

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 905

**PROCJENA POTENCIJALA ENERGIJE  
VJETRA U RH**

Tomislav Benković

Zagreb, lipanj 2009.

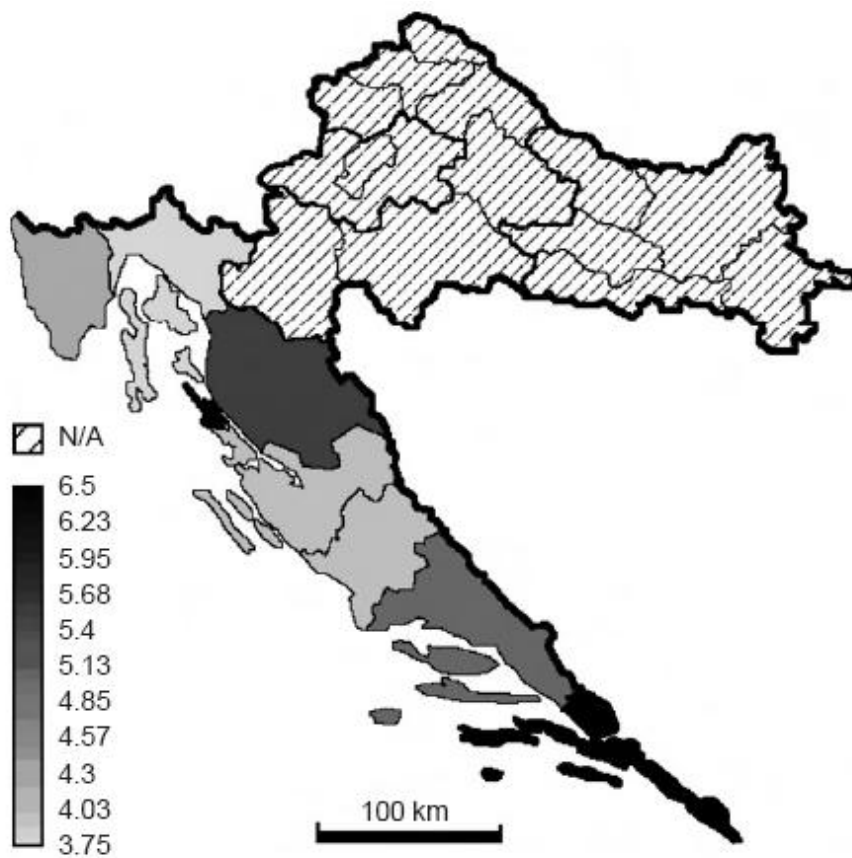
# Sadržaj

Uvod.....	1
1. Trenutno stanje u RH .....	3
1.1. Postojeće vjetroelektrane.....	3
1.2. Poticanje obnovljivih izvora energije .....	6
2. Procjena potencijala korištenja energije vjetra u RH .....	7
2.1. Mjerenja i proračuni.....	7
2.2. Kompjuterski programi za analizu podataka o vjetru.....	8
2.2.1. Windographer .....	8
2.2.2. WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) .....	10
2.2.3. OpenWind.....	13
2.2.4. Homer.....	15
2.3. Postupak mjerenja .....	16
2.4. Opis korištenog vjetroagregata .....	16
3. Procjena potencijala po lokacijama .....	19
3.1. Lokacija 1.....	19
3.2. Lokacija 2.....	24
3.3. Lokacija 3.....	28
3.4. Usporedba podataka sa lokacija 1-3.....	32
3.5. Usporedba procjena kroz 3 različita scenarija .....	34
3.5.1. Prvi scenarij – instalirana snaga 1200 MW .....	34
3.5.2. Drugi scenarij – instalirana snaga 900 MW.....	34
3.5.3. Treći scenarij – instalirana snaga 600 MW .....	35
Zaključak .....	36
Literatura.....	37

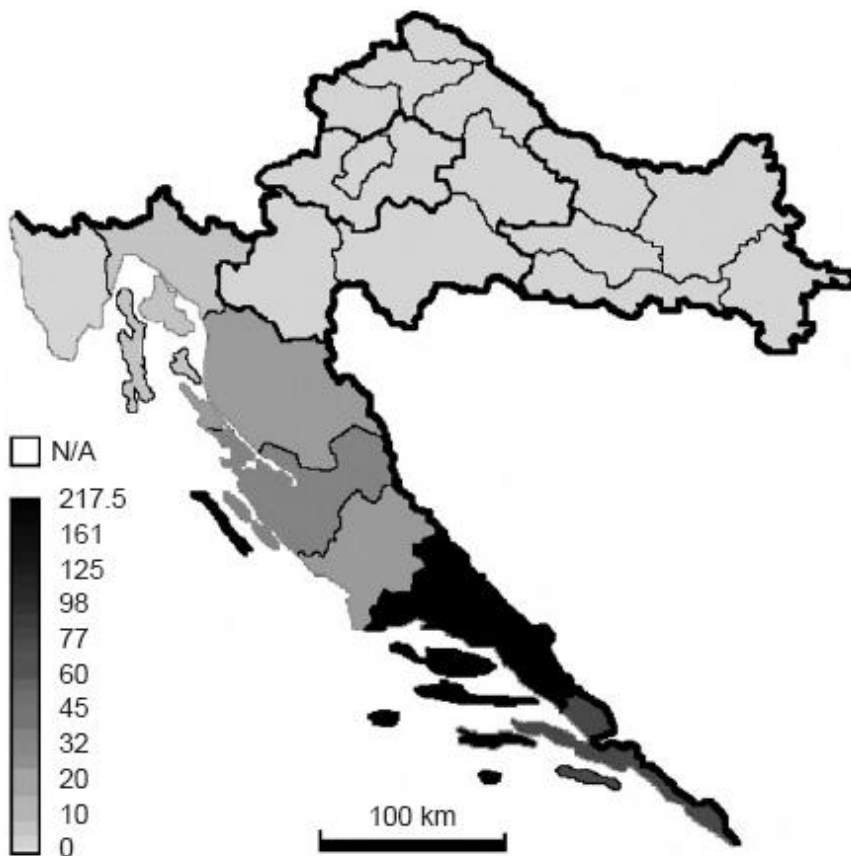
## Uvod

Čovjek se danas sve više i više okreće obnovljivim izvorima energije. Razloga tome ima mnogo, a najvažniji su globalno zatopljenje, a time i poštivanje Kyoto sporazuma, konačne zalihe nafte i prirodnog plina, nestabilna i nesigurna cijena nafte, itd. Jedan od oblika obnovljivih izvora energije je i energija vjetra, o čemu će biti riječi u ovom radu. Kapaciteti hrvatskog sustava za proizvodnju električne energije ne zadovoljavaju trenutne potrebe i gradnja novih elektrana je nužna. Zbog gore navedenih razloga bilo bi poželjno okrenuti se što više obnovljivim izvorima energije. Do sada napravljene studije pokazuju da u Hrvatskoj najveći potencijal za proizvodnju električne energije putem obnovljivih izvora energije leži upravo u energiji vjetra (ne računajući velike hidroelektrane). Ako isključimo već spomenute velike hidroelektrane dolazimo do podatka da se manje od 1 % električne energije u Hrvatskoj proizvodi iz nekonvencionalnih obnovljivih izvora. Pošto Hrvatska danas vodi pregovore za punopravno članstvo u Europskoj uniji potrebno je naglasiti kako je energetska politika EU iznimno dinamična i nužna su stalna prilagođavanja nacionalne energetske politike. Trenutno su najvažniji za spomenuti proklamirani ciljevi EU do 2020. godine prema kojima bi 20 % energije trebalo biti proizvedeno iz obnovljivih izvora. Važno je naglasiti također i da je Hrvatska 2007. ratificirala sporazum iz Kyota i time preuzela obavezu smanjenja emisija stakleničkih plinova za 5 % u razdoblju od 2008. do 2012. godine u odnosu na razinu emisija iz 1990 godine.

Za gradnju vjetroagregata najpovoljnija su područja u kojima puše jak i konstantan vjetar. Pošto svaki agregat ima dvije granične brzine vjetra, jednu pri kojem se elise pokreću i jednu pri kojoj se elise blokiraju da ne bi došlo do njihova pucanja, važno je da vjetar puše jače od minimalne brzine, ali također i da ne prelazi maksimalnu brzinu da ne bi došlo do oštećenja elisa vjetroagregata. Za vjetroagregat koji ćemo koristiti u procjenama u ovom radu minimalna brzina iznosi 3.5 m/s, a maksimalna 25 m/s. Gledano po regijama najveći potencijal za gradnju vjetroelektrana ima područje uz Jadransko more, što pokazuju i slike 1 i 2.



Slika 1. Prosječna godišnja brzina vjetra u RH, [m/s] prema [2]



Slika 2. Maksimalna snaga potencijalnih vjetroelektrana, [MW] prema [2]

# 1. Trenutno stanje u RH

## 1.1. Postojeće vjetroelektrane

Trenutno su u Hrvatskoj sagrađene dvije vjetroelektrane: Vjetroelektrana „Ravne 1“ snage 6 MW na otoku Pagu (slika 3) i vjetroelektrana „Trtar Krtolin“ pored Šibenika snage 11 MW (slika 4). Ukupna instalirana snaga sagrađenih vjetroelektrana u Hrvatskoj je 17,2 MW. Nekoliko vjetroelektrana je u različitom stupnju izgradnje ili u planu za izgradnju. Potencijal za energiju vjetra je naravno mnogo veći od trenutno izgrađenoga. [2]



Slika 3. Vjetroelektrana Ravne 1 na otoku Pagu



Slika 4. Vjetroelektana Trtar – Krtolin pored Šibenika

Izračunati potencijal udjela vjetra u ukupnoj proizvodnji energije [2] je tehnički i ne uzima u obzir odredbe Ministarstva zaštite okoliša, prostornog uređenja i gradnje koje zabranjuju gradnju i planiranje svih novih vjetroelektrana (također i kamenoloma, skladišta, tvornica, itd.) na lokacijama na otocima i onim lokacijama koje se nalaze manje od 1000 metara od mora. Projekti koji su dobili lokacijske dozvole prije uvođenja ove odredbe su uzeti u obzir. Ova odredba objašnjena je kao mjera zaštite hrvatskog obalnog područja. Nažalost, upravo ovo područje koje obuhvaća gore navedena odredba obuhvaća neke od lokacija koje imaju najbolji potencijal za izgradnju vjetroelektrana na otocima i uzduž jadranske obale. Vrijeme će pokazati hoće li odredba biti uklonjena ili promijenjena pošto su se mnogi investitori već žalili na nju. Trenutno je zabrana još na snazi i nema naznaka da će se uskoro mijenjati. [2]

Uz gradnju vjetroagregata na kopnu i otocima važno je napomenuti kako postoji još jedan oblik gradnje vjetroagregata sa vrlo velikim potencijalom. To su veliki vjetroagregati građeni na pučini mora. Primjer takvih agregata prikazan je na slici 5. Gledajući potencijal vjetra, vjetroagregati na pučini bili bi tehnički održivi na samo tri do četiri lokacije na južnom dijelu Jadranskog mora. Problem su velike dubine mora blizu otoka i obale kao i ograničenja u zaštiti okoliša. Trenutno nema planova za izgradnju vjetroagregata na pučini u Hrvatskoj, mada je to veliki potencijal u područjima gdje dubine mora nisu velike. [2]



Slika 5. Vjetroagregati na pučini mora

## **1.2 Poticanje obnovljivih izvora energije**

Vrlo uspješan model poticanja obnovljivih izvora temelji se na principu zajamčenih tarifa (eng. feed-in tariffs). Proizvođač električne energije iz obnovljivih izvora treba ishoditi status povlaštenog proizvođača, kako bi mogao primati poticajnu cijenu za svoju proizvodnju. Poticajna cijena financira se iz posebnih naknada za obnovljive izvore, koju svi kupci električne energije plaćaju na svojim mjesečnim računima. Organizaciju cjelokupnog sustava provodi Hrvatski operator tržišta energije (HROTE), koji je zadužen za prikupljanje i raspodjelu poticaja povlaštenim proizvođačima. Poticajne cijene isplaćuju se proizvođačima dok se ne dostigne ukupni udio od 5,8% obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji električne energije u 2010. godini.

HROTE ima obvezu otkupa sve električne energije iz postrojenja koja imaju status povlaštenog proizvođača (a samim time i pravo na poticajnu cijenu). S druge strane, povlašteni proizvođači imaju obvezu dostave godišnjih i mjesečnih planova proizvodnje HROTE-u. HROTE prikuplja podatke i dostavlja ih Ministarstvu rada i poduzetništva (MINGORP), gdje se oni koriste za utvrđivanje udjela obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji električne energije za tu godinu.

Pravo na poticajnu cijenu dobiva se stjecanjem statusa povlaštenog proizvođača i sklapanjem Ugovora o otkupu električne energije s HROTE-om. Ugovor o otkupu sklapa se na 12 godina, a poticajna cijena za proizvedenu električnu energiju iz vjetroelektrana iznosi 0,64 kn/kWh za postrojenje do 1 MW i 0,65 kn/kWh za postrojenje iznad 1 MW. Kako bi mogao biti upisan u registar i pristupiti uređenju imovinsko pravnih odnosa na zemljištu, investitor mora od Ministarstva ishoditi prethodno energetske odobrenje (PEO). U tu svrhu potrebno je izraditi preliminarnu analizu opravdanosti izgradnje vjetroelektrane. Posebno za vjetroelektrane su definirani pojmovi novog i zatečenog projekta, te načini određivanja prvenstva na lokaciji u slučaju da više potencijalnih investitora pretendira na istu lokaciju. [4]

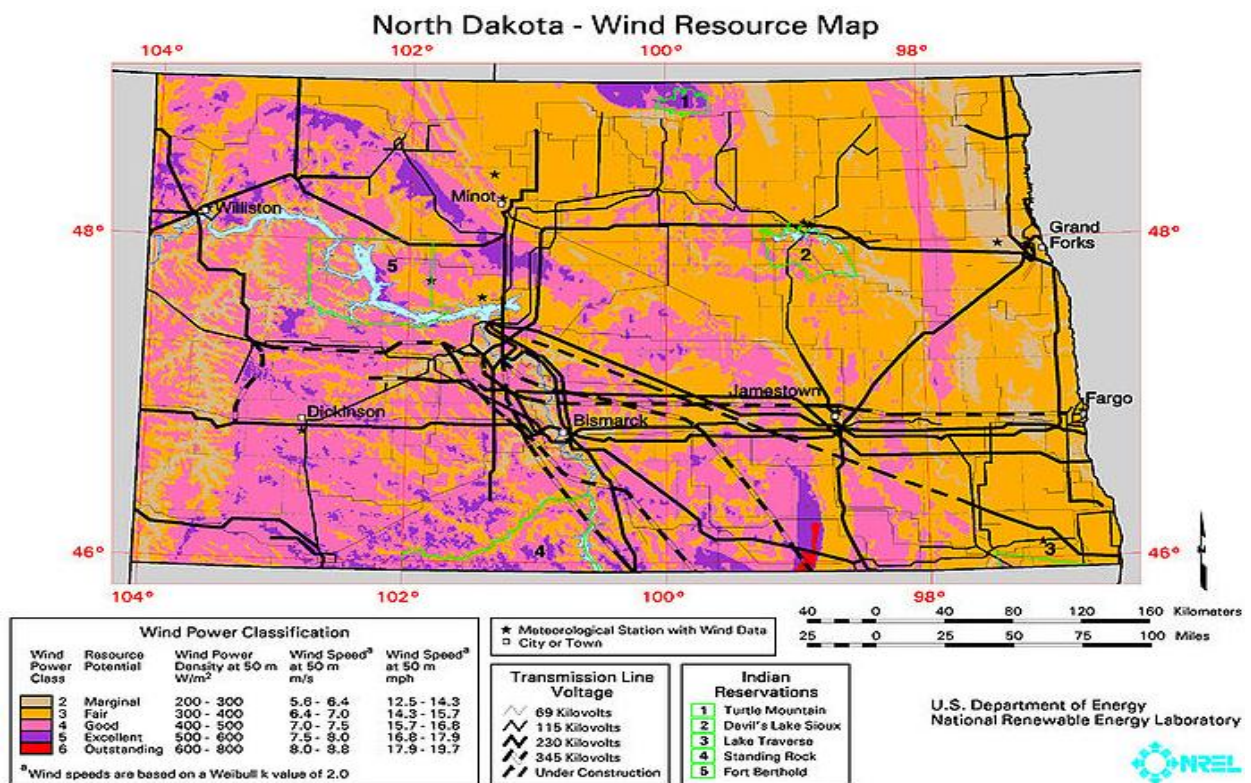


## 2. Procjena potencijala korištenja energije vjetra u RH

Procjena potencija vjetra je proces u kojem ljudi odgovorni za gradnju vjetroelektrane procjenjuju buduću proizvodnju energije dane vjetroelektrane. Precizna procjena je ključna za uspješni razvoj vjetroelektrane. Moderne procjene potencijala energije vjetra provode se od kraja 1970-tih, kada su sagrađene prve vjetroelektrane. [7]

### 2.1. Mjerenja i proračuni

Različite organizacije kreiraju karte sa procjenom potencijala vjetra za područja sa aktivnim razvojem energije vjetra. Primjer jedne karte je na slici 6. Istraživanja vjetra, mogu započeti korištenjem ovakvih karata, ali nedostatak točnosti i detalja čine ih korisnim samo za početni odabir lokacija za mjerenja brzina vjetra. Povećanjem broja mjerenja na samim lokacijama, kao i podacima dobivenih sa već izgrađenih vjetroelektrana, karte vjetra se poboljšavaju s vremenom. To ne znači da će ove karte u potpunosti zamijeniti potrebu za mjerenja na samim lokacijama. [7]



Slika 6. Primjer karte sa podacima vjetra za saveznu državu Arizonu u SAD-u [7]

Za procjenu proizvodnje energije vjetroagregata prvo se moraju obaviti mjerenja svojstava vjetra na samoj lokaciji. Za to prvenstveno služe meteorološke postaje opremljene sa anemometrima, uređajima za mjerenje smjera vjetra, a nekada i sensorima za mjerenje temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka. Podaci sa ovih postaja moraju se mjeriti najmanje godinu dana kako bi se dobili reprezentativni podaci o puhanju vjetra na zadanoj lokaciji.

Procjene se mogu raditi na više načina. Jedan od najčešćih je da se podaci o brzini vjetra dobiveni mjerenjima na meteorološkim postajama i ostalim referentnim postajama uspoređuju sa podacima koji odgovaraju proizvodnji energije vjetroagregata za određene brzine vjetra i potom se iz kombinacijom ovih podataka dobiva godišnja proizvodnja energije vjetroagregata. Za potrebe procjene potencijala energije vjetra u Hrvatskoj koristiti će se upravo ovakva metoda u ovom radu. [7]

## **2.2. *Kompjuterski programi za analizu podataka o vjetru***

U procjenama i izračunima proizvodnje i potrošnje energije pomažu nam kompjuterski programi ili softver, koji nam mogu mnogo olakšati uključivanje velikog broja podataka i loženih odnosa u proračun. U nastavku će biti riječi o nekoliko najpoznatijih programa: Windographer, WAsP, OpenWind i Homer.

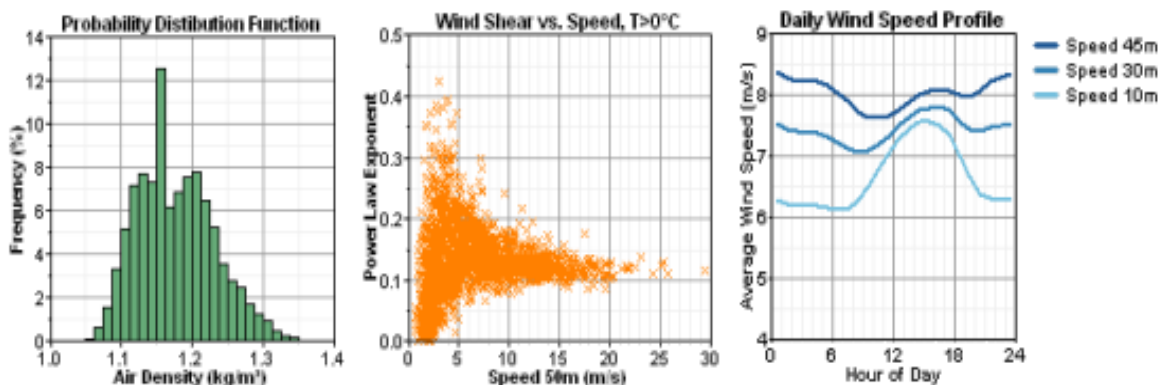
### **2.2.1. Windographer**

Windographer je softver koji analizira podatke o vjetru. Koristi se za pregledavanje podataka koje su snimili senzori na meteorološkim postajama ili samim vjetroagregatima. Korisnici mogu pregledavati podatke o brzini i smjeru vjetra distribuirane u vremenu te raditi razne izračune za mjereni vjetroagregat. Program radi precizne grafove i ruže vjetrulje.

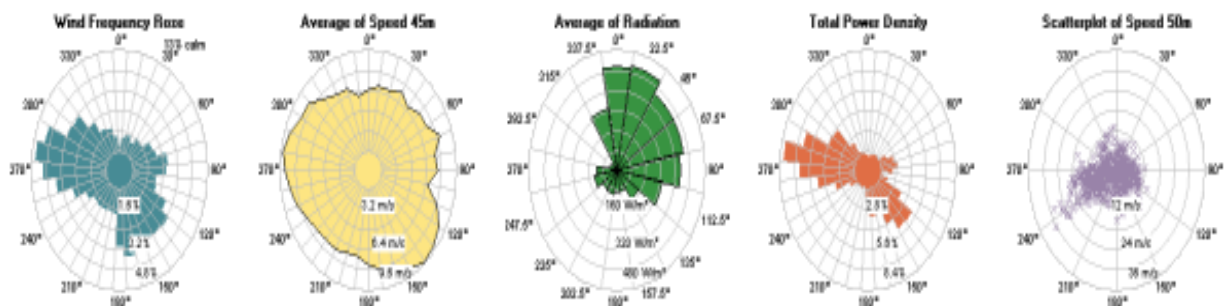
Windographer čita vrlo raznolike ulazne podatke i automatski ih interpretira tako da se ne mora trošiti vrijeme na specifikaciju podataka. Također, automatski prepoznaje stupce koji sadržavaju brzine vjetra, smjer vjetra, standardne devijacije i temperaturne podatke. U većini slučajeva automatski prepoznaje na kojoj

su se brzini podaci mjerili. Windographer može obraditi bilo koji broj podataka o brzini i smjeru vjetera sa postavljenih senzora, kao i bilo koji broj praznina i podataka koji nedostaju. Može primiti bilo koji vremenski razmak između primljenih podataka između jedne minute i šest sati.

Nakon otvaranja seta podataka program omogućuje direktni prijelaz na njihovo analiziranje. Windographer producira proizvoljan broj tablica i grafova koji pomažu korisniku u vizualiziranju i obradi podataka. Primjer nekoliko grafova dan je na slici 7. Program također može proizvesti mnogo različitih tipova ruža vjetrulja. Korisnik može iscrtati frekvenciju kojom vjetar puše iz svakog smjera. Kao i kod ostalih tipova grafova, korisnik može odabrati iscrtavanje cijelog seta podataka ili samo određene godine ili mjeseca. Korisnik može odabrati prikazivanje dvanaest ruža vjetrulja istodobno, jednu za svaki mjesec u godini ili za svako dvosatno razdoblje u jednom danu. Korisnik može odabrati proizvoljan broj smjerova puhanja vjetera na ruži vjetrulja. Primjeri ruža vjetrulja dobivenih ovim programom prikazan je na slici 8. [9]



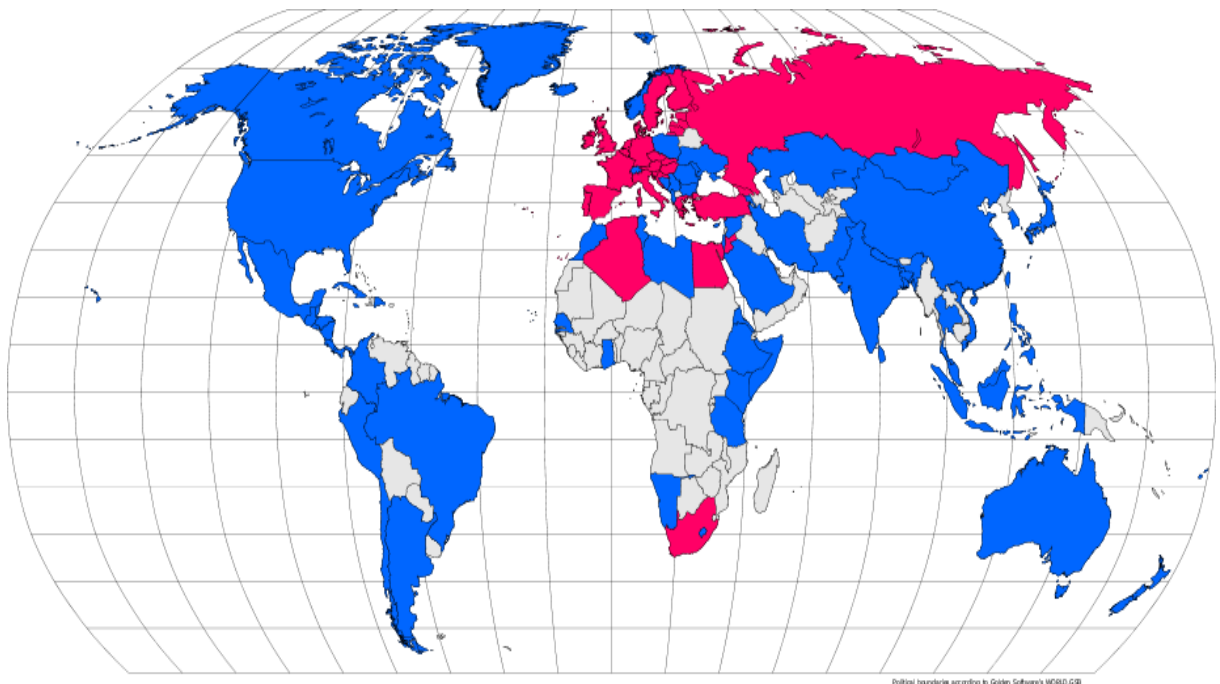
Slika 7. Primjer nekoliko grafova iz programa Windographer [9]



Slika 8. Primjer nekoliko ruža vjetrulja iz programa Windographer [9]

## 2.2.2. WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program)

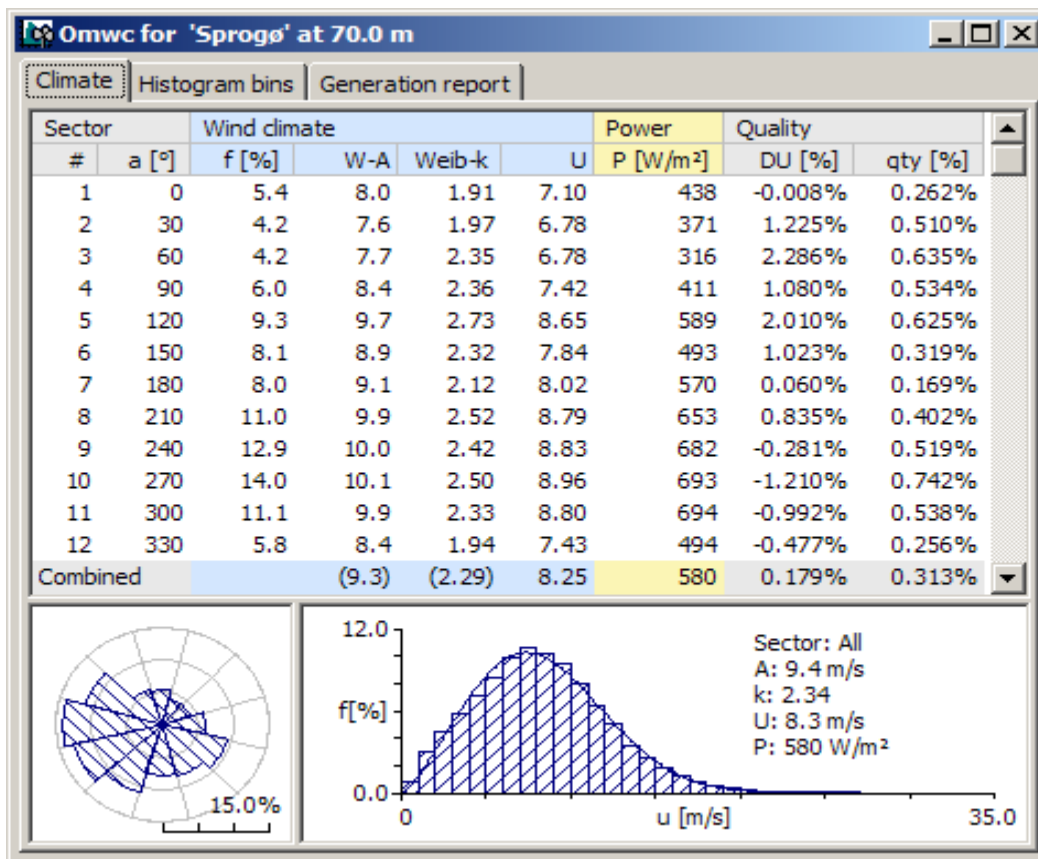
WAsP je kompjutorski program za predviđanje izvora i vrste vjetra i proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana. Predviđanja se baziraju na podacima o vjetru izmjenjenim na postajama u istoj regiji. WAsP je proizveden u Danskoj, a trenutno ga koristi više od 2600 korisnika u preko 100 zemalja. Na slici 9 prikazane su zemlje svijeta u kojima se koristi WAsP. Crvenom bojom označene su zemlje koje WAsP koriste za izradu nacionalnih atlasa vjetra, plavom bojom zemlje koje WAsP koriste za lokalne i regionalne studije. Siva boja označava da za tu zemlju nema informacija o korištenju ovog programa. WAsP ima puno primjena, a najvažnije će biti navedene u daljnjem tekstu. [10]



Slika 9. Zemlje koje koriste WAsP [10]

### Analiza podataka vjetra

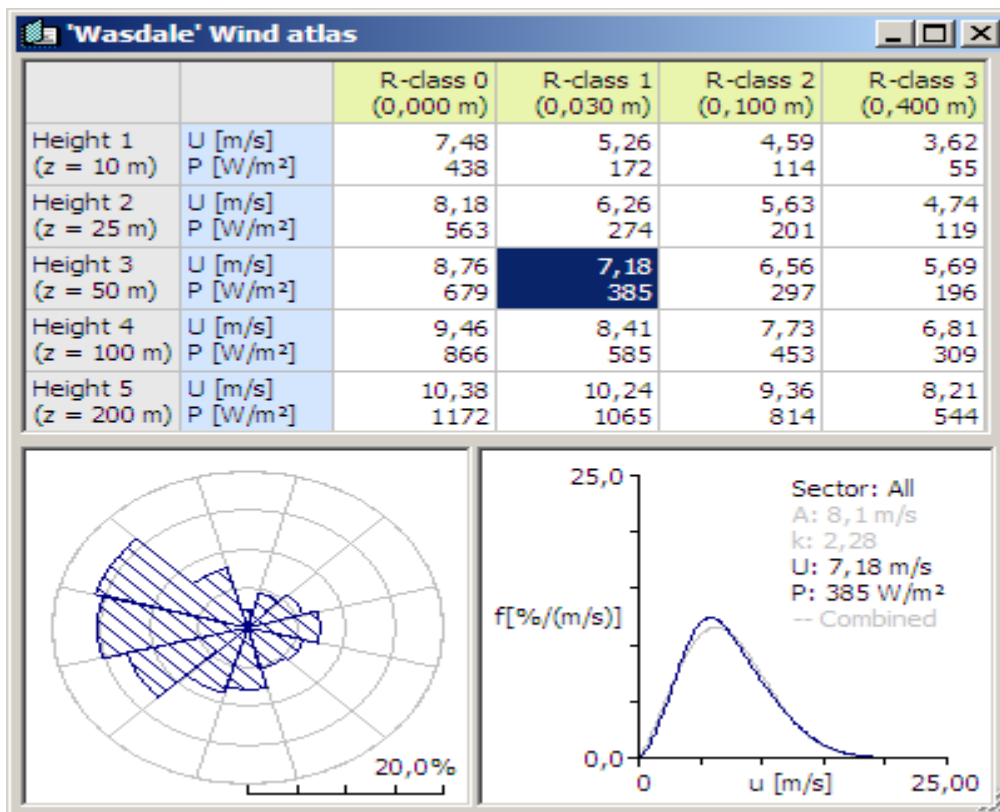
WAsP omogućuje analizu podataka o vjetru, mjerenih u bilo kojem vremenskom intervalu, za proračun statističke slike unesenih podataka. Statistička slika sadrži ružu vjetrovju i distribuciju brzine vjetra po sektorima. Jedan takav primjer iz programa WAsP dan je na slici 10. WAsP sadrži i posebni alat koji podatke o brzini i smjeru vjetra prikazuje na nekoliko grafova. [10]



Slika 10. Primjer podataka o vjetru obrađenih u programu WAsP [10]

### Stvaranje atlasa vjetra

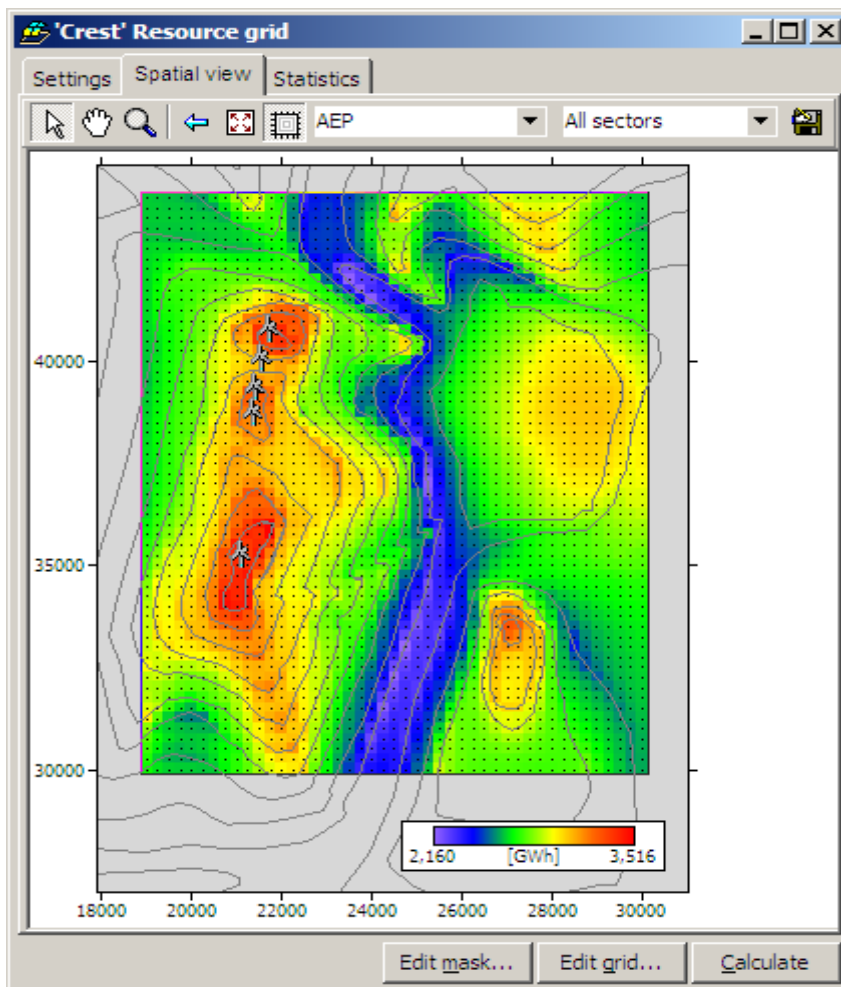
Promatrana svojstva vjetra mogu se transformirati u takozvana regionalna svojstva vjetra, također poznata kao atlas vjetra. U atlasu vjetra mjerenim podacima dodaje se opis i svojstva lokacije. Prozor atlasa vjetra u WAsP-u prikazuje prosječnu brzinu vjetra i prosječnu gustoću snage za 20 različitih standardnih klasa, definiranim visinom iznad površine zemlje i hrapavosti terena. Primjer takvog prozora dan je na slici 11. [10]



Slika 11. Primjer atlasa vjetra u programu WAsP [10]

### Stvaranje karte potencijala vjetra

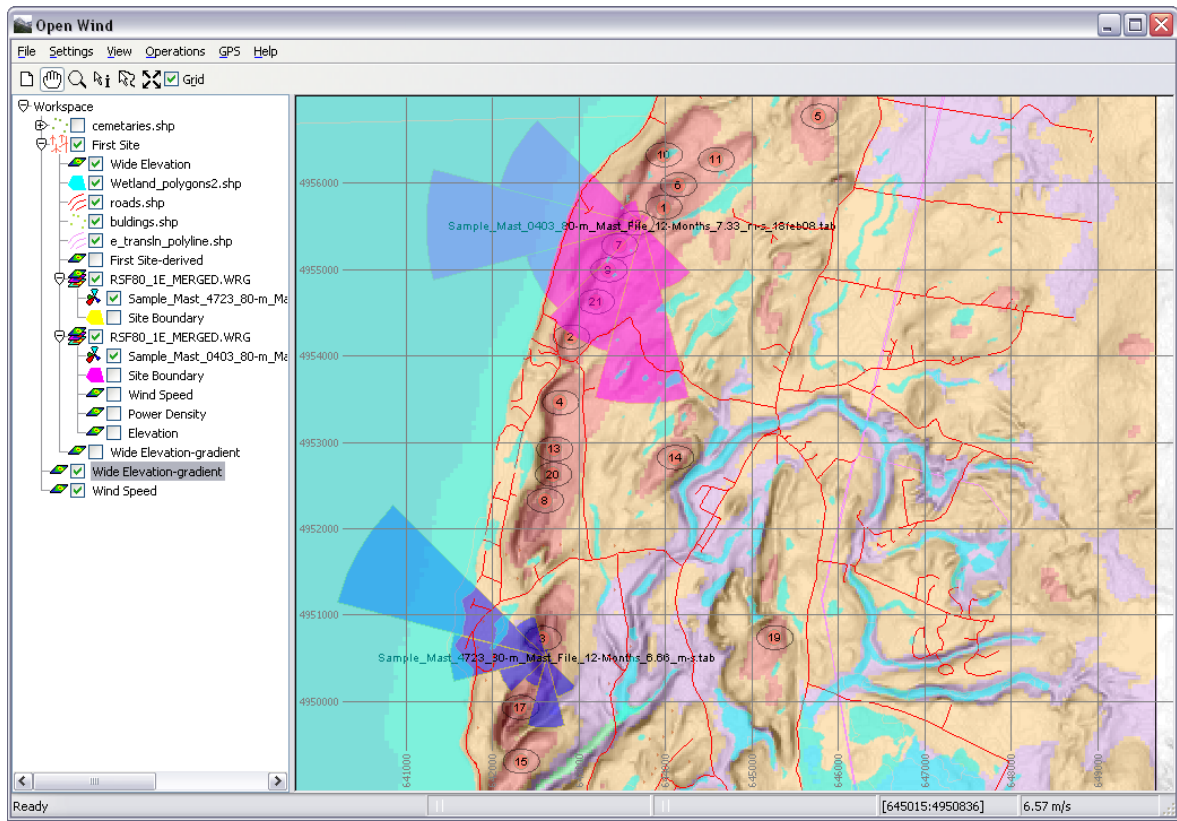
Za kreiranje karte potencijala vjetra WAsP radi mrežu koja korisniku daje pravokutne setove točaka prema kojima se predviđaju svojstva vjetra. Točke se jednoliko raspoređuju i uređuju u redove i stupce. Ovo korisniku omogućuje pregled svojstava vjetra na određenom području. Primjer jedne karte prikazan je na slici 12. [10]



Slika 12. Karta vjetra izrađena u programu WAsP [10]

### 2.2.3. OpenWind

OpenWind je softver za dizajniranje vjetroelektrana za inženjere i znanstvenike. Program je besplatan za skidanje i korištenje. Napravila ga je tvrtka AWS Truewind, koja je savjetnička tvrtka u području obnovljivih izvora energije. Program koristi modelirane podatke o strujanju vjetra i podatke sa meteoroloških postaja za izračun proizvodnje energije vjetroagregata. Program je besplatan i dostupan svim potencijalnim korisnicima na stranici <http://www.awsopenwind.org/>. Slike sučelja samog programa OpenWind dane su na slikama 13 i 14. [11]



Slika 13. Slika iz programa OpenWind, odabir potencijalne lokacije za vjetroagregate [11]

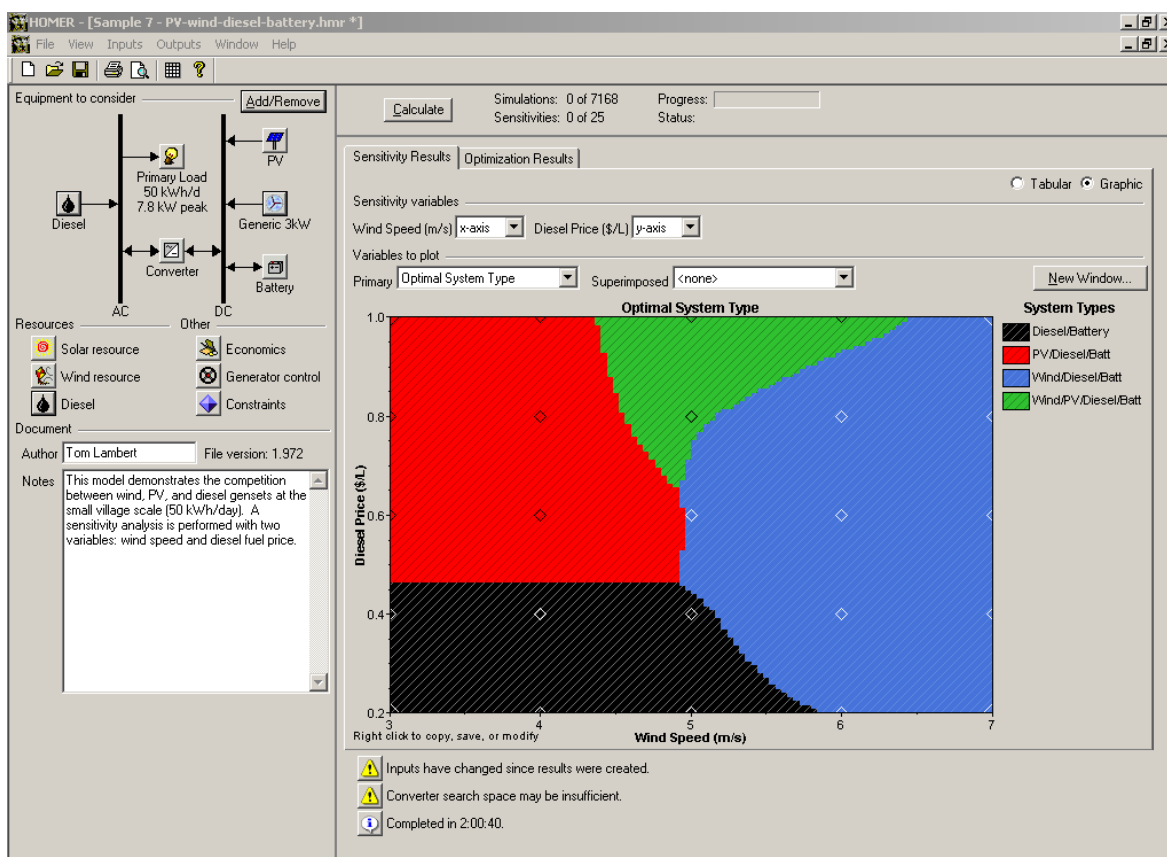
Wind Speed [m/s]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Power [kW]	Poi
<b>Air Density [kg]</b>	<b>1.18</b>	<b>1.19</b>	<b>1.20</b>	<b>1.21</b>	<b>1.22</b>	<b>1.225</b>	<b>1.23</b>	<b>1.24</b>		
0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	2	2	2	2	2	2	2	2		
4	37	37	37	37	37	37	37	37		
5	118	118	118	118	118	118	118	118		
6	219	219	219	219	219	219	219	219		
7	366	366	366	366	366	366	366	366		
8	557	557	557	557	557	557	557	557		
9	821	821	821	821	821	821	821	821		
10	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113	1113		
11	1401	1401	1401	1401	1401	1401	1401	1401		
12	1509	1509	1509	1509	1509	1509	1509	1509		
13	1515	1515	1515	1515	1515	1515	1515	1515		
14	1516	1516	1516	1516	1516	1516	1516	1516		
15	1515	1515	1515	1515	1515	1515	1515	1515		
16	1513	1513	1513	1513	1513	1513	1513	1513		
17	1514	1514	1514	1514	1514	1514	1514	1514		
18	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500		
19	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500		
20	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500		
21	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500		
22	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500		
23	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500		

Slika 14. Slika iz programa OpenWind, prikaz specifikacija turbine [11]



## 2.2.4. Homer

Homer je kompjutorski program koji pojednostavljuje zadatke procjene rada i korisnosti sustava za proizvodnju električne energije. Program je vrlo dobro optimiziran i opremljen algoritmima za analizu ekonomske i tehničke ostvarivosti za velik broj tehnoloških opcija te za procjene dostupnosti energetske resursa. Unutar Homera postoje modeli i za konvencionalne i za obnovljive energetske izvore i tehnologije. Koristi se za sve vrste elektrana kao i za analizu mjera energetske učinkovitosti i mnoge druge stvari. Koristi se i unutar ovog rada za analizu proizvodnje električne energije iz vjetroagregata. Slika 15 ilustrira posebnu mogućnost da se u Homeru analizira parametarski utjecaj najvažnijih veličina i optimira konačna izvedba.



Slika 15. Slika iz kompjutorskog programa Homer <https://analysis.nrel.gov/homer/>

### **2.3. Postupak mjerenja**

Najveći problem pri provođenju procjene potencijala energije vjetra je taj što u Hrvatskoj ne postoji atlas vjetra. Tek 2004. godine završeni su radovi na podizanju prvog stupa za mjerenje vjetropotencijala i započela je mjerna kampanja radi prikupljanja podataka za hrvatski atlas vjetra. U međuvremenu, ispitivanja na pojedinim lokacijama obavljaju potencijalni investitori sami. [4] Podaci korišteni u ovom radu su od Energetskog Instituta Hrvoje Požar.

Osnovna ideja je uzeti podatke o brzini i smjeru vjetra sa određene lokacije u Hrvatskoj i povezati ih sa krivuljom snage korištenog vjetroagregata. Ti podaci će se zajedno uključiti u računalni program Homer koji će proračunati podatke o godišnjoj proizvodnji energije na zadanoj lokaciji. Postupak ćemo ponoviti za nekoliko lokacija i potom dobivene podatke usporediti za nekoliko scenarija i iz toga odrediti optimalni broj vjetroagregata na tim lokacijama i kako bi agregati trebali biti postavljeni s obzirom na smjer vjetra koji je dominantan.

U obzir će biti uzeta tri scenarija. Prvi je onaj koji slijedi podatke iz zelene knjige, prema kojem bi Hrvatska do 2020. godine trebala imati 1200 MW instalirane snage u vjetroelektranama. Usporedbe radi, sa 1200 MW instalirane snage, Hrvatska bi se po instaliranoj snazi vjetroelektrana na 1000 stanovnika približila Španjolskoj danas (348 kW/1000 stanovnika). U drugom scenariju uzet ćemo 25 % manju instaliranu snagu tj. 900 MW, a u trećem 50 % manju, što znači 600 MW.

### **2.4. Opis korištenog vjetroagregata**

Vjetroagregat koji će biti korišten unutar ovog rada je Nordex S77/1500, nazivne snage 1,5 MW (prikazan na slici 16). Njegovi osnovni podaci i tehničke specifikacije dane su u tablici 1, a preuzete su sa službene stranice proizvođača. Visina agregata za sve proračune je 80 m. Ovaj je vjetroagregat, zbog povećanog promjera lopatica i korištene tehnologije nagiba, optimalan za lokacije sa srednjim i slabim brzinama vjetra. Pri slabom vjetru turbina radi sa konstantnim nagibom lopatica i varijabilnom brzinom rotora, dok pri jakom vjetru lopatice i velikoj brzini vrtnje rotora kontroliraju rad zajedno, zadržavajući konstantu izlaznu snagu. [6]

Jedna od najvažnijih stvari agregata koja nas zanima je njegova krivulja snage, tj. koliku snagu daje agregat pri određenoj brzini vjetra. Krivulja snage dana je na slici 17, a na slici 18 je krivulja snage unesena u Homer.



Slika 16. Vjetroagregat Nordex S77/1500 [6]

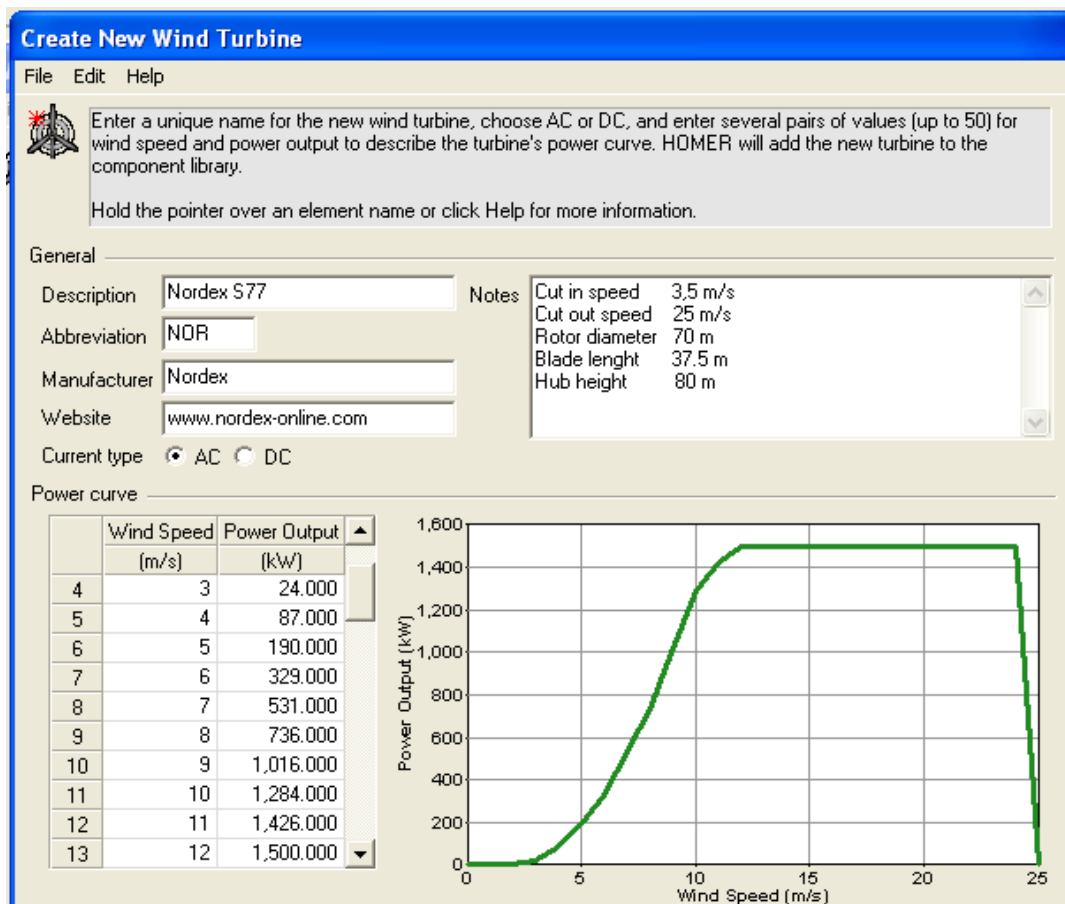
Tablica 1. Najvažniji podaci i tehničke specifikacije agregata Nordex S77 [6]

<b>Parametar</b>	<b>Vrijednost</b>
Broj lopatica	3
Brzina rotora	9.9-17.3 rpm
Promjer rotora	77 m
Nazivna snaga od brzine	13 m/s
Brzina uključenja	3,5 m/s
Brzina isključenja	25 m/s
Ukupna težina	34,000 kg
Duljina lopatice	37,5 m
Snaga	1500 kW (promjenjivo)
Napon	690 V
Korisnost	95 % pri nazivnoj snazi
Faktor snage	0,9 ind do 0,95 kap

## POWERCURVE S77/1500 KW

Windspeed [m/s]	Power [kW]	Cp
4	44	0,241
5	131	0,367
6	244	0,396
7	400	0,409
8	600	0,411
9	854	0,411
10	1111	0,389
11	1331	0,351
12	1475	0,299
13	1500	0,239
14	1500	0,192
15	1500	0,156
16	1500	0,128
17	1500	0,107
18	1500	0,090
19	1500	0,077
20	1500	0,066
21	1500	0,057
22	1500	0,049
23	1500	0,043
24	1500	0,038
25	1500	0,034

Slika 17. Krivulja snage agregata Nordex S77 [6]



Slika 18. Dijagram snage agregata Nordex S77 izvađen iz programa Homer

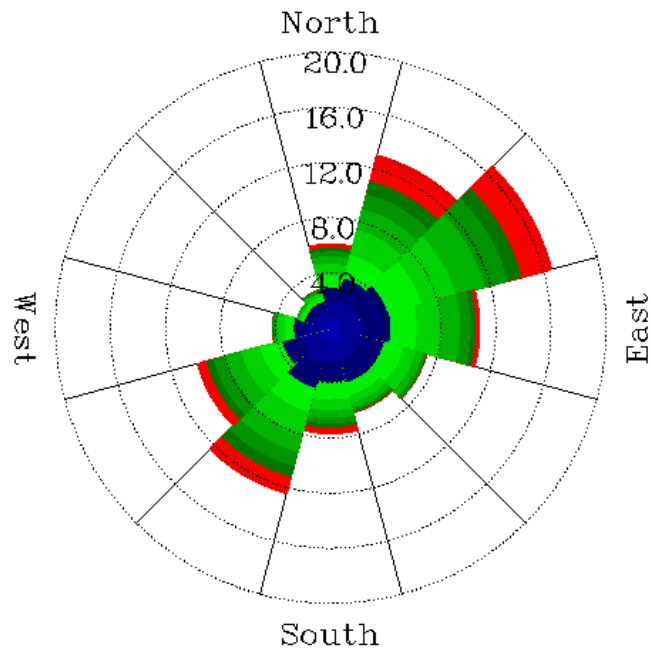
### **3. Procjena potencijala po lokacijama**

U procjeni su korištene tri lokacije, koje su raspoređene po različitim dijelovima Hrvatske. Iako bi procjena sa više točaka bila preciznija, i sa ove tri lokacije pokriveno je makro područje cijele Hrvatske.

#### **3.1. Lokacija 1**

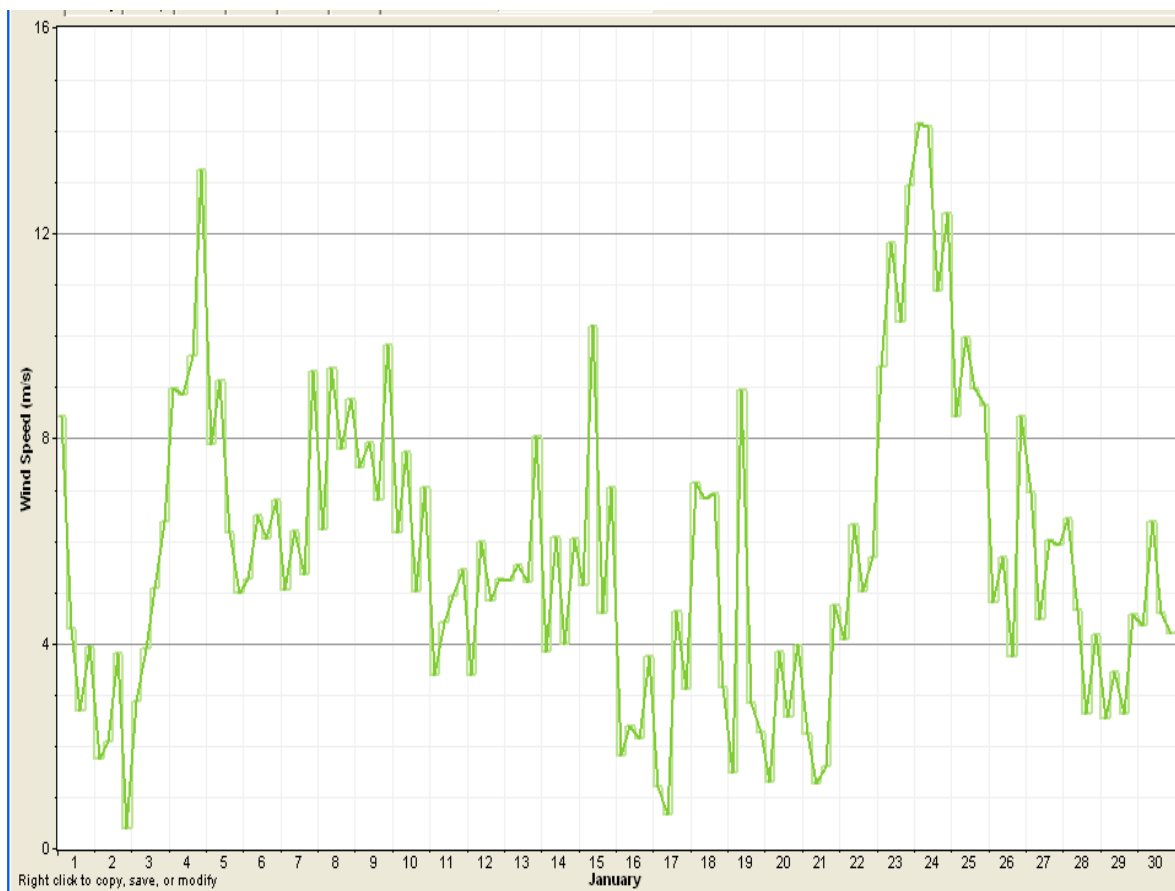
Prva lokacija nalazi se pored Senja, točnije 8 km istočno od Senja. Nadmorska visina je 250 m. Na slici 19 nalazi se ruža vjetrovica na kojoj su zabilježeni prosjeci brzine i smjera vjetra od 1997. do 2006. godine. Sa ruže vjetrovica vidi se da najjači vjetrovi pušu sa sjeveroistoka i jugozapada, tako da bi i položaj potencijalnih vjetroagregata bio najisplativiji da su lopatice položene u tom smjeru. Nadalje ubacujemo u Homer podatke o prosječnoj brzini vjetra svakog sata, svakog dana u godini na ovoj lokaciji, što on sa krivuljom snage vjetroagregata, koju smo mu također zadali, koristi za računanje godišnje proizvodnje energije. Podaci o brzini puhanja vjetra (dnevne, mjesečne, godišnje promjene), te mjesečnim i godišnjom proizvodnji zajedno su prikazani na grafovima 1-6. Prosječna godišnja brzina vjetra je 4,54 m/s, a ta brzina skalirana za 30% iznosi 5,9 m/s. Skaliranje je napravljeno da bi se uračunalo potencijal na posebno odabranim lokacijama.

Wind rose  
1997 – 2006  
50m  
45N 0' 0"  
15E 0' 0"

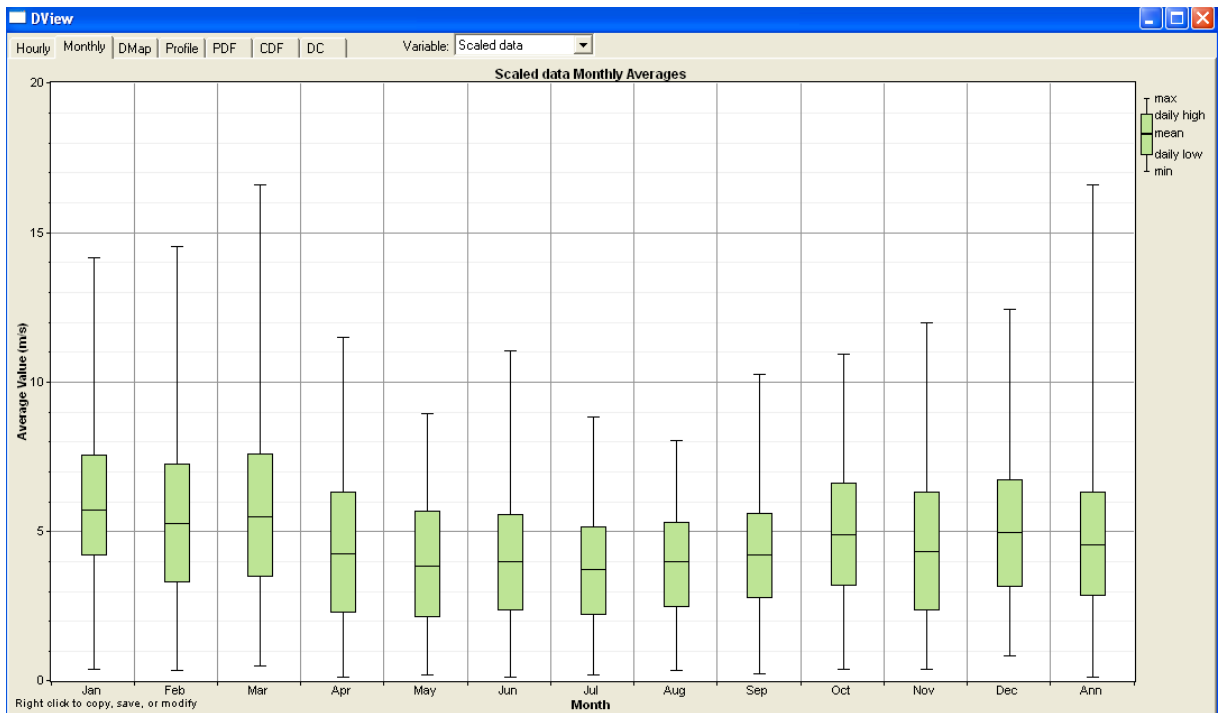


Energy Institute Hrvoje Pozar      0 5 10 15 m/s  
World Wind Atlas  
© SANDER + PARTNER GmbH

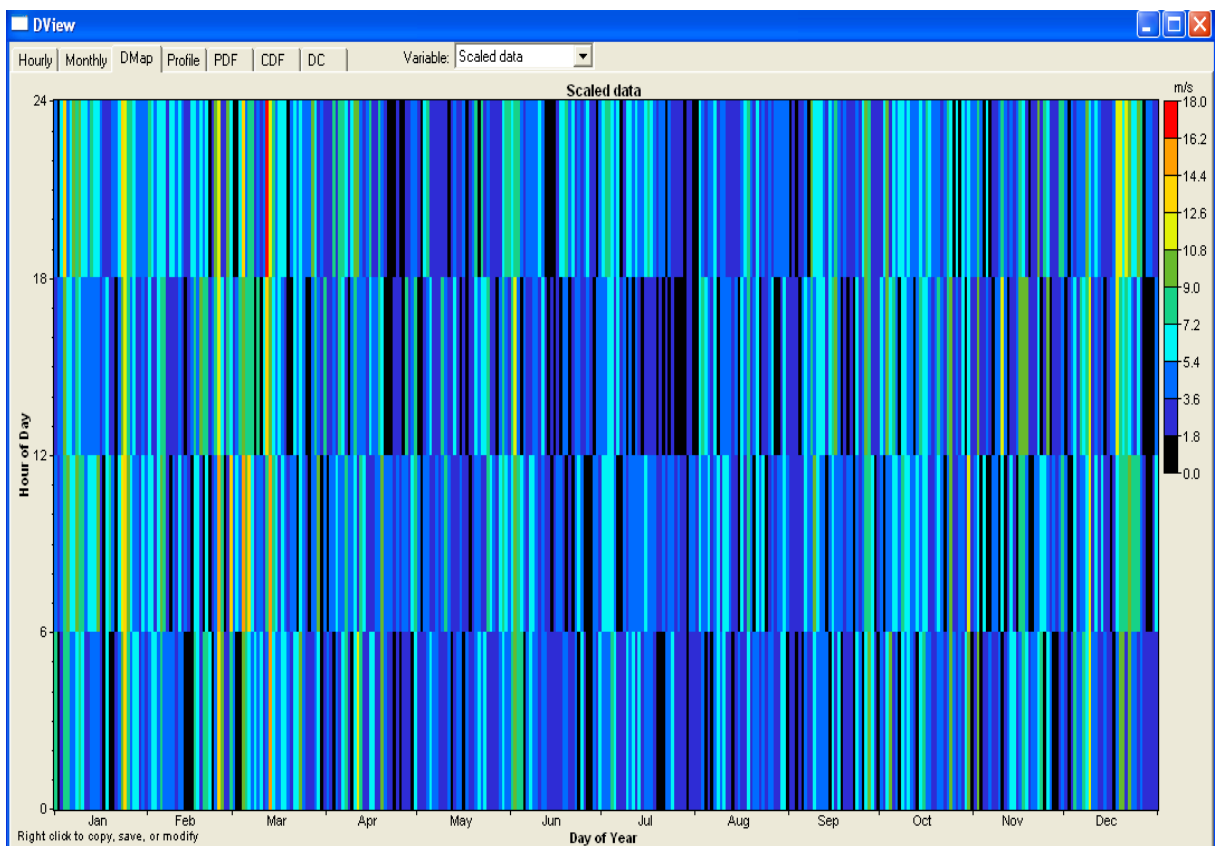
Slika 19. Ruža vjetrulja lokacije 1



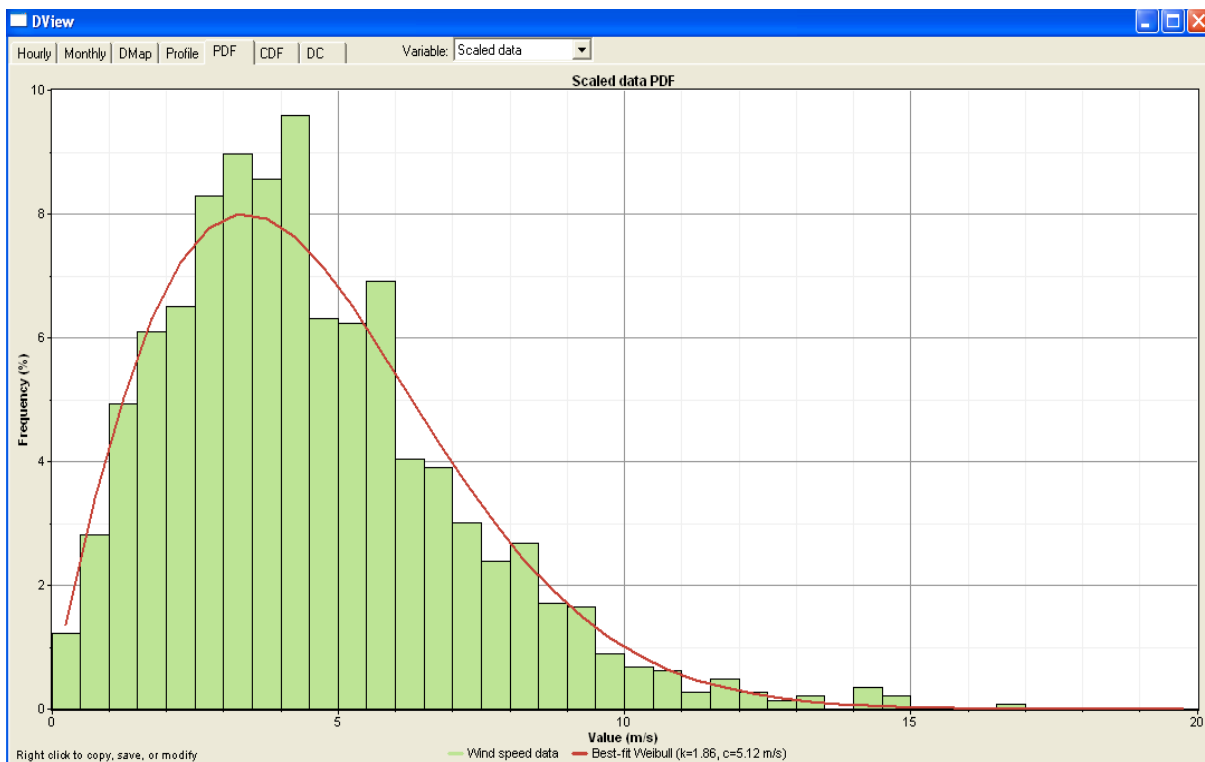
Graf 1. Promjena brzine vjetra kroz jedan mjesec (Siječanj) za lokaciju 1



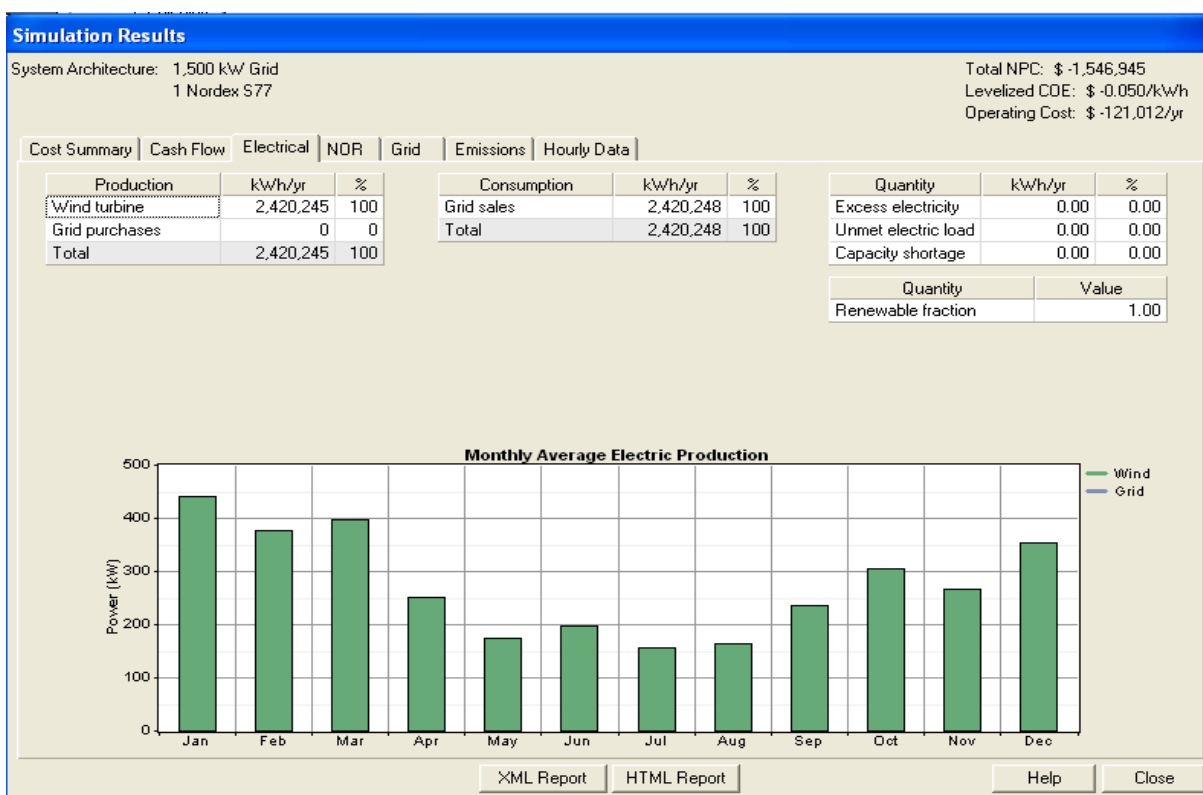
Graf 2. Mjesečne promjene brzine vjetra kroz godinu za lokaciju 1



Graf 3. Promjena brzine vjetra za doba dana kroz godinu za lokaciju 1

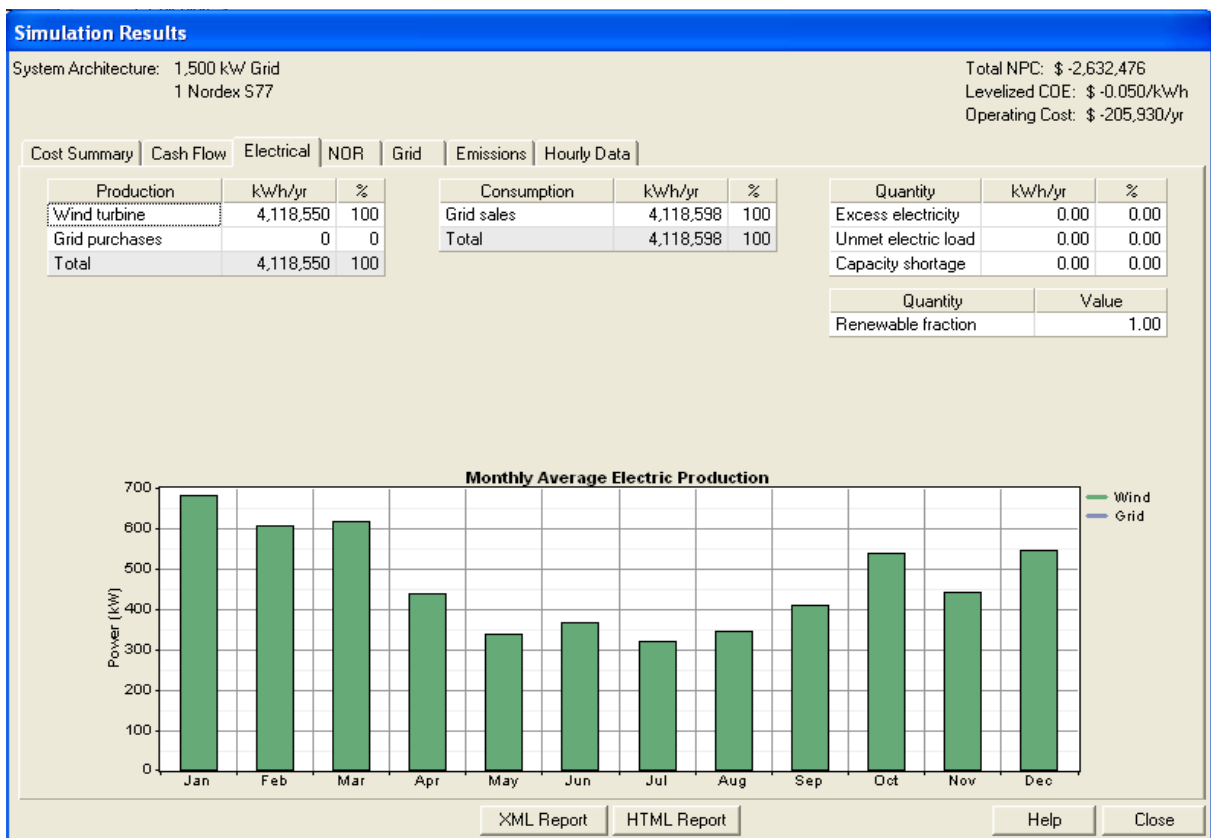


Graf 4. Skalirani podaci za frekvenciju brzine vjetra na lokaciji 1



Graf 5. Mjesečna i ukupna godišnja proizvodnja energije sa normalnom brzinom vjetra za lokaciju 1



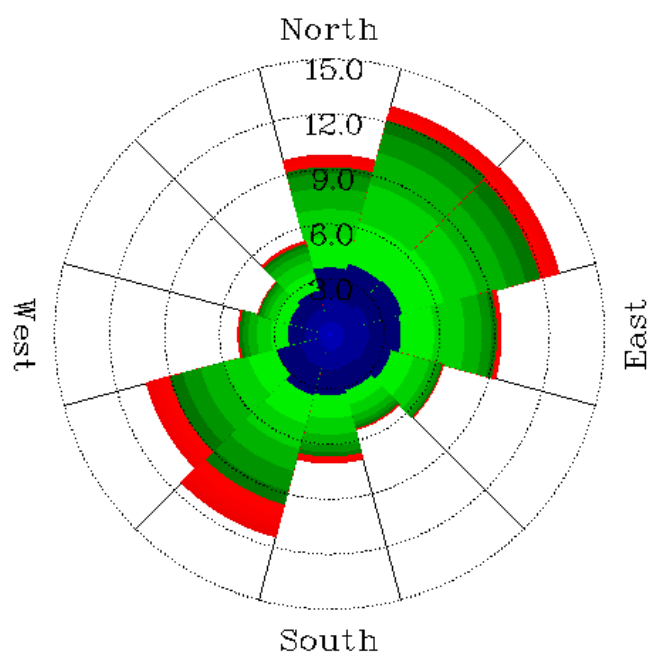


Graf 6. Mjesečna i ukupna godišnja proizvodnja energije sa brzinom vjetra skaliranom za 1,3 radi dobivanja boljih vrijednosti za lokaciju 1

### 3.2. Lokacija 2

Ova lokacija se nalazi u Slavoniji, pokraj Nove Gradiške. Nadmorska visina je oko 135 m. Slici 20 nalazi se ruža vjetrulja na kojoj su zabilježeni prosjeci brzine i smjera vjetra od 1997. do 2006. godine. Sa ruže vjetrulje vidi se da najjači vjetrovi pušu sa sjeveroistoka i jugozapada, tako da bi i položaj potencijalnih vjetroagregata bio najisplativiji da su lopatice položene u tom smjeru. Podaci o brzini puhanja vjetra (dnevne, mjesečne, godišnje promjene), te mjesečnim i godišnjom proizvodnji zajedno sa prikazani su na grafovima 7-12. Prosječna godišnja brzina vjetra je 4,35 m/s, a ta brzina skalirana za 30% iznosi 5,66 m/s.

Wind rose  
1997 – 2006  
50m  
45N 0' 0"  
17E 30' 0"



Energy Institute Hrvoje Pozar

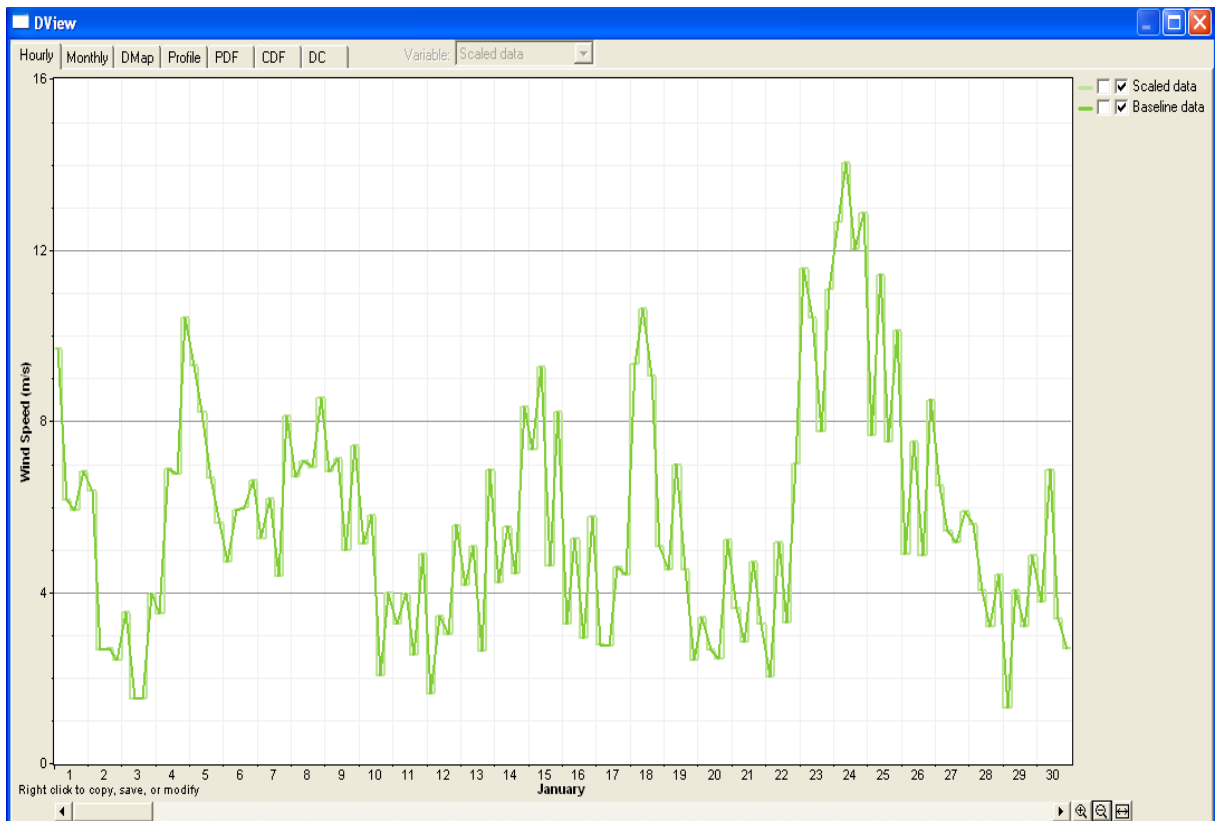
World Wind Atlas

© SANDER + PARTNER GmbH

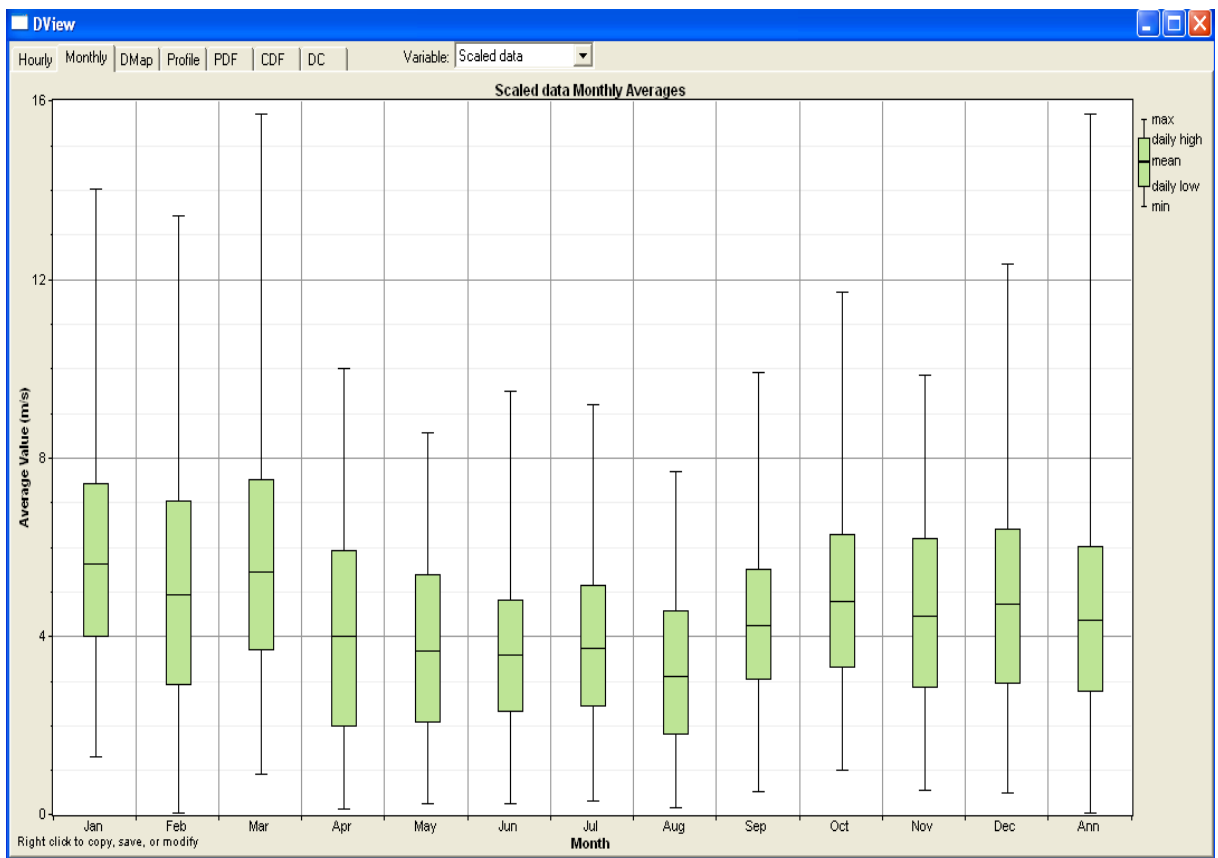
0 5 10 15 m/s



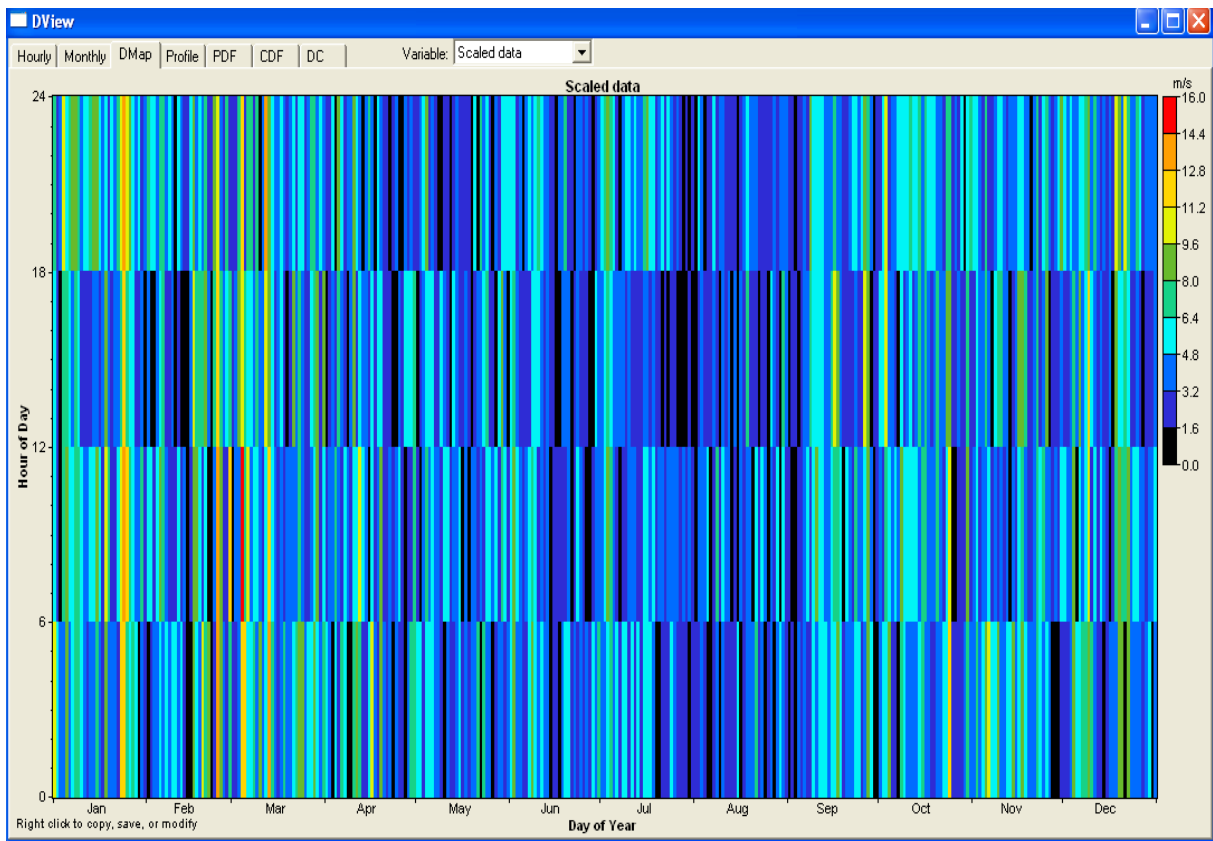
Slika 20. Ruža vjetrulja lokacije 2



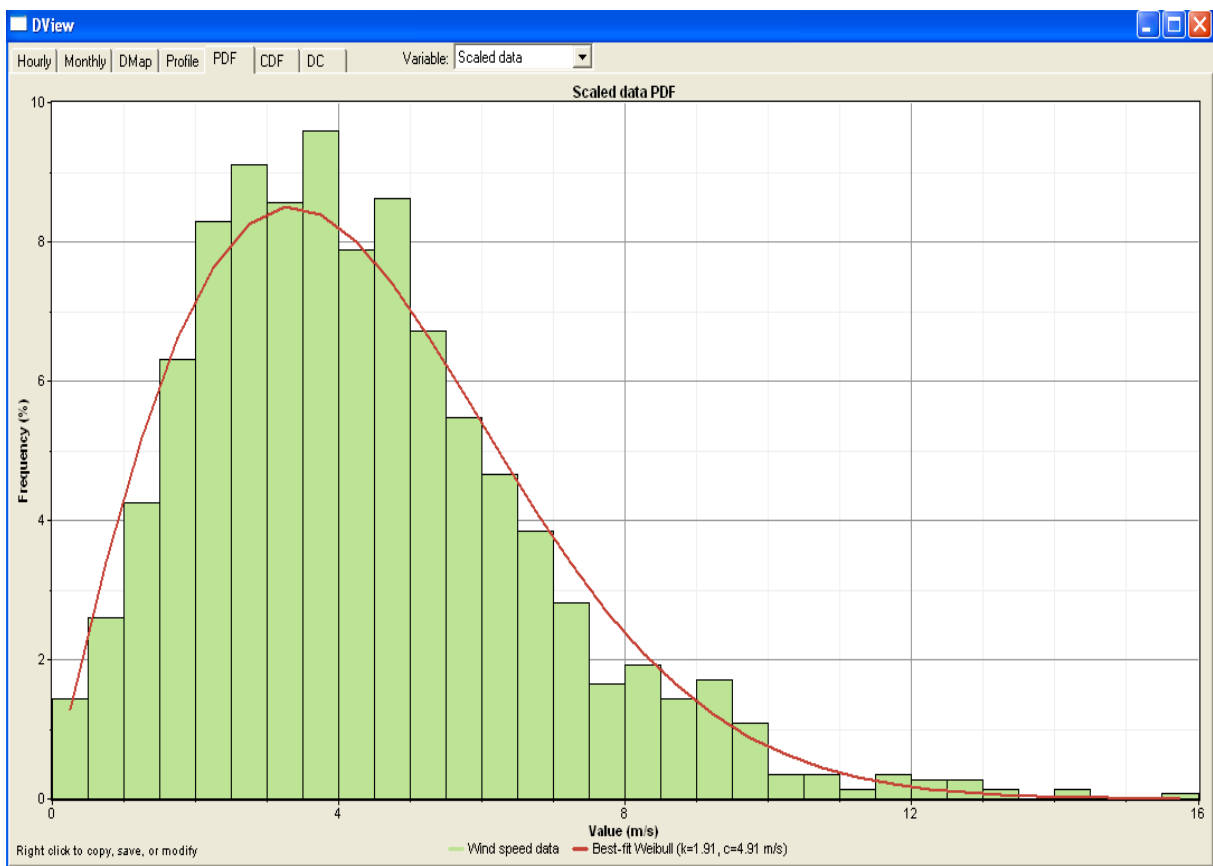
Graf 7. Promjena brzine vjetrova kroz jedan mjesec (Siječanj) za lokaciju 2



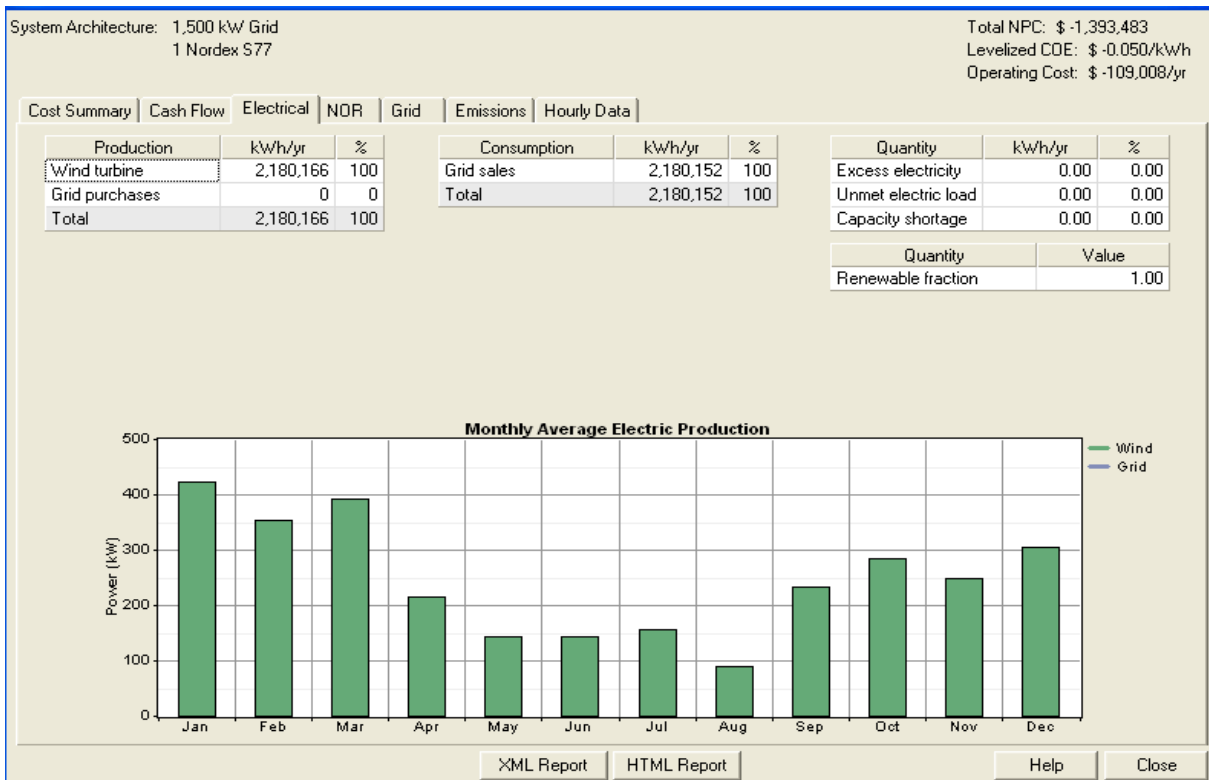
Graf 8. Mjesečne promjene brzine vjetrova kroz godinu za lokaciju 2



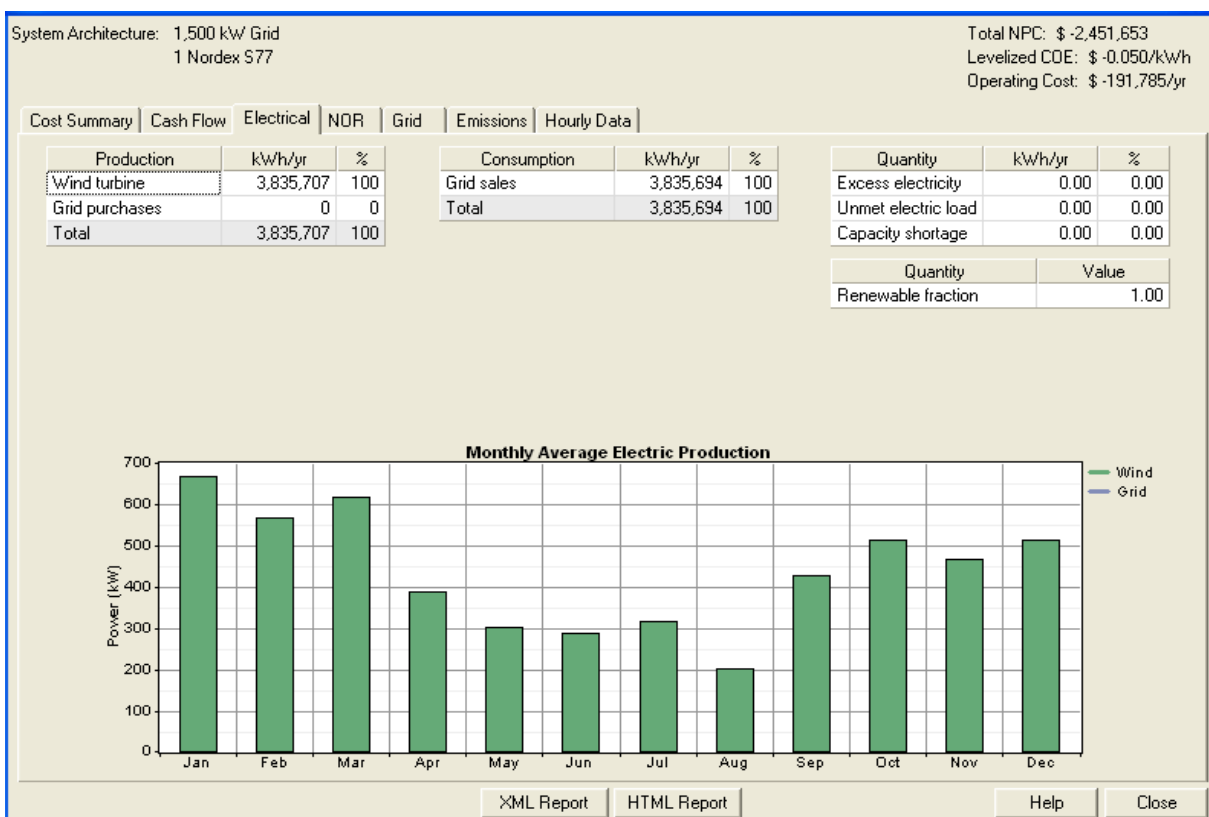
Graf 9. Promjena brzine vjetra za doba dana kroz godinu za lokaciju 2



Graf 10. Skalirani podaci za frekvencije brzine vjetra na lokaciji 2



Graf 11. Mjesečna i ukupna godišnja proizvodnja energije sa normalnom brzinom vjeta za lokaciju 2

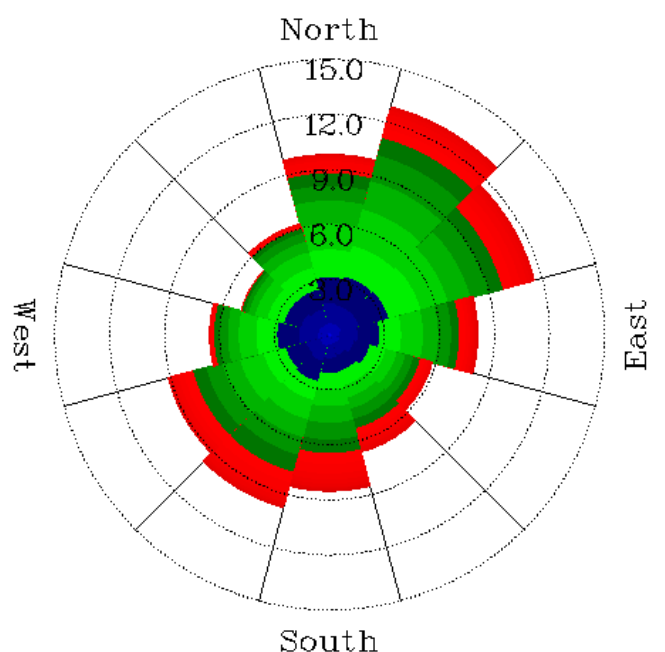


Graf 12. Mjesečna i ukupna godišnja proizvodnja energije sa brzinom vjeta skaliranom za 1,3 radi dobivanja boljih vrijednosti za lokaciju 2

### 3.3. Lokacija 3

Lokacija se nalazi na pučini mora, pored otoka Mljeta. Lokacija na kojoj bi se gradila vjetroelektrana bila bi na samom otoku Mljetu jer se na pučini, zbog dubine mora, ne može ništa graditi. Prostor za gradnju nalazi se na nadmorskoj visinu u rasponu od 160 do 230 m. Za potrebe procjene odabrat ćemo najmanju nadmorsku visinu, znači 160 m. Na slici 21 nalazi se ruža vjetrovlja na kojoj su zabilježeni prosjeci brzine i smjera vjetra od 1997. do 2006. godine. Kao i na prethodne dvije lokacije, najjači vjetrovi pušu sa sjeveroistoka i jugozapada, tako da bi i položaj potencijalnih vjetroagregata bio najisplativiji da su lopatice položene u tom smjeru. Podaci o brzini puhanja vjetra (dnevne, mjesečne, godišnje promjene), te mjesečnim i godišnjoj proizvodnji prikazani su na grafovima 13-18. Prosječna godišnja brzina vjetra je 5,03 m/s, a ta brzina skalirana za 30% iznosi 6,54 m/s.

Wind rose  
1997 – 2006  
50m  
42N 30' 0"  
17E 30' 0"



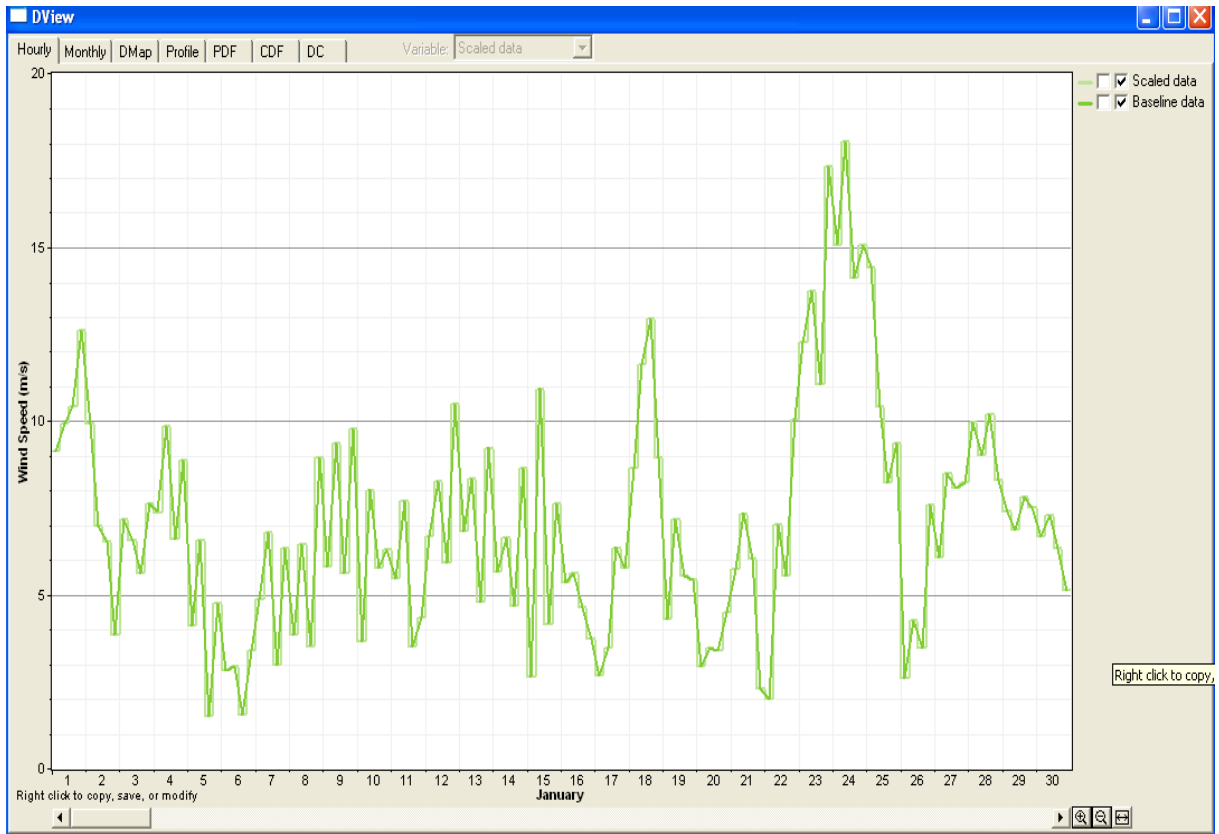
Energy Institute Hrvoje Pozar

0 5 10 15 20 m/s

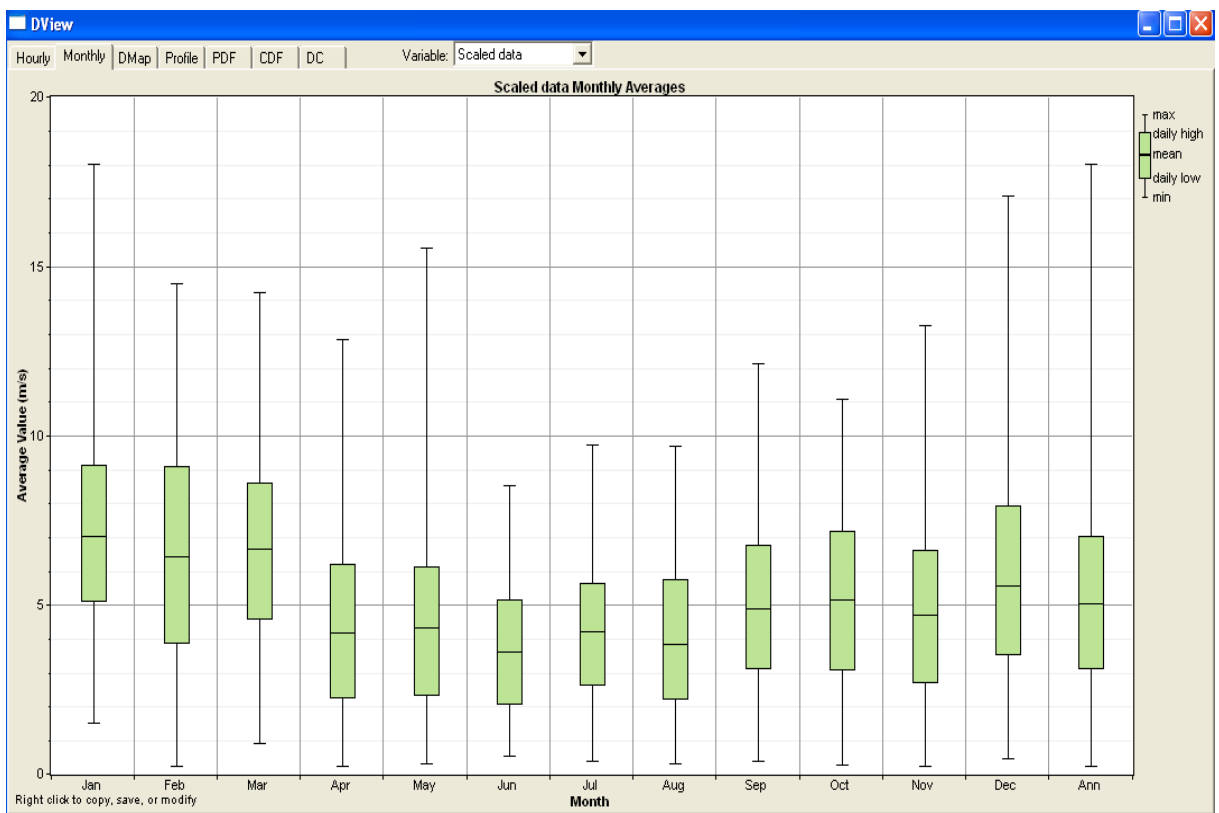
World Wind Atlas

© SANDER + PARTNER GmbH

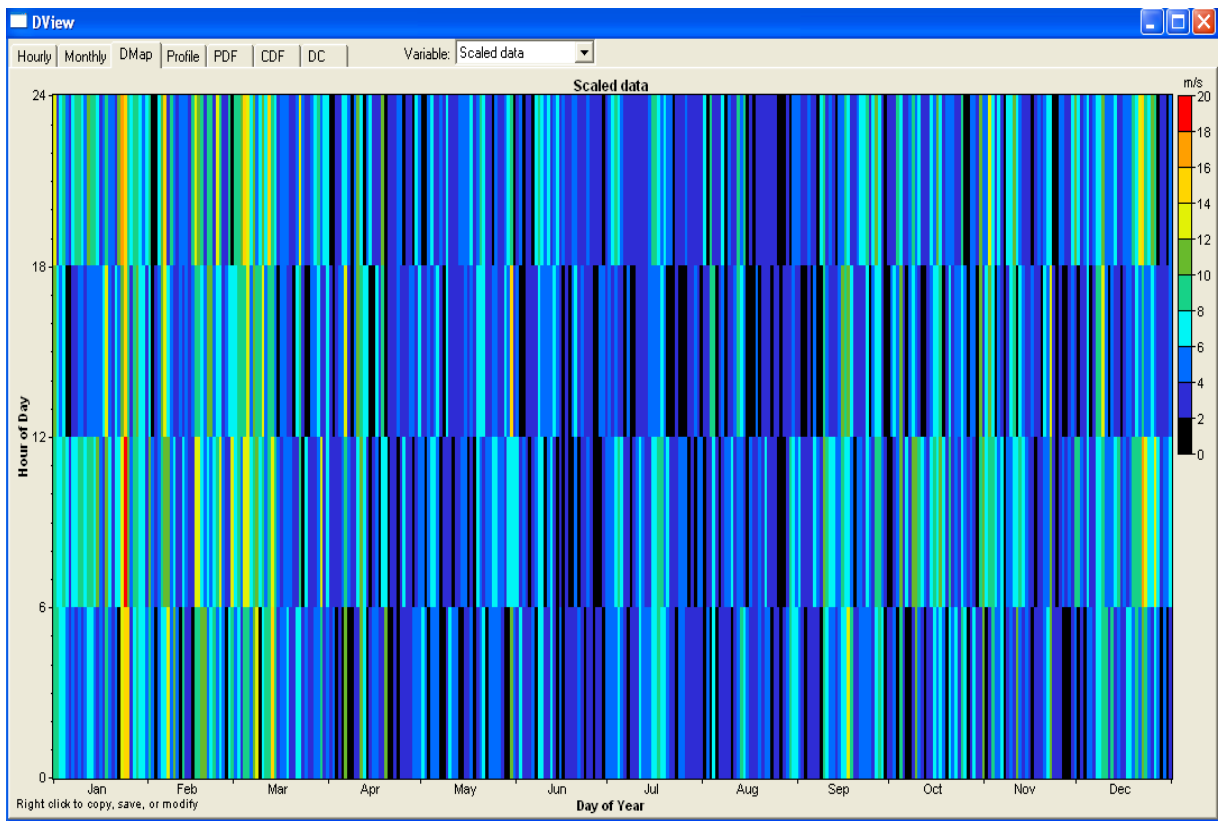
Slika 21. Ruža vjetrovlja lokacije 3



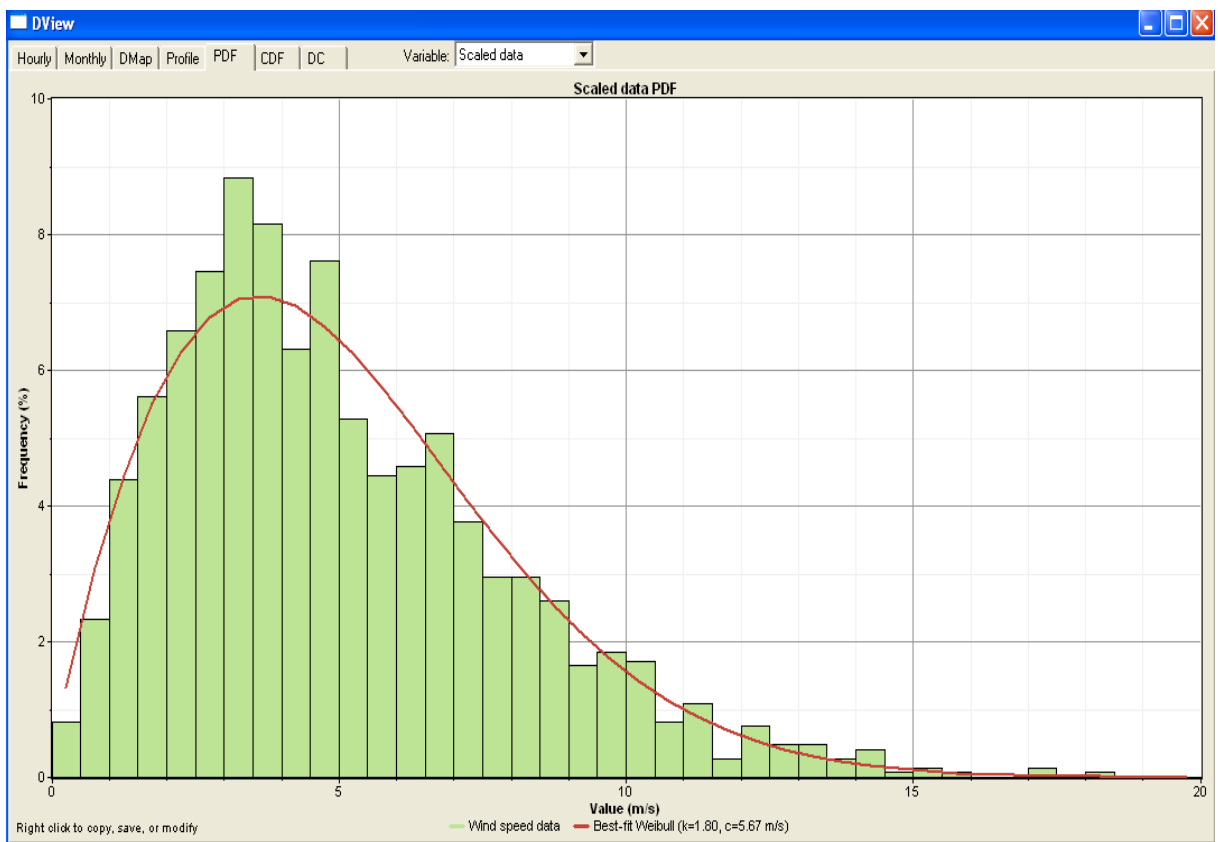
Graf 13. Promjena brzine vjetra kroz jedan mjesec (Siječanj) za lokaciju 3



Graf 14. Mjesečne promjene brzine vjetra kroz godinu za lokaciju 3

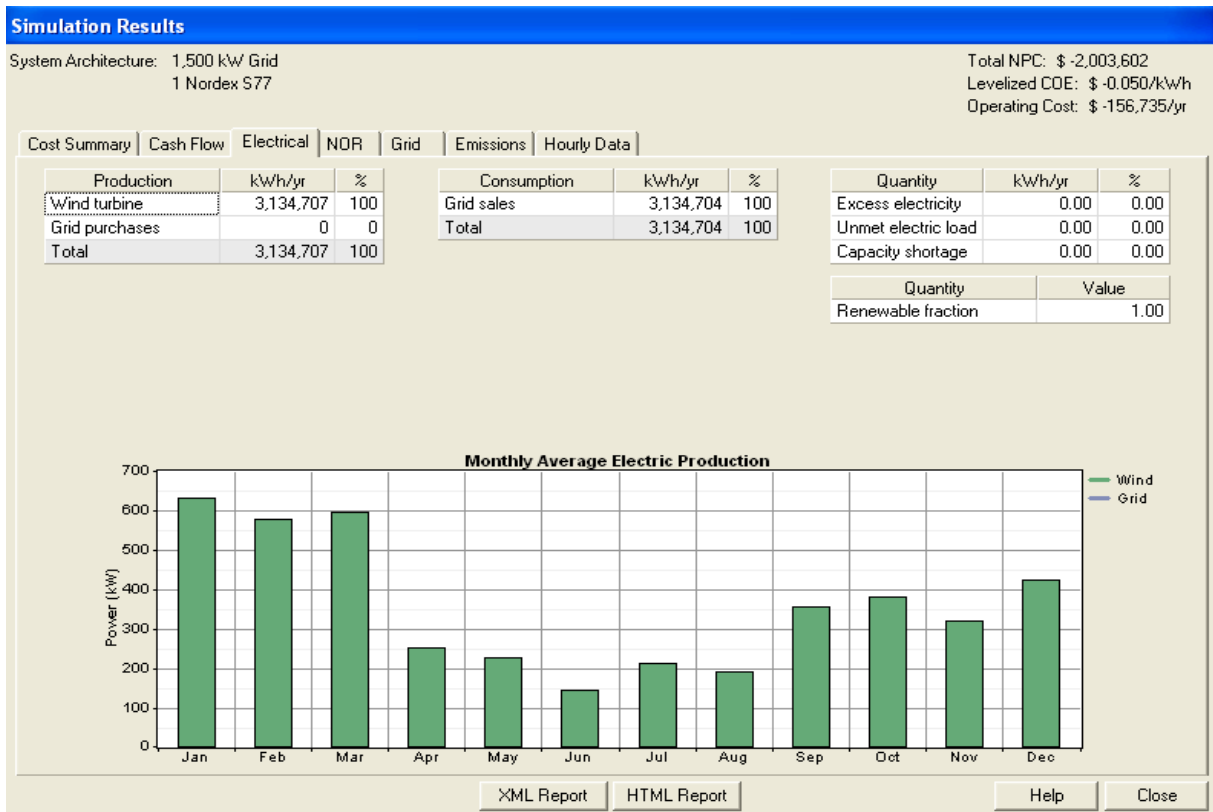


Graf 15. Promjena brzine vjetra za doba dana kroz godinu za lokaciju 3

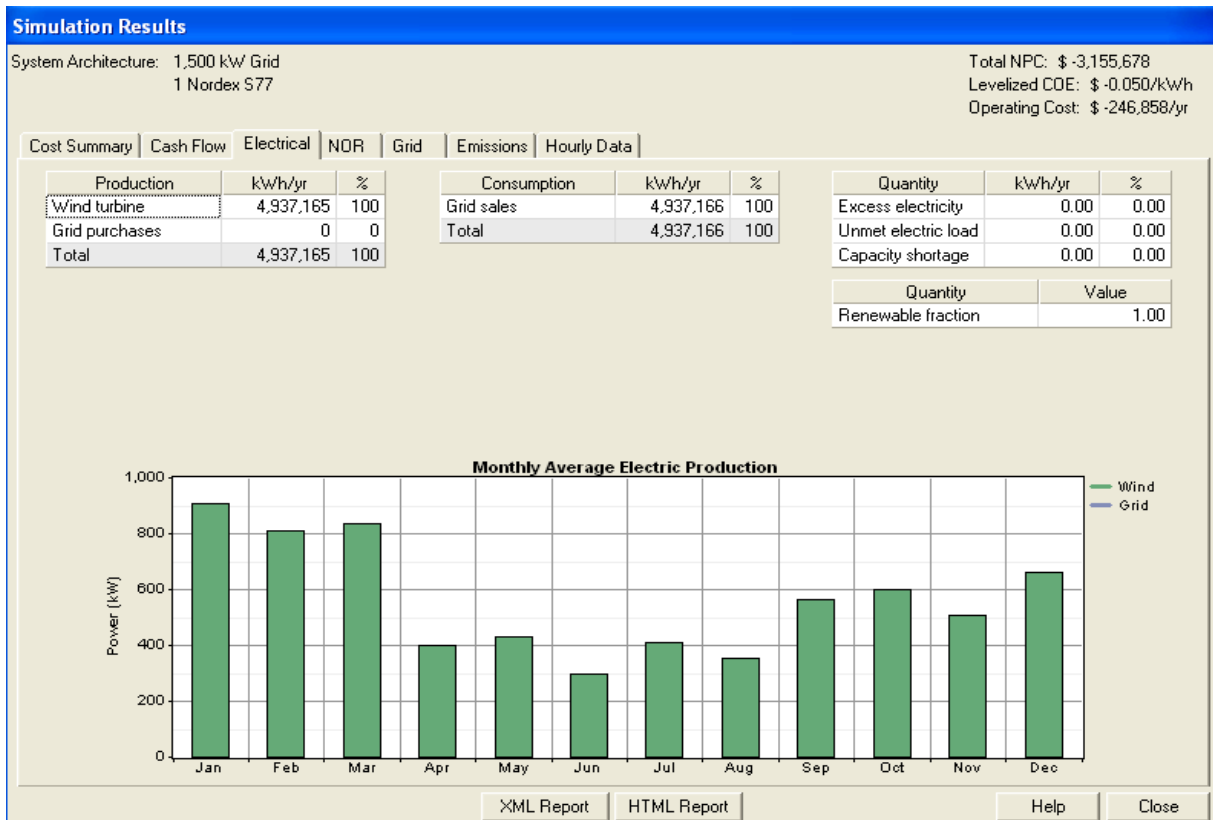


Graf 16. Skalirani podaci za frekvencije vjetra na lokaciji 3





Graf 17. Mjesečna i ukupna godišnja proizvodnja energije sa normalnom brzinom vjetra za lokaciju 3



Graf 18. Mjesečna i ukupna godišnja proizvodnja energije sa brzinom vjetra skaliranom za 1,3 radi dobivanja boljih vrijednosti za lokaciju 2

### 3.4. Usporedba podataka sa lokacija 1-3

Nakon što smo dobili podatke koliko bi svaki agregat na trima lokacijama godišnje proizvedio električne energije u kWh prelazimo na usporedbu procjene proizvedene godišnje snage svakog agregata. Taj ćemo podatak iskazati kao proizvedenu električnu energiju i kao faktor opterećenja u postocima. Godišnji faktor opterećenja dobivamo tako da podatak dobiven u kWh/god podijelimo sa energijom koju bi vjetroagregat proizveo radeći na nazivnoj snazi cijele godine (1500 kW x 8760 h). Podatak o nazivnoj snazi upotrijebiti ćemo i u procjeni kroz već navedena tri scenarija. Bez komplikacija proračuna podijelit ćemo svaku traženu instaliranu snagu na 3 dijela i potom vidjeti koliko bi na svakoj lokaciji bilo potrebno vjetroagregata nazivne snage 1500 kW za ostvarivanje ciljane ukupne snage. Također valja napomenuti kako u procjeni nije oduzet broj već instalirane snage postojećih vjetroelektrana pošto je on naspram snaga u procjenama zanemariv. U tablici 2 navedeni su podaci o godišnjoj proizvodnji električne energije agregata po lokacijama za normalne brzine vjetra (bez skaliranja), a u tablici 3 podaci o godišnjoj proizvodnji električne energije po lokacijama za brzine vjetra skalirane za 30 posto. U tablici 4 nalaze se podaci o godišnjem faktoru opterećenja za svaku lokaciju.

Tablica 2. Godišnja proizvodnja el. energije po lokacijama za normalnu brzinu vjetra (bez skaliranja)

<b>LOKACIJA</b>	<b>Proizvodnja el. en.</b>
LOKACIJA 1	2,420 GWh/god
LOKACIJA 2	2,180 GWh/god
LOKACIJA 3	3,135 GWh/god

Tablica 3. Godišnja proizvodnja el. energije po lokacijama za brzinu vjetra skaliranu za 30 posto

<b>LOKACIJA</b>	<b>Proizvodnja el. en.</b>
LOKACIJA 1	4,119 GWh/god
LOKACIJA 2	3,836 GWh/god
LOKACIJA 3	4,937 GWh/god

Tablica 4. Godišnji faktor opterećenja po lokacijama u % za skaliranu brzinu vjetra

<b>LOKACIJA</b>	<b>Faktor opterećenja</b>
LOKACIJA 1	31.34 %
LOKACIJA 2	29.19 %
LOKACIJA 3	37.57 %

Također će se za svaku lokaciju procijeniti koliku bi površinu zauzimali postavljeni vjetroagregati. Uzimamo u obzir da bi se agregati gradili jedan do drugoga i da je promjer rotora 77 m. Teoretski razmak između agregata trebao bi u dominantnom smjeru biti 4 do 9 veličine promjera. U našem slučaju uzet ćemo da je razmak između agregata 5 puta veći od promjera agregata, drugim riječima, udaljenost između dva agregata bila bi  $77 \times 5 = 385$  metara. Iz ovoga slijedi da bi svaki agregat zauzimao površinu kvadrata veličine stranice 385 metara. Znači svaki bi agregat zauzimao površinu od 148,225 m<sup>2</sup>.

### **3.5. Usporedba procjena kroz 3 različita scenarija**

#### **3.5.1. Prvi scenarij – instalirana snaga 1200 MW**

Dakle, kao što je već navedeno krećemo sa scenarijem koji se nalazi u zelenoj knjizi, a to je da do 2020. godine instalirana snaga u vjetroelektranama bude 1200 MW. Iz gore navedene podjele instalirane snage na tri jednaka dijela po lokacijama zaključujemo da bi instalirana snaga po svakoj lokaciji trebala biti 400 MW. Dolazimo do sljedećeg zaključka:

Svaka lokacija trebala bi imati po 267 vjetroagregata, koji bi zauzimali ukupnu površinu od 39.58 km<sup>2</sup>. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije po lokacijama iznosila bi:

LOKACIJA 1 – 1100 GWh/god

LOKACIJA 2 – 1024 GWh/god

LOKACIJA 3 – 1318 GWh/god

#### **3.5.2. Drugi scenarij – instalirana snaga 900 MW**

Istim postupkom kao i u prethodnom scenariju dobit ćemo podatke o potrebnom broju vjetroagregata za nešto manju snagu, snagu od 900 MW. Analogno prethodnom scenariju podjelom snage na tri jednaka dijela svaka lokacija trebala bi imati snagu od po 300 MW. Podaci su sljedeći:

Svaka lokacija trebala bi imati po 200 vjetroagregata, koji bi zauzimali ukupnu površinu od 29.65 km<sup>2</sup>. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije po lokacijama iznosila bi:

LOKACIJA 1 – 823,8 GWh/god

LOKACIJA 2 – 767,2 GWh/god

LOKACIJA 3 – 987,4 GWh/god

### **3.5.3. Treći scenarij – instalirana snaga 600 MW**

Kao i u prethodna dva slučaja dijelimo snagu od 600 MW na tri jednaka dijela i dobivamo snagu od 200 MW po lokaciji. Podaci su sljedeći:

Svaka lokacija trebala bi imati po 134 vjetroagregata, koji bi zauzimali ukupnu površinu od 19.86 km<sup>2</sup>. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije po lokacijama iznosila bi:

LOKACIJA 1 – 551,9 GWh/god

LOKACIJA 2 – 514,0 GWh/god

LOKACIJA 3 – 661,6 GWh/god

## Zaključak

Okretanje obnovljivim izvorima je potrebno i nužno. Države bi se što prije trebale odlučiti na poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije da ne ovise o konačnim zalihama nafte i prirodnog plina i zbog nestabilne i varijabilne cijene nafte. Energetski sektor snažno utječe na okoliš, tj. globalno zagrijavanje kroz emisije stakleničkih plinova. Zbog gore navedenog se u posljednje vrijeme proizvodnja energije snažno promovira. Sve oko ukazuje kako će važnost obnovljivih izvora u budućnosti sve više jačati.

Procjenama napravljenima u ovom radu dolazimo do nekoliko zaključaka. Najvažnije je reći kako Hrvatska ima solidan potencijal za obnovljive izvore energije: Sunce, biomasu i vjetar. Procjene u ovom radu su napravljene za tri lokacije tako da je zahvaćeno poprilično malo područje RH na koje je palo veliko opterećenje snage i zahtjeva veliku površinu za gradnju samih vjetroagregata. Uzevši u obzir prosjek sa sve tri lokacije vidimo kako je godišnji prosjek brzine vjetra oko 6 m/s, što u kombinaciji sa danas standardnim vjetroagregatom (nazivne snage 1,5 MW) koji smo uzeli daje godišnje prosječno opterećenje od nekih 500-tinjak kW. S takvim opterećenjem i scenarijem koji prati Zelenu knjigu da bi se do 2020. godine postigla snaga od 1200 MW, na svakoj od tri promatrane lokacije trebalo bi sagraditi poprilično veliki broj agregata koji bi zauzimali veliku površinu. Naravno brojke bi bile manje i realnije da se uzeo veći broj lokacija, ali nažalost za njih nije bilo adekvatnih podataka o brzinama vjetra. No, ukupna potrebna površina bi bila slična. U budućnosti, kada Hrvatska napravi detaljan atlas vjetra, ove će procjene biti detaljnije i preciznije. Time će automatski biti moguće uzeti više lokacija, na primjer njih desetak, i napraviti precizniju procjenu sa kvalitetnijom raspodjelom snage na više lokacija.

## Literatura

- [1] Kris R. Voorspools, William D. D'haeseleer: „Critical evaluation of methods for wind-power Appraisal“, University of Leuven, Belgija, prosinac 2004.
- [2] Daniel R. Schneider, Neven Duić, Željko Bogdan: „Mapping the potential for decentralized energy generation based on renewable energy sources in the Republic of Croatia“, Zagreb, studeni 2005.
- [3] Bert J.M. de Vries, Detlef P. van Vuuren, Monique M. Hoogwijk: „Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach“, Utrecht, Nizozemska, studeni 2006.
- [4] Skupina autora: „Analiza tehnoloških platformi za vjetroelektrane u RH“, ZVNE, FER Zagreb, Hrvatska, prosinac 2008.
- [5] Emilio Migoya, Antonio Crespo, Angel Jimenez, Javier Garcia, Fernando Manuel: „Wind energy resource assessment in Madrid region“, Madrid, Španjolska, lipanj 2006.
- [6] Brošura vjetroagregata Nordex S77, s interneta, <http://www.nordex-online.com/en/products-services/wind-turbines/s77-15-mw.html>, 16. ožujak 2009.
- [7] Wind resource assessment, s interneta, [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_resource\\_assessment](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_resource_assessment), 10. ožujak 2009.
- [8] Nacrt zelene knjige, s interneta, [http://www.energetska-strategija.hr/doc/zelena\\_knjiga.pdf](http://www.energetska-strategija.hr/doc/zelena_knjiga.pdf), 10. ožujak 2009.
- [9] Kompjutorski program Windographer, s interneta, <http://www.mistaya.ca/windographer/overview.htm>, 18. ožujak 2009.
- [10] Kompjutorski program WAsP, s interneta, <http://www.wasp.dk/>, 18. ožujak 2009.
- [11] Kompjutorski program OpenWind, s interneta, <http://www.awsopenwind.org/>, 18. ožujak 2009.

## **PROCJENA POTENCIJALA ENERGIJE VJETRA U RH**

### **CROATIAN WIND ENERGY POTENTIAL ASSESSMENT**

#### **KLJUČNE RIJEČI:**

Procjena, potencijal, vjetar, energija, vjetroagregat, vjetroelektrana, brzina vjetra, smjer vjetra, Nordex, Homer, proračun, graf, ruža vjetrulja, dijagram snage, lokacija, proizvodnja, faktor opterećenja, scenarij, instalirana snaga, površina

Assessment, potential, wind, energy, wind turbine, wind speed, wind direction, Nordex, Homer, calculation, graph, wind rose, power curve, location, production, load factor, scenario, installed power, size

#### **SAŽETAK:**

Zadatak ovog rada bio je analizirati i proračunati potencijal vjetra u RH, drugim riječima bilo je potrebno procijeniti koliko bi snage godišnje proizvodio pojedini vjetroagregat i koliko bi površinu zauzimao. Za procjenu je uzet vjetroagregat Nordex S77, snage 1,5 MW. U obzir su uzete tri lokacije u RH, jedna u okolici Senja, druga u Slavoniji i treća na jugu RH pored otoka Mljeta. Sa svake lokacije uzeli smo podatke o brzini vjetra kroz cijelu godinu i spojili ih sa dijagramom snage vjetroagregata u kompjutorskom programu Homer i na taj način dobili godišnju proizvodnju energije i snage svakog agregata. Nadalje, odabrana su tri scenarija o ukupnoj instaliranoj snazi u RH: 1200, 900 i 600 MW. Snage su ravnomjerno raspoređene po lokacijama i na taj način su dobiveni podaci o broju potrebnih vjetroagregata na svakoj lokaciji. Dodatno je obavljena procjena za potrebnu površinu koju bi zauzeo svaki agregat i potom je izračunato koliko bi površine na svakoj lokaciji zauzimali svi agregati.