAILY LEVEL SHOWN IN PERCENTAGE OF INSTALLED WPP CAPACITY
SLIKA 20 KORIJEN SREDNJE KVADRATNE POGREŠKE PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE SVIH VE	31	FIGURE 20 ROOT MEAN SQUARE ERROR OF HOURLY WPP GENERATION FORECAST
SLIKA 21 KORIJEN SREDNJE KVADRATNE POGREŠKE PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE SVIH VE U JEDINIČNIM VRIJEDNOSTIMA	32	FIGURE 21 ROOT MEAN SQUARE ERROR OF HOURLY WPP GENERATION FORECAST IN PER UNIT
SLIKA 22 FREKVENCIJA POJAVLJIVANJA POGREŠKE PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE SVIH VE	33	FIGURE 22 FREQUENCY OF FORECAST ERROR OF WIND POWER PLANT HOURLY GENERATION
SLIKA 23 KORIJEN SREDNJE KVADRATNE POGREŠKE PROGNOZE SATNE PROIZVODNJE SVIH VE U POSTOCIMA INSTALIRANE SNAGE U POSLJEDNJIH 5 GODINA	33	FIGURE 23 ROOT MEAN SQUARE ERROR OF HOURLY WPP GENERATION FORECAST IN PERCENTAGE OF INSTALLED CAPACITY IN THE LAST 5 YEARS

## PREDGOVOR



## FOREWORD

Poštovani čitatelji,

nakon višegodišnje reforme elektroenergetskog sektora koja podrazumijeva i sve veću integraciju obnovljivih izvora energije, razina izgradnje vjetroelektrana u Hrvatskoj dosegla je vrijednosti koje značajno utječu na pogon elektroenergetskog sustava u cjelini. Stoga se pojavila potreba da se stručna i šira javnost detaljnije izvještava o karakteristikama i specifičnostima proizvodnje vjetroelektrana te o pripadnim pogonskim iskustvima u Hrvatskoj.

Sukladno ciljevima energetske politike Hrvatske i EU u narednom razdoblju očekuje se još značajnija uloga vjetroelektrana i u elektroenergetskom sustavu Hrvatske. Njihova pravilna integracija u elektroenergetski sustav uz istodobno očuvanje sigurnog i stabilnog pogona te sigurnosti opskrbe svakako predstavlja jedan od najvećih izazova pred Hrvatskim operatorom prijenosnog sustava, ali i energetske sektorom u cjelini.

Objavlivanjem ovih Izvještaja Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o. nastavlja s informiranjem javnosti o odnosima i kretanjima u hrvatskom elektroenergetskom sustavu. Ove izvještaje smatramo posebno bitnim obzirom na očekivanu sve značajniju i vrlo specifičnu ulogu vjetroelektrana u elektroenergetskom sustavu, ali i obzirom na činjenicu da se proizvodnja vjetroelektrana u Hrvatskoj subvencionira javnim novcem, pa objavljivanje ovih podataka svakako spada i u domenu javnog interesa.

Ovaj Izvještaj u svojih 4 poglavlja na sistematičan i konzistentan način donosi više od 50 različitih tehničkih podataka i pokazatelja te predstavlja temeljnu literaturu za sve buduće rasprave i analize na temu integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Hrvatske.

Zagreb, veljača 2016.

Dear readers,

after years of power sector reform, including larger scale integration of renewable energy sources, wind power plant integration in Croatia reached the level that affects power system operation significantly. Accordingly, there is a need to inform professionals and general public about characteristics and specifics of wind power plant generation as well as about relevant Croatian operational experiences.

In line with Croatian and EU energy policy targets it is expected to have increasing role of wind power plants in Croatian power system in the future. Its adequate and correct integration, along with keeping stable and safe system operation and security of supply, is one of the largest challenges for Croatian Transmission System Operator and for energy sector in general.

With these Reports Croatian Transmission System Operator Ltd. continues to inform general public about relations and developments in Croatian power system. We believe that these Reports are of special importance taking into account expected growing and very specific role of wind power plants, as well as having in mind that wind power plant generation in Croatia is subsidized through the public funding. So, the Reports are certainly in the domain of public interest.

The Report consists of 4 Chapters in which more than 50 different technical data and indicators are given in systematic and consistent way. It represents the basic literature for future debates and analyses about wind power plant integration in Croatian power system-

Zagreb, February 2016



Dr.sc. Miroslav Mesić

predsjednik Uprave društva  
*President of the Management Board*

# 1.

## PREGLED OSNOVNIH PARAMETARA VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ



## BASIC PARAMETERS OVERVIEW OF WIND POWER PLANTS IN CROATIA



U prikazu osnovnih parametara vjetroelektrane dijelimo u dvije grupe:

- 1) vjetroelektrane u redovnom pogonu i
- 2) vjetroelektrane u pokusnom radu.

U 2016. godini je u Hrvatskoj u redovnom pogonu bilo 16 vjetroelektrana, s ukupno instaliranom snagom od 428,15 MW i odobrenom snagom priključenja u iznosu od 420,35 MW (tablica 1).

Najviše vjetroelektrana smješteno je na lokacijama u Šibensko-kninskoj županiji (6), Zadarskoj županiji (5) i Splitsko-dalmatinskoj županiji (4) (slika 1).

Najveći broj vjetroelektrana (12) priključen je na 110 kV prijenosnu mrežu, dok su ostale priključene na sredjenaponsku distribucijsku mrežu (35, 30 i 10 kV).

U probnom pogonu / izgradnji bile su 2 vjetroelektrane, ukupne instalirane snage od 54,9 MW, a ukupno odobrene priključne snage 62,9 MW (tablica 2).

In basic parameters overview wind power plants are divided in two groups:

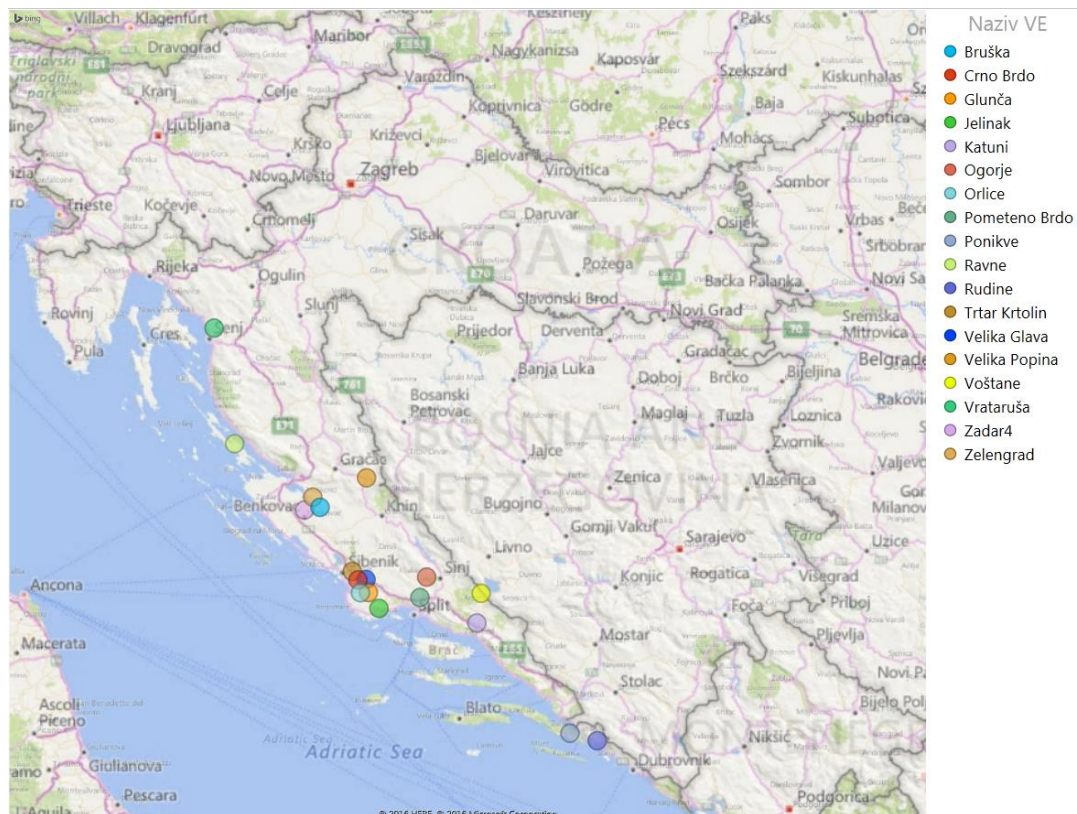
- 1) wind power plants in normal operation
- 2) wind power plants in testing operation or under construction.

In 2016 in Croatia there were 16 wind power plants with total installed capacity of 428.15 MW and total approved connection capacity of 420.35 MW (Table 1).

The largest number of wind power plants are located in Šibensko-kninska County (6), Zadarska County (5) and Split-Dalmatia County (4).

The largest number of wind power plants (12) are connected to 110 kV voltage level, while the rest are connected to the mid-voltage distribution network (35, 30 and 10 kV).

There were 2 wind power plants in testing operation / construction, with total installed capacity of 54.9 MW and total approved connection capacity of 62.9 MW (Table 2).



Slika 1 Lokacije VE u Hrvatskoj  
Figure 1 WPP locations in Croatia

Tablica 1 Osnovni parametri vjetroelektrana u redovnom pogonu

Table 1 Basic parameters overview of wind power plants in normal operation

Br No	Naziv VE WPP name	Lokacija (županija/općina) Location (county/municip.)	Ukupna instalirana snaga (MW) Total installed capacity (MW)	Ukupno odobrena snaga priključenja (MW) Total approved connected capacity (MW)	Napon priključenja (kV) Connection voltage (kV)	U redovnom pogonu od In normal operation since
1	Ravne	Zadarska/Pag	5,95	5,95	10	2005
2	Trtar Krtolin	Šib-Knin/Šibenik	11,2	11,2	30	2007
3	Orlice	Šib-Knin/Šibenik	9,6	9,6	30	2009
4	Vrataruša	Prim-Goran/Senj	42	42	110	2010
5	Velika Popina	Zadarska/Gračac	9,2	9,2	35	2011
6	Pometeno Brdo	Split-Dalm/Split	20	20	110	2010 / 2011 / 2012 / 2015
7	Crno Brdo	Šib-Knin/Šibenik	10,5	10	10	2011
8	Bruška	Zadarska/Benkovac, Obrovac	36,8	36	110	2011
9	Ponikve	Dub-Neret/Ston	36,8	34	110	2012
10	Jelinak	Šib-Knin/Marina, Seget	30	30	110	2013
11	Voštane	Split-Dalm/Trilj	42	40	110	2013
12	Zadar4	Zadarska/Benkovac	9,2	9,2	10	2013
13	Velika Glava	Šib-Knin/Drniš, Šibenik, Unešić	43,7	43	110	2014
14	Zelengrad	Zadarska/Obrovac	42	42	110	2014
15	Ogorje	Split-Dalm/Muč	45	44	110	2015
16	Rudine	Dub-Neret/Dubrovačko primorje	34,2	34,2	110	2015
UKUPNO TOTAL			428,15	420,35		

**Tablica 2 Osnovni parametri vjetroelektrana u pokusnom radu**

**Table 2 Basic parameters overview of wind power plants in testing operation**

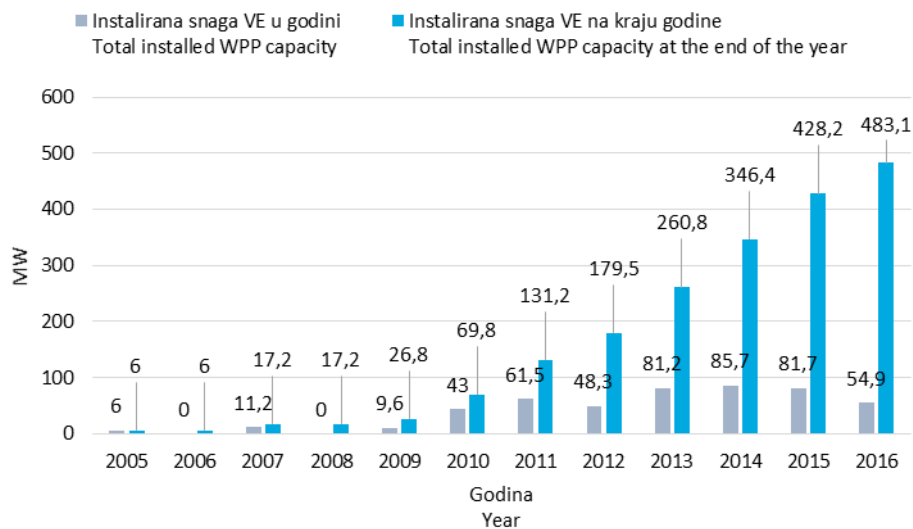
Br No	Naziv VE WPP name	Lokacija (županija/općina) Location (county/municip.)	Ukupna instalirana snaga (MW) Total installed capacity (MW)	Ukupno odobrena snaga priključenja (MW) Total approved connected capacity (MW)	Napon priključenja (kV) Connection voltage (kV)	Trenutni status Current status
17	Glunča	Šib-Knin/Šibenik	20,7	23	110	Pokusni rad / Testing operation
18	Katuni	Split-Dalm/Šestanovac	34,2	39,9	110	Pokusni rad / Testing operation
UKUPNO TOTAL			54,9	62,9		

Posebnost integracije VE u Hrvatskoj je njihova mala geografska raspršenost. Najveća udaljenost između dviju VE iznosi oko 300 km, dok je 15 od ukupno 18 VE sa 77% ukupno instalirane snage VE smještno na području sličnog vjetroklimatskog režima (110 x 70 km<sup>2</sup>) što uz izraženu promjenjivost brzine i smjera vjetra značajno utječe na promjenjivost ukupne proizvodnje VE, a samim time i na vođenje elektroenergetskog sustava u cjelini.

Prva vjetroelektrana u Hrvatskoj puštena je u redovni pogon 2005. godine (VE Ravna 1, instalirane snage 5,95 MW). U idućih nekoliko godina izgradnja VE tekla je usporeno, pa su do kraja 2009. godine izgrađene i puštene u pogon još dvije vjetroelektrane, od ukupno 26,8 MW instalirane snage svih VE. U razdoblju 2010. – 2016. godine u redovni pogon ulazilo prosječno 76,05 MW godišnje novih instaliranih kapaciteta vjetroelektrana (slika 2).

WPP integration in Croatia is specific for its low geographical dispersion. The largest distance between two WPPs is about 300 km, while 15 out of 18 WPPs with 77% of total WPP installed capacity is located on the area with similar wind climate (110 x 70 km<sup>2</sup>),. Along with significant wind variability, it strongly affects WPP output variability as well as controlling power system in general.

The first wind power plant in Croatia was put in normal operation in 2005 (WPP Ravna 1, with installed capacity of 5.95 MW). In the following years WPP integration was slow and till the end of 2009 two new wind power plants were constructed and put in normal operation. Total installed capacity of all wind power plants then was 26.8 MW. In the period 2010-2016 in average 76,05 MW of new WPP installed capacity was annually put in normal operation (Figure 2).



Slika 2 Vremenska dinamika izgradnje VE u Hrvatskoj

Figure 2 Time horizon of wind power plant construction in Croatia

# 2.

## OSTVARENA PROIZVODNJA VJETROELEKTRANA



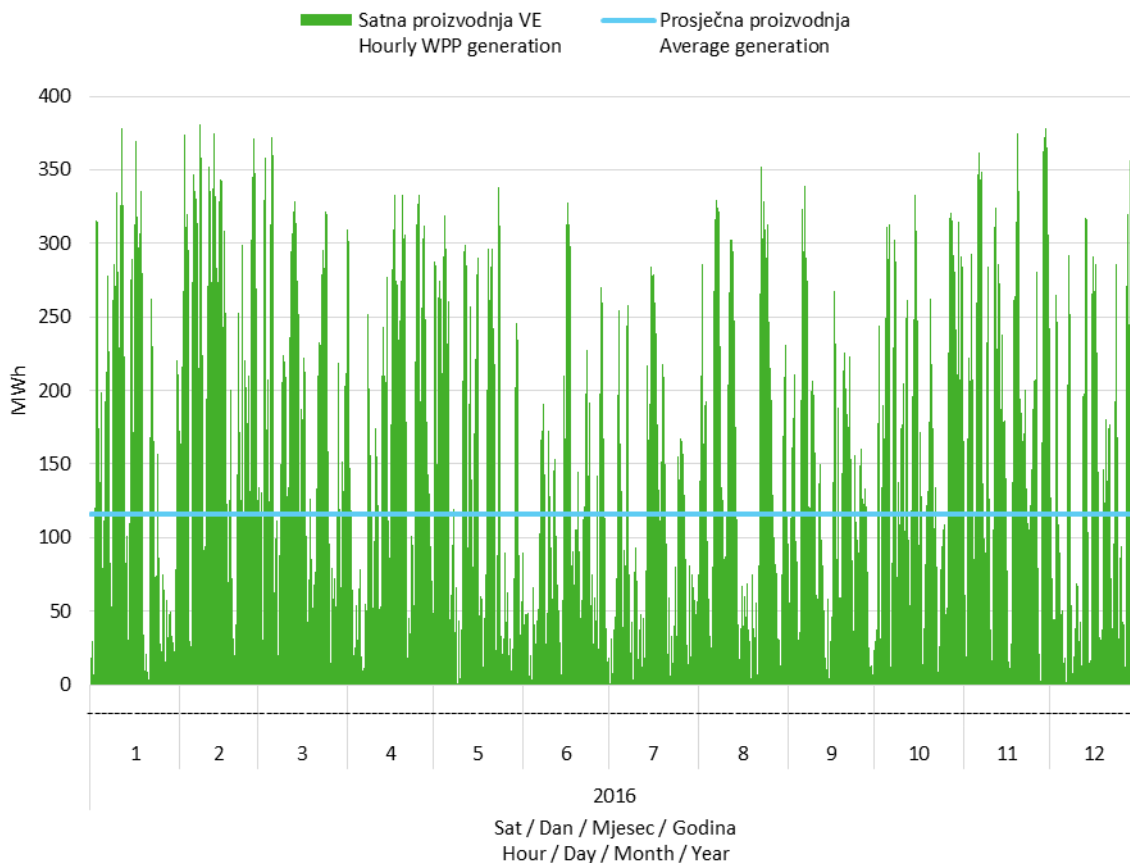
## REALIZED WIND POWER PLANT GENERATION

U ovom poglavlju prikazani su podaci o ostvarenoj proizvodnji svih VE u Hrvatskoj. Ukupna proizvodnja svih VE u Hrvatskoj u 2016. godini bila je 1012,51 GWh. Na slici 3 prikazana je ukupna satna proizvodnja svih VE u zadnjih 12 mjeseci. Pri tom je najveća ostvarena satna proizvodnja iznosila 380,5 MWh i ostvarena je 9.2.2016 godine u 22 h, a najmanja 0 MWh ostvarena 6.4.2016 godine u 1 h. Satna proizvodnja veća od 300 MWh ostvarena je tijekom 496 sati.

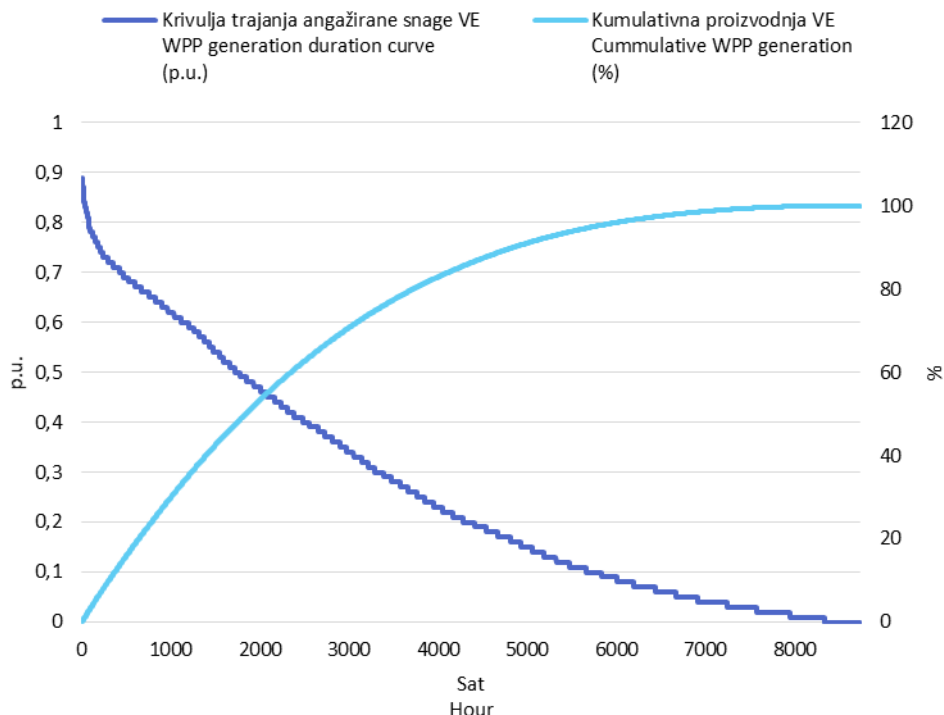
Budući da se instalirana snaga VE mijenjala tijekom godine krivulja trajanja angažirane snage svih VE izražena je specifično u odnosu na instaliranu snagu VE (engl. „per unit“ ili p.u.) a za promatrano razdoblje prikazana je na slici 4.

Wind power plant total output in Croatia is presented in this Chapter. Total WPP generation in Croatia in 2016 was 1012.51 GWh. Figure 3 shows hourly wind power plant generation in the last 12 months. Maximum hourly output was 380.5 MWh and it was realized on 9.2.2016 at 22 h, while minimum output was 0 MWh on 6.4.2016 at 1 h. Hourly production higher than 300 MWh occurred in 496 hours.

Having in mind that total wind plants capacity was changing during the year, duration curve of engaged capacity of all wind power plants is expressed in p.u. (per unit of installed WPP capacity) in given timeframe on the Figure 4.



Slika 3 Satna proizvodnja svih vjetroelektrana  
Figure 3 Hourly generation of all wind power plants



Slika 4 Krivulja trajanja angažirane snage svih VE u promatranom razdoblju u jediničnim vrijednostima

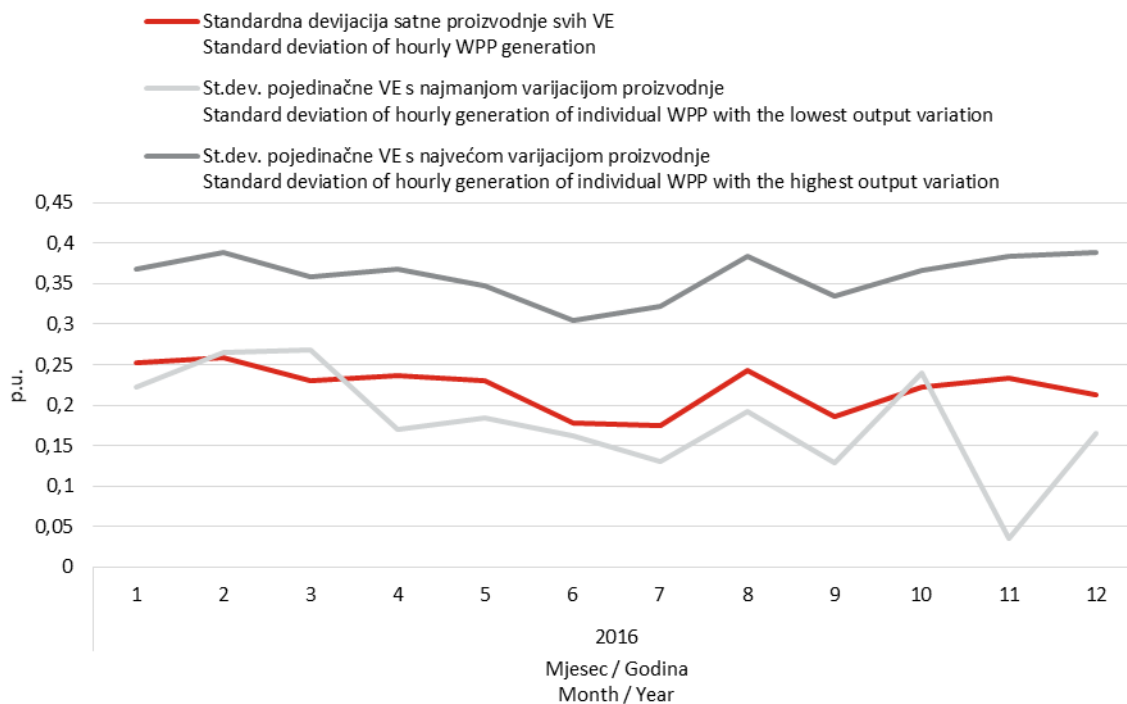
Figure 4 Duration curve of engaged capacity of all wind power plants in given timeframe in per unit

Jedna od osnovnih karakteristika proizvodnje VE je promjenjivost. Na slici 5 prikazana je standardna devijacija ukupne satne proizvodnje svih VE koja se u posljednjih 12 mjeseci kreće u rasponu 0,175 – 0,259 p.u., gdje p.u. (per unit - jedinična vrijednost) označava udio u ukupno instaliranoj snazi svih VE. Prosječna standardna devijacija u cijelom prikazanom razdoblju iznosila je 0,222 p.u.

Premda su sve VE u Hrvatskoj smještene na relativno malom prostoru, postoje značajne razlike u promjenjivosti satne proizvodnje pojedinih VE. Na slici 5 su pored standardne devijacije satne proizvodnje svih VE prikazane i standardne devijacije satne proizvodnje pojedinačnih VE s najvećom, odnosno najmanjom varijacijom proizvodnje u tom mjesecu (ne u cijeloj godini). Iz slike se jasno vidi kumulativni efekt ublažavanja satnih varijacija proizvodnje većeg broja vjetroelektrana budući da je standardna devijacija pojedinačne VE s najvećom varijacijom proizvodnje u tom mjesecu značajno veća od standardne devijacije proizvodnje svih VE.

One of the basic characteristic of wind power plant generation is its intermittency. Figure 5 shows standard deviation of total wind power plant hourly output. In the last 12 months it was in the range 0.175 – 0.259 p.u., where p.u. (per unit) refers to the share in total installed capacity of all wind power plants. Average standard deviation in given timeframe was 0.222 p.u.

Even though all wind power plants in Croatia are located on relatively small area, there are significant differences among individual wind power plants' generation variations. Beside standard deviation of all wind power plants output, Figure 5 shows standard deviation of individual wind power plants with maximum and minimum generation variations in each month. The figure indicates the cumulative effect of reducing hourly generation variations (in p.u.), with the increase of wind farms number, since standard deviation of individual wind power plant with the largest output variation in each month is significantly larger than standard deviation of all wind power plants' output.



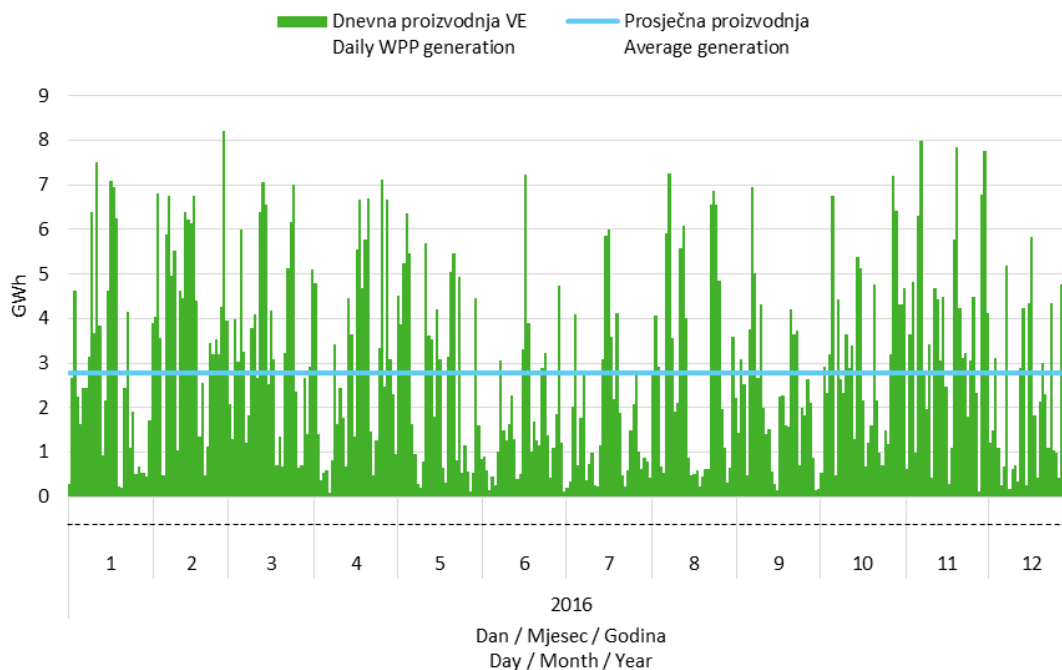
Slika 5 Standardna devijacija satne proizvodnje vjetroelektrana u jediničnim vrijednostima

Figure 5 Standard deviation of hourly generation of all wind power plants in per unit

Pored podataka o satnoj proizvodnji VE analiziraju se i podaci o dnevnoj proizvodnji VE. Na slici 6 prikazana je ukupna dnevna proizvodnja svih VE i u posljednjih 12 mjeseci kreće se u rasponu 0,1 GWh (ostvareno 6.4.2016 godine) – 8,21 GWh (ostvareno 28.2.2016 godine). Prosječna dnevna proizvodnja svih VE u cijelom prikazanom razdoblju iznosila je 2,78 GWh.

In addition to hourly output, data on daily wind power plants output are analysed. Figure 6 shows total daily wind power plant generation in the last 12 months within the range of 0.1 GWh (6.4.2016) – 8.21 GWh (28.2.2016). Average daily generation in given timeframe was 2.78 GWh.



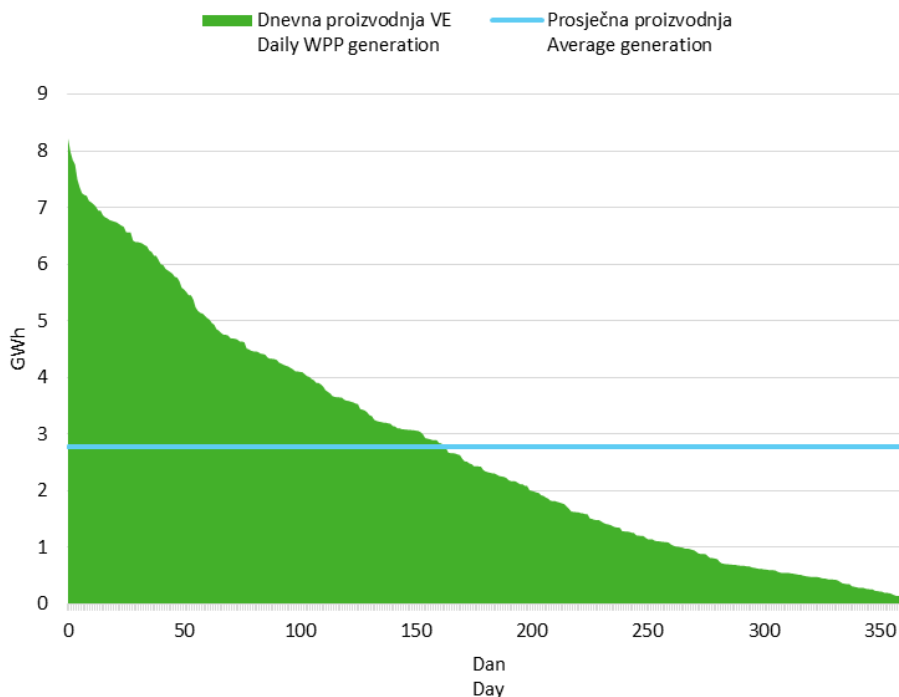


Slika 6 Dnevna proizvodnja svih vjetroelektrana

Figure 6 Daily generation of all wind power plants

Podaci o dnevnoj proizvodnji svih VE prikazani su krivuljom trajanja i na slici 7.

Daily generation of all wind power plants are shown on the following Figure 7 with duration curve.

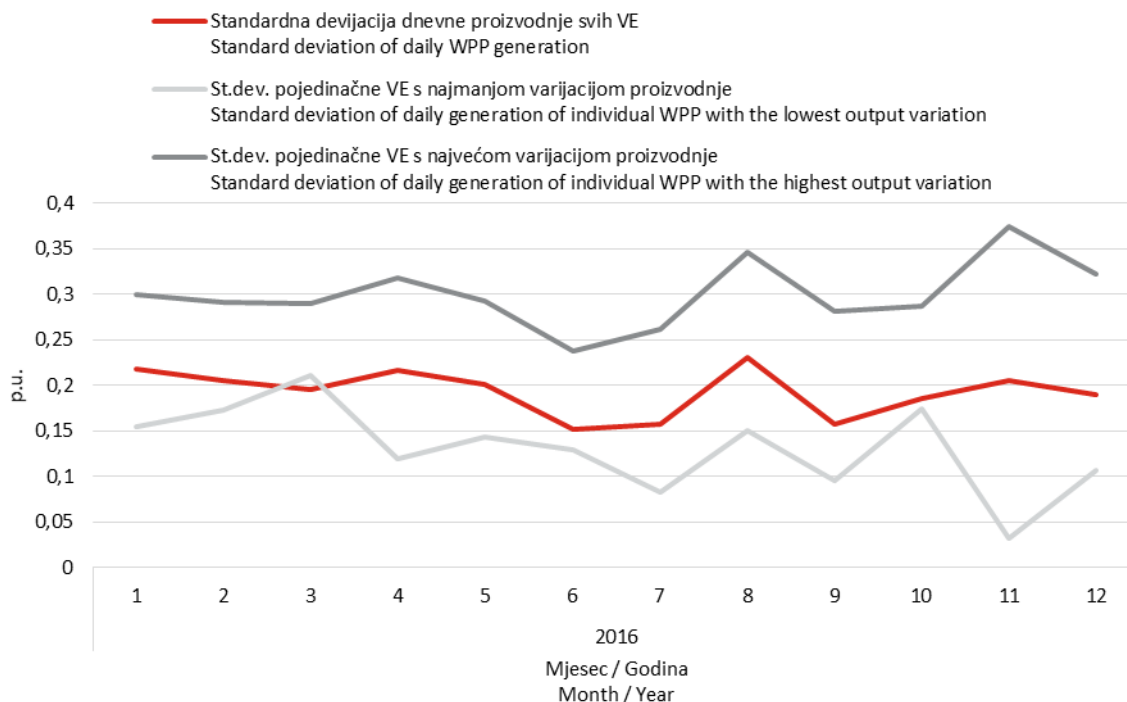


Slika 7 Krivulja trajanja dnevne proizvodnje vjetroelektrana

Figure 7 Average daily WPP generation duration curve

Na slici 8 prikazana je standardna devijacija ukupne dnevne proizvodnje svih VE i u posljednjih 12 mjeseci kreće se u rasponu 0,15 – 0,23 p.u. Prosječna standardna devijacija u cijelom prikazanom razdoblju iznosila je 0,19 p.u.

Figure 8 shows standard deviation of total wind power plant daily output. In the last 12 months it was in the range 0.15 – 0.23 p.u. Average standard deviation in given timeframe was 0.19 p.u.



Slika 8 Standardna devijacija dnevne proizvodnje svih vjetroelektrana u jediničnim vrijednostima

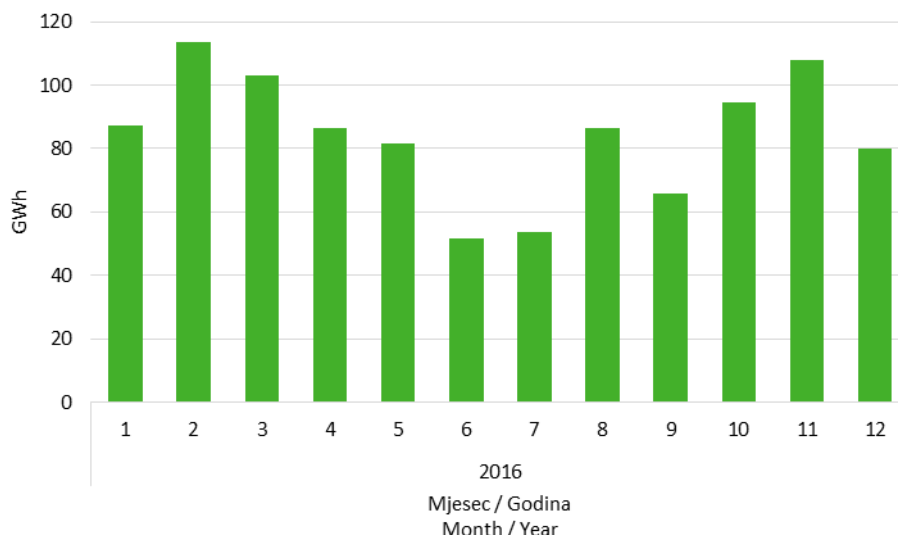
Figure 8 Standard deviation of daily generation of all wind power plants in per unit

Pored podataka o satnoj i dnevnoj proizvodnji analiziraju se i podaci o mjesečnoj proizvodnji svih VE. Na slici 9 prikazana je ukupna mjesečna proizvodnja svih VE i u posljednjih 12 mjeseci kreće se u rasponu 51,79 GWh (lipanj) – 113,39 GWh (veljača). Prosječna mjesečna proizvodnja svih VE u cijelom prikazanom razdoblju iznosila je 84,38 GWh.

In addition to hourly and daily output, data on monthly wind power plants output are analysed. Figure 9 shows total monthly wind power plant generation in the last 12 months that was in the range of 51.79 GWh (June) – 113.39 GWh (February). Average monthly generation in given timeframe was 84.38 GWh.

Tijekom zadnjih 12 mjeseci vide se znatne mjesečne razlike u proizvodnji. Uz tipično vjetrovite proljetne i jesenske mjesece te manje vjetrovite ljetne, u promatranom razdoblju netipično visoka bila je proizvodnja u kolovozu 2016.g. koja je usporediva s tipičnom proizvodnjom u proljetnim mjesecima što nije uobičajeno u našem vjetroklimatskom području.

In the last 12 months significant differences in monthly production can be seen. Besides windy periods typical for spring and autumn and less windy ones during summer, the production in August 2016. was untypically high, similar to production in spring months. Such a phenomenon is not usual for wind climate in our area.



Slika 9 Mjesečna proizvodnja svih vjetroelektrana

Figure 9 Monthly output of all wind power plants

Proizvodnost svih VE na mjesečnoj razini prikazana je na slici 10 pomoću mjesečnog faktora iskorištenja snage (postotak vremena pri kojem je ukupna proizvodnja VE svedena na ekvivalentnu proizvodnju pri angažmanu instalirane snage svih VE). U promatranom razdoblju faktor iskorištenja snage kreće se u rasponu od 16,8 % (lipanj) do 40,87 % (veljača), a prosjek pojedinačnih mjesečnih vrijednosti iznosi 26,77 %.

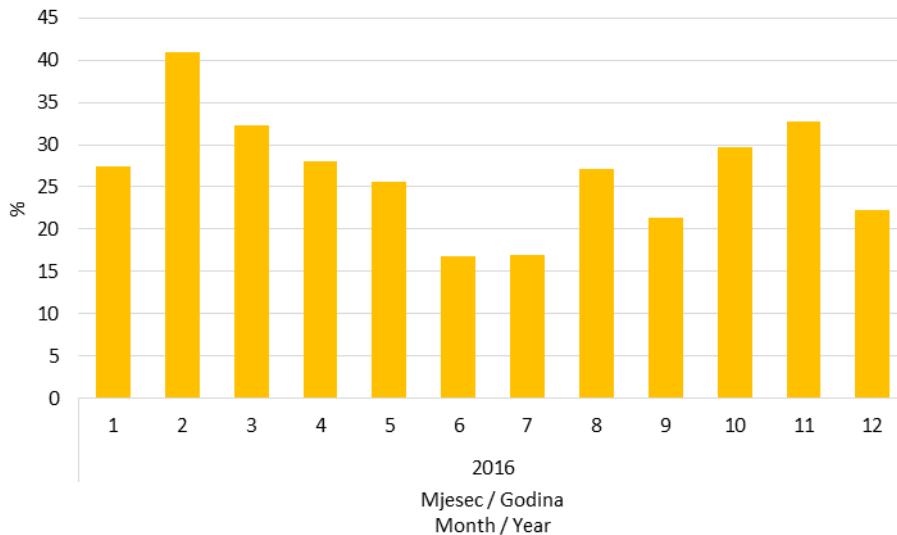
U promatranom vremenskom intervalu može se prikazati i pokazatelj - ekvivalentni broj radnih sati (FLH - Full Load Hours) svih vjetroelektrana, koji na razini promatranog vremenskog intervala reducira vrijeme rada u satima na ono koje je potrebno da se uz angažman ukupne instalirane snage proizvede ista količina energije kao u normalnom radu tijekom promatranog vremenskog intervala.

U 2016. godini FLH pokazatelj kretao se od 1440 do 3113 (po pojedinoj VE u pogonu), dok je ukupni FLH (za sve VE, uključujući i one u pokusnom radu) iznosio 2327.

Wind power plant capacity factor on monthly level is shown on the Figure 10. In given timeframe capacity factor (percentage of time in which the total production of all WPPs is reduced to equivalent production while engaging total installed WPPs capacity.) was in the range from 16.8 % (June) to 40.87 % (February), with the average of monthly values of 26.77 %.

For the analysed period it is usual to show FLH (Full Load Hours) indicator showing the reduced period (in hours) in which the production would be the same as if the WPP operated normally during the whole analysed period.

In 2016 FLH ranged from 1440 to 3113 (per wind plant in operation), while total FLH (for all wind power plants, including those in testing operation) was 2327.

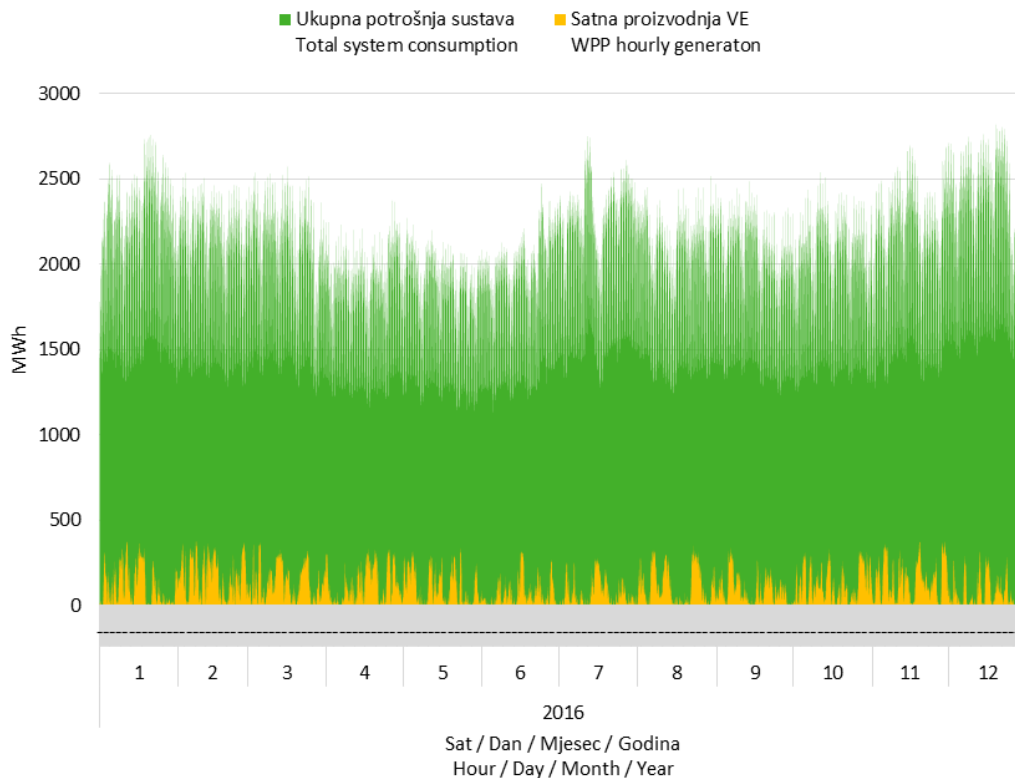


**Slika 10 Mjesečni faktor iskorištenja snage svih vjetroelektrana**

**Figure 10 Monthly capacity factor of all wind power plants**

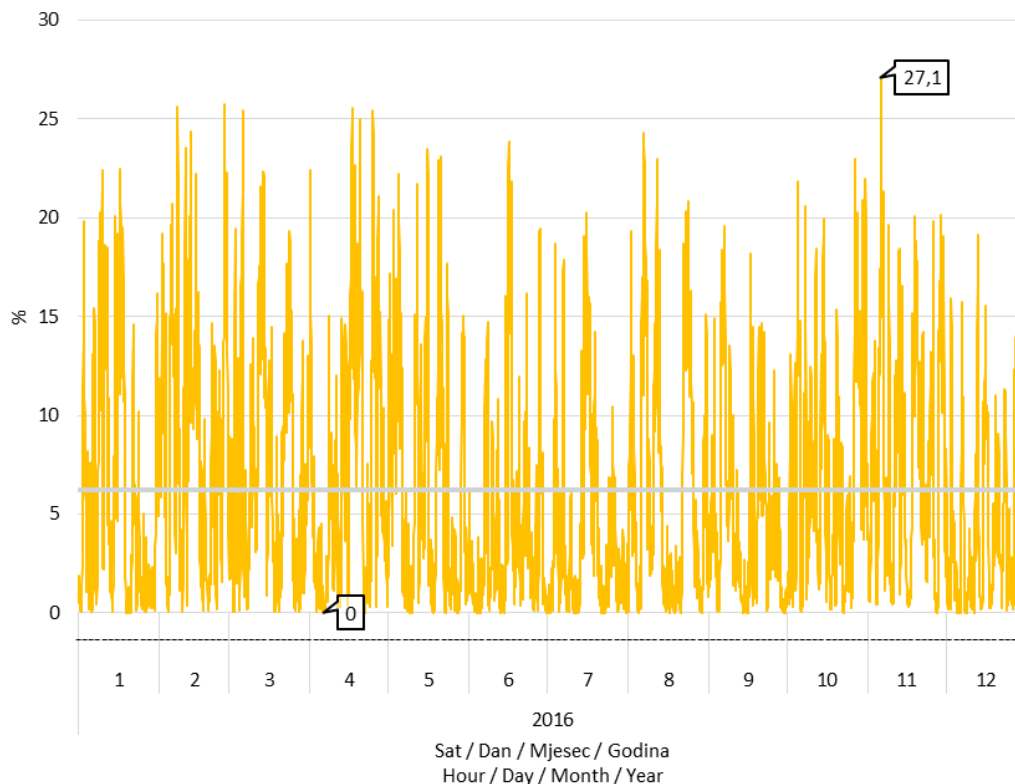
U posljednje vrijeme VE imaju sve veću ulogu u pokrivanju opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske. Na slici 11 prikazana je usporedba satnog dijagrama opterećenja sustava i proizvodnje VE, a na slici 12 prikazan je udio proizvodnje VE u pokrivanju satnog opterećenja sustava. U promatranom razdoblju taj udio kreće se u rasponu od 0% do najviše 27,1% (ostvareno na 6.11.2016 u 3 h), a bio je veći od 15% tijekom 795 sati.

Wind power plants are having an increasing role in covering power system demand in Croatia. Figure 11 shows comparison between hourly demand diagram and wind power generation. Figure 12 shows share of wind power plant generation in covering hourly power system demand. In the analysed period this share was ranging from 0% to 27.1% (6.11.2016 at 3 h), while it was larger than 15% in 795 hours.



Slika 11 Usporedba satnog dijagrama opterećenja sustava i proizvodnje vjetroelektrana

Figure 11 Comparison between hourly system demand and WPP generation



Slika 12 Udio proizvodnje vjetroelektrana u pokrivanju satnog opterećenja elektroenergetskog sustava

Figure 12 WPP generation share in covering power system demand

# 3.

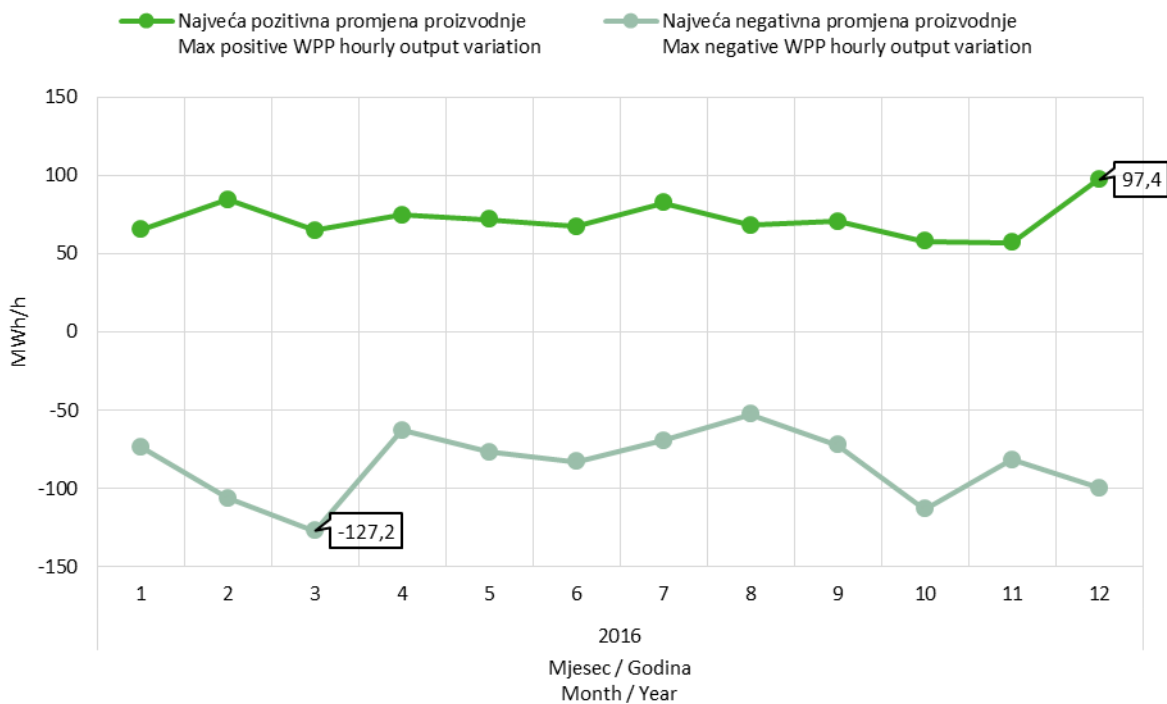
## PROMJENJIVOST PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA



## WIND POWER PLANT GENERATION VARIABILITY

Za vođenje elektroenergetskog sustava od posebne je važnosti promjenjivost proizvodnje VE. Na slici 13 prikazana je maksimalna pozitivna i maksimalna negativna promjena satne proizvodnje VE u pojedinom mjesecu. Drugim riječima, prikazana je razlika ostvarene prosječne proizvodnje VE u dva uzastopna sata. Najveća pozitivna satna promjena proizvodnje VE iznosila je 97,4 MW, dok je najveća negativna satna promjena proizvodnje VE iznosila -127,2 MW. Prosječna pozitivna satna promjena proizvodnje u promatranom razdoblju iznosila je 71,83 MW, a prosječna negativna -84,75 MW.

For power system control wind power plant output variation is of utmost interest. Maximum positive and maximum negative wind power plant hourly output variations are given on the Figure 13. In other words, the difference between in hourly WPP output in two consecutive hours is shown. The largest positive hourly WPP output variation was 97.4 MW. The largest negative hourly WPP output variation was -127.2 MW. Average positive hourly WPP output variation in given timeframe was 71.83 MW, while average negative hourly WPP output variation was -84.75 MW.

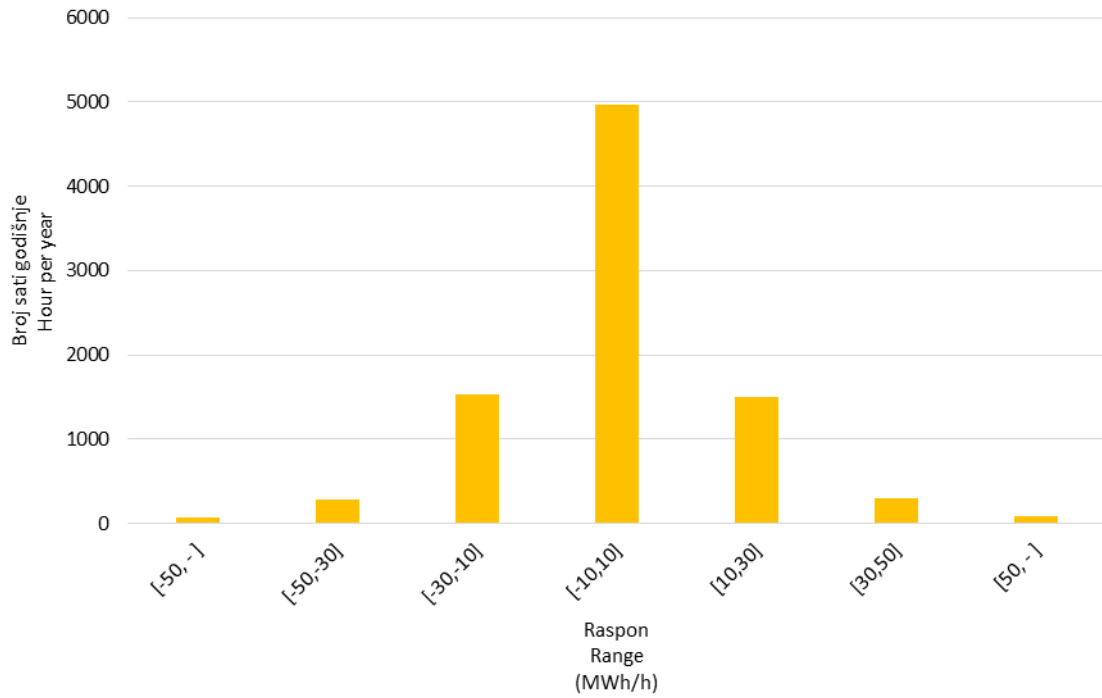


Slika 13 Maksimalna pozitivna i maksimalna negativna promjena satne proizvodnje VE u mjesecu

Figure 13 Maximum positive and maximum negative wind power plant hourly output variation during the month

Najveći broj satnih promjena proizvodnje VE događa se u rasponu od -30 MWh/h do +30 MWh/h, 7992 sata ili 91,48% vremena godišnje, kako je prikazano slikom 14. Apsolutna vrijednost promjene proizvodnje VE iznad 50 MWh/h (dakle i pozitivne i negativne promjene) pojavile su se u 158 sati, odnosno 1,81% vremena godišnje.

The largest amount of WPP hourly output variation was in the range -30 MWh/h to +30 MWh/h, 7992 hours, or 91.48% of the year, as shown on the Figure 14. Absolute value of WPP hourly output variations above 50 MWh/h (including both positive and negative variations) happened in 158 hours or 1.81% of the year.



**Slika 14 Statistička raspodjela satnih promjena proizvodnje VE**  
**Figure 14 Statistical distribution of WPP hourly output variations**



# 4.

## PROGNOZA PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA



## WIND POWER PLANT GENERATION FORECASTING

Prognoza proizvodnje VE svakako predstavlja najveći izazov pri većoj integraciji VE u elektroenergetski sustav. Veća pogreška u prognozi VE podrazumijeva veću potrebnu regulacijsku snagu i energiju uravnoteženja, odnosno veće troškove u toj domeni. U Hrvatskoj je prognoza proizvodnje VE za potrebe vođenja elektroenergetskog sustava operativno započela 2011. godine, a provodio ga je i unaprjeđivao HOPS. Promjenom zakonskog okvira od početka 2018. godine prognoza proizvodnje VE prelazi u domenu odgovornosti Hrvatskog operatora tržišta energije (HROTE).

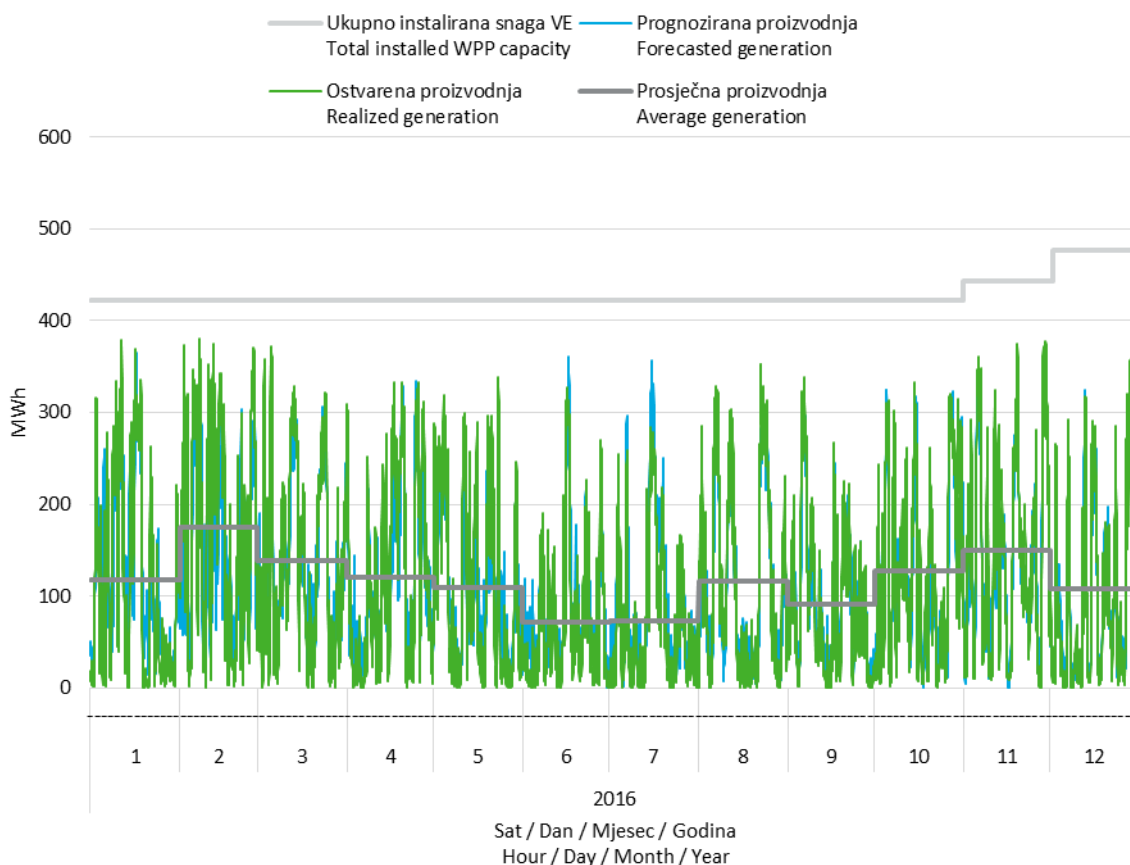
Prognoza proizvodnje VE u promatranom razdoblju proizvodila se za dan unaprijed.

Na slici 15 prikazane su prognozirane i ostvarene satne proizvodnje svih VE u cijeloj godini.

Wind power plant generation forecasting is certainly the largest challenge in large scale wind integration in power system. Larger forecast error assumes larger regulation capacity needs and balancing energy, causing therefore higher costs in this segment. In Croatia wind power plant generation forecasting started operating in 2011. It has been implemented and developed by HOPS. Along with legislative changes from end of 2018 this task is allocated to Croatian Energy Market Operator (HROTE).

Wind power plant generation forecast was done on day-ahead basis.

Figure 15 shows forecasted and realized wind power plant generation in whole year.

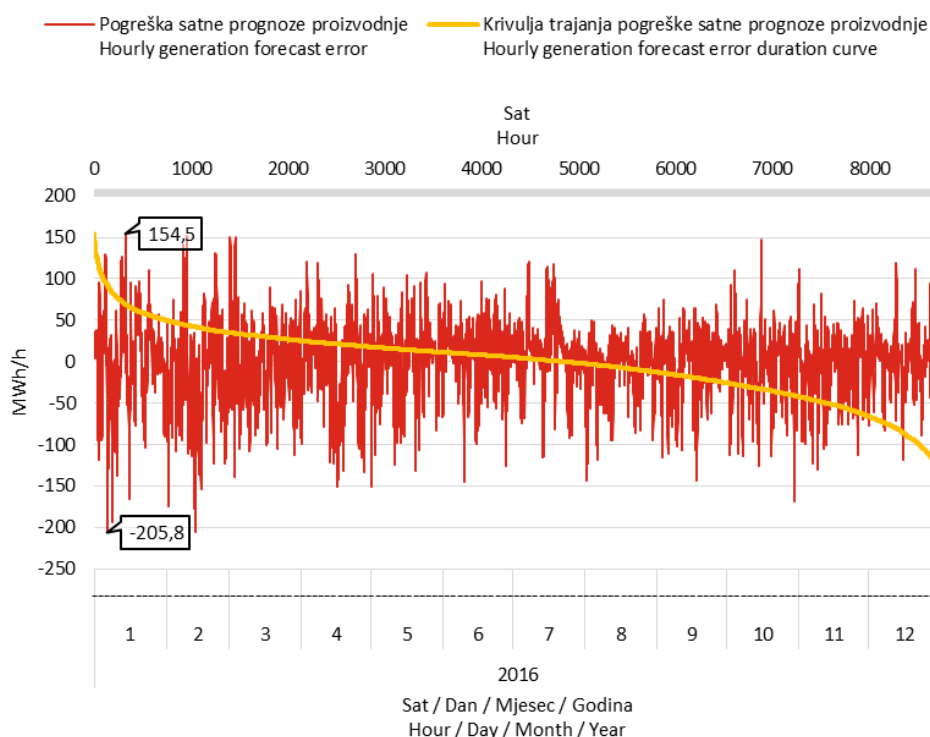


Slika 15 Prognozirana i ostvarena satna proizvodnja vjetroelektrana

Figure 15 Forecasted and realized wind power plant generation

Na slici 16 prikazane su pogreške satne prognoze proizvodnje VE, odnosno razlika između prognozirane i ostvarene satne proizvodnje svih VE. Također, na istoj slici prikazana je i pripadna krivulja trajanja pogreške satne prognoze proizvodnje svih VE. Maksimalna pozitivna pogreška prognoze proizvodnje VE (prognoza veća od ostvarenja) iznosila je 154,5 MW i ostvarena je u 13 h, 14.1.2016 godine. Maksimalna negativna pogreška prognoze proizvodnje VE (prognoza manja od ostvarenja) iznosila je -205,8 MW i ostvarena je u 16 h, 6.1.2016 godine. Srednja apsolutna pogreška prognoze proizvodnje VE iznosila je 33,08 MW.

Figure 16 shows wind power plant generation forecasting error on hourly basis. In other words, it is the difference between forecasted and realized wind power plants hourly output. Forecast error duration curve is shown on the same Figure. Maximum positive forecast error (forecast higher than real output) was 154.5 MW and it occurred on 13 hour, 14.1.2016. Maximum negative forecast error (forecast larger than real output) was -205.8 MW and it occurred on 16 hour, 6.1.2016. Average absolute forecast error was 33.08 MW.

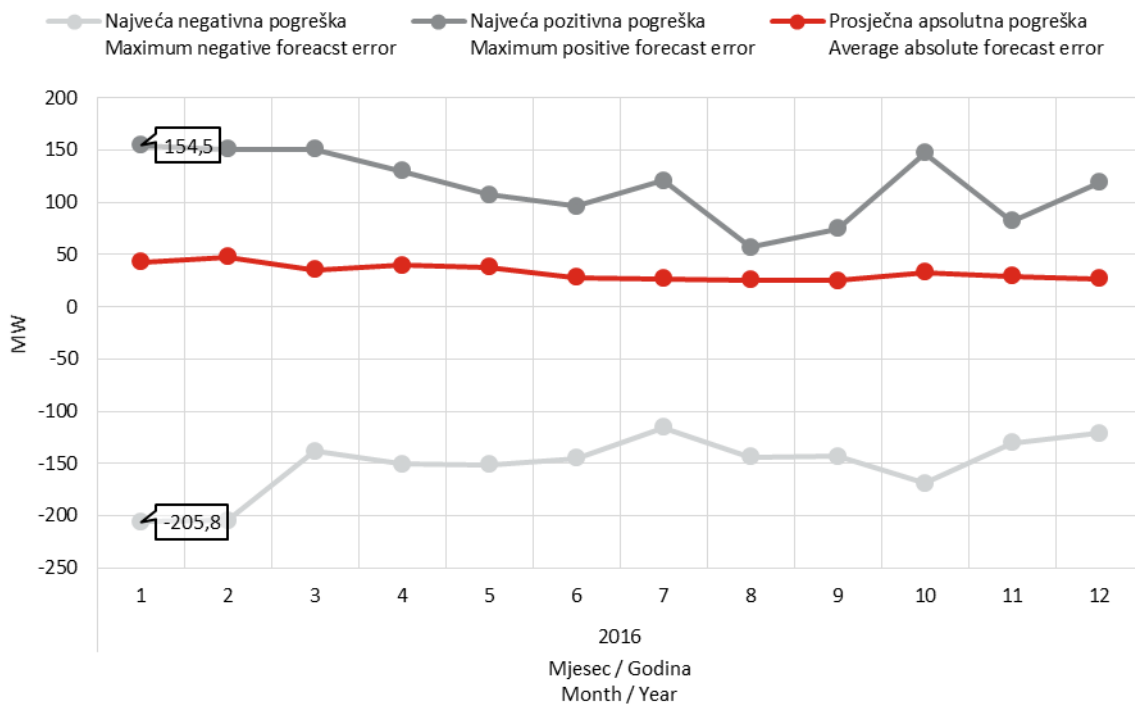


**Slika 16** Razlika između prognozirane i ostvarene satne proizvodnje svih VE i pripadna krivulja trajanja

**Figure 16** Difference between forecasted and realized total WPP hourly generation and its duration curve

Pogreške prognoze satne proizvodnje VE analizirane su i na mjesečnoj razini te su za potrebe ovoga izvješća prikazane tri veličine: maksimalna pozitivna, maksimalna negativna i prosječna apsolutna pogreška prognoze proizvodnje VE (slika 17). Maksimalna pozitivna pogreška prognoze veća od 100 MW pojavljuje se u 8 mjeseci 2016. godine. Maksimalna negativna pogreška prognoze u apsolutnom iznosu veća od 100 MW pojavljuje se u 12 mjeseci 2016. godine. Prosječna apsolutna pogreška na mjesečnoj razini kreće se u rasponu od 24,75 – 47,83 MW.

Wind power plant hourly output forecast error are analysed on monthly basis, resulting in three values required for this report: maximum positive, maximum negative and average absolute forecast error, as shown on the Figure 17. In 2016 maximum positive forecast error over 100 MW occurs in 8 months, while maximum negative absolute forecast error over 100 MW in 2016 occurs in 12 months. Average absolute forecast error on monthly basis was in the range 24.75 – 47.83 MW.



Slika 17 Maksimalna pozitivna, maksimalna negativna i prosječna apsolutna pogreška satne prognoze proizvodnje VE

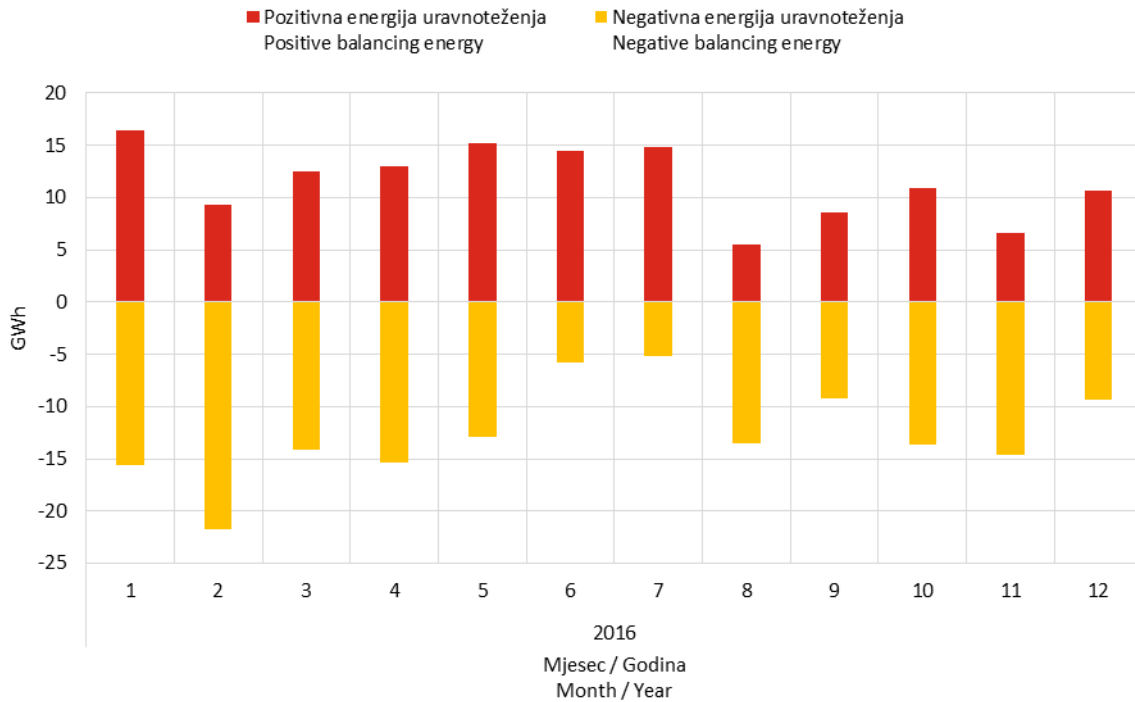
Figure 17 Maximum positive, maximum negative and average absolute forecast error of wind power plant hourly output

Suma pogreški prognoze satne proizvodnje VE predstavlja potrebnu energiju uravnoteženja. Suma pozitivnih pogreški prognoze (prognoza veća od ostvarenja) u konačnici određuje potrebnu negativnu energiju uravnoteženja u elektroenergetskom sustavu, a suma negativnih pogreški prognoze predstavlja pozitivnu energiju uravnoteženja. Slika 18 prikazuje sumu pozitivnih i negativnih pogreški prognoze za svaki razmatrani mjesec.

Ukupna suma svih pozitivnih pogreški prognoze satne proizvodnje u cjelokupnom promatranom razdoblju iznosi 137,99 GWh, dok ukupna suma svih negativnih pogreški iznosi -151,02 GWh.

Sum of hourly WPP forecast errors assumes requires energy balancing. Sum of positive hourly forecast errors (forecast larger than realized) represents in the end required negative balancing energy in power system, while sum of negative hourly forecast error represents positive balancing energy. Figure 18 shows sum of positive and negative hourly forecast errors for each month.

Total sum of all positive hourly forecast errors in given timeframe is 137.99 GWh, while total sum of all negative hourly forecast errors in given timeframe is -151.02 GWh.

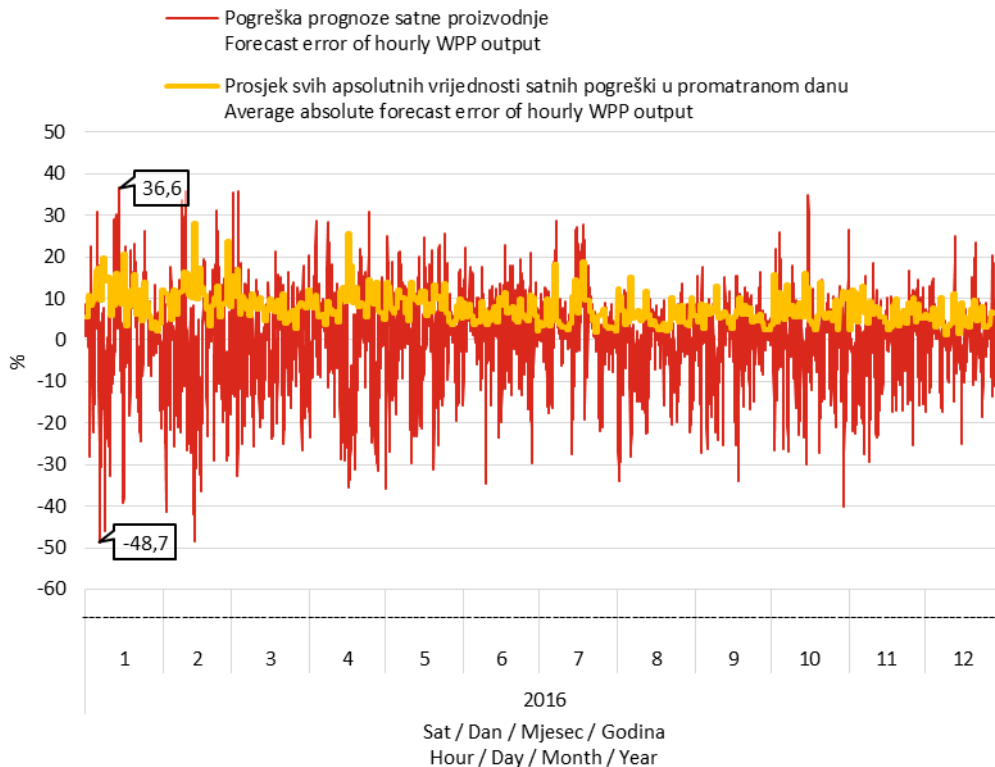


**Slika 18** Suma pozitivnih pogreški prognoze satne proizvodnje VE (negativna energija uravnoteženja) i suma negativnih pogreški prognoze satne proizvodnje VE (pozitivna energija uravnoteženja) u pojedinom mjesecu

**Figure 18** Sum of positive errors (negative balancing energy) and sum of negative errors (positive balancing energy) of wind power plant hourly generation in each month

Slika 19 prikazuje dvije varijable: pogreške prognoze satne proizvodnje VE te dnevne prosječne vrijednosti apsolutnih satnih pogrešaka prognoze, sve u odnosu na instaliranu snagu (p.u.). Prva varijabla je prikazana u satnoj domeni, a druga varijabla u dnevnoj domeni kao prosjek svih apsolutnih vrijednosti satnih pogreški u promatranom danu. Dnevni prosjek apsolutne satne pogreške prognoze proizvodnje VE u cjelokupnom razmatranom razdoblju iznosi u prosjeku 7,75% instalirane snage VE. Najveća pozitivna pogreška prognoze satne proizvodnje VE iznosila je 36,6%, a dogodila se 14.1.2016 godine u 13 h, dok je najveća negativna pogreška prognoze satne prognoze iznosila -48,7% dana 6.1.2016 godine u 16 h.

Figure 19 shows two variables: forecast error of WPP hourly output and daily averages of absolute hourly forecast errors, all normalized by installed capacity (p.u.). The first variable is shown on hourly basis, while the second one is given in daily time domain as average value of all hourly absolute forecast errors during the day. Daily average of absolute hourly forecast error of WPP in given timeframe is in average 7.75% of installed capacity WPPs. The largest hourly forecast error was 36.6% and happened on 14.1.2016 at 13 h, while the lower hourly forecast error was -48.7% on 6.1.2016 at 16 h.



**Slika 19 Pogreške prognoze satne proizvodnje VE i prosječne apsolutne pogreške prognoze satne proizvodnje VE na dnevnoj razini iskazane u postocima instalirane snage VE**

**Figure 19 Forecast errors of WPP hourly output and average absolute forecast error of WPP hourly output on daily level shown in percentage of installed WPP capacity**

Kao mjera točnosti pogreške prognoze proizvodnje VE, koja daje veću težinu lošim prognozama, često se koristi korijen srednje kvadratne pogreške prognoze prema sljedećoj formuli:

Wind power plant generation forecast error, that “gives more value” to bad forecast, is usually evaluated with root mean square error, according to the following equation:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{prognozirano}} - P_{\text{ostvareno}})^2}$$

Gdje je:

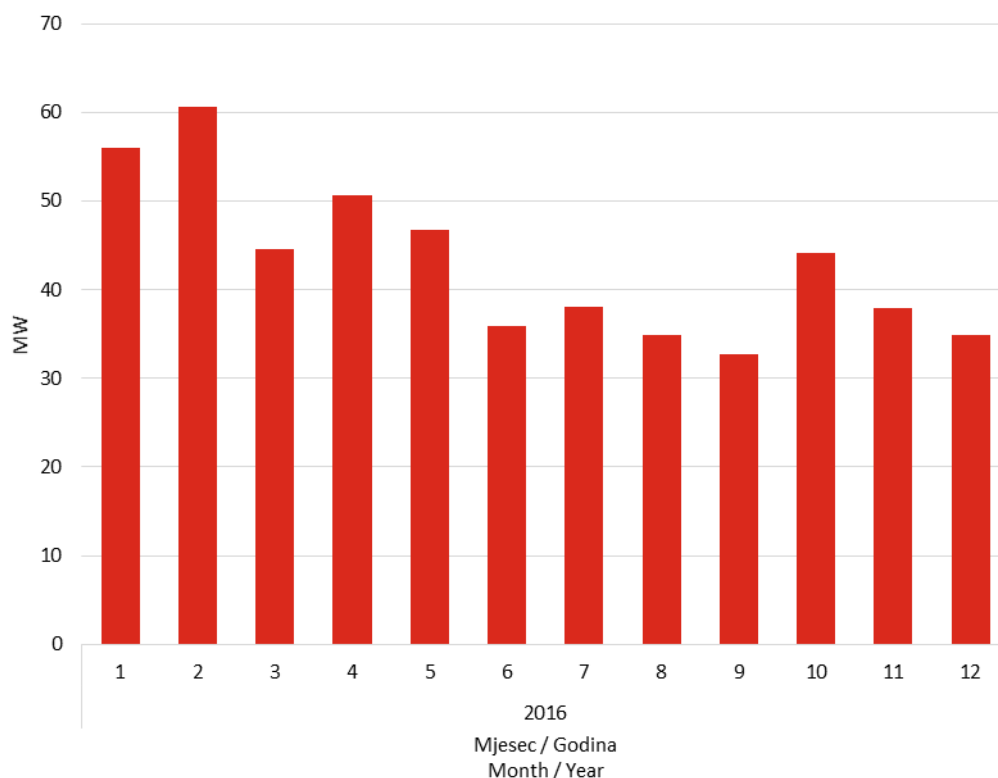
RMSE – korijen srednje kvadratne pogreške prognoze proizvodnje VE  
Pprognozirano – prognozirana proizvodnja VE (MWh/h)  
Postvareno – ostvarena proizvodnja VE (MWh/h)  
n – ukupni broj promatranih interval (sati)  
i – promatrani interval (sat)

Where is:

RMSE – root mean square error of hourly WPP generation forecast  
Pprognozirano – forecasted WPP output  
Postvareno – realized WPP output  
n – total number of intervals (hours)  
i – single interval (hour)

Slika 20 prikazuje ukupni korijen srednje kvadratne pogreške prognoze proizvodnje svih VE. Na mjesečnoj razini RMSE je bio najveći u veljači i iznosio je 60,65 MW, a najmanji u rujnu i iznosio je 32,78 MW.

Figure 20 shows total root mean square forecast error of WPP generation. On monthly basis RMSE had the largest value in February, 60.65 MW, while the lowest value was in September, 32.78 MW.



Slika 20 Korijen srednje kvadratne pogreške prognoze satne proizvodnje svih VE

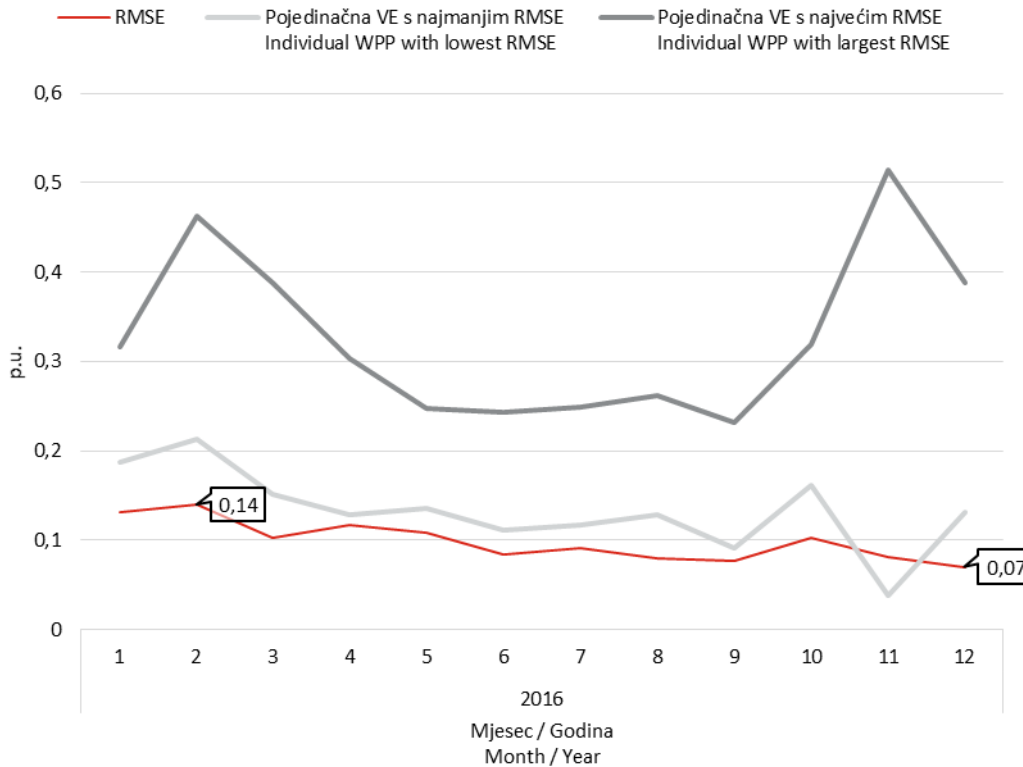
Figure 20 Root mean square error of hourly WPP generation forecast

Korijen srednje kvadratne pogreške prognoze može se iskazati i u jediničnim vrijednostima (u odnosu na instaliranu snagu VE), kao na slici 21.

Na istoj slici za svaki promatrani mjesec prikazan je i korijen srednje kvadratne pogreške prognoze za individualne VE koje imaju najveću, odnosno najmanju pogrešku prognoze u svakom promatranom mjesecu (ne u cijeloj godini). Stoga je moguće da ukupni RMSE svih VE bude manji od RMSE pojedinačne VE s najmanjom pogreškom prognozom u tom mjesecu.

Root mean square error can be presented in per unit (to installed WPP capacity), as shown on the Figure 21.

At the same Figure root mean square values are shown for individual wind power plants with the largest and the lowest root mean square error in each month (not in the whole year). Accordingly, it is possible that total RMSE of all WPP is lower than RMSE of individual WPP with the lowest forecast error.



Slika 21 Korijen srednje kvadratne pogreške prognoze satne proizvodnje svih VE u jediničnim vrijednostima

Figure 21 Root mean square error of hourly WPP generation forecast in per unit

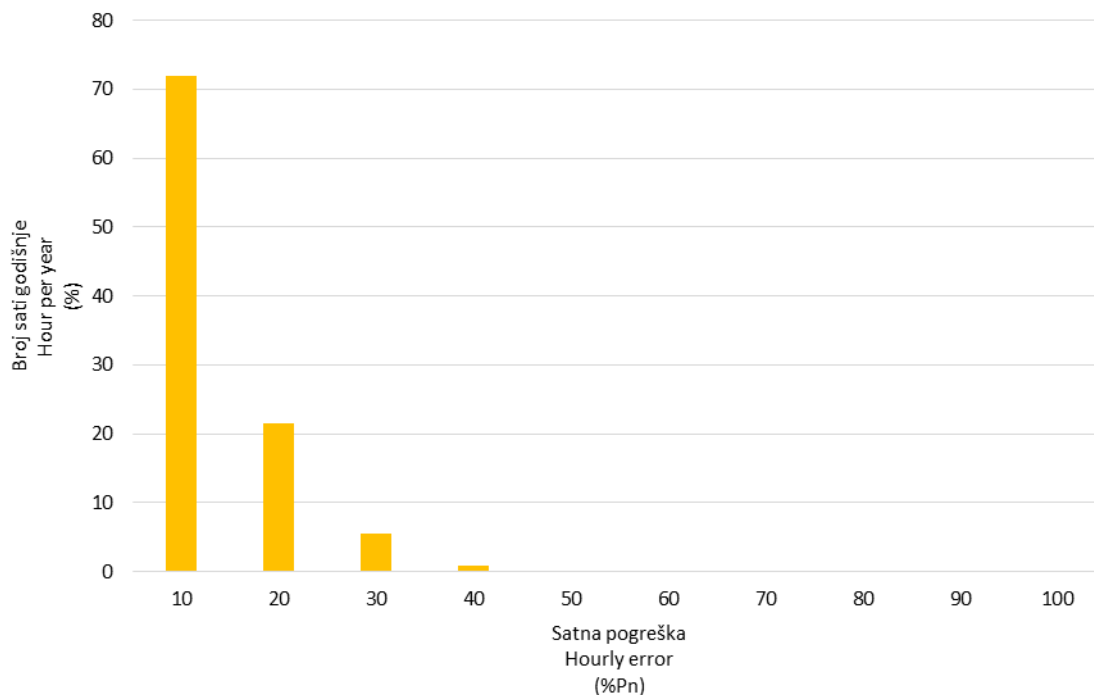
Na slici 22 prikazana je frekvencija pojavljivanja satne pogreške prognoze proizvodnje VE u cijeloj godini. Očito je da je satna pogreška prognoze bila manja od 10% instalirane snage svih VE u 71,99% slučajeva, dok je u rasponu 10-20% instalirane snage bila u 21,49% slučajeva godišnje.

Figure 22 shows the frequency of occurrence for hourly production forecast error of WPPs. Clearly, forecast error was below 10 % of installed capacity of all WPPs in 71.99% cases, while it was ranging from 10-20% in 21.49% cases in one year.

Korijen srednje kvadratne pogreške prognoze satne proizvodnje svih VE u postocima instalirane snage u posljednjih 5 godina prikazan je na slici 23.

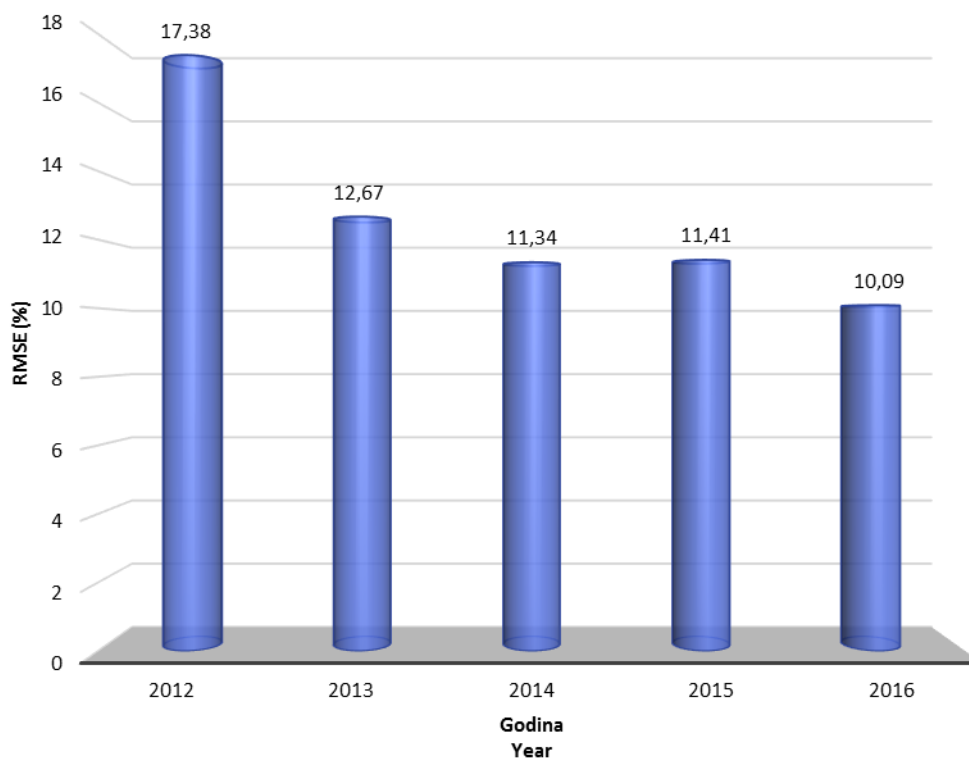
Root mean square error of hourly WPP generation forecast in percentage of installed capacity in the last 5 years is shown on the Figure 23.





Slika 22 Frekvencija pojavljivanja pogreške prognoze satne proizvodnje svih VE

Figure 22 Frequency of forecast error of wind power plant hourly generation



Slika 23 Korijen srednje kvadratne pogreške prognoze satne proizvodnje svih VE u postocima instalirane snage u posljednjih 5 godina

Figure 23 Root mean square error of hourly WPP generation forecast in percentage of installed capacity in the last 5 years

**IZDAVAČ:**

Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.  
Kupska 4, 10 000 Zagreb, Hrvatska

**PUBLISHER:**

Croatian Transmission System Operator Ltd.  
Kupska 4, 10 000 Zagreb, Croatia

**ODGOVORNA OSOBA:**

Dr.sc. Miroslav Mesić

**RESPONSIBLE PERSON:**

Miroslav Mesić, PhD

**UREDNIK:**

Sektor za vođenje EES-a i tržište

**EDITOR:**

System Operation and Market Department

**AUTORSKA PRAVA:**

Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.  
Kupska 4, 10 000 Zagreb, Hrvatska

**COPYRIGHT:**

Croatian Transmission System Operator Ltd.  
Kupska 4, 10 000 Zagreb, Croatia