

Predviđanje proizvodnje vjetroelektrana

Benić, Mateja

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:576069>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Mateja Benić

PREDVIĐANJE PROIZVODNJE VJETROELEKTRANA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Igor Sutlović,

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Igor Sutlović

prof. dr. sc. Veljko Filipan

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Zagreb, srpanj 2018.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Igoru Sutloviću na stručnom vodstvu i pomoći prilikom izrade i pisanja diplomskog rada.

Želim se zahvaliti i Državnom hidrometeorološkom zavodu koji su mi ustupili podatke o brzinama vjetra za izradu diplomskog rada.

Posebno se želim zahvaliti svojoj obitelji koja je uvijek vjerovala u mene i bila mi najveća podrška.

SAŽETAK:

U ovom je radu težnja stavljena na tijek planiranja proizvodnje električne energije u Hrvatskoj, kojom se bavi tvrtka HROTE. Na temelju podataka o srednjoj satnoj brzini vjetra iz DHMZ-a koji su dobiveni sa meteoroloških postaja, matematičkom metodom interpolacije i ekstrapolacije ta je brzina približena stvarnoj vrijednosti na lokacijama vjetroelektrana u Hrvatskoj. Korištenjem dobivenih podataka o brzini vjetra na lokacijama izračunata je snaga električne energije proizvedene iz vjetroelektrana u Hrvatskoj za određeni datum. Zatim je napravljena usporedba izračunate snage i stvarno proizvedene električne energije iz vjetroelektrana za taj datum koju je prikazala tvrtka HOPS u svom izvješću.

Kao dokaz stvarne nepredvidivosti energije vjetra prikazana je usporedba HROTE-ove prognoze rada vjetroelektrana sa HOPS-ovim izvještajem stvarno proizvedene električne energije iz vjetroelektrana u Hrvatskoj na određene datume.

Ključne riječi: brzina vjetra, energija vjetra, vjetroelektrana, snaga, električna energija, predviđanje, proizvodnja

ABSTRACT

The aim of this paper is to show the course of planning the electricity generation in Croatia, which is in charge of the Croatian energy market operator company. Based on the Meteorological and hydrological service data on mean hourly wind speed obtained from meteorological stations and with mathematical method of interpolation and extrapolation, that speed is approximated to the real value yielded at wind power plant locations in Croatia. Using the obtained wind speed data at different locations, it is possible to calculate the power of electricity produced by wind power plants in Croatia for a given date. Afterwards, a comparison of the calculated power and actual electricity produced by wind power plants was made for a date which was shown by the Croatian transmission system operator company in its report.

As an evidence of the real unpredictability of wind power, this paper also presents a comparison of Croatian energy market operator's forecast about production planning of wind power plants and Croatian transmission system operator's report of actually produced electricity on specific dates from wind power plants in Croatia.

Keywords: wind speed, wind energy, wind power plant, power, electricity, forecast, production

SADRŽAJ:

1. Uvod.....	1
2. Energija vjetra.....	1
2.1. Gradijent tlaka	2
2.2. Coriolisova sila	3
2.3. Sila trenja.....	4
3. Određivanje smjera i mjerenje brzine vjetra	4
4. Promjena brzine vjetra s visinom.....	7
5. Snaga i energija vjetra.....	9
6. Vjetroelektrane u Hrvatskoj	11
7. Proračun brzina vjetra na lokacijama VE u Hrvatskoj.....	15
8. Proračun proizvedene snage električne energije na lokacijama VE u Hrvatskoj	25
9. Planiranje proizvodnje električne energije.....	28
10. Odstupanje prognoze od stvarno proizvedene električne energije.....	32
10.1. Energija uravnoteženja.....	32
10.2. Pokazatelji kvalitete prognoze	34
11. Zaključak.....	37
12. Popis simbola	38
13. Literatura	40
14. Životopis.....	41

1. Uvod

Ubrzanim načinom života direktno utječemo na eko sustav u svom neposrednom okruženju, što dovodi do određenih promjena u negativnom smislu jer se remeti prirodni poredak. Iste te promjene, s obzirom da smo dio tog sustava, odražavaju se na nas. Iz tog razloga, sve se više budi ekološka svijest ljudi.

Jedan od oblika energije bez kojeg ne možemo zamisliti današnju svakodnevicu je električna energija. Osnovna prednost električne energije je mogućnost njenog lakog transporta do krajnjeg korisnika, a osnovni problem pri proizvodnji je upotreba fosilnih goriva koja se koriste kao osnovni izvor dobivanja električne energije u termoelektranama. Osim što su im resursi ograničeni, fosilna goriva značajno zagađuju okoliš.

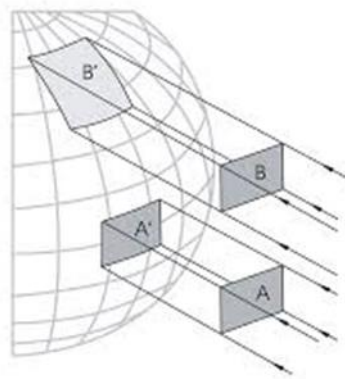
Alternativni izvor energije za proizvodnju električne energije na svjetskoj razini je vjetar. Po svojoj prirodi vjetar je oblik sunčeve energije i kao takav ubraja se u obnovljive izvore. Sunce neravnomjerno zagrijava dijelove Zemljine površine što rezultira različitim tlakom zraka, a vjetar nastaje zbog težnje da izjednači taj tlak zraka. Energija vjetra je neiscrpan izvor koji se stalno obnavlja u prirodi i lako je dostupna svima, te je postala sasvim konkurentna konvencionalnim izvorima energije.

Prednost vjetroenergetskih postrojenja u odnosu na one koji koriste konvencionalne izvore energije je nepostojanje štetnih emisija kao i mogućnost korištenja prostora i u druge svrhe, poput poljoprivrede i ratarstva, budući da vjetroelektrane zauzimaju samo 1% prostora na kojem se nalaze. Dobri položaji za iskorištavanje energije vjetra su obale mora i oceana (priobalna vjetroelektrana), te pučina mora (plutajuća vjetroelektrana). Pučina se ističe kao najbolji položaj zbog stalnosti vjetrova, ali cijene ugradnje i prijenosa energije usporavaju takva ulaganja.

2. Energija vjetra

Prirodno strujanje zraka zovemo vjetar. Vjetar struji paralelno s površinom Zemlje. Nastaje radi neravnomjernog zagrijavanja Zemljine površine, zbog čega dolazi do različite temperature u slojevima zraka. Taj gradijent temperature uzrokuje i gradijent tlaka zbog kojeg se zrak giba iz područja većeg tlaka zraka u područje s nižim tlakom zraka. Na temelju ovoga može se zaključiti da vjetar indirektno nastaje iz sunčeve energije.

Temperaturne nejednolikosti na Zemlji zbog kojih nastaje gibanje zraka posljedica su nejednolike dozračene Sunčeve energije na Zemljinu površinu. Na Slici 1 prikazano je kako Sunčeve zrake padaju na Zemljinu površinu.



Slika 1. Upad Sunčevih zraka na Zemljinu površinu

Oko ekvatora Sunčeve zrake padaju gotovo okomito i dozračuju najviše energije pa je tamo i najtoplije. Od ekvatora prema jugu ili sjeveru, kut upada Sunčevih zraka sve više se smanjuje, odnosno dozračena energija po jedinici površine je sve manja. Samo se 2% Sunčevog zračenja pretvara u energiju vjetra, a 35% od toga se raspršuje unutar 1 km od površine Zemlje. To je snaga vjetra koja je dostupna za pretvorbu u druge oblike energije ¹.

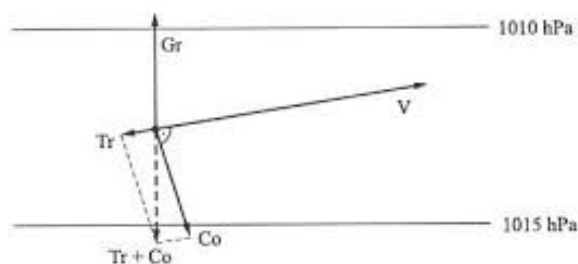
Vjetar je posljedica djelovanja ovih sila:

- a) gradijent tlaka,
- b) Coriolisova sila,
- c) sila trenja

2.1. Gradijent tlaka

Gradijent tlaka (Gr) je veći kada je veća razlika tlaka na manjoj udaljenosti. Brzina vjetra je razmjerna tom gradijentu. Budući da leži u smjeru najveće promjene tlaka, gradijent je uvijek okomit na izobare (ib), a usmjeren je od višeg tlaka prema nižem. Iako vjetar puše iz područja višeg tlaka u područje nižeg tlaka, ne puše direktno najkraćim putem, odnosno ne puše paralelno sa smjerom gradijenta tlaka. Vjetar nije poput gradijenta tlaka okomit na izobare, nego s njima zatvara određeni kut. Taj kut je veći nad kopnom nego nad morem, a porastom geografske širine se smanjuje. Možemo zaključiti da gradijent tlaka uzrokuje

gibanje zraka, međutim neke druge sile skreću vjetar i mijenjanju mu smjer, a to su sila trenja (Tr) i Coriolisova sila (Co), kao što je prikazano na Slici 2.



Slika 2. Utjecaj sile: Gr, Co i Tr na strujanje vjetra

2.2. Coriolisova sila

Coriolisova sila nastaje kao posljedica rotacije Zemlje. Pod utjecajem Coriolisove sile zrak se kreće gotovo paralelno s izobarama, tako da vjetrovi na sjevernoj hemisferi imaju tendenciju da se kreću u smjeru kazaljke na satu, a na južnoj u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (Slika 3) ².

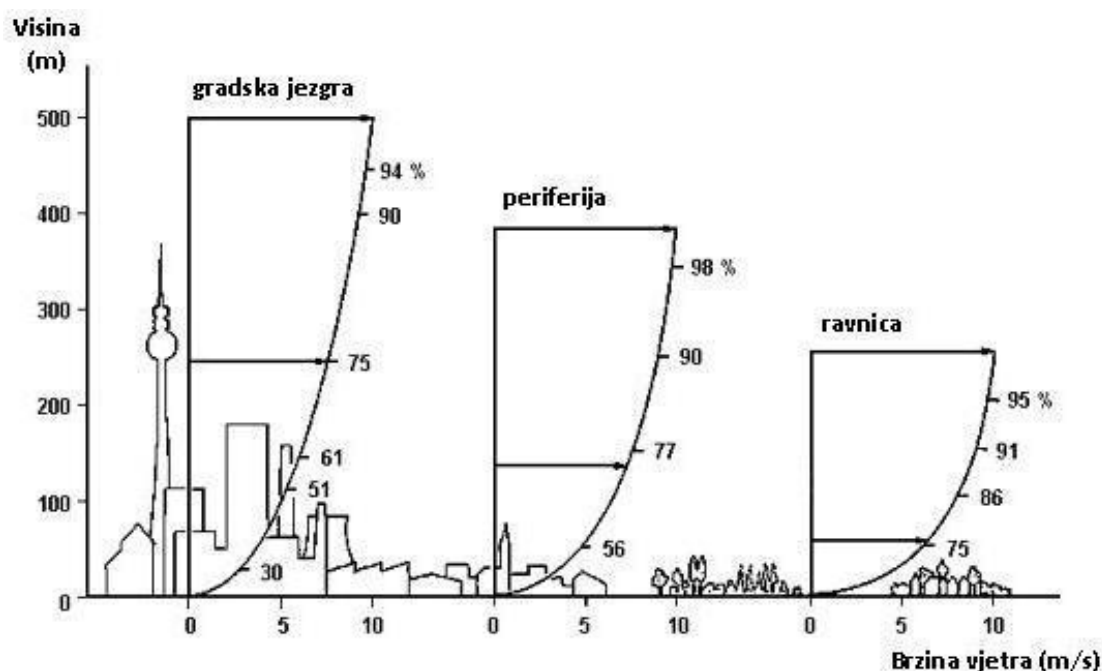


Slika 3. Posljedica djelovanja Coriolisove sile

Coriolisove sile djeluju na globalne vjetrove koji pušu na visinama većim od 1000 m, no nama su za iskorištavanje energije vjetra puno zanimljiviji lokalni vjetrovi koji pušu do 100 m iznad površine Zemlje ². Oni ovise i o smjeru globalnih vjetrova, ali najviše ovise o lokalnim čimbenicima karakterističnim za pojedinu lokaciju kao što su gradijent tlaka i reljefna obilježja. Stoga možemo reći da na lokalne vjetrove utječe vrsta terena (npr. ravnica, planine, naselja, šume itd.) i izgled terena (pješčani, kameni, vodeni, snježni) iznad kojega pušu.

2.3. Sila trenja

Hrapavost površine ima veliki utjecaj na brzinu vjetra pa tako s porastom visine hrapavosti raste otpor i povećava se trenje a vjetar se usporava. Šume i veliki gradovi mjesta su velike hrapavosti dok ceste i betonske površine stvaraju vrlo mali otpor gibanju vjetra. Vodene površine stvaraju najmanje otpora vjetru dok s druge strane travnate površine pune grmlja značajno usporavaju vjetar ². Na Slici 4 prikazana je promjena brzine vjetra ovisno o vrsti terena, odnosno hrapavosti.



Slika 4. Ovisnost brzine vjetra o hrapavosti površine

Na temelju meteoroloških mjerenja na standardnim visinama od 10 metara iznad tla i s pripadnim faktorom hrapavosti moguće je izračunati brzinu vjetra na potrebnoj visini od tla, npr. na visini vrha stupa turbine, a preko te brzine i snagu vjetra.

3. Određivanje smjera i mjerenje brzine vjetra

U svakoj točki vjetar ima određeni smjer i brzinu, prema tome vjetar je definiran ako mu se odrede brzina i smjer. Brzina ili jačina vjetra mjeri se pomoću anemometra (Slika 5). Zdjelasti anemometar koji se najčešće koristi, sastoji se od tri polulopataste čašice koje se nalaze na vrhu osovine i okreću se u smjeru vjetra ². Broj okretaja registrira se elektronički. Uz anemometar se postavlja i mehanizam koji određuje smjer vjetra. Tako se dobivaju podaci o brzini i smjeru pomoću kojih se izrađuje ruža vjetrova određenog područja.



Slika 5. Anemometar

Brzina vjetra se izražava u metrima po sekundi (m/s) ili u čvorovima (1 čvor /1 čv /= 1 naut. milja/sat; 1 naut. milja= 1 852 m). Jačina vjetra se također može odrediti prema učinku na objekte u prirodi, a izražava se u boforima. Skala ide od 0 do 12 stupnjeva za jačinu vjetra pri tlu, a za vjetrove na većim visinama do 16 stupnjeva. Beaufortova skala sadrži uz opis vjetra, za svaki stupanj jačine vjetra, njegovo djelovanje odnosno učinak (Tablica 1).

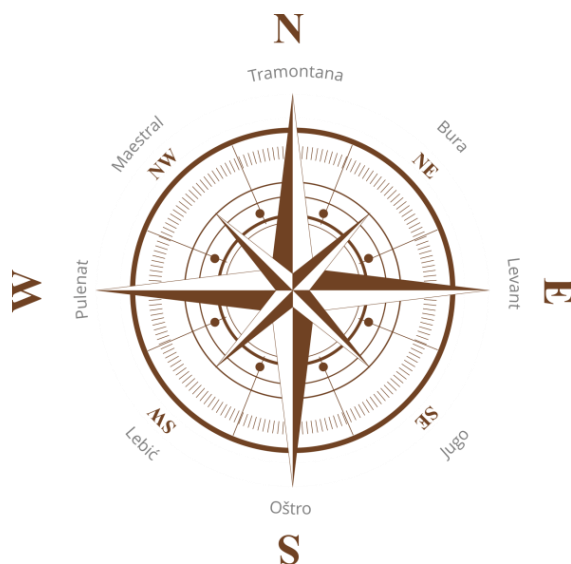
Tablica 1. Beaufortova ljestvica jačine vjetra ³

Beaufortova oznaka, Bf	Opis vjetra	Djelovanje	Brzina na 10 m iznad tla		
			m/s	km/h	čv
0	Tišina	Dim se diže ravnu u vis, zastave i lišće se ne miču	0,0 - 0,4	0,0 - 1,4	0,0 - 0,9
1	Lahor	Čovjek ne osjeća, ali dim se više ne diže jednoliko, vjetrulja se ne pokreće	0,4 - 1,8	1,4 - 6,5	0,9 - 3,5
2	Povjetarac	Osjeća se na licu, lišće počinje treperiti i vjetrulja se pokreće	1,8 - 3,6	6,5 - 13	3,5 - 7
3	Slab vjetar	Lišće se neprestano njiše i šušti, lagana zastava se njiše	3,6 - 5,8	13 - 20,9	7 - 11
4	Umjereni vjetar	S tla se podiže prašina, suho lišće i papirići, zastava se razvija, njišu se manje grane	5,8 - 8,5	20,9 - 30,6	11 - 17
5	Umjereno jaki vjetar	Njišu se veće lisnate grane, a i mala stabla, ljudima je neugodno, stvaraju se mali valovi	8,5 - 11	30,6 - 39,6	17 - 22
6	Jaki vjetar	Zuji na predmetima, žice zvižde, njišu se velike grane, teško je nositi kišobran	11 - 14	39,6 - 50,4	22 - 28
7	Žestoki	Neprestano se njiše	14 - 17	50,4 - 61,2	28 - 34

	vjetar	drveće, valovi se pjene, otežano je hodanje			
8	Olujni vjetar	Njišu se debela drveća, lome se velike grane, onemogućeno je hodanje	17 - 21	61,2 - 75,6	34 - 41
9	Jaki olujni vjetar	Pomiču se manji predmeti, pomiču se crijepovi, nastaju štete na kućama	21 - 25	75,6 - 90	41 - 48
10	Orkanski vjetar	Obara se i čupa drveće sa korijenjem, nastaju veće štete na zgradama	25 - 29	90 - 104, ⁴	48 - 56
11	Jaki orkanski vjetar	Velike štete na većem području, razorno djelovanje	29 - 34	104,4 - 122,4	56 - 65
12	Orkan	Teško pustošenje cijelog područja	43	154,8	65

1 m/s = 3,6 km/h = 1,944 čv (čvor)

Smjer vjetra se određuje geografski po strani svijeta s koje puše, tj. otkuda dolazi struja zraka. Osim glavnih strana svijeta, upotrebljavaju se i sporedne strane i među smjerovi. Najčešće se uzima 8 smjerova, a imena tih smjerova se uglavnom obilježavaju prema engleskim nazivima za strane svijeta (north, east, south, west) pa prema tome slijede oznake: N, NE, E, SE, S, SW, W i NW ². Ruža vjetrova (Slika 6) je razdioba pojave vjetra određene brzine u određenom smjeru nastala mjerenjem i korelacijom na određenoj mikrolokaciji. Karakteristike vjetrova na nekoj lokaciji mogu se razlikovati iz godine u godinu i do 10%, pa je preporučljivo mjerenja provesti kroz nekoliko godina.



Slika 6. Ruža vjetrova

4. Promjena brzine vjetra s visinom

Brzina vjetra, a samim time i snaga, ovise o visini iznad Zemljine površine. Strujanje zraka iznad Zemlje usporeno je zbog trenja čestica zraka s površinom Zemlje. Trenje može biti uzrokovano zbog same konfiguracije tla (različita vegetacija, planine, brežuljci) ili prepreka kao što su visoke zgrade. Teoretski, brzina vjetra na samoj površini Zemlje zbog trenja bi trebala biti nula ².

Efekt usporavanja vjetra zbog sile trenja smanjuje se s povećanjem visine. To uzrokuje povećanje brzine vjetra s povećanjem visine.

Postoje dva osnovna principa koji objašnjavaju varijacije brzine vjetra s visinom: zakon profila snage i logaritamski zakon.

Zakon profila snage izveden je empirijski iz stvarnih mjerenja i glasi ¹:

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

Gdje je:

v – brzina vjetra na visini H , m/s

v_0 – mjerena brzina vjetra, m/s

H_0 – visina na kojoj je mjerena brzina v_0 , m

H – visina na kojoj nas zanima brzina vjetra, m

α - koeficijent hrapavosti površine

Koeficijent hrapavosti površine α iznosi oko 0,14 (1/7) za stabilnu atmosferu (promjena temperature s visinom je malena ili negativna), međutim on će varirati, ovisno o terenu i atmosferskim uvjetima. Svjetska standardna visina za meteorološka mjerenja vremena je 10 m; međutim, korištenjem podataka od 10 m i eksponenta od 0,14 za procjenu potencijala vjetra na 50 m, za mnoge lokacije znatno će se podcijeniti potencijal vjetra za vjetroelektrane ¹.

Drugi je logaritamski zakon koji je matematički izveden iz teorije gibanja vjetra preko površine Zemlje. Visina hrapavosti z_0 koristi se da bi se opisao utjecaj konfiguracije terena na brzinu vjetra. Promjena brzine vjetra s visinom hrapavosti prema logaritamskom zakonu predstavljena je formulom ¹:

$$v = v_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (2)$$

U Tablici 2 dane su neke karakteristične vrijednosti koeficijenta z_0 .

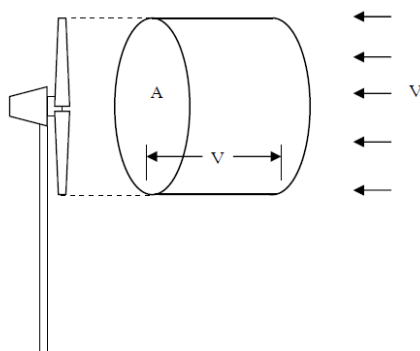
Tablica 2. Iznos koeficijenta hrapavosti terena za različite vrste terena ⁴

Opis terena	Koeficijent z_0 , m
grad	1
šuma (gusto drveće više od 15 m)	0,8
šuma (srednje gusta, visina 10-15 m)	0,7
šuma (visina manja od 10 m)	0,6
predgrađa	0,5
vjetrobrani (zidovi, nizovi drveća), makijast teren	0,3
puno drveća ili žbunja, rijetka niska makija	0,2
krš	0,15
ograđena poljoprivredna dobra	0,1
neograđena poljoprivredna dobra	0,05
livade s povremenom vegetacijom	0,03
livade	0,01
golo tlo (glatko)	0,005
snijeg	0,001
pješčane površine	0,0003
vodne površine	0

5. Snaga i energija vjetra

Energija vjetra je u osnovi kinetička energija. Molekule zraka koje se gibaju imaju kinetičku energiju, tako da količina molekula zraka koje prolaze nekim područjem u određenom vremenskom periodu određuju energiju vjetra ¹.

Budući da lopatice turbine prilikom vrtnje opisuju zamišljeni krug površine A i ako uzmemo neki cilindar duljine L (Slika 7) ⁵, tada se pomoću volumena i gustoće zraka može izračunati ukupna masa čestica koje dolaze na lopatice turbine, a pomoću mase i brzine dobije se kinetička energija.



Slika 7. Površina lopatica koja definira snagu ²

Kinetička energija struje zraka mase m i brzine v dana je izrazom ⁶:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3)$$

Masa zraka m koja struji kroz presjek A brzinom v , gustoće ρ u vremenu t jednaka je ⁶:

$$m = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (4)$$

Kada se jednačba (4) uvrsti u jednačbu (3) dobivamo:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 A \cdot t \quad (5)$$

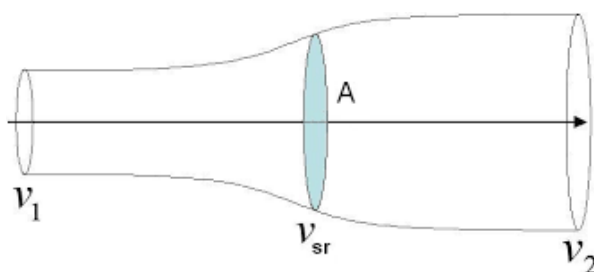
Snaga vjetra je derivacija kinetičke energije po vremenu, dE_k/dt ⁶:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (6)$$

Pritom je moguće primijetiti sljedeće:

- Snaga vjetra proporcionalna je gustoći zraka. Standardna gustoća zraka iznosi 1.225 kg/m³ pri 15 °C (288.15 K) i tlaku zraka na razini mora,
- Snaga vjetra proporcionalna je zamišljenoj površini koju opisuje rotor,
- Snaga vjetra proporcionalna je kubu brzine vjetra. Ako brzina vjetra poraste dva puta, snaga poraste osam puta.

Formule (5) i (6) daju maksimalnu teorijsku energiju i snagu koja je sadržana u vjetru. Kad bi se zrak iza turbine zaustavio turbina bi preuzela svu tu energiju odnosno snagu ⁶. Pretvorbom kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju (okretanje osovine generatora) iskorištava se samo razlika brzine vjetra na ulazu i na izlazu.



Slika 8. Strujanje zraka kroz turbinu

Ukupna kinetička energija zraka ne može se sva iskoristiti jer zrak mora dalje strujati da bi oslobodio prostor onome koji dolazi, energija se djelomično gubi na trenje, te turbina može iskoristiti samo jedan dio te energije koji je proporcionalan razlici kinetičkih energija zraka ispred i iza turbine. Izraz za mehaničku snagu turbine je ¹:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

Gdje je:

$\dot{m}$ – maseni protok (kg/s), ovisi o prosjeku brzina tj. $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2}$

v_1 – brzina vjetra na ulazu u turbinu

v_2 – brzina vjetra na izlazu iz turbine

Uvrštavanjem masenog protoka u izraz (7) slijedi da je energija turbine ¹:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (8)$$

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]}{2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (9)$$

$$c_p = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right]}{2} \quad (10)$$

Faktor c_p daje najveći stupanj aerodinamičke iskoristivosti kad je omjer $v_2/v_1=1/3$ i tada iznosi $c_{p \max}=c_{p \text{ Betz}}=16/27=0.59259$ ¹. To je zakon energije vjetra, odnosno Betzov zakon. Njegov zakon kaže da možemo pretvoriti samo manje od 16/27 ili 59,3% kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju pomoću turbine. 59,3% predstavlja teoretski maksimum, ali u praktičnoj primjeni se može pretvoriti još manje zbog raznih gubitaka u sustavu. Ako uzmemo u obzir maksimalni stupanj djelovanja turbine od oko 0.65 i stupanj djelovanja generatora od otprilike 0.8, dobijemo da je moguće iskoristiti nešto više od 30% ukupne energije vjetra za proizvodnju električne energije ⁵:

$$P_{el} = 0,59259 \cdot 0,65 \cdot 0,8 \cdot P_v = 0,31 \cdot P_v \quad (11)$$

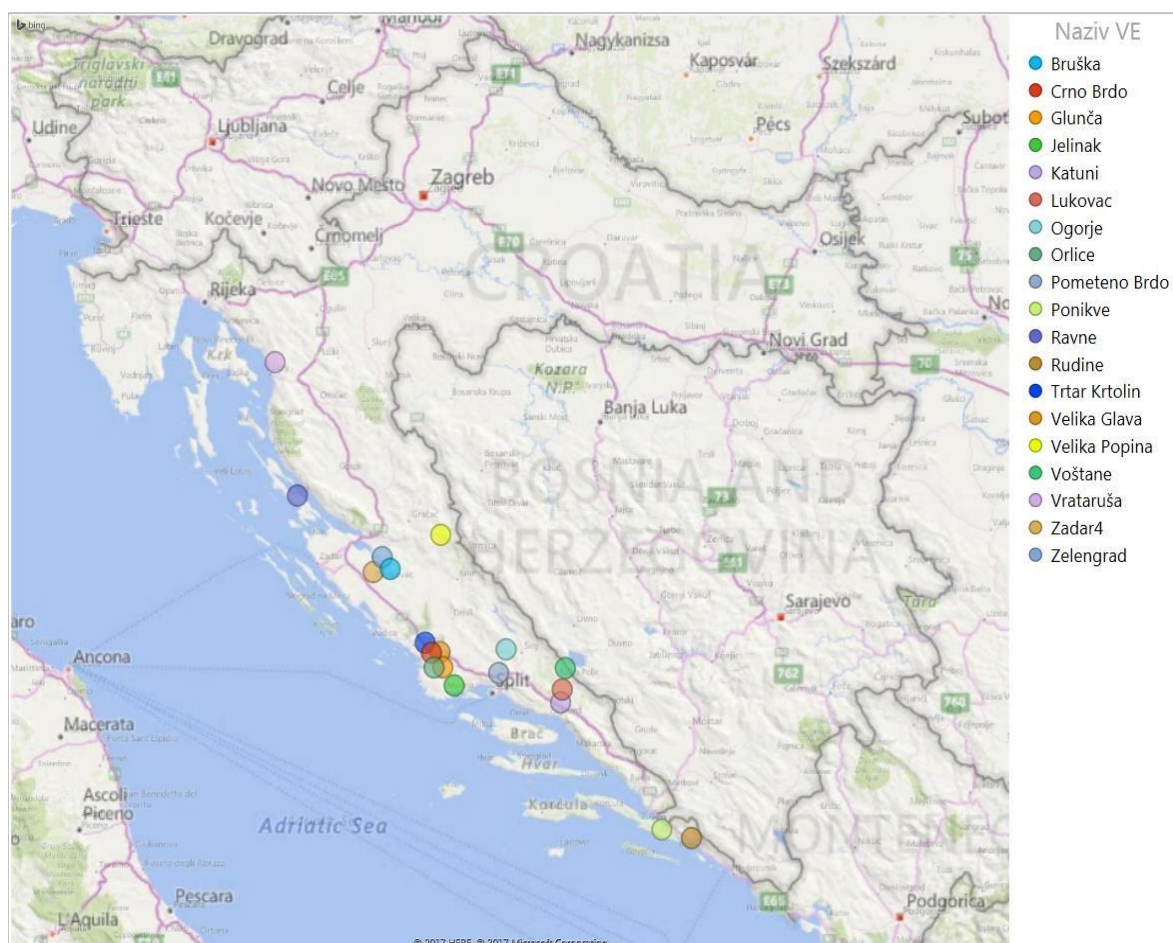
6. Vjetroelevtrane u Hrvatskoj

U prikazu osnovnih parametara vjetroelevtrane dijelimo u dvije grupe:

- 1) vjetroelevtrane u redovnom pogonu
- 2) vjetroelevtrane u pokusnom radu.

U siječnju 2018. u Hrvatskoj je u redovnom pogonu bilo 19 vjetroelektrana, s ukupno instaliranom snagom od 527,25 MW i odobrenom snagom priključenja u iznosu od 528,25 MW (Tablica 3). Najviše vjetroelektrana smješteno je u Šibensko-kninskoj županiji (6), Zadarskoj županiji (6) i Splitsko-dalmatinskoj županiji (4) (Slika 9). Najveći broj vjetroelektrana (13) priključeno je na 110 kV prijenosnu mrežu, dok su ostale priključene na srednjenaponsku distribucijsku mrežu (35, 30 i 10 kV) ⁷.

U probnom pogonu je bila još 1 vjetroelektrana, ukupne instalirane snage od 48,75 MW, a ukupno odobrene priključne snage 48 MW (Tablica 4) ⁷.



Slika 9. Lokacije VE u Hrvatskoj ⁷

Tablica 3. Osnovni parametri vjetroelektrana u redovnom pogonu ⁷

br.	Naziv VE	Lokacija (županija/općina)	Ukupna instalirana snaga (MW)	Ukupno odobrena snaga priključenja (MW)	Napon priključenja (kV)	U redovnom pogonu od
1	Ravne	Zadarska/Pag	5,95	5,95	10	2005
2	Trtar Krtolin	Šibensko-Kninska/ Šibenik	11,2	11,2	30	2007
3	Orlice	Šibensko-Kninska/ Šibenik	9,6	9,6	30	2009
4	Vrataruša	Primorsko- Goranska/Senj	42	42	110	2010
5	Velika Popina	Zadarska/Gračac	9,2	9,2	35	2011
6	Pometeno Brdo	Splitsko- Dalmatinska/Split	20	20	110	2010/2011/ 2012/2015
7	Crno Brdo	Šibensko-Kninska/ Šibenik	10,5	10	10	2011
8	Bruška	Zadarska/ Benkovac,Obrovac	36,8	36	110	2011
9	Ponikve	Dubrovačko- Neretvanska/Ston	36,8	34	110	2012
10	Jelinak	Šibensko-Kninska/ Marina, Seget	30	30	110	2013
11	Voštane	Splitsko- Dalmatinska/Trilj	42	40	110	2013
12	Zadar4	Zadarska/Benkovac	9,2	9,2	10	2013
13	Velika Glava	Šibensko-Kninska/ Drniš,Šibenik, Unešić	43,7	43	110	2014
14	Zelengrad	Zadarska/Obrovac	42	42	110	2014

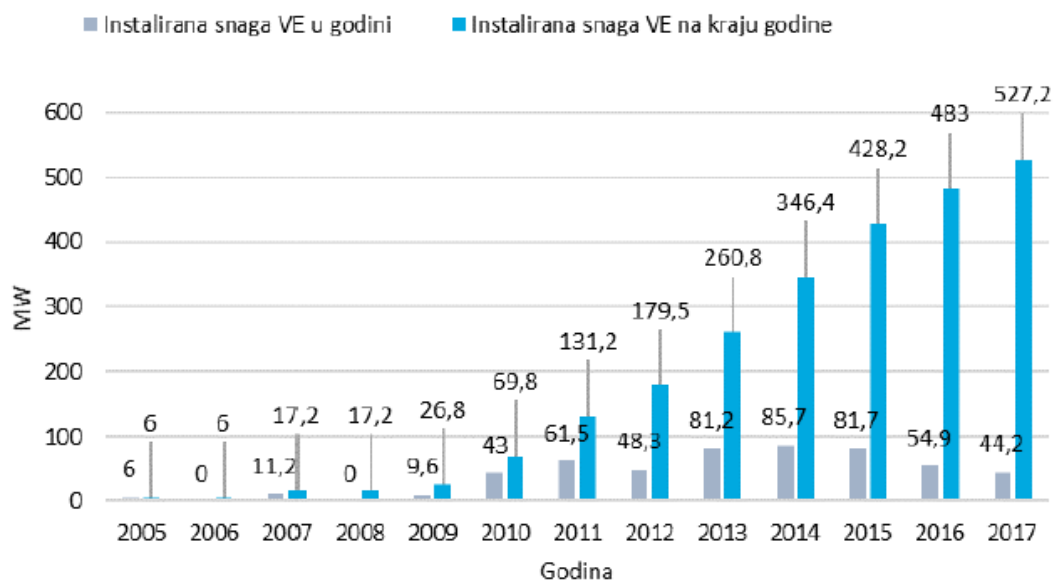
15	Ogorje	Splitsko-Dalmatinska/Muč	45	44	110	2015
16	Rudine	Dubrovačko-Neretvanska/Dubrovačko primorje	34,2	34,2	110	2015
17	Glunča	Šibensko-Kninska/Šibenik	20,7	23	110	2016
18	Katuni	Splitsko-Dalmatinska/Šestanovac	34,2	39,9	110	2016
19	Velika Popina	Zadarska/Gračac	44,2	45	110	2017
UKUPNO			527,25	528,25		

Tablica 4. Osnovni parametri vjetroelektrana u pokusnom radu ⁷

br.	Naziv VE	Lokacija (županija/općina)	Ukupna instalirana snaga (MW)	Ukupno odobrena snaga priključenja (MW)	Napon priključenja (kV)	U redovnom pogonu od
20	Lukovac	Splitsko-Dalmatinska/ Cista Provo	48,75	48	110	Pokusni rad
UKUPNO			48,75	48		

Posebnost VE u Hrvatskoj je njihova mala geografska raspršenost. Najveća udaljenost između dviju VE iznosi oko 300 km, dok je 16 od ukupno 19 VE sa 75% ukupno instalirane snage VE smještanu na području sličnog vjetroklimatskog režima 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 ⁸.

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. – 2017. godine u redovni pogon ulazilo je prosječno 71,5 MW godišnje novih instaliranih kapaciteta vjetroelektrana (Slika 10) ⁸.



Slika 10. Vremenska dinamika izgradnje VE u Hrvatskoj ⁸

7. Proračun brzina vjetra na lokacijama VE u Hrvatskoj

U nedostatku podataka o brzini vjetra na lokacijama VE, korišteni su podaci iz obližnjih meteoroloških postaja koji su matematičkim modelom približeni stvarnoj vrijednosti na lokaciji VE.

Iz Državnog hidrometeorološkog zavoda dobiveni su podaci o srednjoj satnoj brzini vjetra za traženi vremenski period na području Senja, Knina i Šibenika.

Radi jednostavnosti izračuna, aritmetičkom sredinom dobivene su srednje dnevne brzine vjetra:

$$\bar{v} = \frac{v_1 + \dots + v_n}{n} \quad (12)$$

Tablica 5. Srednje dnevne brzine vjetra za Šibenik, Knin i Senj u razdoblju od 07.-
17.01.2018. izmjerene na visini od 10 m

Datum	Srednje dnevne brzine vjetra na visini na visini od 10 m, m/s		
	Šibenik	Knin	Senj
07.01.2018.	5,2458	5,0333	1,9083
08.01.2018.	7,5458	8,2875	1,7208
09.01.2018.	7,3125	6,7625	2,8500
10.01.2018.	3,1292	2,1917	1,3375
11.01.2018.	3,7208	3,2083	6,4125
12.01.2018.	4,9292	5,5750	6,9125
13.01.2018.	4,1875	5,3042	6,9958
14.01.2018.	5,4292	5,5083	9,1625
15.01.2018.	1,8125	1,7208	5,6292
16.01.2018.	3,3458	4,5417	4,3042
17.01.2018.	4,8625	5,6083	3,5708

Dobiveni podaci iz DHMZ-a mjereni su na visini od 10 metara, te ih je bilo potrebno preračunati na visinu stupa vjetroturbine primjenom logaritamske funkcije (2). U nedostatku točnih informacija o dimenzijama vjetroatregata, uzeta je srednja vrijednost visine stupa vjetroatregata. Visina stupa na lokacijama vjetroelektrana u Hrvatskoj kreće se okvirno između 50 i 90 m, tako da je za proračun uzeta srednja vrijednost od 70 m, dok je za visinu hrapavosti z_0 uzeta vrijednost od 0,03 m :

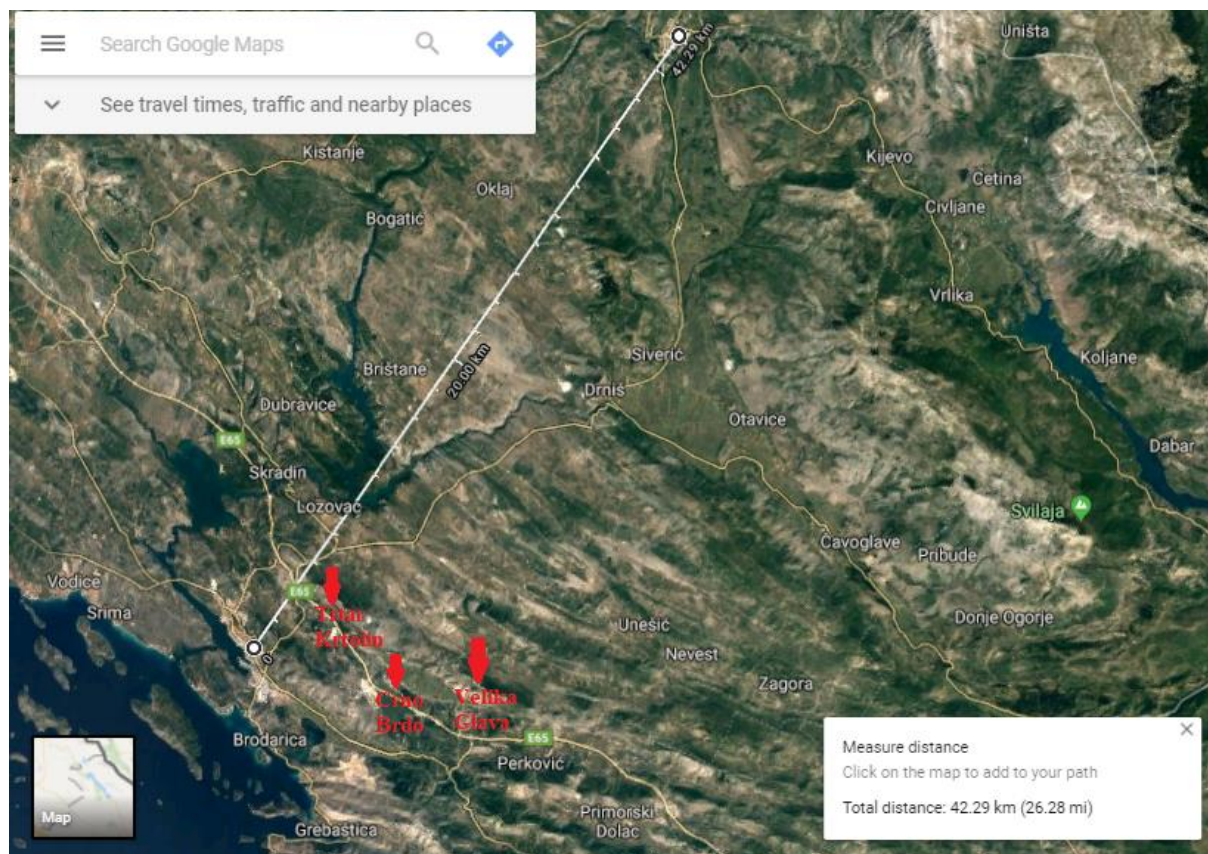
$$v = 5,2458 \cdot \frac{\ln(70 / 0,03)}{\ln(10 / 0,03)} = 7,0031 \text{ m / s} \quad (13)$$

Tablica 6. Srednje dnevne brzine vjetra za Šibenik, Knin i Senj u razdoblju od 07.-
17.01.2018. preračunate na visinu od 70 m

Datum	Srednje dnevne brzine vjetra na visini od 70 m, m/s		
	Šibenik	Knin	Senj
07.01.2018.	7,0031	6,7194	2,5476

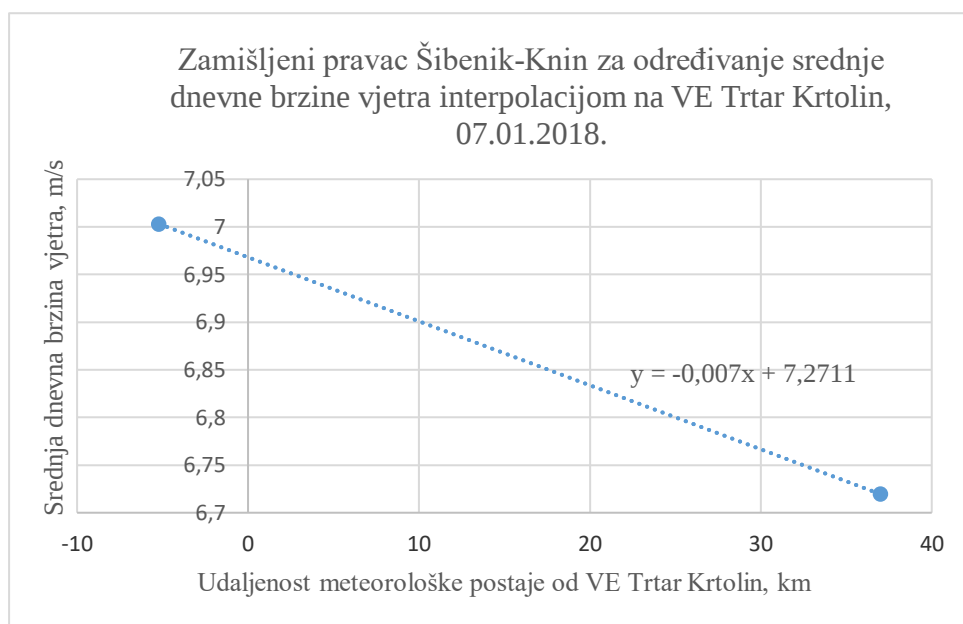
08.01.2018.	10,0735	11,0636	2,2973
09.01.2018.	9,7620	9,0278	3,8047
10.01.2018.	4,1774	2,9258	1,7855
11.01.2018.	4,9672	4,2830	8,5605
12.01.2018.	6,5803	7,4425	9,2280
13.01.2018.	5,5902	7,0809	9,3393
14.01.2018.	7,2478	7,3535	12,2317
15.01.2018.	2,4196	2,2973	7,5148
16.01.2018.	4,4666	6,0630	5,7460
17.01.2018.	6,4913	7,4870	4,7670

Na području Šibensko-Kninske županije dostupni su podaci iz dvije meteorološke postaje (Knin i Šibenik), te je približna vrijednost brzine vjetra na lokacijama VE Trtar Krtolin, Crno Brdo i Velika Glava određena interpolacijom.



Slika 11. VE Trtar Krtolin, Crno Brdo i Velika Glava u odnosu na zamišljeni pravac Šibenik – Knin⁹

U programskom paketu Microsoft Excel prikazan je odnos srednje dnevne brzine vjetra i udaljenosti meteorološke postaje od VE. Jednoj je udaljenosti dodijeljen negativni predznak, tako da položaj $x=0$ predstavlja lokaciju VE, a odsječak na osi y brzinu vjetra na traženoj lokaciji VE.



Slika 12. Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE Trtar Krtolin na visini od 70 m, na datum 07.01.2018.

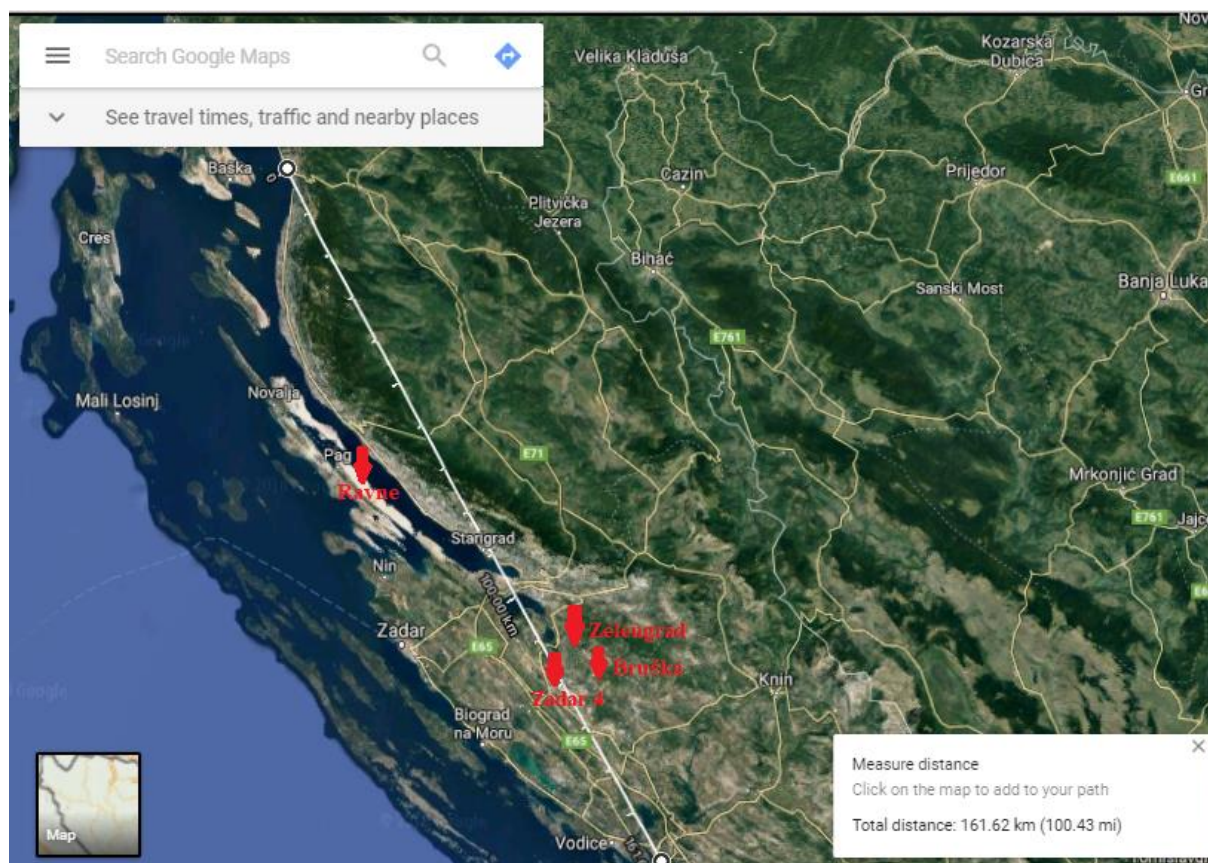
Korištenjem prikazane metode određena je brzina vjetra za VE Trtar Krtolin, VE Crno Brdo i VE Velika Glava u promatranom razdoblju.

Tablica 7. Srednje dnevne brzine vjetra na lokacijama VE Trtar Krtolin, VE Crno Brdo i VE Velika Glava u promatranom razdoblju

Datum	Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE, m/s		
	VE Trtar Krtolin	VE Crno Brdo	VE Velika Glava
07.01.2018.	7,27	6,98	6,95
08.01.2018.	10,20	10,14	10,26
09.01.2018.	9,67	9,71	9,62
10.01.2018.	4,02	4,09	3,94
11.01.2018.	4,88	4,92	4,84
12.01.2018.	6,69	6,64	6,74
13.01.2018.	5,77	5,70	5,87

14.01.2018.	7,26	7,26	7,27
15.01.2018.	2,41	2,41	2,40
16.01.2018.	4,66	4,58	4,77
17.01.2018.	6,61	6,56	6,68

Matematičkom metodom interpolacije, no ovaj put na drugom zamišljenom pravcu Senj-Šibenik određena je brzina vjeta za lokacije VE Ravne, VE Zelengrad, VE Zadar 4 i VE Bruška.



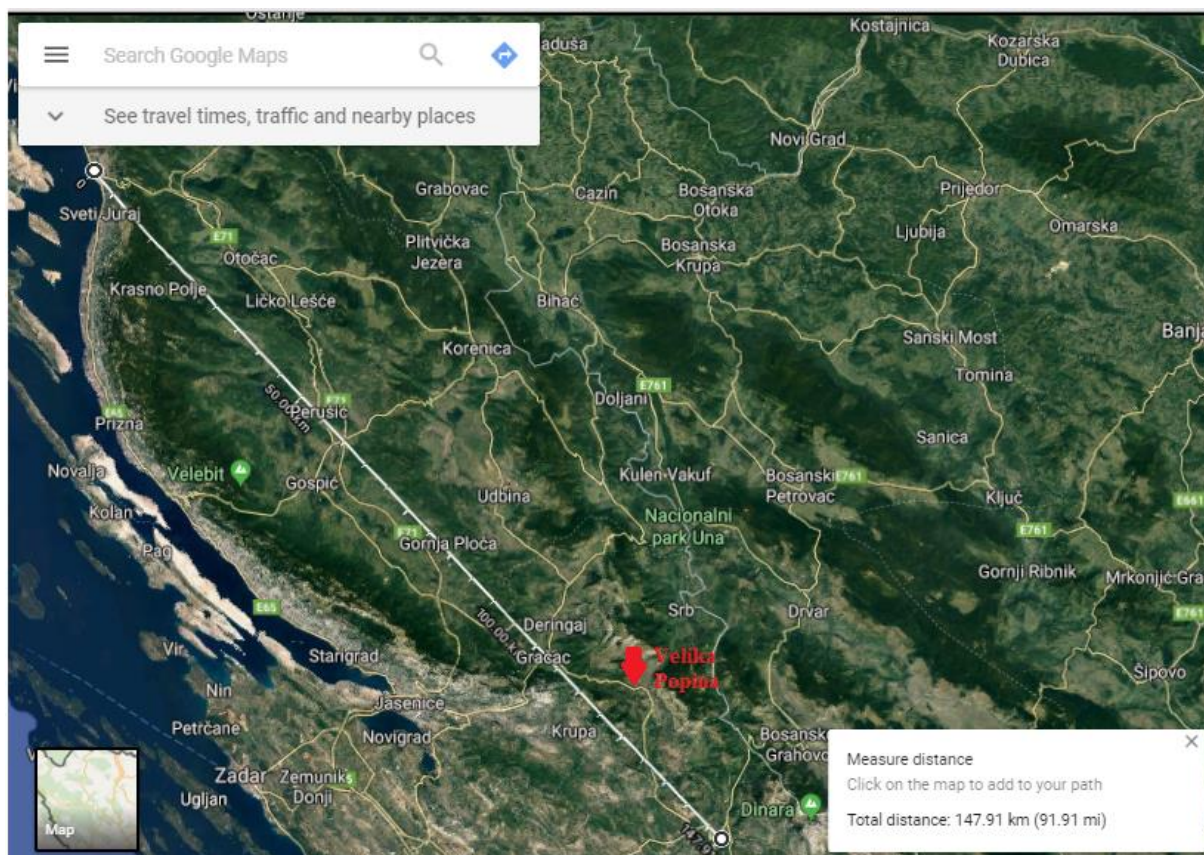
Slika 13. VE Ravne, VE Zelengrad, VE Bruška i VE Zadar 4 u odnosu na zamišljeni pravac Senj-Šibenik ⁹

Tablica 8. Srednje dnevne brzine vjeta na lokacijama VE Ravne, VE Zelengrad, VE Bruška i VE Zadar 4 u promatranom razdoblju

Datum	Srednja dnevna brzina vjeta na lokaciji VE, m/s			
	VE Ravne	VE Zadar 4	VE Bruška	VE Zelengrad
07.01.2018.	4,26	5,73	5,91	5,59
08.01.2018.	5,28	7,85	8,17	7,61

09.01.2018.	6,09	8,06	8,30	7,87
10.01.2018.	2,70	3,49	3,59	3,42
11.01.2018.	7,18	6,00	5,85	6,11
12.01.2018.	8,21	7,34	7,23	7,42
13.01.2018.	7,90	6,67	6,51	6,78
14.01.2018.	10,32	8,68	8,47	8,83
15.01.2018.	5,56	3,88	3,67	4,04
16.01.2018.	5,26	4,83	4,78	4,87
17.01.2018.	5,43	6,00	6,07	5,95

Na pravcu Senj-Knin nalazi se VE Velika Popina.



Slika 14. VE Velika Popina u odnosu na zamišljeni pravac Senj-Knin ⁹

Datum	Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE Velika Popina, m/s
07.01.2018.	5,99
08.01.2018.	9,53
09.01.2018.	8,11
10.01.2018.	2,73
11.01.2018.	5,03
12.01.2018.	7,76
13.01.2018.	7,48
14.01.2018.	8,21
15.01.2018.	3,21
16.01.2018.	6,01
17.01.2018.	7,01

Search Google Maps

See travel times, traffic and nearby places

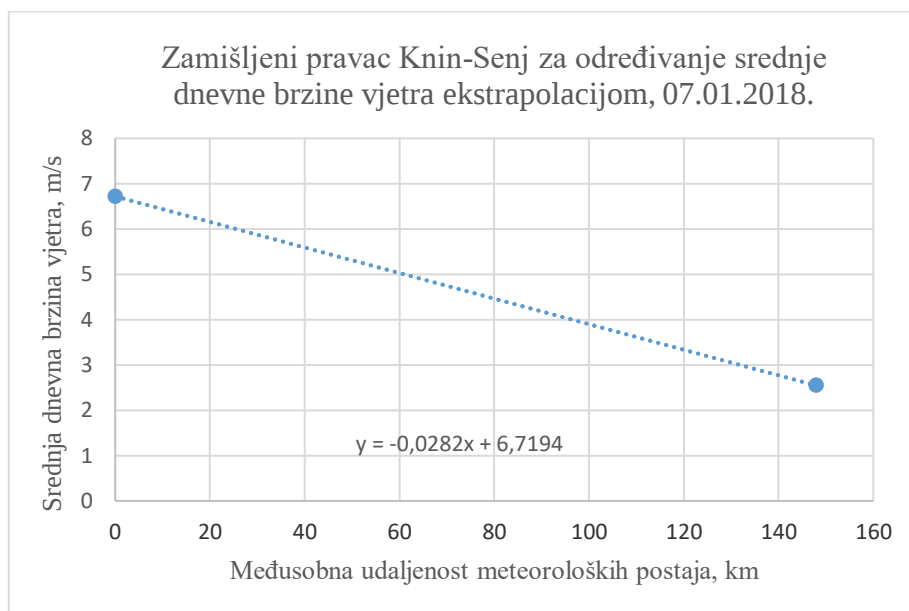
Measure distance

Click on the map to add to your path

Total distance: 185.84 km (115.48 mi)

21

U programu Microsoft Excell stavljene su u odnos srednje dnevne brzine vjetra na lokacijama meteoroloških postaja i međusobna udaljenost tih istih postaja. U koordinatnom sustavu, na x osi nalazi se međusobna udaljenost meteoroloških postaja. Za x(Knin) uzeta je vrijednost 0 km, a za x(Senj) je uzeta vrijednost od 147,91 km koja odgovara zračnoj udaljenosti meteoroloških postaja od Knina do Senja.



Slika 16. Jednadžba pravca koja opisuje odnos srednje dnevne brzine vjetra i međusobne udaljenosti meteoroloških postaja Knina i Senja

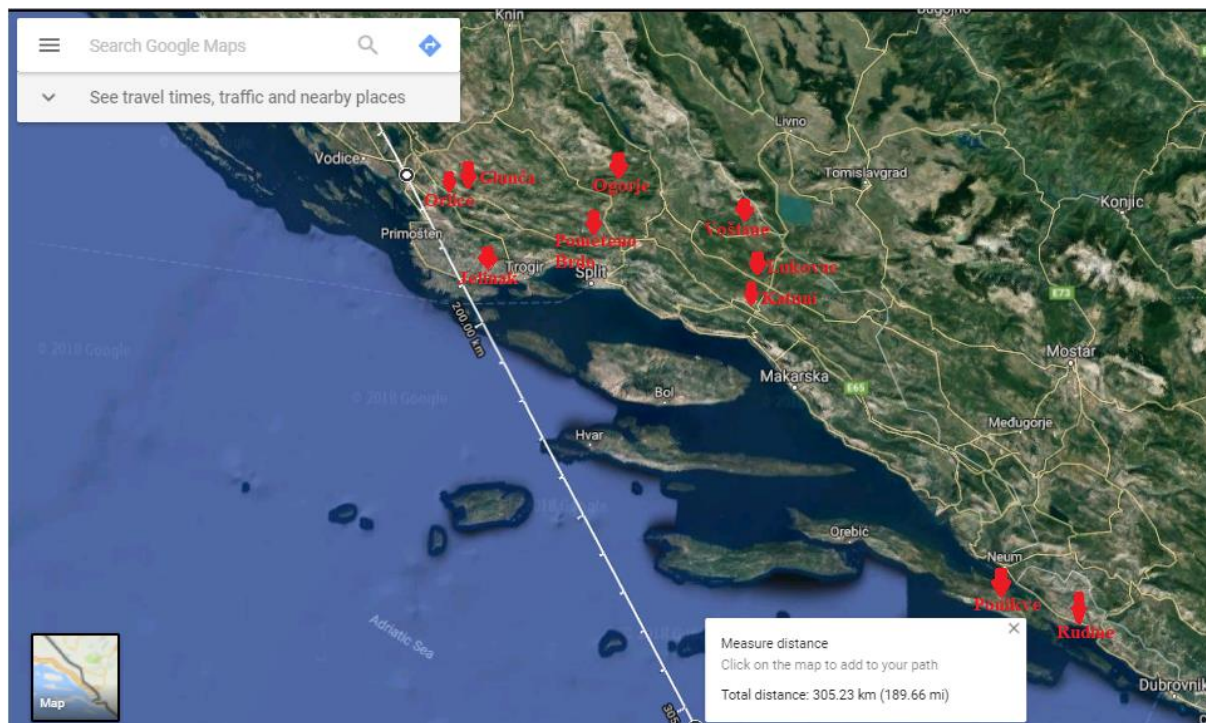
Uzevši u obzir da se VE Vrataruša nalazi na 151. km zamišljenog pravca koji se pruža od Knina preko Senja do otoka Krka, dobivene su slijedeće brzine vjetra za VE Vratarušu:

Tablica 10. Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE Vrataruša u promatranom razdoblju

Datum	Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE Vrataruša, m/s
07.01.2018.	2,46
08.01.2018.	2,11
09.01.2018.	3,70
10.01.2018.	1,76
11.01.2018.	8,65
12.01.2018.	9,27
13.01.2018.	9,39
14.01.2018.	12,34

15.01.2018.	7,63
16.01.2018.	5,75
17.01.2018.	7,47

Matematičkom metodom ekstrapolacije, no ovaj put na drugom zamišljenom pravcu Senj-Šibenik određena je brzina vjetra za lokacije VE Orlice, VE Glunča, VE Jelinak, VE Ogorje, VE Pometeno Brdo, VE Voštane, VE Katuni, VE Ponikve, VE Rudine i VE Lukovac.



Slika 17. VE Orlice, VE Glunča, VE Jelinak, VE Ogorje, VE Pometeno Brdo, VE Voštane, VE Katuni, VE Ponikve, VE Rudine i VE Lukovac u odnosu na zamišljeni pravac Senj-Šibenik ⁹

Stavljajući u odnos srednje dnevne brzine vjetra i međusobnu udaljenost meteoroloških postaja Senja i Šibenika dobivena je jednadžba pravca. Iz te jednadžbe je izračunata srednja dnevna brzina vjetra na lokacijama uz pretpostavku da se VE Orlice nalazi na 175 km, VE Glunča na 178 km, VE Jelinak na 189 km, VE Ogorje na 187 km, VE Pometeno Brdo na 195 km, VE Voštane na 210 km, VE Katuni na 226 km, VE Ponikve na 310 km, VE Rudine na 326 km i VE Lukovac na 220 km zamišljenog pravca koji prolazi kroz Senj i Šibenik.

Tablica 11. Srednje dnevne brzine vjetra na lokacijama VE Orlice, VE Glunča, VE Jelinak, VE Ogorje i VE Pometeno Brdo u promatranom razdoblju

Datum	Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE, m/s				
	VE Orlice	VE Glunča	VE Jelinak	VE Ogorje	VE Pometeno brdo
07.01.2018.	7,38	7,46	7,76	7,71	7,93
08.01.2018.	10,72	10,86	11,39	11,29	11,68
09.01.2018.	10,26	10,37	10,78	10,71	11,00
10.01.2018.	4,38	4,42	4,58	4,55	4,67
11.01.2018.	4,68	4,61	4,37	4,41	4,23
12.01.2018.	6,36	6,31	6,13	6,16	6,03
13.01.2018.	5,28	5,21	4,96	5,00	4,82
14.01.2018.	6,84	6,75	6,41	6,47	6,23
15.01.2018.	2,00	1,91	1,56	1,62	1,37
16.01.2018.	4,36	4,34	4,25	4,27	4,21
17.01.2018.	6,64	6,67	6,79	6,77	6,85

Tablica 12. Srednje dnevne brzine vjetra na lokacijama VE Voštane, VE Katuni, VE Ponikve, VE Rudine i VE Lukovac u promatranom razdoblju

Datum	Srednja dnevna brzina vjetra na lokaciji VE, m/s				
	VE Voštane	VE Katuni	VE Ponikve	VE Rudine	VE Lukovac
07.01.2018.	8,34	8,79	11,10	11,55	8,62
08.01.2018.	12,40	13,17	17,21	17,98	12,88
09.01.2018.	11,55	12,14	15,24	15,83	11,92
10.01.2018.	4,89	5,13	6,37	6,61	5,04
11.01.2018.	3,90	3,54	1,68	1,32	3,68
12.01.2018.	5,78	5,52	4,14	3,88	5,62
13.01.2018.	4,47	4,10	2,15	1,78	4,24
14.01.2018.	5,76	5,27	2,68	2,19	5,46
15.01.2018.	0,90	0,40	2,25	2,75	0,59

16.01.2018.	4,09	3,96	3,30	3,17	4,01
17.01.2018.	7,01	7,19	8,08	8,26	7,12

8. Proračun proizvedene snage električne energije na lokacijama VE u Hrvatskoj

Nakon izračunatih brzina vjetra na lokacijama VE, izračunata je snaga koju su proizvele VE u Hrvatskoj na datum 08. siječanj 2018.

Za gustoću zraka je uzeta vrijednost pri standardnim uvjetima (razina mora i temperatura zraka od 15° C) koja iznosi 1,225 kg/m³.

Ako pretpostavimo da lopatice rotora opisuju zamišljenu kružnicu, onda možemo površinu rotora izračunati koristeći formulu za površinu kruga:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (14)$$

Pri čemu je d promjer lopatica rotora koji se za VE u Hrvatskoj okvirno kreće u rasponu od 48 do 103 metra, a za izračun je uzeta srednja vrijednost od 75 metara:

$$A = \frac{75^2 \cdot \pi}{4} = 4418m^2 \quad (15)$$

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti u formulu (6) izračunata je snaga vjetra za VE Trtar Krtolin na datum 08.01.2018. gdje je srednja dnevna brzina vjetra iznosila 10,20 m/s:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 4418 \cdot 10,20^3 = 2871,66kW \quad (16)$$

Uzevši u obzir Betzov zakon, te stupanj djelovanja turbine i generatora izračunata je snaga vjetra koja se može pretvoriti u električnu energiju:

$$P_{el} = 0,31 \cdot 2871,66 = 890,22kW \quad (17)$$

Ovim je računom dobivena snaga vjetra koju jedan vjetroagregat može pretvoriti u električnu energiju, znači da je P_{el} potrebno pomnožiti sa brojem vjetroagregata na lokaciji VE Trtar Krtolin koji iznosi 14 ⁹:

$$P_{VE} = 890,22 \cdot 14 = 12463,0kW \quad (18)$$

Time je dobivena snaga električne energije koja je proizvedena na lokaciji VE Trtar Krtolin i koja iznosi 12463,0 kWh u vremenskom periodu od jednoga sata, što znači da je za ukupnu snagu na datum 08.01.2018. ovaj iznos potrebno pomnožiti sa 24 (uz pretpostavku da se svaki sat proizvede ista količina snage):

$$P_{VE} = 12463,0 \cdot 24 = 299112,11kWh \quad (19)$$

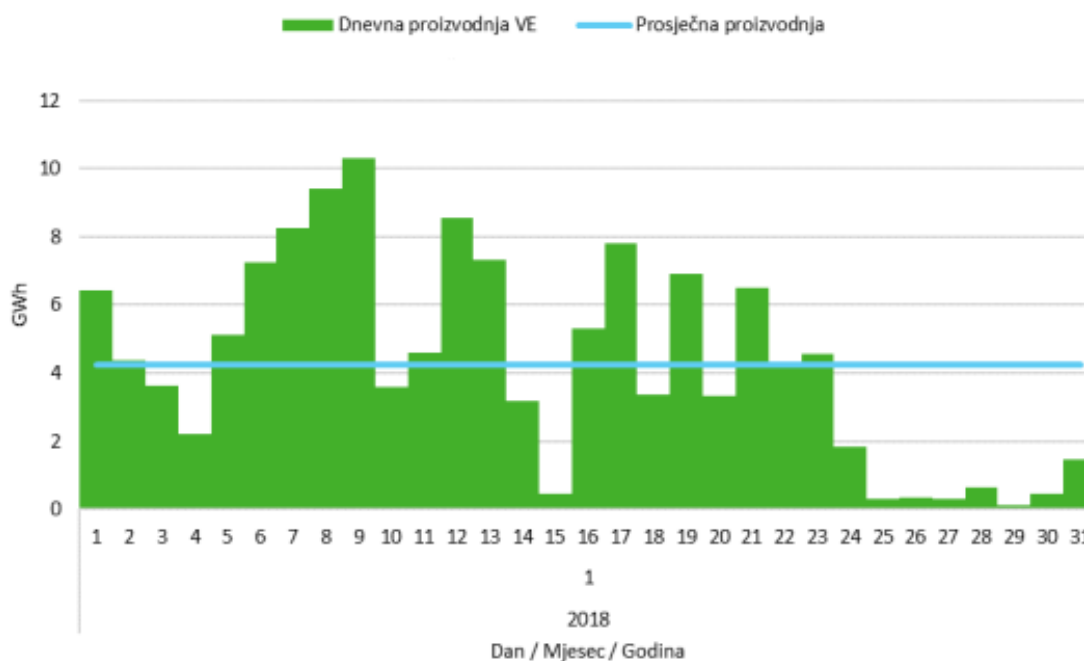
Da bi se dobila ukupna proizvedena snaga električne energije iz vjetroelektrana na datum 08.01.2018., potrebno je istim postupkom izračunati snagu za sve lokacije:

Tablica 13. Proizvedena snaga električne energije na datum 08.01.2018.

Lokacije VE	Proizvedena snaga električne energije na datum 08.01.2018., kWh
Trtar Krtolin	299.111,60
Crno Brdo	146.932,10
Velika Glava	413.143,00
Ravne	20.744,58
Zadar 4	38.955,94
Bruška	175.667,30
Zelengrad	124.218,60
Velika Popina	69.701,71
Vrataruša	2.647,77
Orlice	272.823,50
Glunča	232.079,50
Jelinak	594.984,90
Ogorje	405.615,60
Pometeno Brdo	481.198,80

Voštane	537.400,20
Katuni	551.878,30
Ponikve	1.641.978,00
Rudine	1.404.284,00
Lukovac	688.291,40
Ukupno	8.101.657,00

Ukupnu prizvedenu snagu električne energije iz vjetroelektrana u Hrvatskoj na datum 08.01.2018. možemo usporediti sa HOPS-ovim izvještajem za siječanj 2018. koji je proizvodnju prikazao grafički po danima u mjesecu siječnju:



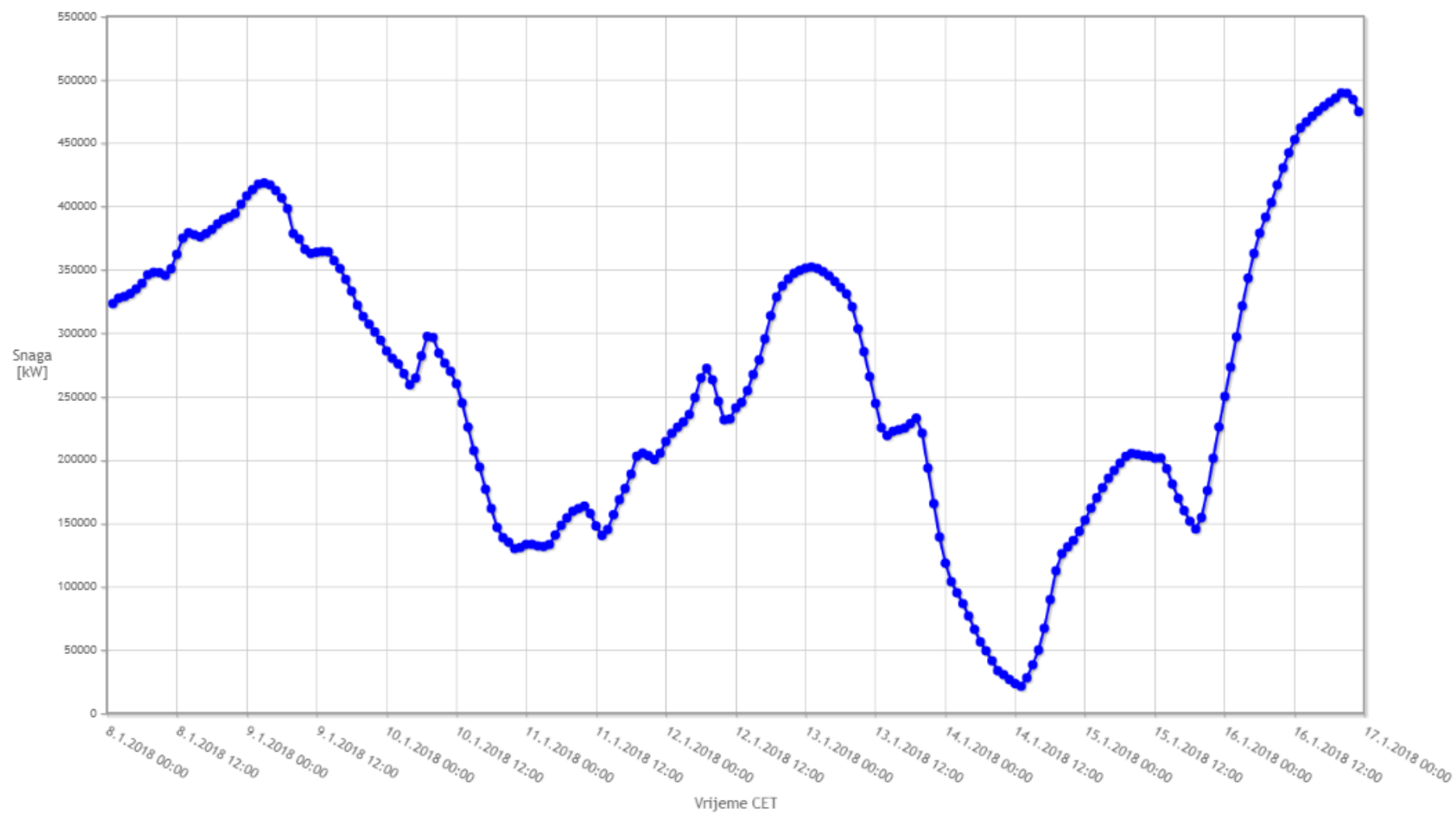
Slika 18. Dnevna proizvodnja svih vjetroelektrana u Hrvatskoj za mjesec siječnj 2018. ⁷

U HOPS-ovom izvještaju vidimo da je proizvodnja električne energije na dan 08.01.2018. iznosila oko 9,4 GWh što značajno odstupa od izračunatih 8,1 GWh. Ova odstupanja možemo pripisati nedostatku točnih podataka o brzini vjetra na lokacijama VE, jer brzina vjetra sa trećom potencijom značajno utječe na snagu električne energije koja se može proizvesti.

9. Planiranje proizvodnje električne energije

Hrvatski operator tržišta energije HROTE bavi se planiranjem proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora (vjetroelektrane i sunčane elektrane) na temelju meteorološke prognoze i povijesnih podataka o radu takvih postrojenja. Proizvodnju planira za 240 sati unaprijed uz četiri dnevna osvježanja prognoze na temelju novih meteoroloških podataka. Kvaliteta prognoze se poboljšava sa svakim novim osvježavanjem, a za HROTE je najrelevantnije drugo osvježavanje prognoze koje se izrađuje prije zatvaranja trgovanja na Hrvatskoj burzi električne energije CROPEX. Težnja je da se zadnjim osvježanjem uravnoteži tržišna pozicija HROTE-a u odnosu na plan proizvodnje EKO bilančne grupe na CROPEX-u. EKO bilančnu grupu čine proizvođači električne energije i druge osobe koje obavljaju djelatnosti proizvodnje električne energije. Za voditelja EKO bilančne grupe određen je HROTE koji ima obavezu planiranja proizvodnje električne energije za EKO bilančnu grupu, te prodaju proizvedene električne energije iz EKO bilančne grupe na tržištu električne energije ¹⁰.

Ako pogledamo HROTE-ovo predviđanje na datum 07.01.2018. za 10 dana unaprijed (Slika 19), možemo vidjeti da je predviđena proizvodnja snage za 08.01.2018. iznosila 8,7 GWh (taj je iznos dobiven zbrajanjem satnih vrijednosti prognozirane proizvodnje snage).



Slika 19. Prognoza rada vjetroelektrana za sljedećih 10 dana na datum 07.01.2018. ¹⁰

Na HROTE-ovoj stranici također možemo pogledat kako taj iznos izgleda 8 dana prije, te kakve su njegove varijacije u tom periodu:

Tablica 14. Predviđanje proizvodnje električne energije za datum 08.01.2018.

PREDVIĐANJE PROIZVODNJE	Snaga električne energije predviđena za 08.01.2018., GWh
8 dana unaprijed	9,5
7 dana unaprijed	3,7
6 dana unaprijed	5,6
5 dana unaprijed	9,7
4 dana unaprijed	10,4
3 dana unaprijed	9,2
2 dana unaprijed	8,9
1 dan unaprijed	8,7
STVARNA PROIZVODNJA	9,3

Iz tablice 14 možemo zaključiti da vrijednosti dosta variraju i da su nepredvidive. Treći i osmi dan su vrijednosti bile najbliže ostvarenoj, dok je drugi dan ta vrijednost bila bliža ostvarenoj nego što je to bila dan unaprijed.

Ako uzmemo neke druge datume u promatranom periodu, na primjer 10. i 17.01.2018. onda tablice predviđanja izgledaju ovako:

Tablica 15. Predviđanje proizvodnje električne energije za datum 10.01.2018.

PREDVIĐANJE PROIZVODNJE	Snaga električne energije predviđena za 10.01.2018., GWh
8 dana unaprijed	7,8
7 dana unaprijed	4,7
6 dana unaprijed	1,4
5 dana unaprijed	3,2
4 dana unaprijed	4,4

3 dana unaprijed	5,3
2 dana unaprijed	5,7
1 dan unaprijed	5,0
STVARNA PROIZVODNJA	3,5

U tablici 15 je vidljivo da predviđanje HROTE-a za dan unaprijed pokazuje velika odstupanja od stvarne proizvodnje. Najbliže je stvarnoj vrijednosti predviđanje pet dana unaprijed. Iz tablice su također vidljive velike varijacije predviđanja proizvodnje od 1,4 do 7,8 GWh, koje su se približavanjem promatranom datumu smanjile. Vrijednost prognoze kretala se oko 5 GWh, no stvarna je proizvodnja podbacila.

Tablica 16. Predviđanje proizvodnje električne energije za datum 17.01.2018.

PREDVIĐANJE PROIZVODNJE	Snaga električne energije predviđena za 17.01.2018., GWh
8 dana unaprijed	6,4
7 dana unaprijed	3,4
6 dana unaprijed	6,1
5 dana unaprijed	4,9
4 dana unaprijed	6,0
3 dana unaprijed	6,4
2 dana unaprijed	6,6
1 dan unaprijed	6,4
STVARNA PROIZVODNJA	7,9

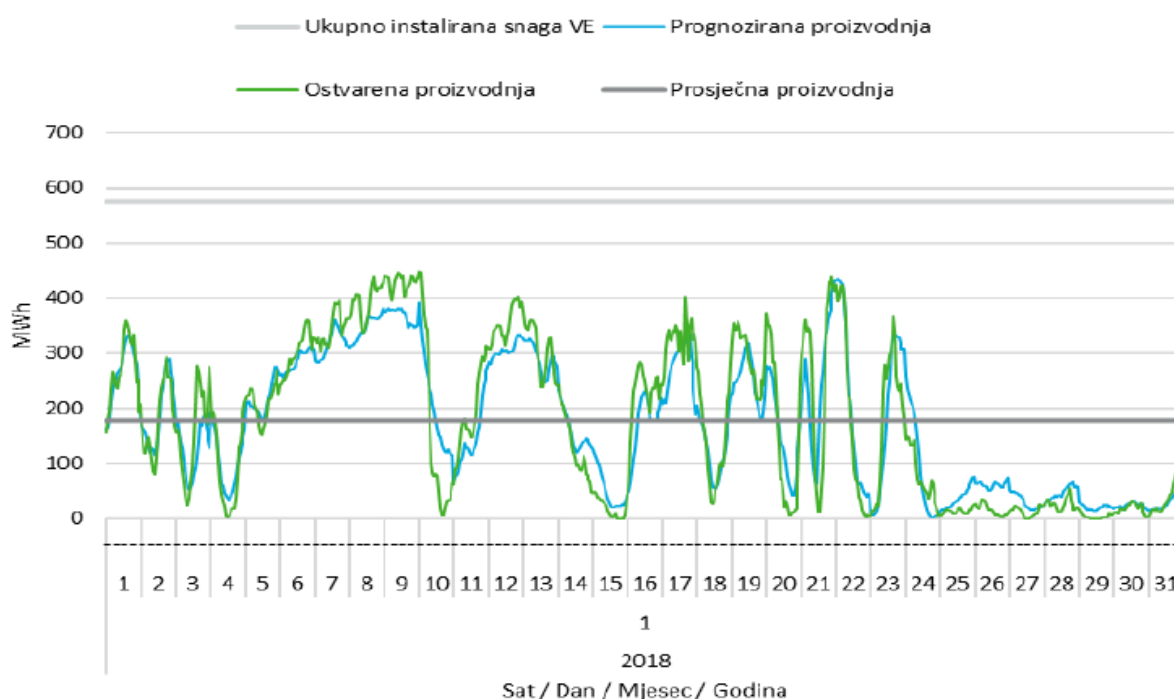
U ovoj je tablici vidljiva stabilna prognoza koja se kreće oko 6,4 GWh, međutim stvarna je proizvodnja bila puno veća i ona iznosi 7,9 MWh.

Iz priloženih tablica proizlazi da je stvarnu proizvodnju vjetroelektrana vrlo teško prognozirati zbog nepredvidive prirode vjetra.

10. Odstupanje prognoze od stvarno proizvedene električne energije

Prognoza proizvodnje VE svakako predstavlja najveći izazov, osobito 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 ⁷.

Na slici 20 prikazana je ostvarena proizvodnja u odnosu na prognoziranu proizvodnju u siječnju 2018:

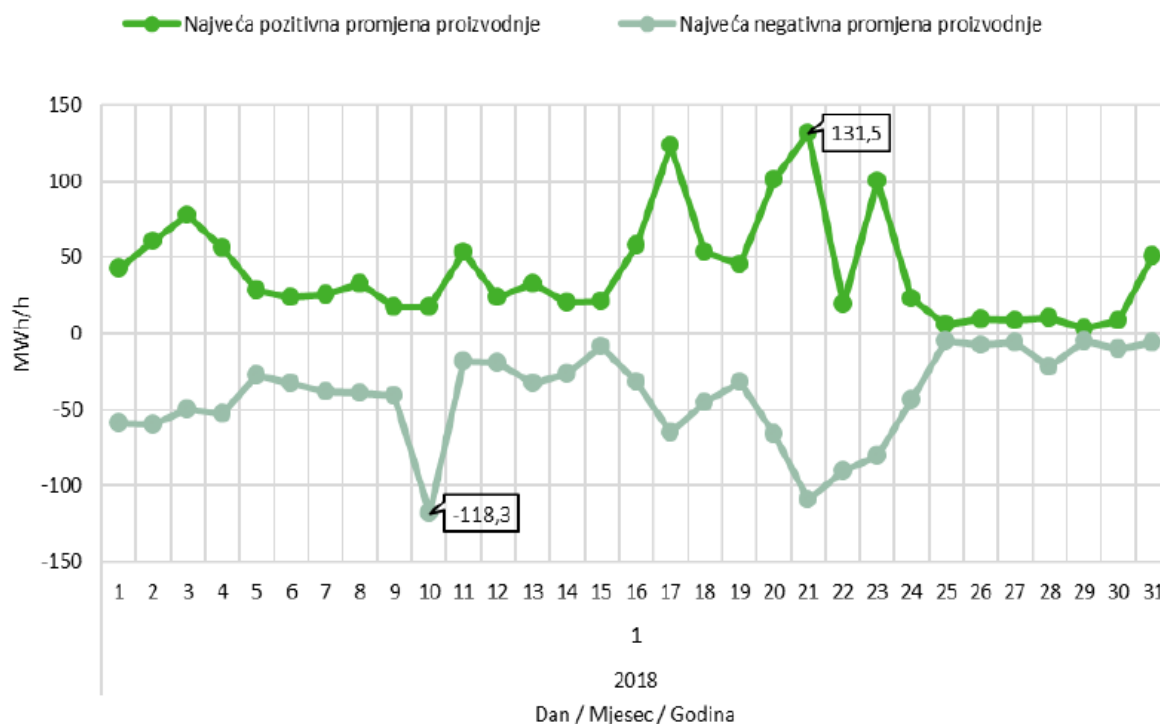


Slika 20. Ostvarena proizvodnja u odnosu na prognoziranu proizvodnju za siječanj 2018. ⁷

10.1. Energija uravnoteženja

Energija uravnoteženja je električna energija koju aktivira HOPS radi pokrivanja razlike između stvarno isporučene ili preuzete električne energije i ugovorenih količina električne energije, te radi održavanja frekvencije u elektroenergetskom sustavu u propisanim granicama ¹⁰. Obvezu snošenja troškova energije uravnoteženja prema operatoru prijenosnog sustava HOPS-u ima HROTE.

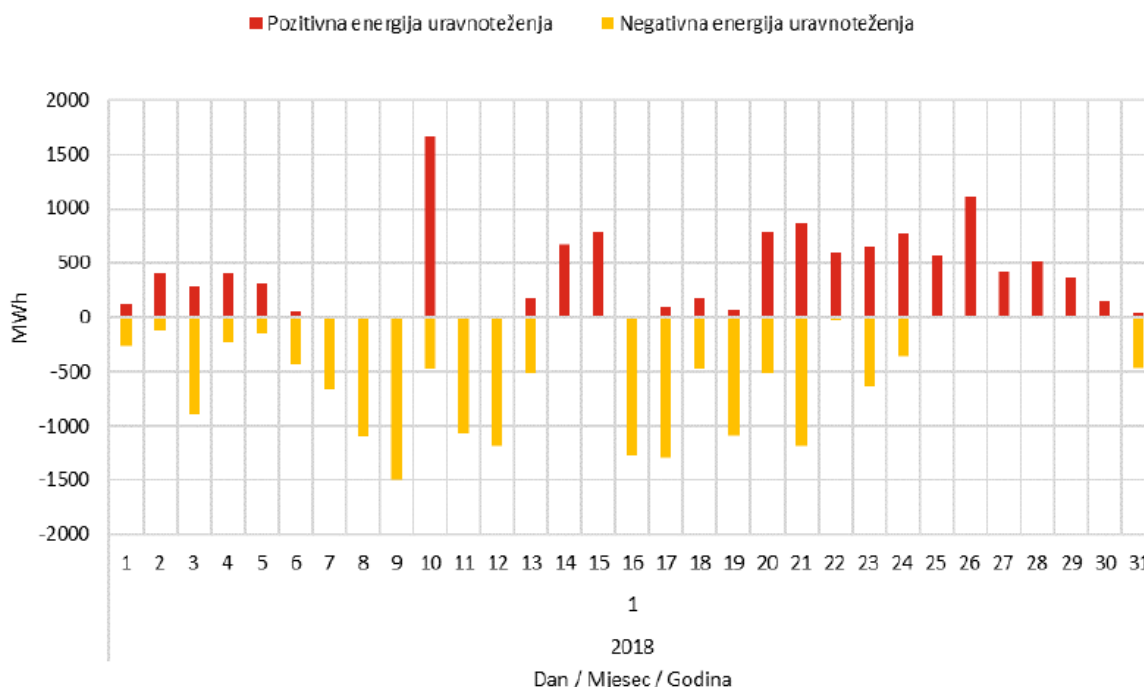
Ovako izgledaju najveće pozitivne i negativne promjene proizvodnje u siječnju 2018. godine:



Slika 21. Maksimalna pozitivna i maksimalna negativna promjena satne proizvodnje VE u siječnju 2018. godine ⁷

Na slici 21. možemo vidjeti da su promjene proizvodnje uglavnom usklađene, ako je mala pozitivna promjena, mala je i negativna promjena, odnosno ako je velika pozitivna promjena, velika je i negativna. Velika odstupanja uglavnom su uzrokovana snažnom burom, koja puše velikom brzinom te uzrokuje neplanirano gašenje vjetroagregata.

Suma pogreški prognoze 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 ⁷. Energija uravnoteženja za siječanj 2018. odgovara grafu na Slici 22:



Slika 22. Suma pozitivnih pogreški prognoze satne proizvodnje VE (negativna energija uravnoteženja) i suma negativnih pogreški prognoze satne proizvodnje VE (pozitivna energija uravnoteženja) u siječnju 2018. godine ⁷

10.2. Pokazatelji kvalitete prognoze

Pokazatelji kvalitete prognoze su MAE (eng: Mean absolute error) i RMSE (eng: Root mean square error) koji prikazuju odstupanje planova proizvodnje u odnosu na ukupnu instaliranu snagu svih postrojenja ¹⁰.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{plan,i} - P_{ostvarenje,i}}{P_{instalirano}} \right| \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{plan,i} - P_{ostvarenje,i}}{P_{instalirano}} \right)^2} \quad (21)$$

Gdje je:

MAE – srednja apsolutna pogreška

RMSE – korijen srednje kvadratne pogreške prognoze proizvodnje VE

P_{prognozirano} – prognozirana satna proizvodnja VE (MWh/h)

P_{ostvoreno} – ostvarena satna proizvodnja VE (MWh/h)

P_{instalirano} – ukupna instalirana snaga (MWh/h)

n – ukupni broj promatranih interval (sati)

i – promatrani interval (sat)

Oba pokazatelja (*MAE* i *RMSE*) prikazuju odstupanje planova proizvodnje od ostvarene proizvodnje električne energije u odnosu na instaliranu snagu svih prognoziranih postrojenja. Osnovna razlika između *MAE* i *RMSE* jest u činjenici da *RMSE* daje veću težinu u konačnom izračunu većim greškama prognoze u pojedinim satima, a za isti promatrani set podataka *RMSE* je uvijek veći ili jednak od *MAE* ¹⁰.

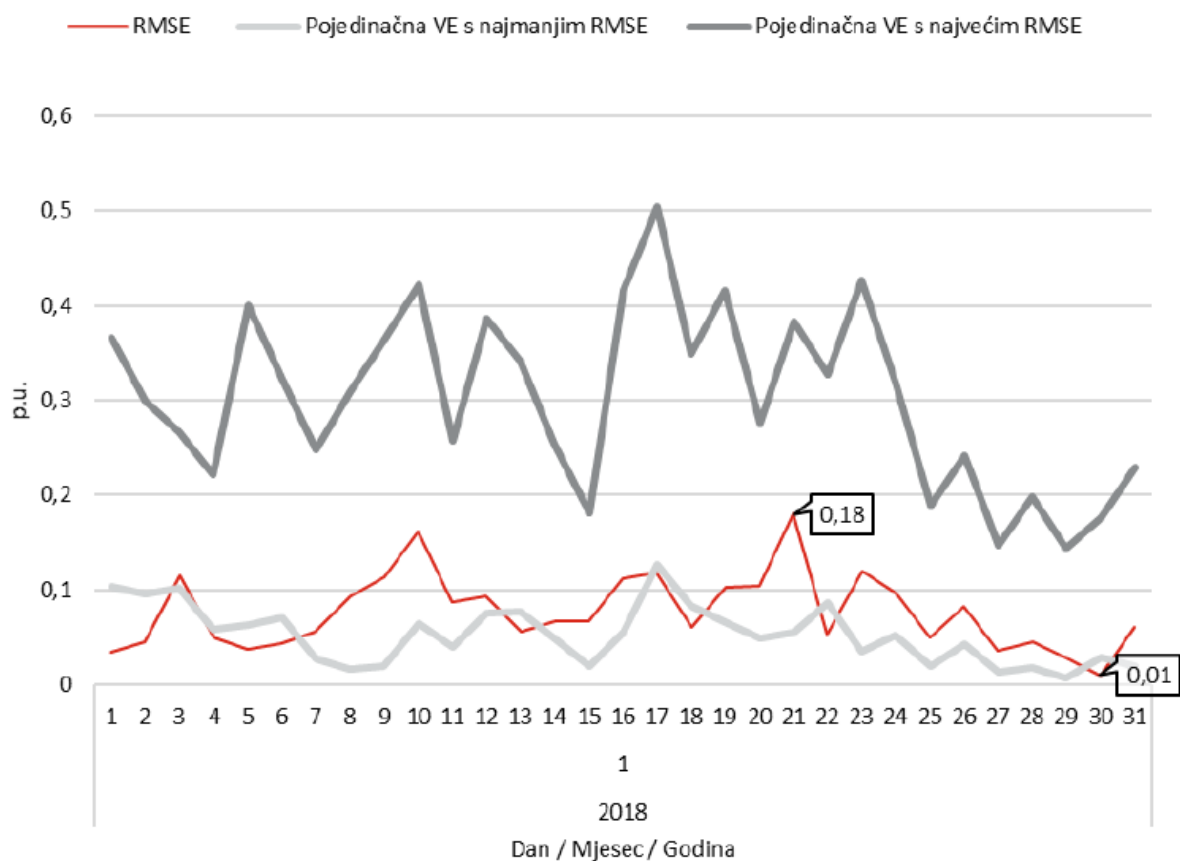
Korištenjem prognoziranih podataka od HROTE-a za 08.01.2018. i podataka od HOPS-a koji je grafički prikazao proizvodnju možemo izračunati kvalitetu prognoze, odnosno *MAE* i *RMSE*:

$$MAE = \frac{1}{24} \cdot \left(\left| \frac{323,35 - 365}{576} \right| + \dots + \left| \frac{408,38 - 425}{576} \right| \right) = 0,06 \quad (22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{24} \cdot \left(\left(\frac{323,35 - 365}{576} \right)^2 + \dots + \left(\frac{408,38 - 425}{576} \right)^2 \right)} = 0,07 \quad (23)$$

Vidimo da je *RMSE* veći za isti set podataka. Iz tog razloga ga HOPS uglavnom koristi kao mjeru točnosti pogreške prognoze proizvodnje VE.

Na slijedećem grafu HOPS je prikazao kretanje srednje kvadratne pogreške *RMSE* u mjesecu siječnju 2018. Iz grafa je vidljivo da se ta pogreška 8. siječnja kreće oko 0,09. Pogreška u izračunu nastala je zbog nepreciznosti očitavanja proizvedene snage sa HOPS-ovog grafa.



Slika 23. Korijen srednje kvadratne pogreške prognoze satne proizvodnje svih VE u jediničnim vrijednostima ⁷

Promatranjem linije koja pokazuje kretanje kvalitete prognoze RMSE u siječnju 2018. možemo vidjeti da se ona većinu vremena kretala ispod 0,1.

11. Zaključak

Zbog nedostatka podataka o brzinama vjetra na lokacijama vjetroelektrana u Hrvatskoj, korišteni su podaci sa tri meteorološke postaje u Hrvatskoj (Senj, Knin i Šibenik). Ti su podaci približeni vrijednostima brzina vjetra na lokacijama VE u Hrvatskoj korištenjem matematičke metode interpolacije i ekstrapolacije. Uvrštavanjem izračunatih brzina vjetra u formulu za izračunavanje snage došlo je do značajnih odstupanja od stvarno proizvedene snage električne energije. Ovo odstupanje možemo pripisati nedostatku točnih podataka o brzinama vjetra, zato što je brzina vjetra svojom trećom potencijom proporcionalna snazi vjetra. Ako se brzina vjetra poveća dva puta, snaga će se povećati osam puta.

U razdoblju slaboga vjetra, proizvodnja električne energije se mora nadomjestiti iz drugih elektrana. Suprotno, povećanje količine proizvedene električne energije u sustavu moglo bi prouzročiti probleme sa preopterećenjem, jer se energija većih količina ne može skladištiti. Proizvodnja i potrošnja električne energije moraju biti podjednake kako bi mreža ostala jednoliko opterećena. Uspoređujući HROTE-ove prognoze o radu VE i HOPS-ove grafove o ostvarenoj proizvodnji električne energije iz VE možemo zaključiti da je energiju vjetra vrlo teško predvidjeti samo za sat vremena, a ne za dvadeset i četiri sata unaprijed. Predviđanje energije vjetra nije najpouzdanija metoda, što se pripisuje nepredvidivoj prirodi vjetra.

Odstupanje prognoze od stvarno proizvedene električne energije potrebno je nadomjestiti energijom uravnoteženja. Pozitivna pogreška prognoze određuje potrebnu negativnu energiju uravnoteženja u elektroenergetskom sustavu, dok negativna pogreška prognoze predstavlja potrebnu pozitivnu energiju uravnoteženja. Pokazatelji kvalitete prognoze su srednja apsolutna pogreška, odnosno *MAE* i korijen srednje kvadratne pogreške prognoze u odnosu na instaliranu snagu VE, odnosno *RMSE*. *RMSE* je uvijek veći od *MAE* a za isti promatrani set podataka.

12. Popis simbola

v	brzina vjetra na visini H [m/s]
v_0	mjerena brzina vjetra [m/s]
H_0	visina na kojoj je mjerena brzina v_0 [m]
H	visina na kojoj nas zanima brzina vjetra [m]
α	koeficijent hrapavosti površine
z_0	visina hrapavosti [m]
E_k	kinetička energija [J]
m	masa [kg]
ρ	gustoća [kg/m ³]
t	vrijeme [s]
A	površina lopatica [m ²]
P_v	snaga vjetra [W]
P_t	snaga turbine [W]
$\dot{m}$	maseni protok [kg/s]
v_1	brzina vjetra ispred turbine [m/s]
v_2	brzina vjetra iza turbine [m/s]
c_p	stupanj aerodinamičke iskoristivosti
P_{el}	snaga koja se pretvara u električnu energiju [W]
$\bar{v}$	srednja dnevna brzina vjetra [m/s]

n	ukupni broj promatranih intervala
d	promjer lopatica rotora [m]
π	pi, $\approx 3,14$
P_{VE}	snaga vjetroelektrane [kWh]
MAE	srednja apsolutna pogreška
$RMSE$	korijen srednje kvadratne pogreške prognoze proizvodnje VE
$P_{prognozirano}$	prognozirana satna proizvodnja VE [MWh/h]
$P_{ostvareno}$	ostvarena satna proizvodnja VE [MWh/h]
$P_{instalirano}$	ukupna instalirana snaga [MWh/h]
i	promatrani interval

13. Literatura

- [1] Vaughn, N., Wind Energy: Renewable Energy and the Environment, Taylor & Francis Group, New York (2009) 33-50
- [2] Mathew, S., Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer, Netherlands (2006) 20-69
- [3] Cullen, S., Trees and wind: Wind scales and speeds; Technical Note; Journal of Arboriculture, (2002) 237-242
- [4] Troen, I., Lundtang, P., European Wind Atlas, Technical University of Denmark, (1989) 15-26, 55-58
- [5] Šimić, Z., Šljivac, D., Obnovljivi izvori energije: Najvažnije vrste, potencijal i tehnologije (2009) 50-62
- [6] Kulišić, P., Novi izvori energije II dio: Sunčana energija i energija vjetra, Zagreb; Školska knjiga (1991) 20-37
- [7] HOPS; Mjesečni izvještaj o proizvodnji VE u Hrvatskoj, siječanj 2018.
- [8] HOPS; Godišnji izvještaj o proizvodnji VE u Hrvatskoj za 2017. godinu
- [9] <https://www.google.com/maps>, pristupljeno 20.6.2018.
- [10] HROTE; Godišnji izvještaj o uspostavi EKO bilančne grupe u 2017. godini

14. Životopis

Mateja Benić, [REDACTED] Osnovno školsko obrazovanje završava 2007. godine u osnovnoj školi „Ivan Goran Kovačić“ u Dugoj Resi. Iste godine upisuje Ekonomsko-turističku školu u Karlovcu, smjer Ekonomist. Maturirala je s odličnim uspjehom 2011. godine, nakon čega upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Ekoinženjerstvo. Preddiplomski studij završava 2015. godine i nastavlja obrazovanje na diplomskom studiju Ekoinženjerstvo. Stručnu praksu odradila je u laboratoriju koje se bavi ispitivanjem kemijske postojanosti baruta za Oružane snage Republike Hrvatske, koji je smješten na Hrvatskom vojnom učilištu „Dr. Franjo Tuđman“ na Črnomercu u Zagrebu.