

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

prof. dr. sc. Neven Duić

Nikola Matak

Zagreb, 2013.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Nikola Matak

Zagreb, 2013.

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Matak**

Mat. br.: 0035177602

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun moguće proizvodnje električne energije iz planiranih vjetroelektrana na području Dubrovačko –neretvanske županije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of wind power production from planned wind power plants in the Dubrovnik-Neretva County**

Opis zadatka:

U Dubrovačko–neretvanskoj županiji trenutno ima planiranih 14 vjetroelektrana ukupne snage 641 MW, koje su upisane u Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP), a koji se vodi pri Ministarstvu gospodarstva, rada i poduzetništva u Odjelu za obnovljive izvore i energetske učinkovitost.

Za potrebe kvalitetnog energetskeg planiranja potrebno je odrediti moguću godišnju proizvodnju električne energije na područje Dubrovačko –neretvanske županije uzimajući u obzir mjerene brzine vjetra na minimalno jednoj lokaciji.

U radu je potrebno:

1. Unijeti sve planirane vjetroelektrane iz Registar OIEKPP u WAsP PC program za predviđanje proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana.
2. Provesti analizu moguće ukupne godišnje proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana s obzirom na dostupne mjerene podatke brzina i smjerova vjetra te konfiguracije tla.
3. Unijeti u WAsP dodatne moguće vjetroelektrane prema prostornom planu uređenja Dubrovačko –neretvanske županije uključujući vjetroturbine na otoku Mljetu, Lastovu i Korčuli te analizirati ukupnu proizvodnju električne energije.
4. Detaljnije analizirati i prikazati rezultate analize moguće proizvodnje električne energije za jednu lokaciju vjetroelektrane u Dubrovačko –neretvanskoj županiji.

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

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom obrazovanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i služeći se navedenom literaturom. Zahvaljujem na nesebičnoj i stručnoj pomoći mentoru prof. dr. sc. Nevenu Duiću, dr. sc Goranu Krajačiću te dr.sc. Marku Banu.

Također se zahvaljujem dr.sc. Kristianu Horvathu iz Državnog hidrometeorološkog zavoda na ustupljenim podacima o vjetru sa meteorološke postaje Dubrovnik.

Sažetak

U radu je analizirana moguća godišnja proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana za područje Dubrovačko-neretvanske županije. U prvom dijelu rada izložen je kratak teorijski uvod i opis funkcioniranja programa u kojem će se provesti simulacija, dok su u drugom dijelu navedeni praktični koraci i rezultati ovog predviđanja. Program koji je korišten za predviđanje prosječne godišnje proizvodnje električne energije je Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Da bi se izračunala moguća proizvodnja električne energije u program je bilo potrebno unijeti podatke o brzini i smjeru vjetra mjerene na barem jednoj lokaciji u toj županiji te podatke o topografiji terena, hrapavosti površine terena, unijeti sve predviđene vjetroelektrane i vjetroagregate. Lokacije vjetroelektrana su unesene u program prema podacima iz Registra projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP) dostupnog na stranicama Ministarstva gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske te prema prostornom planu Dubrovačko-neretvanske županije. Dodatno su unesene lokacije na otocima Korčuli, Visu i Mljetu, iako je na njima zabranjena gradnja vjetroelektrana, da bi se istražio energetska potencijal tih otoka. Dobiveni su rezultati prema dvjema lokacijama mjerenja, prema lokaciji Smokovljani u blizini grada Stona i prema meteorološkoj postaji Dubrovnik i međusobno su uspoređeni. Dobiveni rezultati su pokazali da Dubrovačko-neretvanska županija raspolaže većim potencijalom proizvodnje električne energije iz vjetra nego što su njezine potrebe za električnom energijom. Također u radu je detaljnije analizirana proizvodnja električne energije za vjetroelektranu Dubrovačko primorje koja se nalazi u neposrednoj blizini mjerne lokacije Smokovljani.

Sadržaj:

1. UVOD	10
1.1.Vjetar	10
1.2.Noviji radovi o procjeni proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana	13
1.3.Vjetroelektrane u Hrvatskoj	14
2. METODOLOGIJA	17
2.1.Meteorološki podaci	18
2.2.Unošenje meteoroloških podataka u WAsP	20
2.3.Topografija	21
2.4.Hrapavost terena i prepreke	23
2.5.Modeliranje vjetroelektrane i odabir vjetroagregata	24
3. PRIMJENA METODOLOGIJE	27
3.1.Meteorološka mjerenja i izrada OWC	27
3.2.Topografija, hrapavost terena i prepreke	31
3.3.Odabir lokacije vjetroelektrane	34
3.4.Odabir lokacije pojedine vjetroturbine	36
3.5.Izračun prosječne godišnje proizvodnje električne energije (AEP)	39
4. REZULTATI PRORAČUNA	42
4.1.Rezultati procjene proizvodnje električne energije za vjetroelektrane koje se nalaze u Registru OIEKPP	42
4.2.Rezultati procjene AEP za slučaj kada se dodaju dodatni kapaciteti prema prostornom planu i otocima	46
4.3.Detaljnija analiza rezultata za VE Dubrovačko primorje	50
5. ZAKLJUČAK	53
6. LITERATURA	55

POPIS SLIKA

Slika 1-1 Globalno strujanje zraka [1].....	10
Slika 1-2 Atlas vjetra Hrvatske [3].....	11
Slika 1-3 Prototip leteće vjetroturbine [4]	12
Slika 2-1 Metodologija WAsP [5].....	17
Slika 2-2 Meteorološki stup [15].....	19
Slika 2-3 Uređaji za mjerenje na meteorološkom stupu [16]	20
Slika 2-4 OWC ruža vjetrova i raspodjela brzine za <i>Waspdale airport</i> [17].....	21
Slika 2-5 Karta kompleksnog terena primjer iz WAsP [17].....	22
Slika 2-6 Karta s linijama hrapavosti terena i izohipsama [17]	23
Slika 2-7 Vjetroagregat Vestas V80 snage 2MW [17].....	25
Slika 2-8 Standardni atlas vjetra primjer iz WAsP [17]	26
Slika 3-1 Lokacija mjernog stupa Smokovljani prikazana u <i>Google Earth</i>	27
Slika 3-2 Lokacije mjerne postaje Dubrovnik u <i>Google Earth</i>	29
Slika 3-3 OWC za mjernu lokaciju Smokovljani na 44 metra visine	30
Slika 3-4 OWC za meteorološku postaju Dubrovnik na 10 metara visine	31
Slika 3-5 Topografska karta Dubrovačko-neretvanske županije	32
Slika 3-6 Karta koja sadrži linije hrapavosti i topografske linije za područje VE Dubrovačko primorje.....	33
Slika 3-7 Raspodjela obnovljivih izvora energije u Dubrovačko-neretvanskoj županiji [20].....	36
Slika 3-8 <i>Resource grid</i> koji prikazuje prosječnu godišnju proizvodnju električne energije na području VE Dubrovačko primorje	37
Slika 3-9 <i>Resource grid</i> koji prikazuje srednju gustoću energije vjetra na području VE Dubrovačko primorje.....	38
Slika 3-10 <i>Resource grid</i> koji prikazuje nadmorsku visinu na području VE Dubrovačko primorje	38
Slika 3-11 <i>Resource grid</i> koji prikazuje dRIX vrijednost	39
Slika 3-12 Siemens Wind Power SWT-3.6-107 generator vjetroturbine [17].....	39
Slika 3-13 Generalizirani atlas vjetra za Dubrovačko-neretvansku županiju.....	40

Slika 4-1 Prikaz vjetroelektrana prema Registru OIEKPP	42
Slika 4-2 Prikaz lokacija prema prostornom planu Dubrovačko-neretvanske županije.....	47
Slika 4-3 Razmještaj vjetroturbina prema što nižem dRIX faktoru	50
Slika 4-4 Razmještaj vjetroturbina prema što većoj proizvodnji električne energije.....	50
Slika 4-5 Utjecaj faktora orografske performance na brzinu vjetra [5].....	51

POPIS TABLICA

Tablica 1-1 Popis vjetroelektrana u Hrvatskoj [9]	15
Tablica 3-1 Klase hrapavosti terena [10].....	32
Tablica 3-2 Popis vjetroelektrana za Dubrovačko-neretvansku županiju [21]	35
Tablica 4-1 Podaci o predviđenoj proizvodnji električne energije za vjetroelektrane unesene u Registar OIEKPP prema podacima mjerenima na lokaciji Smokovljani	43
Tablica 4-2 Podaci o predviđenoj proizvodnji električne energije za vjetroelektrane unesene u Registar OIEKPP prema podacima mjerenima na meteorološkoj postaji Dubrovnik	44
Tablica 4-3 Podaci o predviđenoj proizvodnji električne energije za vjetroelektrane unesene u Registar OIEKPP prema podacima mjerenima na lokaciji Smokovljani, a postavljeni na planinu Rujnica u WASP simulaciji.....	45
Tablica 4-4 Vjetroagregati korišteni za proračun AEP	46
Tablica 4-5 Podaci o predviđenoj proizvodnji za vjetroelektrane prema prostornom planu i na otocima prema podacima mjerenima na lokaciji Smokovljani.....	48
Tablica 4-6 Podaci o predviđenoj proizvodnji za vjetroelektrane prema prostornom planu i na otocima prema podacima mjerenima na meteorološkoj postaji Dubrovnik	49

POPIS OZNAKA

AEP	godišnja proizvodnja električne energije (GWh)
Bruto AEP	maksimalna godišnja proizvodnja električne energije (GWh)
dRIX	indikator orografske performanse (%)
L	faktor opterećenja (<i>Load factor</i>) (%)
Neto AEP	godišnja proizvodnja električne energije s uračunatim <i>wake losses</i> (GWh)
P	snaga vjetroelektrane (MW)
RIX	indeks brdovitosti terena (Ruggedness IndeX) (%)
<i>Wake losses</i>	gubici za koje se umanjuje AEP, gubici vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine (%)

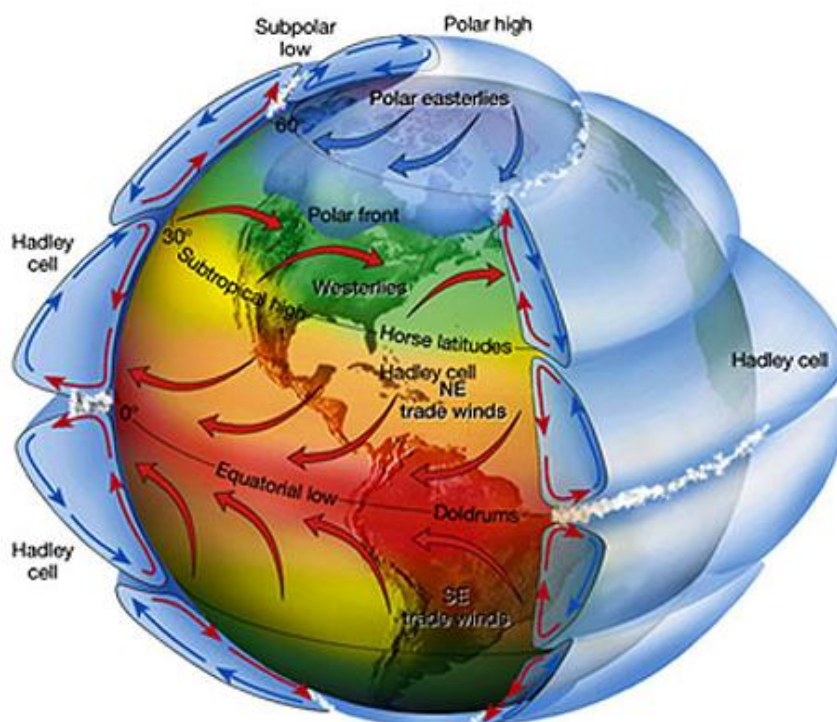
1. UVOD

U uvodnom dijelu rada dati će se kratki pregled nekih općenitih podataka o vjetru, istraživanjima na području procjene proizvodnje električne energije iz vjetra te o vjetroelektranama u Hrvatskoj.

1.1. Vjetar

Vjetar kao i većina energetske izvora na zemlji nastao je kao produkt sunčevog zračenja. Udio sunčevog zračenja koji se pretvori u energiju vjetra iznosi između 1-2%. Koliko god se to činilo malo to je ipak nekoliko desetaka puta više nego što se sunčevog zračenja pretvori u biomasu.

Vjetar nastaje ponajprije zbog nejednake distribucije temperature na zemlji koja nastaje zbog nejednolike raspodjele sunčevog zračenja koje dopiye do zemlje. Budući da područje zemlje oko ekvatora dobija više sunčevog zračenja od područja zemlje u blizini polova, topli zrak na ekvatoru se diže i struji prema polovima, a hladni zrak s polova struji prema ekvatoru da nadomjesti zrak koji je otišao s ekvatora prema polovima.

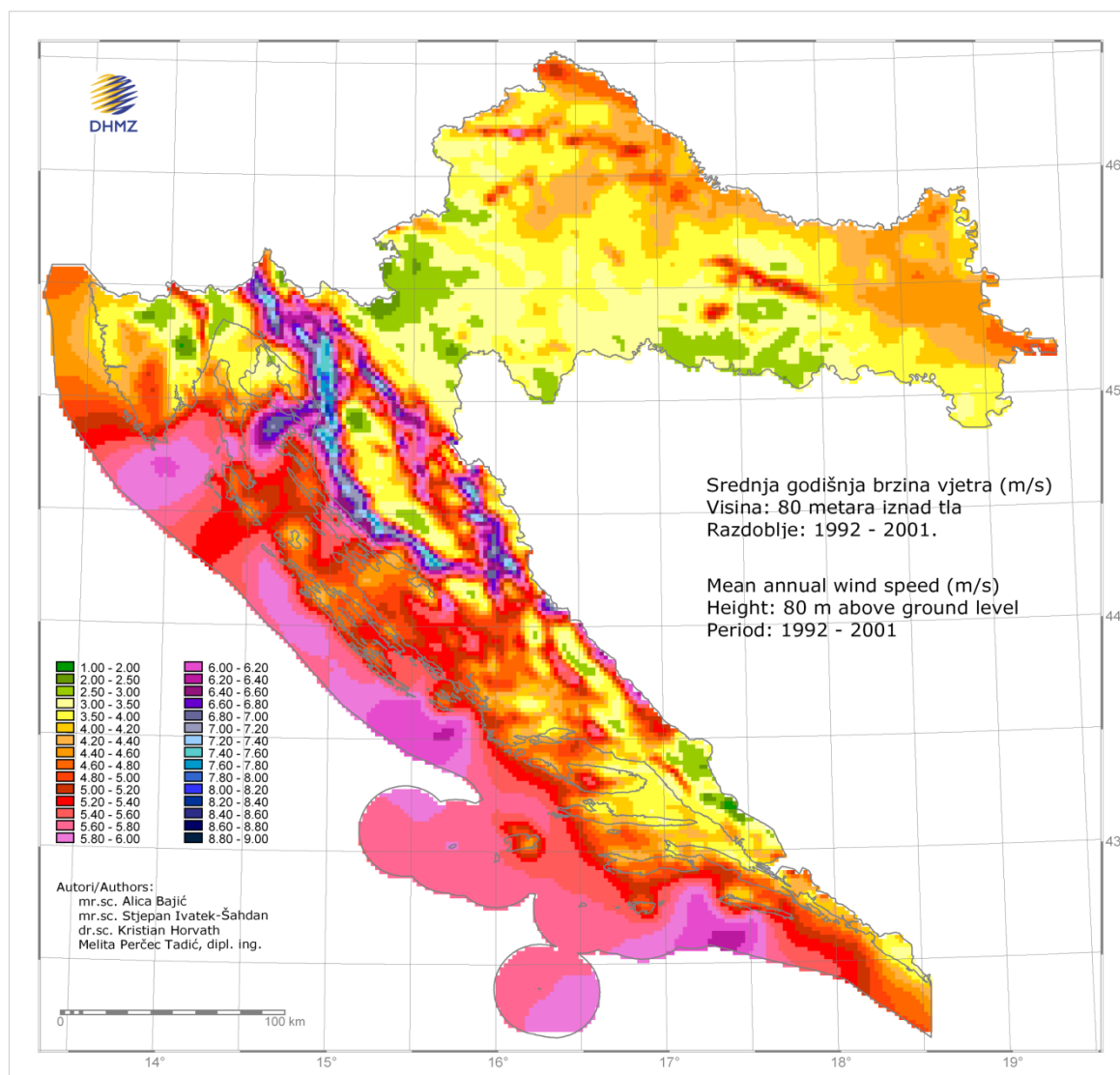


Slika 1-1 Globalno strujanje zraka [1]

Osim utjecaja razlike temperatura između polova i ekvatora postoji još nekoliko utjecaja zbog kojih dolazi do strujanja zraka. Na globalnoj razini na strujanje zraka utječe i Coriolisova sila koja nastaje uslijed rotacije zemlje, a njezina posljedica je strujanje vjetra u višim slojevima

prema istoku, a u nižim slojevima prema zapadu. Na područjima koja se nalaze sjevernije od 30° sjeverne geografske širine i južnije od 30° južne geografske širine utjecaj Coriolisove sile je puno veći od utjecaja temperaturne razlike na strujanje vjetra. Na slici 1-1 prikazano je globalno strujanje vjetra. [2]

Osim globalnih sila koje utječu na strujanje zraka postoje i lokalni utjecaji. U području do 100 metara visine na vjetar utječu hrapavost terena i prepreke kao na primjer šume ili veliki gradovi i zbog toga dolazi do promjena u smjeru i brzini vjetra te do pojave turbulentnog strujanja. Utjecaj mora ili jezera na strujanje vjetra vrlo je sličan utjecajima na globalnoj razini.



Slika 1-2 Atlas vjetra Hrvatske [3]

Vjetar na nekom području, u blizini zemljine površine, sastoji se od kombinacije vjetra zbog globalnih i vjetra koji nastaje zbog lokalnih utjecaja. Zbog toga brzina i smjer vjetra ovise o geografskim kordinatama, klimi područja, visini iznad površine zemlje, hrapavosti same

zemljine površine i preprekama koje se nalaze u blizini. Na vjetar koji dolazi do vjetroturbine utječe i sama vjetroturbina.

Vjetar do visine od 200 metara može se iskoristiti za proizvodnju električne energije pomoću konvencionalnih vjetroturbina, a vjetrovi u višim slojevima atmosfere mogu se iskoristiti za proizvodnju električne energije pomoću letećih vjetroelektrana koje se pomoću balona punjenih helijem dižu na visine iznad 200 metara te kablovima šalju električnu energiju na površinu Zemlje [4]. Prototip jedne takve vjetroturbine koju je izradila tvrtka Altaeros Energies osnovana od strane Massachusetts Institute of Technology (MIT) nalazi se na slici 1-3.



Slika 1-3 Prototip leteće vjetroturbine [4]

Za potrebe procjene moguće proizvodnje električne energije na nekom području potrebno je poznavati smjer i brzinu vjetra te se zbog toga izrađuju karte vjetropotencijala na kojima se nalazi srednja brzina vjetra na nekoj visini. Jedna takva prikazana je na slici 1-3.

1.2. Noviji radovi o procjeni proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana

U ovom dijelu dati će se popis nekoliko radova koji su izrađeni u nekoliko proteklih godina, a cilj im je bio procjena proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana ili analiza vjetropotencijala za neko područje.

Jedan od radova koji je korišten kao podloga za pisanje ovog rada je skripta koja služi kao podloga za predavanja o planiranju i razvijanju vjetroelektrana na Tehničkom sveučilištu u Danskoj (DTU). U skripti su detaljno opisani koraci planiranja proizvodnje električne energije iz vjetroelektrane i procjene vjetropotencijala neke lokacije pomoću računalnog programa WASP. Također su navedeni neki dodatni alati koji mogu pomoći kod izrade topografskih karata i karata hrapavosti terena. Date su upute o prikupljanju meteoroloških podataka i navedene mogućnosti programa koji se nalaze u programskom paketu WASP kao podrška osnovnom programu. Prikazane su moguće prilagodbe programa za kompleksne terene i navedeni gubici koje WASP ne uzima u obzir kod modeliranja. [5]

Drugi rad [6] koji govori o potencijalu proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana na području brda *Nagda*, u pokrajini *Madhya Pradesh*, u blizini grada *Bopal*, na sjeverozapadu Indije imao je za cilj pokušati pomoću WASP odrediti neke od sljedećih točaka:

1. klimu vjetra zabilježenu na obližnjoj meteorološkoj postaji iskoristiti za procjenu klime vjetra na potencijalnoj lokaciji vjetroturbine
2. prikupljanje podataka o vjetru te izradu i analizu topografske karte tog područja
3. uz pomoć WASP digitalizirati topografsku kartu i izraditi kartu hrapavosti terena te prepreka, odrediti ruže vjetrova za svaku godinu i odgovarajuću *Weibull* raspodjelu, izraditi atlas vjetra i odrediti područja s visokom gustoćom energije vjetra, odabrati vjetroturbine i procijeniti godišnju proizvodnju energije te odrediti izgled vjetroelektrane i procjenu njene ukupne proizvodnje električne energije

Na kraju rada je zaključeno da bi bilo koji vjetroagregat s brzinom uključenja od 4 m/s i brzinom isključenja između 20 i 25 m/s zadovoljio na ovoj lokaciji te da lokacija ima jako dobar vjetropotencijal jer srednja brzina vjetra na visini od 65 metara iznosi 8,69 m/s.

U procjeni vjetropotencijala na otoku *Naxos* u Grčkoj [7] korišteni su podaci mjereni na 10 metara visine. Utvrđeno je da je prosječna brzina vjetra na toj lokaciji 7,4 m/s, a gustoća energije vjetra 420 W/m^2 . Za statističku analizu raspodjele vjetra korištena je *Weibull* i *Rayleigh* distribucijska funkcija. Prevladavajući smjer vjetra je utvrđen kao sjeveroistočni i sjevero-

sjeveroistočni. Pokazalo se da odabrana lokacija, koja se nalazi na sjeveroistočnom dijelu otoka ima vrlo dobar vjetropotencijal i da je pogodna za daljnja istraživanja ili za gradnju vjetroelektrana.

Studija provedena u Njemačkim pokrajinama North Hesse i West saxony [8] ispituju kako agencije za regionalno planiranje navedenih pokrajina uspijevaju osigurati u prostornim planovima prostor za vjetroelektrane i da li su predviđena područja ekonomski isplativa. Nude rješenja za poboljšanje iskoristivosti predviđenih kapaciteta vjetroelektrana zamjenom starih vjetroturbinama modernim vjetroturbinama i premještanjem predviđenih lokacija za gradnju novih vjetroelektrana na neku povoljniju lokaciju. Provedena je usporedba dviju pokrajina u Njemačkoj i utvrđeno je da bi se moguća proizvodnja električne energije mogla udvostručiti ako bi se primjenila rješenja koja oni nude.

1.3. Vjetroelektrane u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je do srpnja 2012. instalirano 8 vjetroelektrana ukupne instalirane snage 130 MW, koje godišnje proizvode oko 383 GWh električne energije. Broj postavljenih agregata je 79, a raspon snaga im je od 0,8 do 3 MW. Najveća vjetroelektrana je VE Vratuša, koja se nalazi pokraj Senja, instalirane snage 42 MW, a sastoji se od 14 Vestasovih V-90 vjetroagregata snage 3 MW. Visina stupa svakog agregata je 80 metara, promjer lopatica je 90 metara. Vjetroelektrana je izgrađena 2009. godine, ali je u pogonu tj. priključena je na mrežu od siječnja 2011. godine. Najstarija vjetroelektrana u Hrvatskoj je Mala vjetroelektrana Ravne 1 na otoku Pagu koja je puštena u rad 2004. godine. Sastoji se od 7 Vestasovih V-52 vjetroagregata svaki snage 0,85 MW. U tablici 1-1 nalazi se popis svih vjetroelektrana u Hrvatskoj koje su pogonu. [9]

Prema novim podacima [10] u Hrvatskoj je do kraja 2012. godine izgrađeno ukupno 180 MW vjetroelektrana. U 2012. godini u Hrvatskoj je izgrađeno novih 48 MW snage, a najveća izgrađena vjetroelektrana u 2012. godini je Vjetroelektrana Jelinak snage 30 MW koja je priključena u hrvatski elektroenergetski sustav u prvom mjesecu 2013. godine [11]. Vjetroelektrana Jelinak nalazi se u zaleđu grada Trogira. U Dubrovačko-neretvanskoj županiji Vjetroelektrana Ponikve snage 34 MW trebala bi se uskoro priključiti u hrvatski elektroenergetski sustav [12], a na prvoj fazi gradnje Vjetroelektrane Rudine u kojoj će se izgraditi 35 MW od predviđenih 70 MW trebali bi početi radovi u 3. mjesecu 2013. godine [13].

U europskim okvirima trenutno najviše instaliranih vjetroelektrana postoji u Njemačkoj ukupne snage 31,308 GW, a u 2012. izgrađeno je 2,415 GW što je najviše od svih zemalja u Europi, a slijede je Ujedinjeno Kraljevstvo sa 1,897 GW i Italija sa 1,273 GW instaliranih kapaciteta u

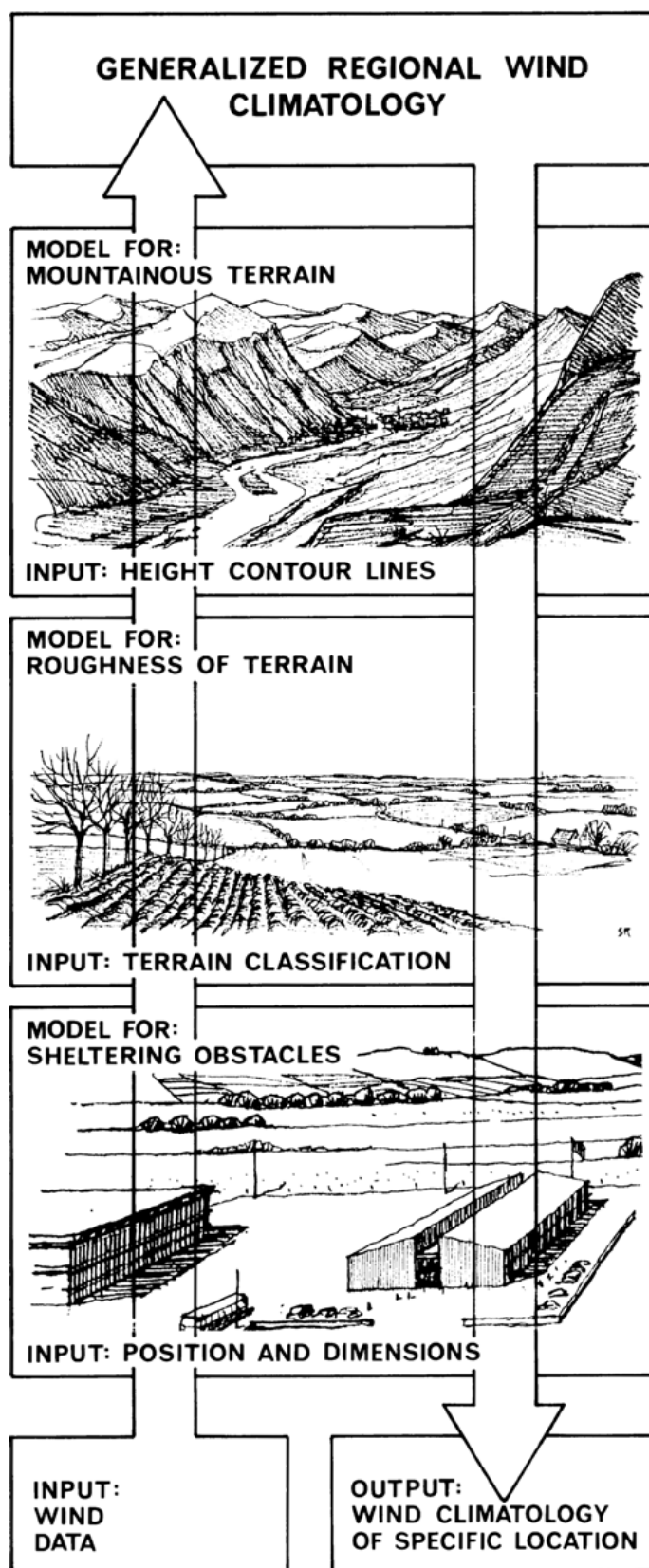
2012. godini. Ukupna instalirana snaga u Europi na kraju 2012. godine bila je 109,581 GW. Vidljivo je da Hrvatska pokušava slijediti europske trendove u povećanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, ali je također primjetno da se izgradnja dodatnih kapaciteta vjetroelektrana mora ubrzati kao bi Hrvatska do 2020. godine proizvodila 20% energije iz obnovljivih izvora energije. [10]

Tablica 1-1 Popis vjetroelektrana u Hrvatskoj [9]

Vjetroelektrana	Instalirana snaga (MW)	Županija	Godišnja proizvodnja (GWh)	Vjetroagregati i modeli	Puštena u rad
VE Vrataruša	42	Ličko-senjska županija	125	14 × Vestas V90 - 3 MW	2011.
VE Velika Popina	9,2	Zadarska županija	26	4 × Siemens SWT 93 – 2,3 MW	2011.
VE Trtar-Krtolin	11,2	Šibensko-kninska županija	28	14 × Enercon E-48 - 0,8 MW	2006.
VE Ravne 1	6	Zadarska županija	15	7 × Vestas V52 – 0,85 MW	2004.
VE Pometeno Brdo 1	6	Splitsko-dalmatinska županija	15	6 × Končar KO-VA 57/1 – 1 MW	2012.
VE Orlice	9,6	Šibensko-kninska županija	25	11 × Enercon (3 x E-48–0,8 MW + 8 x E-44–0,9 MW)	2009.
VE Crno Brdo	10	Šibensko-kninska županija	27	7 × Leitwind LTW77 – 1,5 MW	2011.
VE Bruška	36,8	Zadarska županija	122	16 × Siemens SWT-93 - 2,3 MW	2012.
Ukupno	130		383	79	srpanj 2012.

Broj elektrana koje se planiraju izgraditi u Hrvatskoj je 84, ukupne snage 4137,16 MW [14]. Neki od ovih novih kapaciteta izgradit će se tako da će se povećati snaga postojećih vjetroelektrana, ali većina će biti novoizgrađene vjetroelektrane. U hrvatski elektroenergetski sustav trenutno je dozvoljeno priključiti 400 MW električne energije iz vjetroelektrana. Idući korak je dozvoljavanje uključenja ukupno 1200 MW iz vjetroelektrana, samo je pitanje kako će se nadoknaditi potrebna električna energija za opskrbu u slučaju kada vjetroelektrane neće raditi zbog nedostatka vjetra ili nekih drugih razloga. Potrebno je izgraditi neke dodatne kapacitete kojima će se pokriti taj manjak električne energije. Kao najbolje rješenje nameću se reverzibilne hidroelektrane koje mogu akumulirati višak električne energije pomoću vode i dati električnu energiju u mrežu onda kada postoji nedostatak električne energije. Još jedno moguće rješenje za problem prihvaćanja dodatnih kapaciteta iz vjetroelektrana u elektroenergetski sustav Hrvatske jest osnivanje regionalnog tržišta električne energije po uzoru na skandinavske zemlje i Njemačku te Španjolsku i Portugal.

2. Metodologija [5]



Slika 2-1 Metodologija WAsP [5]

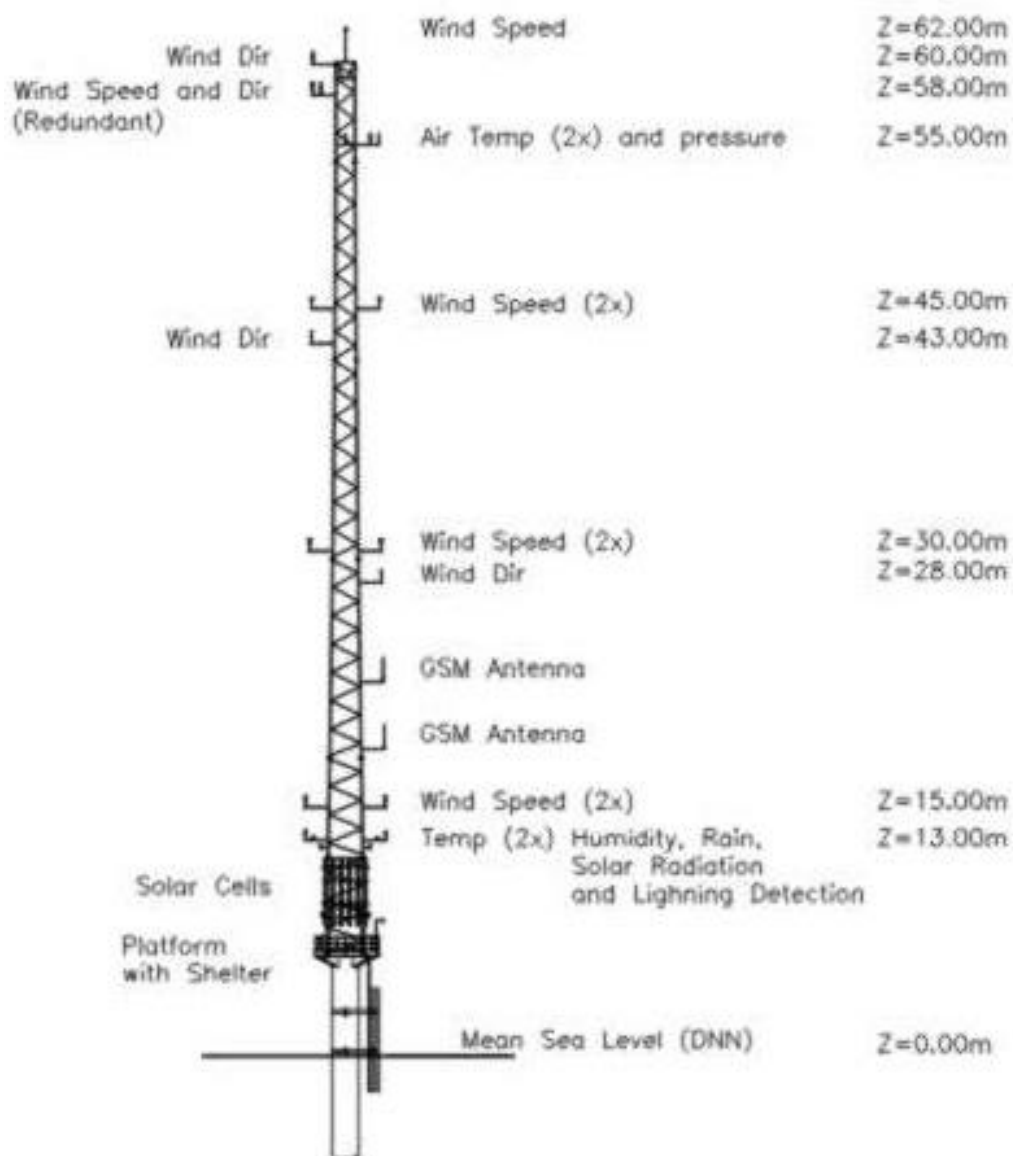
WAsP ili *Wind Atlas Analysis and Application Program* je softverski program koji se koristi za predviđanje atlasa vjetra i proizvodnje električne energije iz vjetroturbina. Predviđanja se baziraju na mjerenjima podataka o vjetru na lokaciji turbina ili na podacima dobivenim od meteoroloških stanica koje se nalaze negdje u blizini lokacije vjetroturbina. U obzir se uzimaju još i utjecaji terena na brzinu i smjer vjetra poput topografije terena, hrapavosti površine i prepreka. Program u prvom koraku računa utjecaj terena na smjer i brzinu vjetra i tako stvara generalizirani atlas vjetra za to područje. Nakon toga se provodi obrnuti proces u kojemu WAsP iz atlasa vjetra uzimajući u obzir topografiju, hrapavost terena i prepreke daje podatke za brzinu i smjer vjetra na lokaciji turbine iako su se mjerenja u stvarnosti odvijala nekoliko kilometara dalje. Taj postupak proračuna prikazan je na slici 2-1. Iz ovog kratkog uvoda možemo zaključiti da postoji nekoliko parametara koji su jako bitni kod predviđanja proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana pa ćemo nešto reći o njima tj. o tome kako se oni unose u WAsP.

2.1. Meteorološki podaci

U WAsP se unose meteorološki podaci u obliku *Observed wind climate* (OWC) podataka koji nam daje podatke o brzini vjetra i smjeru vjetra na lokaciji meteorološke stanice tj. na poziciji na kojoj se nalazi mjerni uređaj. Da bi se došlo do tog tipa podataka potrebno je prikupiti meteorološke podatke u trajanju od najmanje jedne godine (bilo bi bolje kad bi se prikupili podaci za više godina) i te podatke obraditi tako da se ih se može iskoristiti za stvaranje OWC podataka. Zbog toga kvaliteta podataka mjerenja direktno utječe na kvalitetu predviđanja atlasa vjetra i proizvodnje električne energije u WAsP. Ukratko, mjerenja koja se provode moraju biti pouzdana, reprezentativna i najviše od svega točna.

Ako je moguće mjerenja bi se trebala provoditi na osnovu preliminarne analize lokacije vjetroparka provedene u WAsP. To bi osiguralo da podaci koji su prikupljeni mjerenjem budu s reprezentativne lokacije, da pozicija mjernog stupa na kojem se nalazi anemometar pokriva sve bitne raspone visine, hrapavosti površine, strmosti terena te izloženosti bilo kakvim drugim utjecajima tj. lokacija mjesta mjerenja mora biti što sličnija lokaciji na kojoj će se postavljati turbine da bi se predviđanjem dobili što točniji rezultati. Također bi bilo poželjno da se prije postavljanja mjernog stupa za mjerenja napravi OWC tj. ruža vjetrova za to područje na osnovu podataka prikupljenih s lokalne meteorološke postaje kako bi se moglo što bolje postaviti mjerni stup da on ima što manji utjecaj na podatke mjerenja. Još jedan od bitnijih faktora je visina mjernog stupa. Bilo bi poželjno da su podaci koji se prikupljaju izmjereni na minimalno 2/3 visine na kojoj će se nalaziti rotor vjetroturbine. Mjerni stup sa uređajima za mjerenje čija visina je dovoljna da se točno može modelirati proizvodnja električne energije kod većine modernih

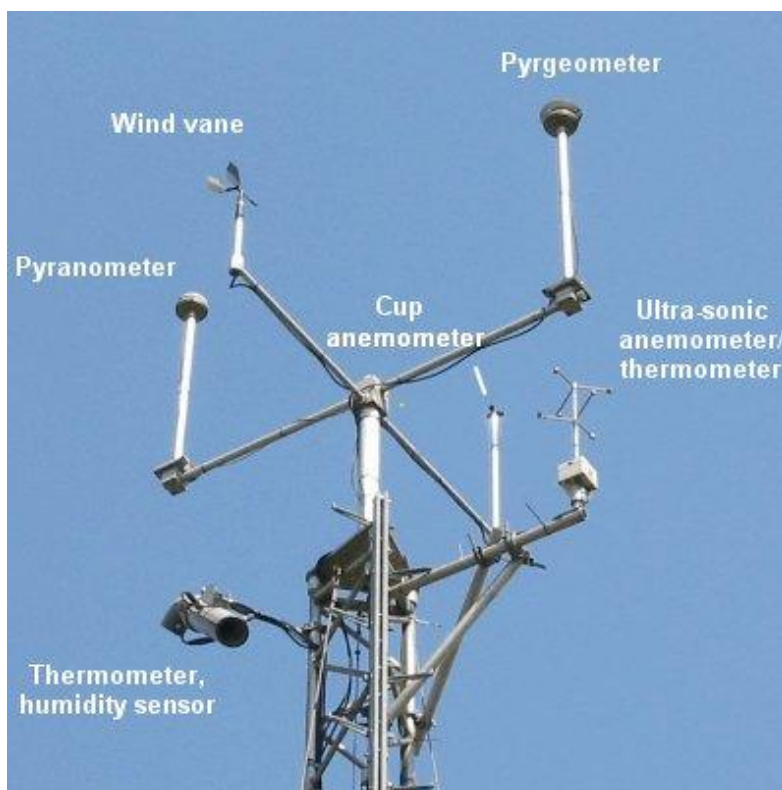
vjetroagregata prikazan je na slici 2-2. Prikazani stup mjeri brzinu vjetra na visinama od 62, 58, 45, 30 i 15 metara pa je na osnovu više točaka moguće točnije odrediti vertikalni profil vjetra.



Slika 2-2 Meteorološki stup [15]

Anemometri koji se koriste za mjerenja moraju biti kalibrirani prema međunarodnim standardima ili ako to nije moguće moraju biti kalibrirani tako da se način kalibracije može ispitati. Poželjno je da se postavi nekoliko anemometara kako bi se mogao utvrditi vertikalni profil vjetra. Temperatura zraka i tlak bi se također trebali mjeriti i to ako je moguće na visini stupa vjetroturbine kako bi se mogla izračunati gustoća zraka preko koje će se izabrati prava karakteristika generatora vjetroturbine. Uređaji koji se koriste za mjerenje podataka o vjetru i karakteristikama zraka prikazani su na slici 2-3. U slučaju da se radi o jako kompleksnom terenu

bilo bi poželjno postaviti dva mjerna stupa sa mjernim uređajima kako bi se mogli uspoređivati podaci dobiveni modeliranjem u WAsP i podaci dobiveni mjerenjima.



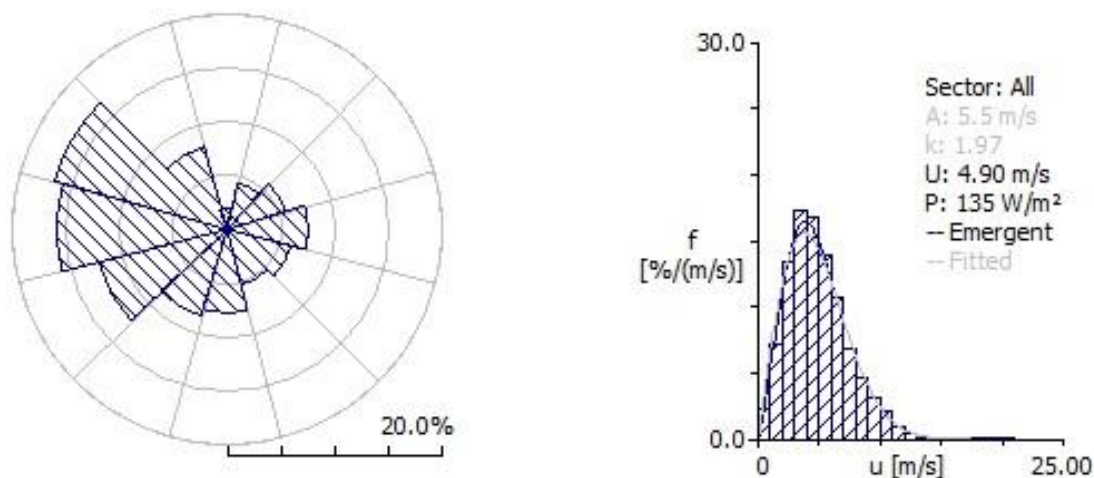
Slika 2-3 Uređaji za mjerenje na meteorološkom stupu [16]

Da bi podaci koji se dobiju modeliranjem u WAsP bili što točniji potrebno je nekoliko puta obići mjernu lokaciju. Kod obilaska bilo bi poželjno da se pomoću GPS uređaja zabilježi točna lokacija mjernog stupa i da se ako je to moguće kod svakog obilaska fotografira lokacija tj. teren oko lokacije kao bi se kasnije mogla izraditi što preciznija ruža hrapavosti terena oko lokacije samog mjernog stupa. Budući da anemometri i ostala mjerna oprema na lokaciji s vremenom gube svojstva navedena u specifikacijama potrebno je kod obilaska mjerne postaje provjeriti uređaje te ih po potrebi kalibrirati ili zamjeniti.

2.2. Unošenje meteoroloških podataka u WAsP

Meteorološki podaci se unose u WAsP u obliku *Observed wind climate* podataka, koji se sastoje od rasporeda smjera puhanja vjetra tzv. ruže vjetrova i raspodjele srednje brzine vjetra po učestalosti. OWC podaci bi također trebali sadržavati podatak o visini anemometra u metrima i lokaciju mjernog stupa, njegove geografske kordinate, širinu i dužinu. Geografska širina je potrebna WAsP kako bi mogao izračunati Coriolisov faktor. Brzina vjetra mora biti zadana u metrima po sekundi, a smjer vjetra u stupnjevima kod kojih 0° označava sjever, a stupnjevi rastu u smjeru kretanja kazaljke na satu. Uobičajeno se raspodjela vjetra po smjeru daje u 12 sektora

po 30°, a brzina je prikazana u dijagramu s rezolucijom od 1 m/s. Prikaz ruže vjetrova sa raspodelom od 30° i dijagram s rezolucijom brzina od 1 m/s nalazi se na idućoj slici 2-4.



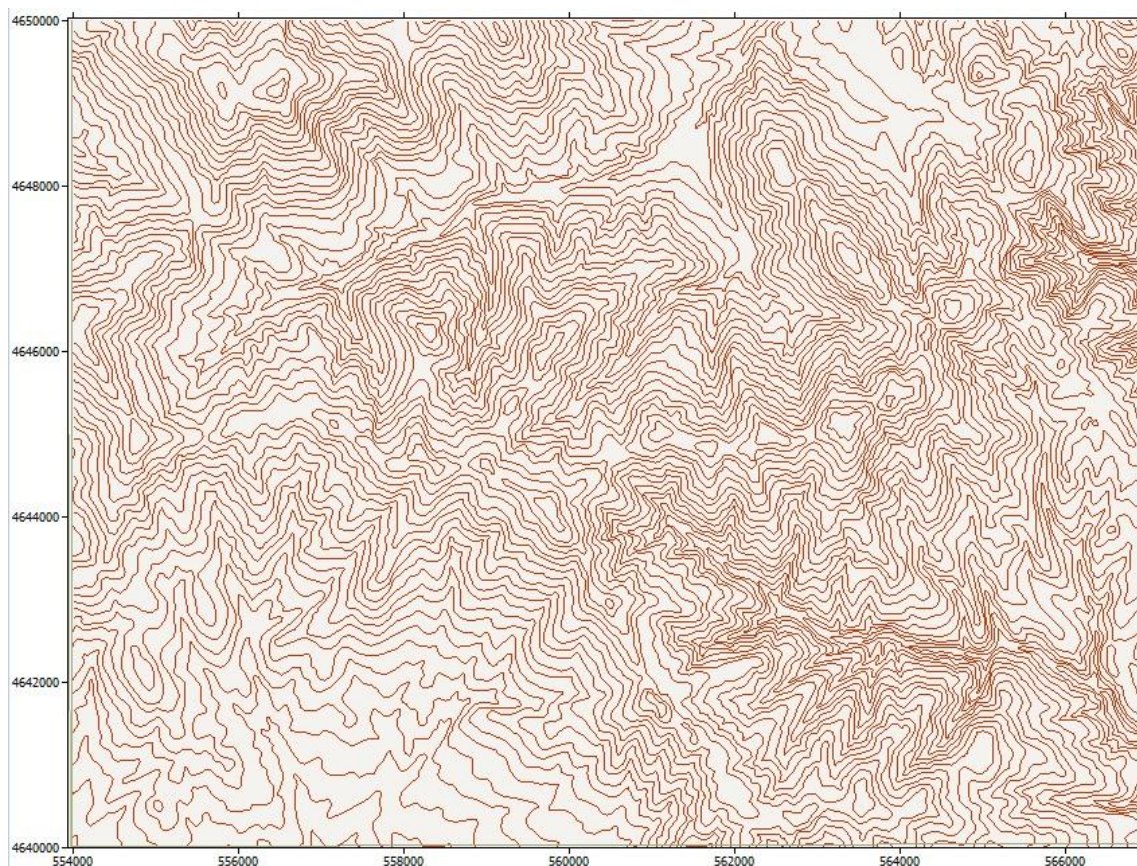
Slika 2-4 OWC ruža vjetrova i raspodjela brzine za *Waspdale airport* [17]

OWC treba predstavljati što je to bolje moguće dugotrajnu klimu vjetra na visini anemometra i na lokaciji na kojoj se nalazi meteorološki stup. Zbog toga se kod izračuna OWC trebaju koristiti podaci koji su prikupljeni kroz čitavu godinu ili kroz nekoliko godina kako bi se izbjegli sezonski utjecaji. Iz istoga razloga frekvencija prikupljenih podataka mora biti visoka tj. ne smije postojati dugotrajno razdoblje u kojem nisu prikupljeni podaci, a ako već postoje razdoblja za koje nema podataka bilo bi poželjno da su ravnomjerno raspoređena tijekom cijele godine. Podaci koji se prikupljaju za gradnju novih vjetroelektrana rijetko kada se prikupljaju duže od godine dana pa bih ih zbog toga trebalo usporediti sa podacima prikupljenim na meteorološkim postajama u blizini njihove lokacije. WASP koristi *Weibull* raspodjelu za prikaz brzine vjetra.

2.3. Topografija

Topografski podaci se unose u WASP u obliku vektorskih mapa, koje mogu sadržavati izohipse, linije kojima je opisana visina terena, linije kojima se opisuje hrapavost terena i linije koje ne sadrže nikakve podatke bitne za predviđanje u WASP kao npr. linije geografske širine i dužine, granica vjetroparka, granica županija itd. Uz to prepreke koje se nalaze u neposrednoj blizini turbine ili meteorološkog stupa moraju se posebno unijeti. Koordinate karte i podaci o visini terena moraju biti zadani u metrima i dani u Kartezijevom koordinatnom sustavu za karte. Podaci o projekciji karte moraju biti specificirani u *Map Editor* programu i ta informacija se mora nalaziti u datoteci karte. Svi ostali podaci koji se unose na kartu kasnije tijekom izrade modela moraju biti zadani u metrima. *Map Editor* je program koji dolazi s WASP i koristi se za obradu karti i transformaciju iz različitih koordinatnih sustava u Kartezijev koordinatni sustav za karte.

Topografska karta koja sadrži linije kojima je opisana visina terena može se dobiti iz skeniranih papirnatih karti, direktno u digitalnom obliku iz Katastra ili sličnih ustanova ili se može generirati iz snimaka satelita pomoću raznih računalnih programa koji se koriste za obradu karti. Jedna takva karta prikazana je na slici 2-5. Topografska karta treba obuhvaćati područje koje je nekoliko puta udaljenije od vjetroturbine nego što je njezina visina. Općenito se uzima da karta mora pokrivati područje koje je 10 kilometara udaljeno od lokacije vjetroturbine ili područje koje je 100 puta veće od njezine visine. Karte koje nisu pravokutne, nego su eliptične, okrugle ili nekog nepravilnog oblika također se mogu koristiti u WAsP i to nema nikakvog utjecaja na točnost rezultata.

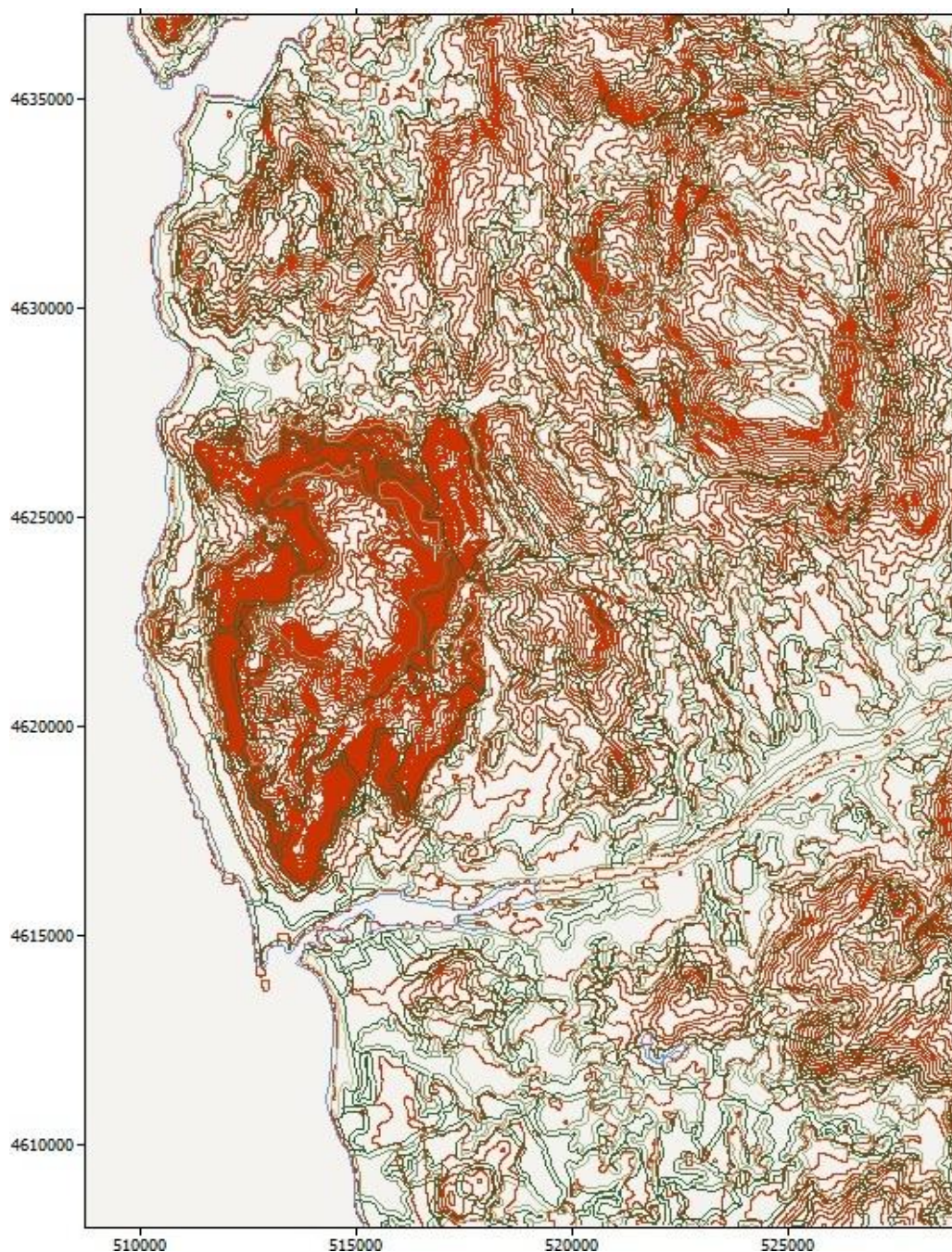


Slika 2-5 Karta kompleksnog terena primjer iz WAsP [17]

Nakon što se izradi vektorska karta koja je pogodna za korištenje u WAsP potrebno je izvršiti kontrolu da se vidi da li je možda došlo do nekih pogrešaka kod stvaranja karte. To se najbolje može provesti tako da se pogleda raspon visina na karti i tako da se karta usporedi sa papirnatom topografskom kartom tog područja.

2.4. Hrapavost terena i prepreke

Drugi tip podataka koji je potrebno unijeti u WAsP su podaci o hrapavosti površine koja se dijeli u nekoliko kategorija, a za svaku kategoriju postoji specifična dužina hrapavosti terena izražena u metrima. Linije koje omeđuju svaku pojedinu zonu hrapavosti terena mogu se prenijeti u digitalni oblik, koji WAsP može učitati, iz skeniranih papirnatih karti, avionskih fotografija terena ili iz satelitskih fotografija pomoću *Map Editor* programa. Također podatke o hrapavosti terena moguće je dobiti iz već digitaliziranih podataka koje bi za određeni teren trebale imati institucije poput Katastra.



Slika 2-6 Karta s linijama hrapavosti terena i izohipsama [17]

U teoriji bi se karte na kojima se nalaze podaci o hrapavosti terena trebale prostirati u radijusu 100 puta većem od visine turbine ili meteorološkog stupa za koji se provodi proračun u WAsP. To se nije pokazalo kao dovoljno pa se taj radijus dodatno povećava za otprilike 50% tako da se za turbinu čiji je stup visok 80 metara pokazalo da karta koja sadrži podatke o hrapavosti terena mora biti dimenzija 25x25 km². Dužina hrapavosti mora biti izražena u metrima, a hrapavost vodene površine mora biti namještena na vrijednost 0,0 m. Karta na kojoj su ispravno unesene linije hrapavosti terena i koja sadrži i topografiju terena prikazana je na slici 2-6. Na njoj su linije topografske visine prikazane crvenom bojom, linije koje označavaju hrapavost 0 tj. da se radi o morskoj površini prikazane su plavom bojom, a zelene linije koje imaju gradaciju od svjetlijih prema tamnijima označavaju različite hrapavosti. Svjetlije zelena označava malu hrapavost, a tamnija veću hrapavost.

Nakon izrade karte hrapavosti terena tu kartu potrebno je provjeriti u *Map Editor* tj. provjeriti da li dolazi do ispreplitanja linija različiti hrapavosti i da li se svaka linija zatvara u konturu, ne smije biti otvorenih kontura. Kao završni pregled kartu bi trebalo pregledati vizualno tj. usporediti je sa kartama tog područja ili sa satelitskim snimkama tog područja. Također kartu se može provjeriti tako da se posjeti lokacija za koju je karta izrađena. Budući da se Zemljina površina konstantno mijenja karte koje se koriste za modeliranje u WAsP trebaju odgovarati onom vremenu u kojem su prikupljeni mjerni podaci na meteorološkom stupu, a kod predviđanja proizvodnje električne energije potrebno je koristiti karte koje odgovaraju sadašnjem ili budućem stanju tog terena.

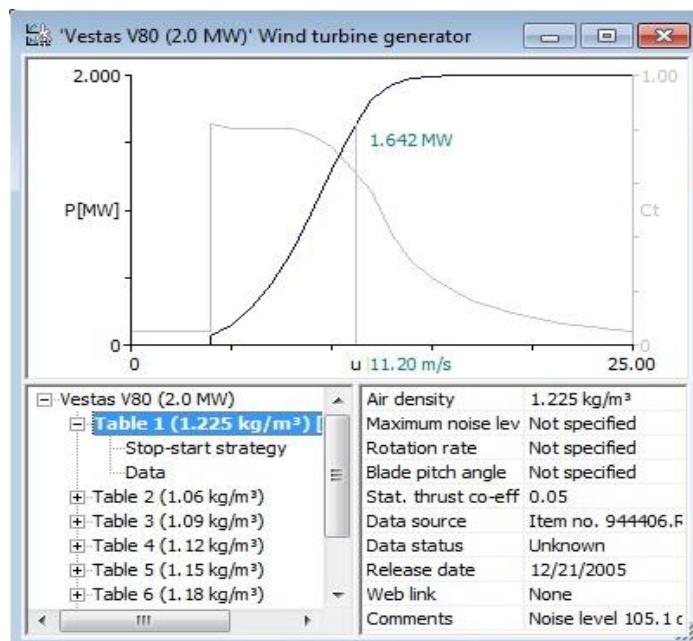
Prepreke koje se nalaze u neposrednoj blizini lokacije koja se proračunava u WAsP poput zgrada, visokih skupina stabala, kuća, ostalih objekata koji svojom visinom mogu utjecati na parametre vjetra u WAsP se unosi u posebnoj kategoriji koja se naziva *Sheltering obstacles*. Za raspodjelu između prepreka i hrapavosti terena koriste se dva pravila:

- Ako je lokacija za koju se vrši proračun bliže prepreci od 50 visina te prepreke i njezina visina je niža nego 3 visine te prepreke onda se ta zapreka unosi kao *Sheltering obstacle*.
- Ali ako je udaljenost veća od 50 visina te prepreke i (ili je) proračunska lokacija viša od 3 visine prepreke nju se modelira kao hrapavost terena

2.5. Modeliranje vjetroelektrane i odabir vjetroagregata

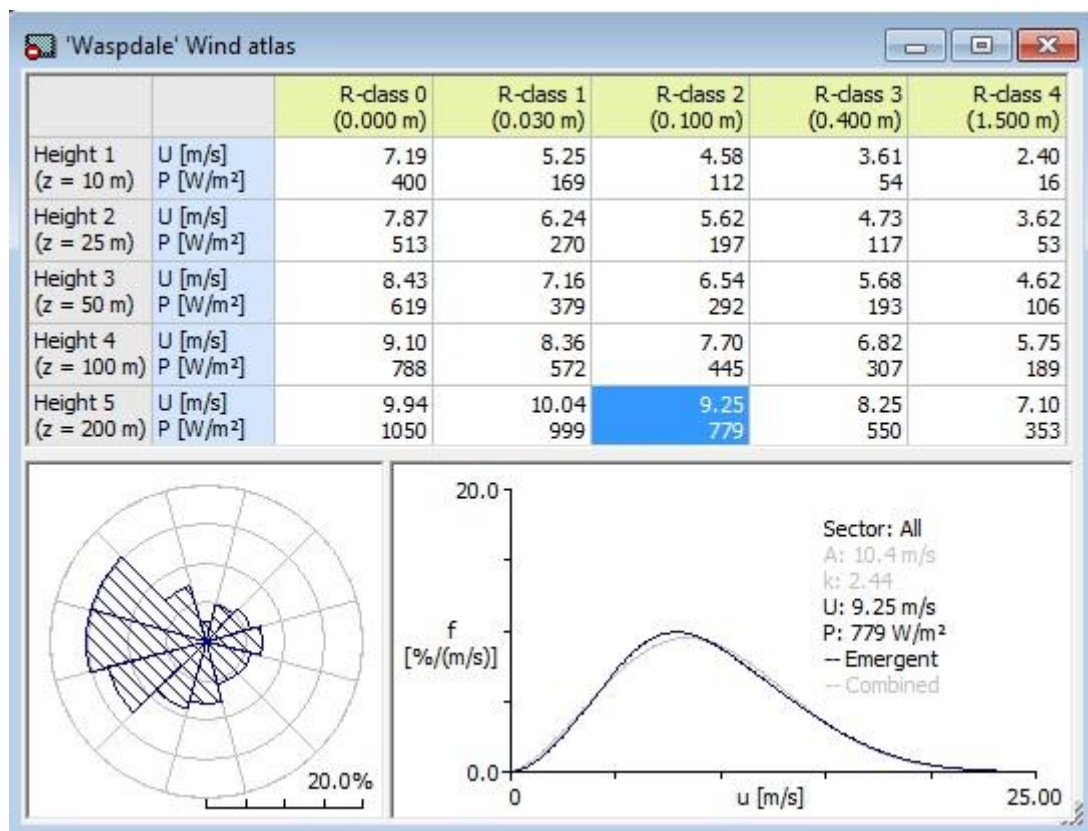
Unos vjetroelektrane u WAsP sastoji se od unosa kordinata svake pojedine vjetroturbine od koje se sastoji vjetroelektrana i karakteristika vjetroagregata: visine stupa, promjera rotora i krivulje

snage turbine kod određene gustoće zraka i brzine vjetra. Budući da u WAsP ne postoji neki alat za izradu vjetroelektrane, lokacija svake turbine se mora ručno unijeti ili proračunati npr. pomoću MS Excel programa. Da bi se olakšao ručni unos turbina može se pomoću Ctrl tipke i lijevog klika miša jednostavno postojeća turbina na karti klonirati na neku drugu lokaciju. Na karti je moguće uključiti opciju da se vide krugovi oko svake turbine da bi se u modelu mogla zadržati dovoljna udaljenost jedne turbine od druge.



Slika 2-7 Vjetroagregat Vestas V80 snage 2MW [17]

Kada se računa proizvodnja električne energije za neku lokaciju treba koristiti vjetroagregat koji će se kasnije postaviti na tu lokaciju da bi krivulja snage koja se koristi za proračun odgovarala stvarnoj krivulji. U WAsP postoji ponuda različitih vjetroagregata za koje postoje podaci o krivulji snage, tablice u kojima su date vrijednosti koje odgovaraju određenoj gustoći zraka i podaci o količini buke za tu situaciju. Primjer jednog od vjetroagregata koji su nam ponudeni u WAsP prikazan je na slici 2-7. Vjetroagregat sa slike ima radno područje između 4 i 25 m/s. Maksimalnu proizvodnju električne energije postiže kod 16 m/s, a krivulja snage izrađena je za gustoću zraka od 1.225 kg/m³. U tablici se mogu vidjeti različiti podaci poput visine stupa, promjera rotora, godine proizvodnje, razine buke, itd. Ako nemamo podatke za vjetroagregat koji ćemo koristiti potrebno je te podatke zatražiti od proizvođača.



Slika 2-8 Standardni atlas vjetra primjer iz WAsP [17]

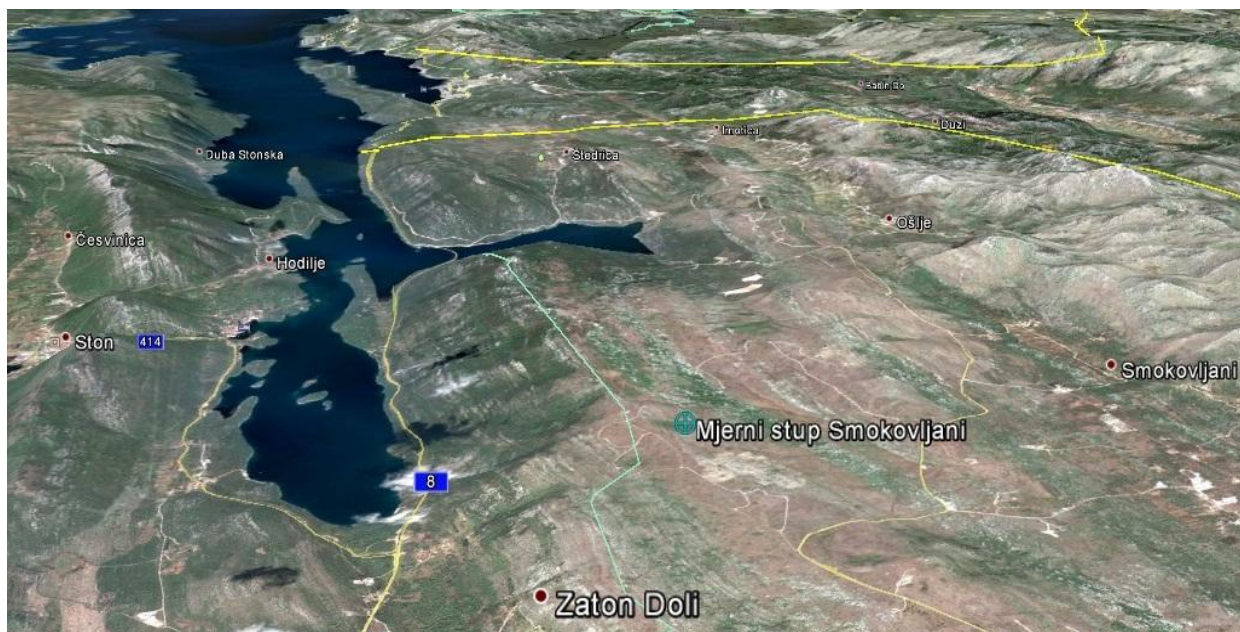
Prije završetka pregleda unosa podataka u WAsP potrebno je još spomenuti da postoje još neke mogućnosti promjene parametara prije početka samog proračuna. U WAsP je moguće promijeniti gustoću zraka i namjestiti je na vrijednost koja odgovara vrijednostima specifičnim za tu lokaciju. Također kod izrade generaliziranog atlasa vjetra za neku lokaciju moguće je promijeniti visine za koje se atlas računa i hrapavosti terena za koje će se atlas izračunati sukladno s parametrima koji odgovaraju situaciji na terenu. Budući da standardni atlas vjetra ima podjelu na 12 sektora postoje neki slučajevi u kojima ta podjela ne zadovoljava pa je također moguće izmjeniti broj sektora. Standardni atlas vjetra nalazi se prikazan na slici 2-8 na kojoj vidimo da se atlas sastoji od tri dijela, mreže podijeljene na 15 poglavlja sa različitim visinama iznad tla i hrapavostima terena, podjele smjera vjetra u ruži vjetrova i grafa u kojem je prikazana ovisnost frekvencije i brzine vjetra. U svakom od 15 pravokutnika od kojih se sastoji mreža prikazana je srednja brzina vjetra i gustoća snage vjetra za pojedinu hrapavost terena i brzinu iznad tla. Iz ruže vjetrova se vidi da je prevladavajući smjer vjetra zapadni, a u dijagramu je prikazana emergentna raspodjela (crna linija) koja predstavlja ponderiranu sumu *Weibull* raspodjela po sektorima i kombinirana *Weibull* raspodjela (siva linija).

3. Primjena metodologije

Kod proračuna godišnje proizvodnje električne energije pokušavalo se pratiti metodologiju iz drugog poglavlja međutim kod primjene su se dogodile neke prilagodbe.

3.1. Meteorološka mjerenja i izrada OWC

Prikupljanje meteoroloških podataka obavljeno je na lokaciji Smokovljani [18] koja se nalazi u općini Dubrovačko primorje u blizini grada Stona. Točne kordinate na kojima se nalazi meteorološki stup su $42^{\circ}50'42,3''$ sjeverne geografske širine i $17^{\circ}45'26,5''$ istočne geografske dužine, a visini na kojoj je postavljen je 323,5 metara nadmorske visine. Lokacija mjernog stupa koja odgovara ovim kordinatama prema programu *Google Earth* prikazana je na slici 3-1. Da li ta lokacija odgovara stvarnoj lokaciji stupa trebalo bi provjeriti posjetom mjernoj lokaciji i snimanjem stvarnog stanja na terenu. Prema [18] na stup su bili postavljeni uređaji za mjerenje brzine i smjera vjetra, uređaji za mjerenje temperature zraka, temperature tla, sunčeva zračenja, tlaka zraka, vlažnosti zraka te količine padalina. Uređaj koji je bilježio sve podatke je *Geolog SG datalogger* koji je proizveo *Logotronic GmbH*. Mjerni uređaji su spojeni na *Geolog SG datalogger* pomoću *Geolog* mjernog sučelja. Mjerni uređaji i uređaj za sakupljanje podataka napajani su pomoću PV panela sa baterijama, a podaci su snimani za 10 minutni period, a prikupljeni su svakih 250 ms.



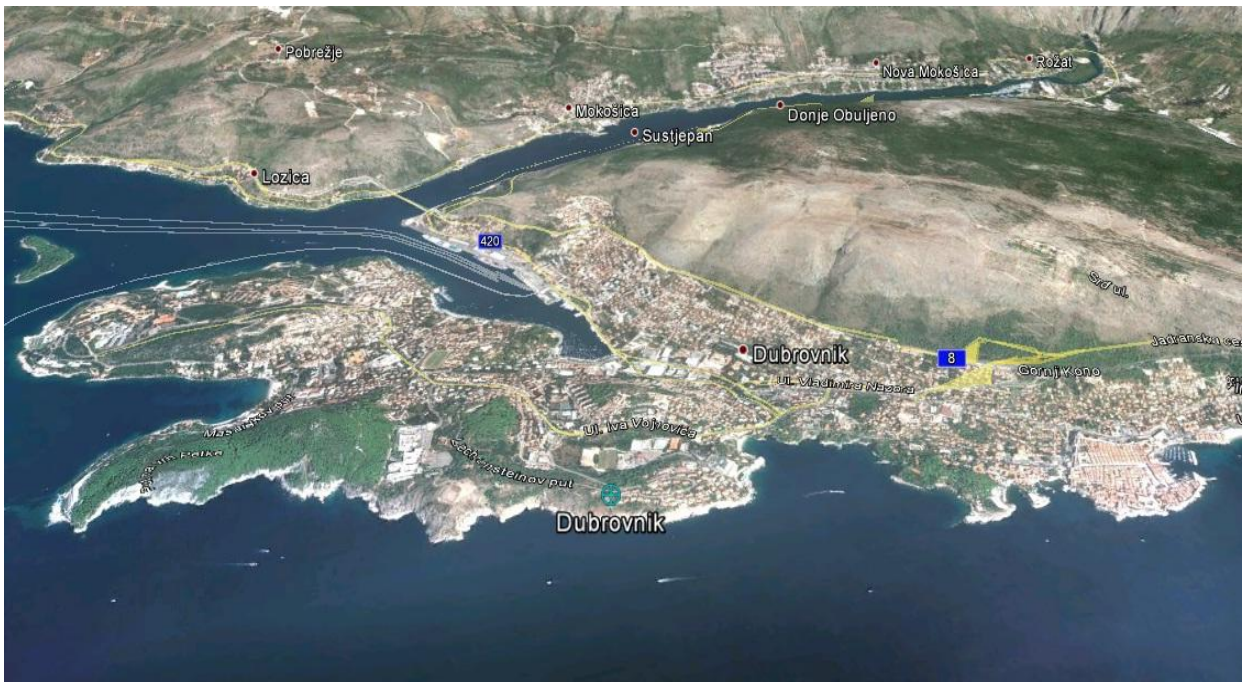
Slika 3-1 Lokacija mjernog stupa Smokovljani prikazana u *Google Earth*

Za provedbu ovog proračuna nama su bili potrebni podaci za smjer i brzinu vjetra te podaci o temperaturi i vlažnosti zraka kao bi se mogla izračunati njegova gustoća. Brzina vjetra je mjerena na visinama od 10, 30, 44 i 46 metara iznad tla. Mjerni uređaj koji je mjerio brzinu vjetra je *Thies Clima First Class* koji je kalibriran prema *MEASNET*. Zabilježene su minimalne, srednje i maksimalne brzine vjetra za 10 minutni period. Smjer vjetra je mjereno na visinama od 10 i 44 metra pomoću istog uređaja koji je mjerio brzinu vjetra, a bilježen je srednji smjer vjetra u 10 minutnom periodu. Vlažnost i temperatura zraka su mjerene pomoću *Rotronic Air Humidity* i *Air Temperature Sensor Hydroclip* mjernih uređaja također za 10 minutne periode.

S obzirom da se u WAsP moraju unijeti upareni podaci o brzini i smjeru vjetra za izradu OWC tipa podataka bilo je moguće iskoristiti podatke koji su izmjereni na istoj visini, a to su podaci za 44 metra visine i podaci za 10 metara visine. Iako smo za brzinu vjetra imali još nekoliko mjerenja nismo ih mogli iskoristiti jer za te brzine nismo imali smjerove vjetra. S obzirom da se kod izrade OWC ne mogu unijeti podaci za dvije različite visine odlučeno je da se koriste podaci prikupljeni na 44 metra visine jer oni točnije opisuju uvjete koji se nalaze na visinama na kojima se nalazi rotor turbine, otprilike između 60 i 90 metara. Detaljnija analiza vertikalne raspodjele vjetra nije bila moguća u dostupnom softverskom paketu. U WAsP su uneseni podaci mjereni za 2008. godinu, međutim u 1. i 2. mjesecu 2008. godine nije radio pokazivač smjera vjetra pa su ti podaci zamijenjeni podacima od prva dva mjeseca 2009. godine i tako uneseni u WAsP.

Dodatno su dobiveni podaci od Državnog hidrometeorološkog zavoda sa meteorološke stanice Dubrovnik mjereni na 10 metara visine koji su korišteni za usporedbu proizvodnje električne energije s proizvodnjom kada su korišteni podaci sa mjerne postaje Smokovljani. Lokacija meteorološke stanice je 42°38'41" sjeverne geografske širine i 18°5' 6" istočne geografske dužine i prema *Google Earth* prikazana je na slici 3-2. Na lokaciji su mjereni skalarni srednjak brzine vjetra, prevladavajući smjer vjetra, maksimalna brzina vjetra, smjer uz maksimalnu brzinu vjetra, vrijeme maksimalne brzine vjetra, terminska brzina vjetra i smjer uz terminsku brzinu vjetra. Podaci su bilježeni u periodu od 10 minuta. Od ovih podataka za izradu OWC su korišteni podaci za skalarni srednjak brzine vjetra i prevladavajući smjer vjetra, a odabrani su podaci za isti period kao i kod mjerne postaje Smokovljani.

Mjerni stup smokovljani nalazi se na visoravni u općini Dubrovačko primorje. Zračna udaljenost stupa od najbliže morske obale je otprilike 3 kilometra, to je udaljenost do Malostonskog zaljeva, a zračna udaljenost do otvorenog mora je otprilike 20-etak kilometara. Za usporedbu, lokacija mjernog stupa Dubrovnik prema *Google Earth* nalazi se u gradu Dubrovniku blizu morske obale.

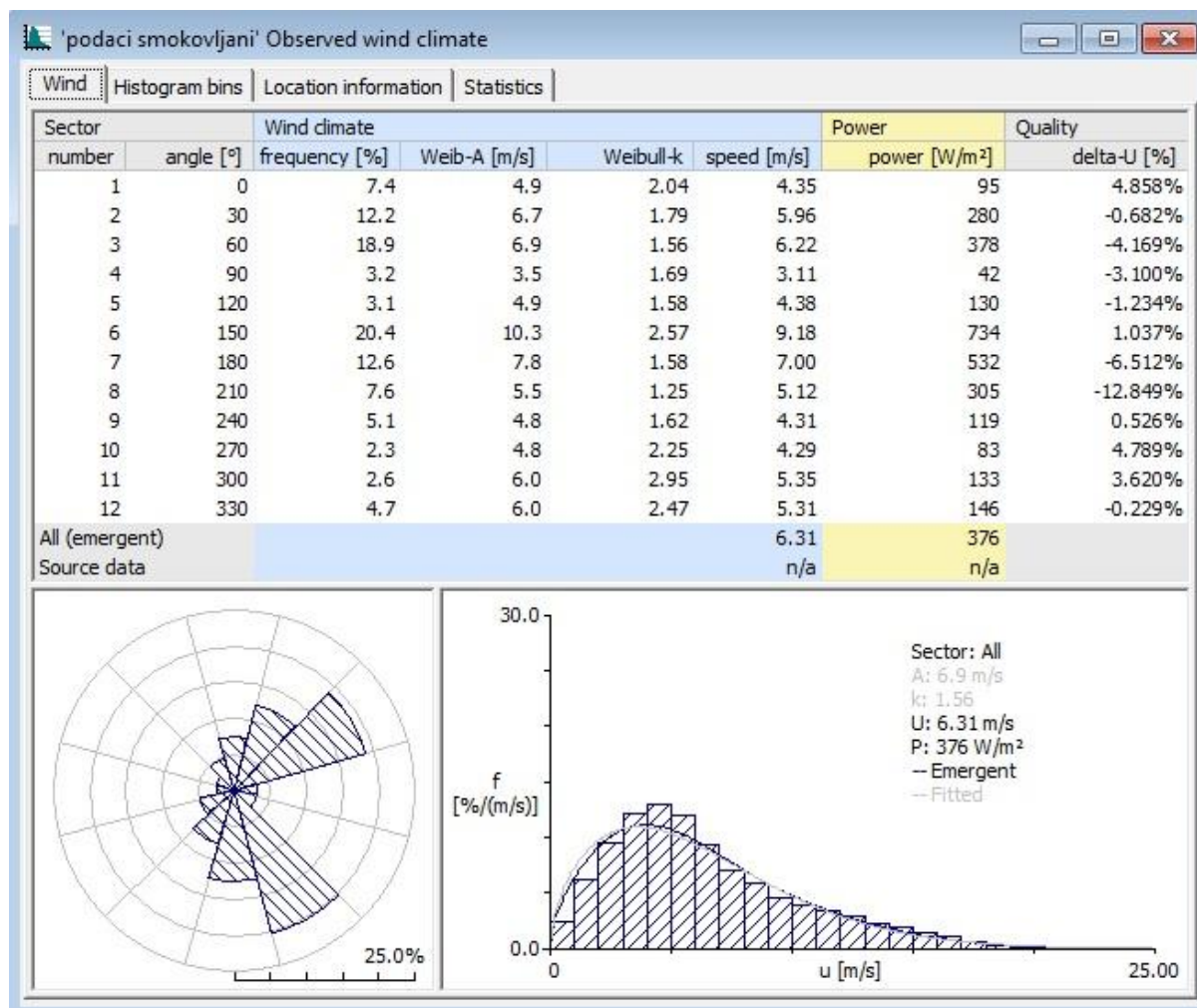


Slika 3-2 Lokacije mjerne postaje Dubrovnik u *Google Earth*

Meteorološki podaci se prije unošenja u WAsP moraju obraditi. Za ovaj slučaj podaci su obrađivani u alatu koji je sastavni dio WAsP, a naziva se *OWC Wizard*. Ovaj program podatke iz txt, tab ili nekog drugog formata prebacuje u OWC format koji je moguće unijeti u WAsP. Nakon pokretanja *OWC Wizard* potrebno je slijediti jednostavne upute kako bi se podaci konvertirali iz txt formata, u našem slučaju, u owc format. Prvi korak je unos visine, lokacije i imena mjerne postaje. U drugom koraku potrebno je povući podatke iz datoteke u kojoj su spremljeni i podijeliti podatke na dva stupca, stupac brzine i stupac smjera. Nakon toga moguće je odbaciti pojedine parove podataka ili koristiti samo određeni dio podataka za daljnju izradu OWC datoteke. U idućem koraku moguće je odbaciti sve brzine niže od neke koju mi smatramo da je preniska i pretvoriti ih u nule, također je moguće skalirati smjerove i brzine. Nakon toga se odbacuju svi podaci koji se nalaze izvan zadanih granica, a za ovaj slučaj su granice za brzinu bile od 0 do 25 m/s, a za smjer vjetra od 0° do 360°. I tako je završen prvi set podataka pa nam program nudi da unesemo još podataka za tu lokaciju i visinu što naravno možemo, ali ne moramo. Idući korak je podjela ruže vjetrova na sektore i nakon što to odaberemo dobili smo podatke za vjetar koji se mogu unijeti u WAsP i koristiti za izradu atlasa vjetra. Na slici 3-3 nalazi se prikaz OWC podataka za mjernu lokaciju Smokovljani na 44 metra visine.

Isti postupak obrade podataka korišten je i za podatke dobivene od Državnog hidrometeorološkog zavoda sa meteorološke postaje Dubrovnik. Ti podaci prikazani su na slici 3-4. Iz usporedbe ovih podataka vidljivo je da su sektori s najviše vjetra za Smokovljane 3 i 6, a kod meteorološke postaje Dubrovnik to su 5 i 6 sektor. Što znači da su prevladavajući smjerovi

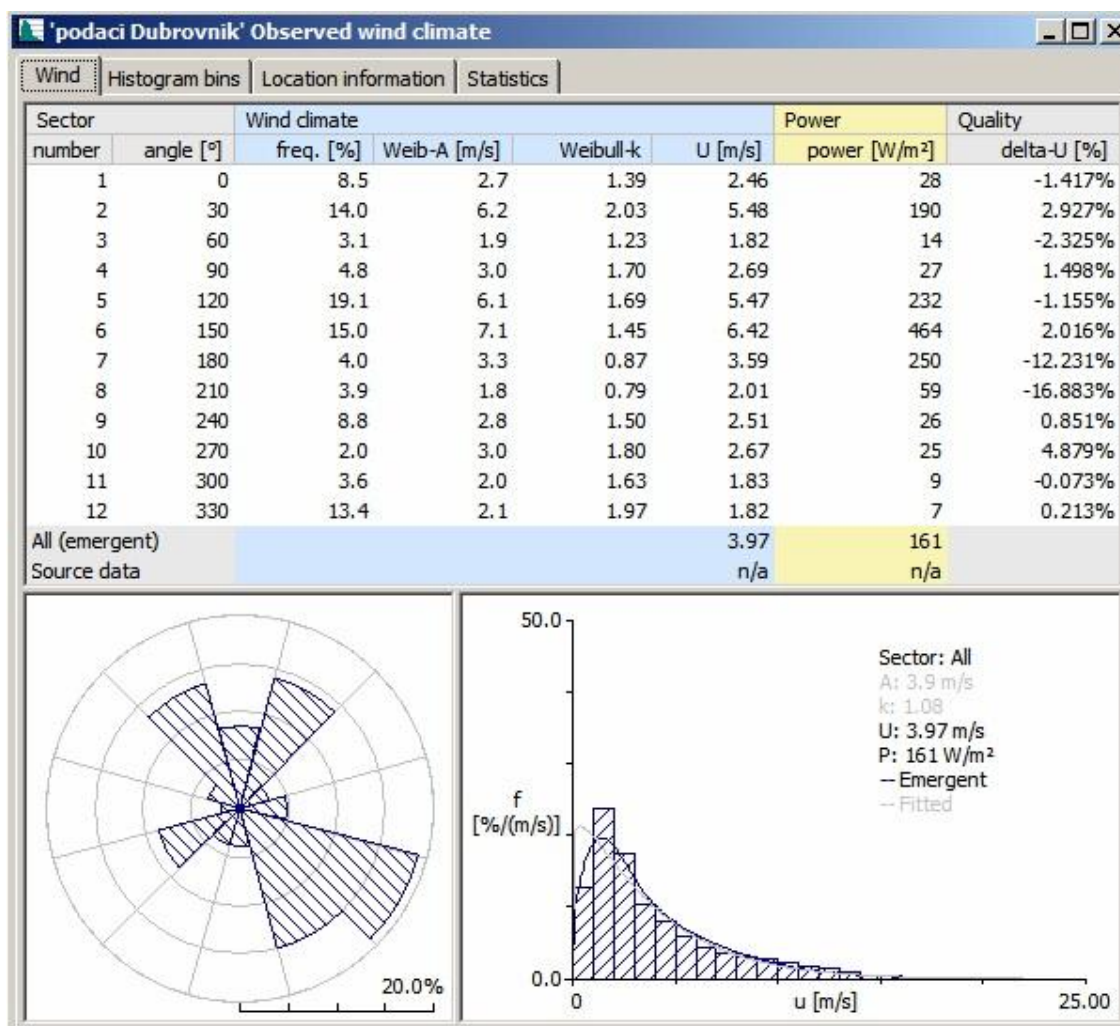
vjetra za Smokovljane jugoistočni i sjeveroistočni, a za Dubrovnik jugoistočni i sjeverni. Također može se uočiti da je srednja brzina vjetra dvostruko manja za Dubrovnik nego za Smokovljane, ali jedan od razloga zbog kojeg je to tako je da su podaci za Smokovljane bilježeni na 44 metra visine, a za Dubrovnik na 10 metara visine.



Slika 3-3 OWC za mjernu lokaciju Smokovljani na 44 metra visine

OWC prozor se sastoji od pet mogućih prozora, nama prozor *Generation report* nije dostupan jer u ovoj verziji programa nije nam bio dostupan pomoćni alat *WASP Climate Analyst* za obradu podatka o brzini i smjeru vjetra. U prvom prozoru naziva *Wind* prikazani su po sektorima (u ovom slučaju njih 12) između kojih stupnjeva se nalazi pojedini sektor, frekvencija vjetra, *Weibull-A* i *Weibull-k* parametar, srednja brzina vjetra, gustoća energije vjetra i *Quality* tj. *delta-U* vrijednost u % koja predstavlja razliku između srednje brzine izračunate iz *Weibull* raspodjele i srednje brzine vjetra izračunate iz histograma. Srednja brzina vjetra i gustoća snage vjetra za sve sektore prikazane su ispod prikaza po sektorima. U doljem lijevom kutu nalazi se ruža vjetrova na kojoj se može klikom miša na pojedini sektor u prostoru gdje se nalazi dijagram

za sve sektore prikazati dijagram za taj sektor. U dijagramu je prikazan histogram frekvencija brzina vjetra za mjernu lokaciju i *Weibull* krivulja.



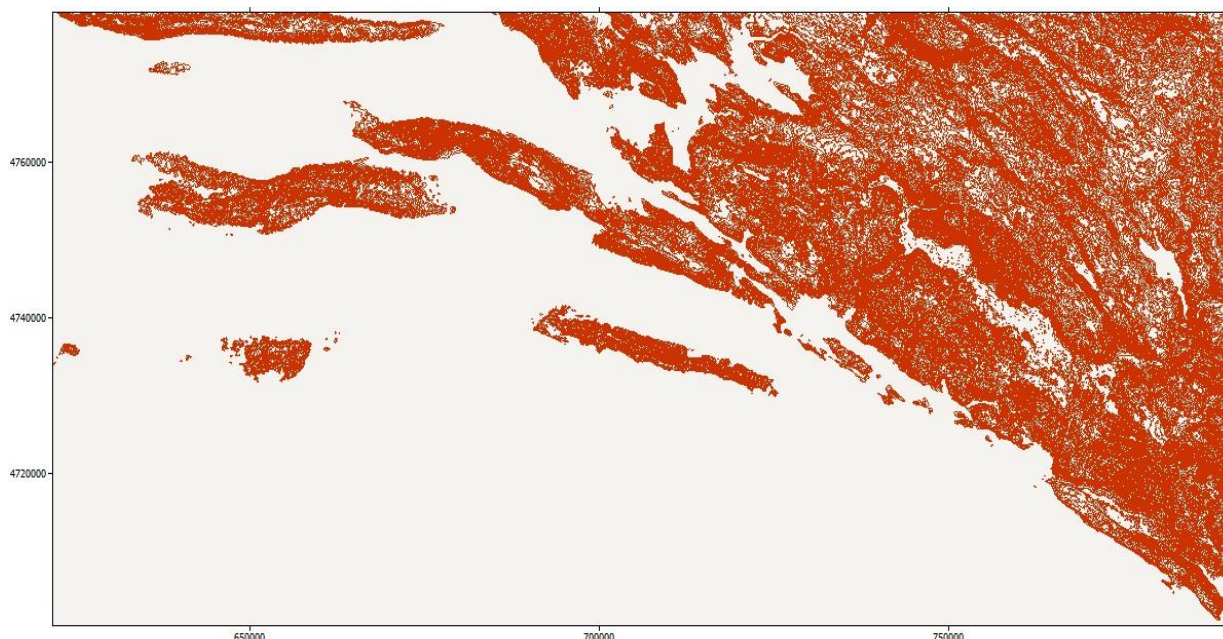
Slika 3-4 OWC za meteorološku postaju Dubrovnik na 10 metara visine

U prozoru *Histogram bins* prikazane su frekvencije brzine vjetra u promilima za svaki sektor i ukupno. U *Location information* prozoru nalaze se podaci o mjernoj lokaciji, visina lokacije i geografske koordinate, a u prozoru *Statistics* prikazane su statistike brzine vjetra prema različitim načinima računanja za sve sektore ukupno.

3.2. Topografija, hrapavost terena i prepreke

Topografska karta za područje Dubrovačko-neretvanske županije izrađena je pomoću programa *Global Mapper 11*. Podaci o topografiji terena preuzeti su iz *ASTER GDEM Worldwide Elevation Data* za područje od 42°23'48" do 43°9'39" sjeverne geografske širine i od 16°28'27" do 18°34'42" istočne geografske dužine. Budući da se radi o jako velikom području odabran je razmak od 25 metara između linija koje označavaju visinu terena tj. izohipsi. Topografska karta

koja je korištena tijekom izrade generaliziranog atlasa vjetra i proračuna godišnje proizvodnje električne energije prikazana je na slici 3-5.



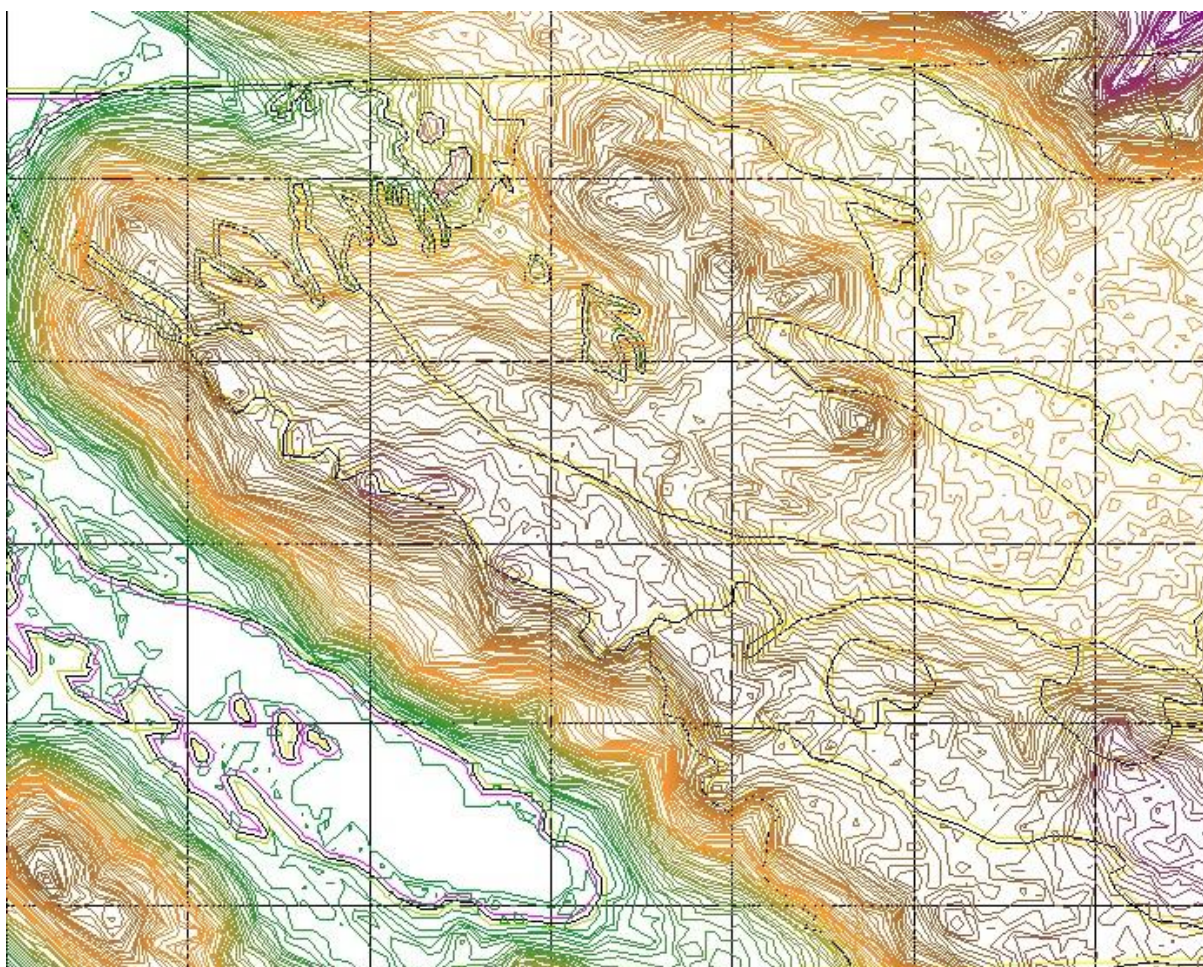
Slika 3-5 Topografska karta Dubrovačko-neretvanske županije

Budući da se radilo o jako velikom području, a nije nam bila dostupna digitalizirana karta hrapavosti terena, a proces njene izrade je poprilično dugotrajan, hrapavost terena za cijelu kartu pretpostavljena je u WASP i zadana na vrijednost 0,09 metara. Prepreke tj. kuće, zgrade, visoka stabla i slično nisu uzete u obzir kod izrade ovog modela.

Tablica 3-1 Klase hrapavosti terena [10]

Klasa hrapavosti	Dužina hrapavosti	Karakteristike okoliša
0	0,0002	Vodena površina
0,5	0,0024	Posve otvoreno područje glatke površine (betonska pista, pokošena trava)
1	0,03	Otvoreno poljoprivredno zemljište bez ograda, vrlo rijetke građevine, glatki brežuljci
1,5	0,055	Poljoprivredno zemljište sa nekoliko zgrada, okruženo raslinjem visokim 8 m na udaljenosti od oko 1250 m
2	0,1	Poljoprivredno zemljište sa nekoliko zgrada, okruženo raslinjem visokim 8 m na udaljenosti od oko 500 m
2,5	0,2	Poljoprivredno zemljište sa zgradama i biljkama ili ograda od raslinja visokog 8 m na udaljenosti od oko 250 m
3	0,4	Selo, mali grad, poljoprivredno zemljište sa većim brojem živica ili visokim živicama, šumama i vrlo neravnim terenom
3,5	0,8	Veći gradovi sa visokim zgradama
4	1,6	Vrlo veliki gradovi sa visokim zgradama i neboderima

U ovom radu korištena je još jedna karta kod detaljnije analize godišnje proizvodnje električne energije na jednoj lokacije vjetroelektrane u Dubrovačko-neretvanskoj županiji. Odabrana je lokacija VE Dubrovačko primorje u blizini grada Stona zbog blizine mjerne lokacije Smokovljani. Zbog toga je izrađena detaljnija topografska karta lokacije na kojoj je razmak između topografskih linija 5 metara. Za izradu je korišten program *Global Mapper 11*, kao i u prethodnom slučaju, a podaci o visini terena su preuzeti iz *ASTER GDEM Worldwide Elevation Data*. Ovom kartom je obuhvaćeno područje od 42°48'23,8" do 42°52'45,6" sjeverne geografske širine i od 17°42'8,3" do 17°47'18,6" istočne geografske dužine.



Slika 3-6 Karta koja sadrži linije hrapavosti i topografske linije za područje VE Dubrovačko primorje

Karta hrapavosti terena izrađena je prema tablici 3-1. Postupak se sastoji od nekoliko koraka od kojih je prvi sinkronizacija topografske karte sa programom *Google Earth* te kopiranja tog dijela terena iz *Google Earth* kao pozadinske slike za topografsku kartu. Kada se iskopira slika potrebno ju je snimiti u nekom slikovnom formatu npr. bmp i nakon toga ju učitati kao pozadinsku kartu u program *Map Editor* koji je pomoćni program za WAsP. Ovakvim

postupkom izrade pozadinske karte ona sadržava podatke o kordinatnom sustavu i globalnim kordinatama.

U *Map Editor* programu kartu je moguće digitalizirati i snimiti u obliku u kojem ju je moguće učitati u WAsP. Digitalizacija karte sastoji se od crtanja linija koje dijele pojedine zone hrapavosti i zadavanja iznosa hrapavosti svakoj zoni. Posljednji korak u izradi karte na kojoj se nalaze i topografske linije i linije hrapavosti terena je spajanje zasebne topografske karte i karte hrapavosti terena u jednu. Karta korištena za izračun godišnje proizvodnje električne energije za VE Dubrovačko primorje na kojoj se nalaze i topografske linije i linije hrapavosti terena prikazana je na slici 3-6. Linije zelene boje označuju nizinsko područje, narančaste linije prijelazno područje, a smeđe linije područje iznad 300 metara nadmorske visine. Linije koje dijele područja različite hrapavosti prikazane su crnom bojom i usporedno s njima nalaze se linije različitih boja koje označuju različite hrapavosti. Ljubičasta boja označava hrapavosti oko nule, žuta boja između 0,03 i 0,1, a zelena od 0,1 naviše. Prepreke koje se nalaze na terenu niti u ovom slučaju nisu uzete u obzir.

3.3. Odabir lokacije vjetroelektrana [14]

Lokacije vjetroelektrana koje je trebalo unijeti u prvom dijelu zadatka nalaze se u registru projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP). Registar vodi Odjel za obnovljive izvore energije Ministarstva gospodarstva, rada i poduzetništva i u njemu se nalaze svi proizvođači energije koji su u sustavu poticanja odnosno u procesu stjecanja statusa povlaštenog proizvođača. Registar OIEKPP je jedinstvena i aktualna evidencija o projektima obnovljivih izvora energije i kogeneracije u Republici Hrvatskoj, postrojenjima koja koriste obnovljive izvore energije, odnosno kogeneracijskim postrojenjima te povlaštenim proizvođačima na području Republike Hrvatske.

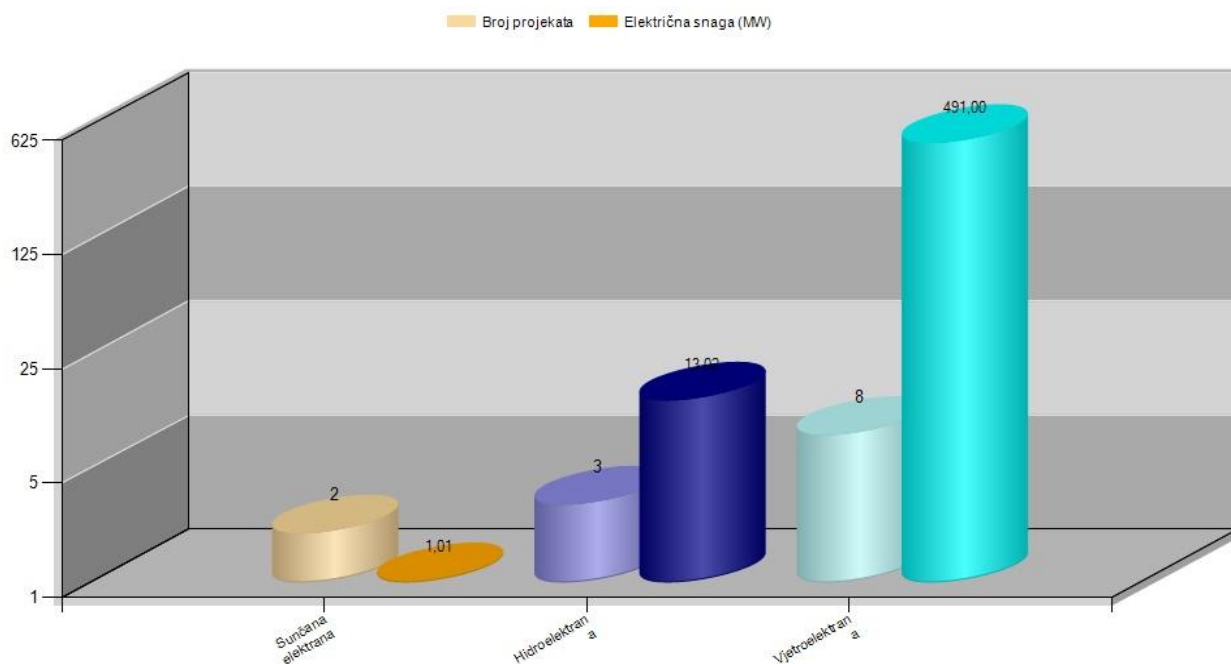
U Registru OIEKPP se vodi evidencija o nositelju projekta, povlaštenom proizvođaču električne energije i postrojenju, koji uključuju podatke o lokaciji i tipu postrojenja, tehničko-tehnološkim značajkama i uvjetima korištenja ovisno o primijenjenoj tehnologiji, osnovnim pogonskim podacima (instalirana snaga postrojenja te planirana proizvodnja električne i toplinske energije) te drugim podacima iz prethodnog energetskeg odobrenja i energetskeg odobrenja, prethodnog rješenja i rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije (lokacija, geodetske točke, rokovi, dužnosti i sl.).

Tablica 3-2 Popis vjetroelektrana za Dubrovačko-neretvansku županiju [21]

Naziv projekta	Nositelj projekta	Županija	Lokacija	Električna snaga
(Project)	(Project coordinator)	(County)	(Location)	(Electrical capacity [MW])
VE Rudine	VJETROELEKTRANA RUDINE d.o.o.	Dubrovačko-neretvanska	Dubrovačko primorje (sjedište Slano)	70
VE Dubrovačko Primorje	CANNON LIBERTAS CO d.o.o.	Dubrovačko-neretvanska	Dubrovačko primorje (sjedište Slano)	125
VE Konavle	CANNON LIBERTAS CO d.o.o.	Dubrovačko-neretvanska	Konavle (sjedište Cavtat)	120
VE Bila Ploča	WPD ENERSYS d.o.o.	Dubrovačko-neretvanska	Orebić	33
VE Ponikve	VJETROELEKTRANA PONIKVE d.o.o.	Dubrovačko-neretvanska	Ston	34
VE Mravinjac	VE MRAVINJAC d.o.o. za proizvodnju energije	Dubrovačko-neretvanska	Dubrovačko primorje (sjedište Slano)	57
VE "Ćučin 30 MW"	KAMEN UKRAS društvo s ograničenom odgovornošću za poslovanje nekretninama i usluge	Dubrovačko-neretvanska	Orebić	30
VE Rujnica	HYPERBOREA, d.o.o.	Dubrovačko-neretvanska	Kula Norinska	22
8	7			491

Registar je javno objavljen na stranicama Ministarstva u obliku strukturiranih izvještaj-tablica i grafičkom obliku. Sve vjetroelektrane u Registru OIEKPP za Dubrovačko-neretvansku županiju prikazane su u tablici 3-2. Također na slici 3-7 može se vidjeti raspodjela svih obnovljivih izvora energije koji se nalaze u registru, broj postrojenja i njihova električna snaga za područje Dubrovačko-neretvanske županije. Iz tog prikaza se može zaključiti da većinu planiranih postrojenja obnovljivih izvora energije u Dubrovačko-neretvanskoj županiji čine

vjetroelektrane. U sklopu registra postoji još i interaktivna karta Hrvatske na kojoj su ucrtani svi obnovljivi izvori energije koji se nalaze u registru.



Slika 3-7 Raspodjela obnovljivih izvora energije u Dubrovačko-neretvanskoj županiji [20]

U drugom dijelu zadatka bilo je potrebno unijeti dodatne vjetroelektrane prema prostornom planu uređenja Dubrovačko-neretvanske županije pa su se dodatne lokacije unosile prema podacima dostupnim na internetskim stranicama Dubrovačko-neretvanske županije. Na njima se nalaze karte s prikazanim mogućim lokacijama za izgradnju vjetroelektrana u sklopu infrastrukturnih energetske sustava. Neke od tih lokacija su već unesene u registar i za njih postoji plan gradnje vjetroelektrana. Budući da na otocima nije dozvoljena gradnja vjetroelektrana po prostornom planu, lokacije vjetroelektrana na otocima su odabirane proizvoljno.

3.4. Odabir lokacije pojedine vjetroturbine

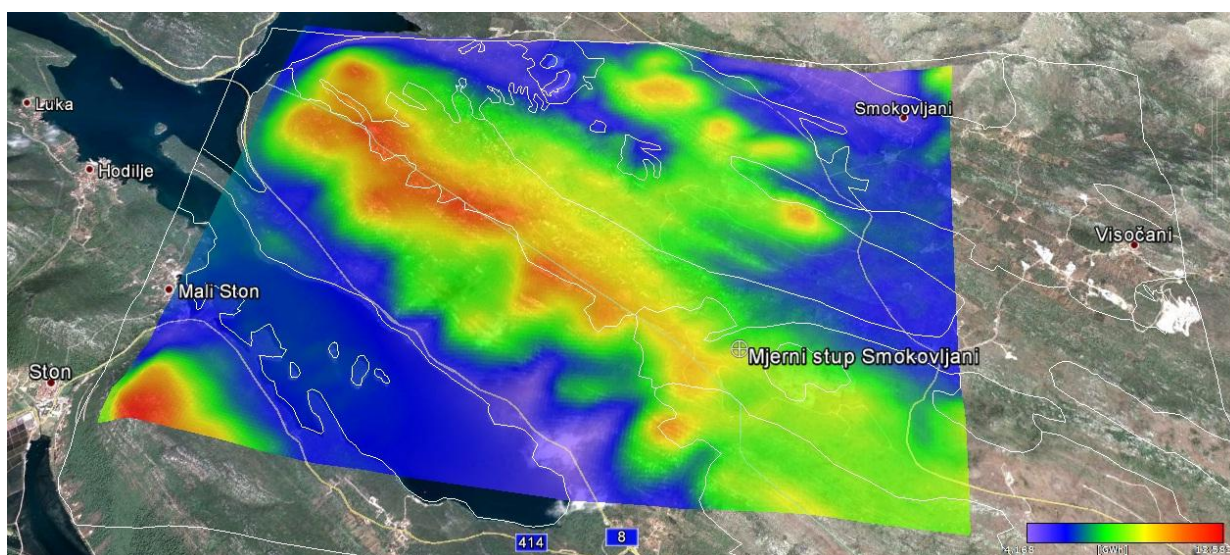
Budući da u Registru OIEKPP, kao ni na interaktivnoj karti obnovljivih izvora energije na stranicama Ministarstva gospodarstva, rada i poduzetništva, nema točnih lokacija na kojima se nalazi pojedina turbina u vjetroparku, lokaciju svake turbine trebalo je odrediti na neki drugi način. Postupak koji je korišten u ovom radu se sastojao od izrade *Resource grid* za svaku pojedinu vjetroelektranu.

Resource grid se sastoji od pravokutnog skupa točaka od kojih se za svaku mogu izračunati podaci o klimi vjetra. Točke su posložene u redove i kolone unutar pravokutnika. To nam omogućuje da vidimo kakva je klima vjetra i kakvi su potencijali vjetra za to područje. Nije

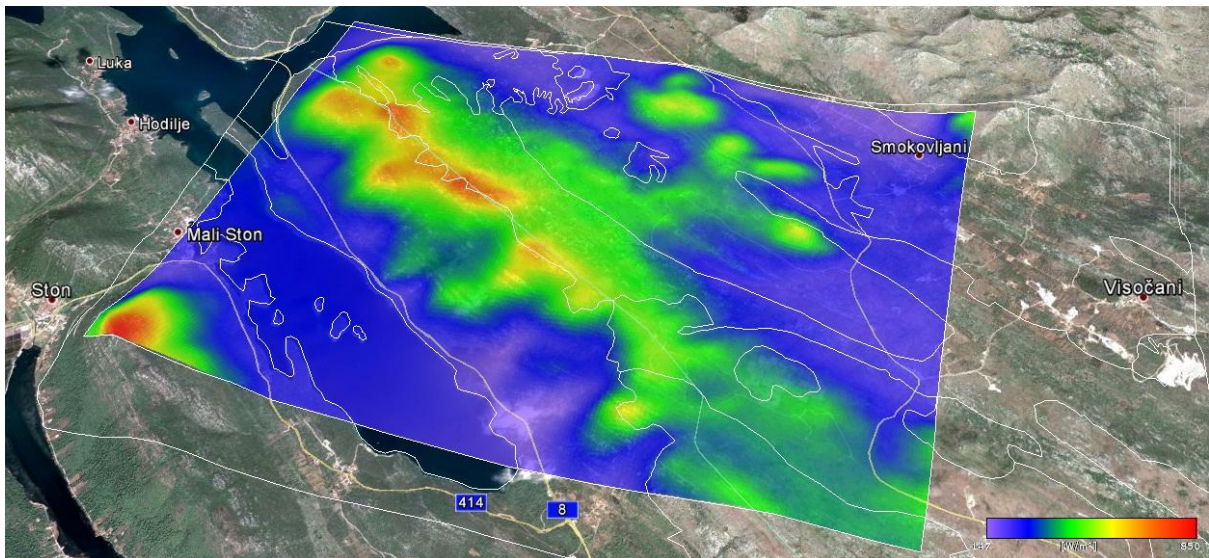
potrebno svaku točku zasebno unositi nego treba odrediti lokaciju pravokutne mreže te broj redova i kolona i udaljenost točaka jedne od druge. Svaka točka predstavlja pojednostavljenu verzije vjetro turbine i sve točke nalaze se na istoj visini. Ako se *Resource grid* pridruži vjetroagregat moguće je izračunati za svaku točku godišnju proizvodnju električne energije tj. AEP. Za svaku točku *Resource grid* WAsP računa još nekoliko podataka, osim AEP, koji se mogu prikazati u *Resource grid*, a to su: nadmorska visina, srednja brzina vjetra, srednja gustoća energije vjetra, vrijednost RIX, vrijednost dRIX i još neki. [22]

Kod proračuna *Resource grid* za svaku vjetroelektranu razmak između točaka tj. rezolucija je bila 50 metara, a veličina pravokutnika je ovisila o veličini vjetroelektrane. *Resource grid* za vjetroelektranu Dubrovačko primorje prikazan je na slikama od 3-8 do 3-11. Na slici 3-8 prikazan je potencijal za prosječnu godišnju proizvodnju električne energije za pridruženi vjetroagregat. Plava boja označava malu proizvodnju, zelena i žuta srednju, a crvena veliku proizvodnju električne energije. Slično vrijedi i za sliku 3-9 na kojoj je prikazana srednja gustoća energije vjetra.

Na slici 3-10 prikazana je nadmorska visina koja se kreće u rasponu od 0 do 375 metara, gdje svijetlozeleno područje označava razinu morske površine, a tamnoplavo područje visinu blizu 375 metara. Na kraju na slici 3-11 prikazana je razlika između dRIX vrijednosti za mjerni stup i vrijednosti za teren koji obuhvaća VE Dubrovačko primorje. Neprihvatljive vrijednosti dRIX parametra su jedino one označene crvenom bojom.

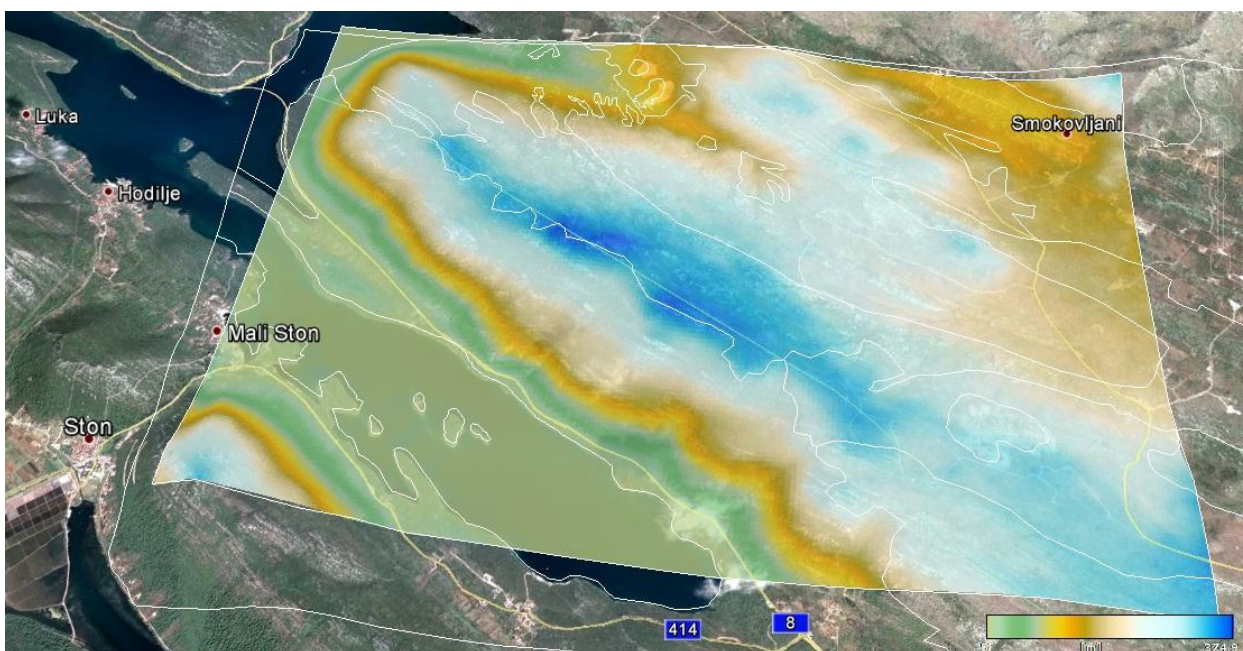


Slika 3-8 *Resource grid* koji prikazuje prosječnu godišnju proizvodnju električne energije na području VE Dubrovačko primorje

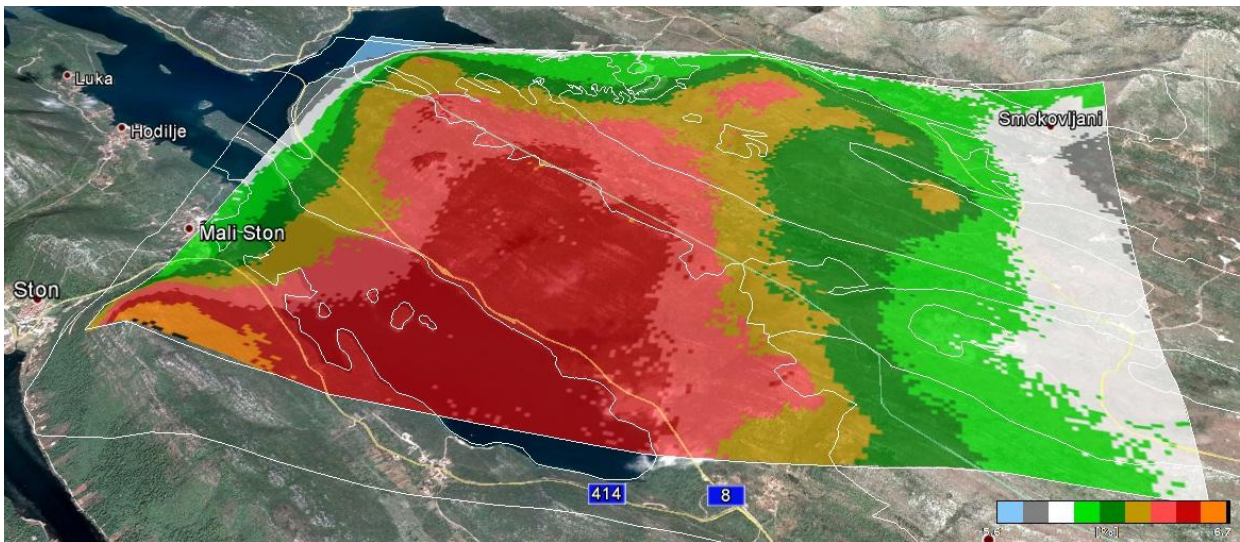


Slika 3-9 *Resource grid* koji prikazuje srednju gustoću energije vjetra na području VE Dubrovačko primorje

Odabir lokacije pojedine vjetroturbine rađen je tako da se pokušalo postaviti turbine na lokaciju na kojoj se nalazi najveća godišnja prosječna proizvodnja električne energije prema *Resource grid* za tu vjetroelektranu. Kod odabira lokacije potrebno je zadržati određeni razmak između turbina zbog toga da ne utječu jedna drugoj previše na profil vjetra tj. da bi gubici (*wake losses*) bili što manji. Kod odabira lokacije za turbine VE Dubrovačko primorje osim o prosječnoj godišnjoj proizvodnji električne energije vodilo se računa o tome da ni jedna lokacija prema dRIX vrijednosti ne odstupa puno od lokacije na kojoj se nalazi mjerni stup.



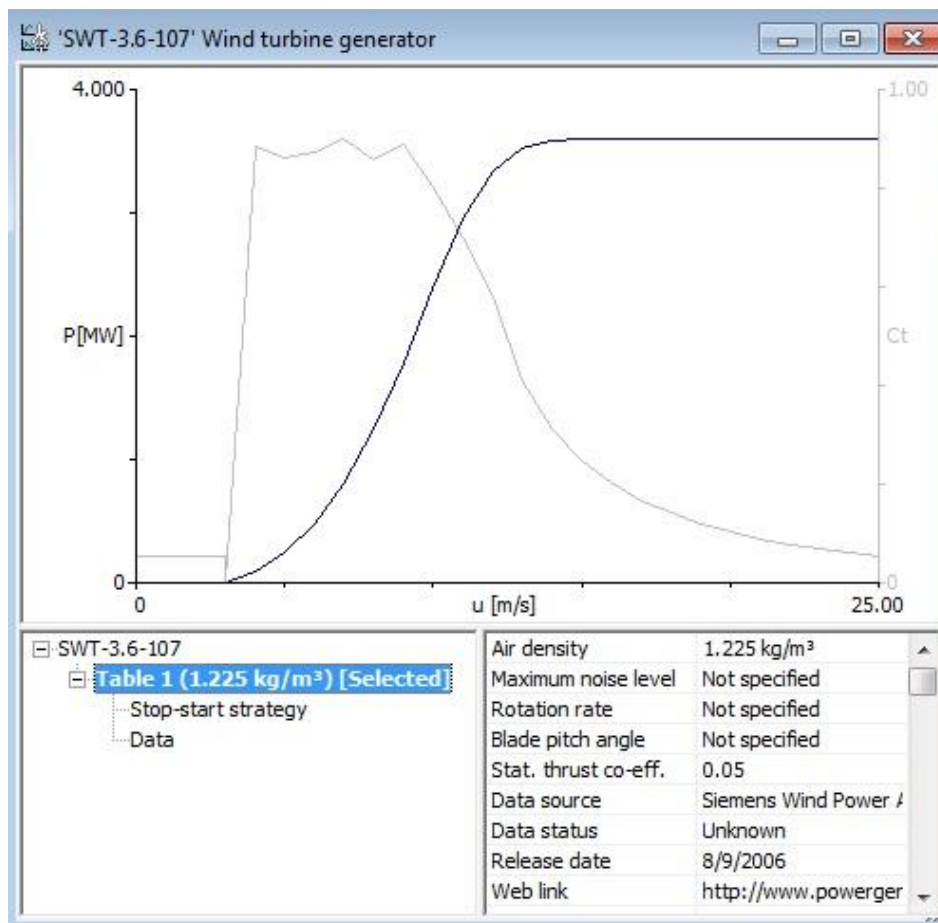
Slika 3-10 *Resource grid* koji prikazuje nadmorsku visinu na području VE Dubrovačko primorje



Slika 3-11 Resource grid koji prikazuje dRIX vrijednost

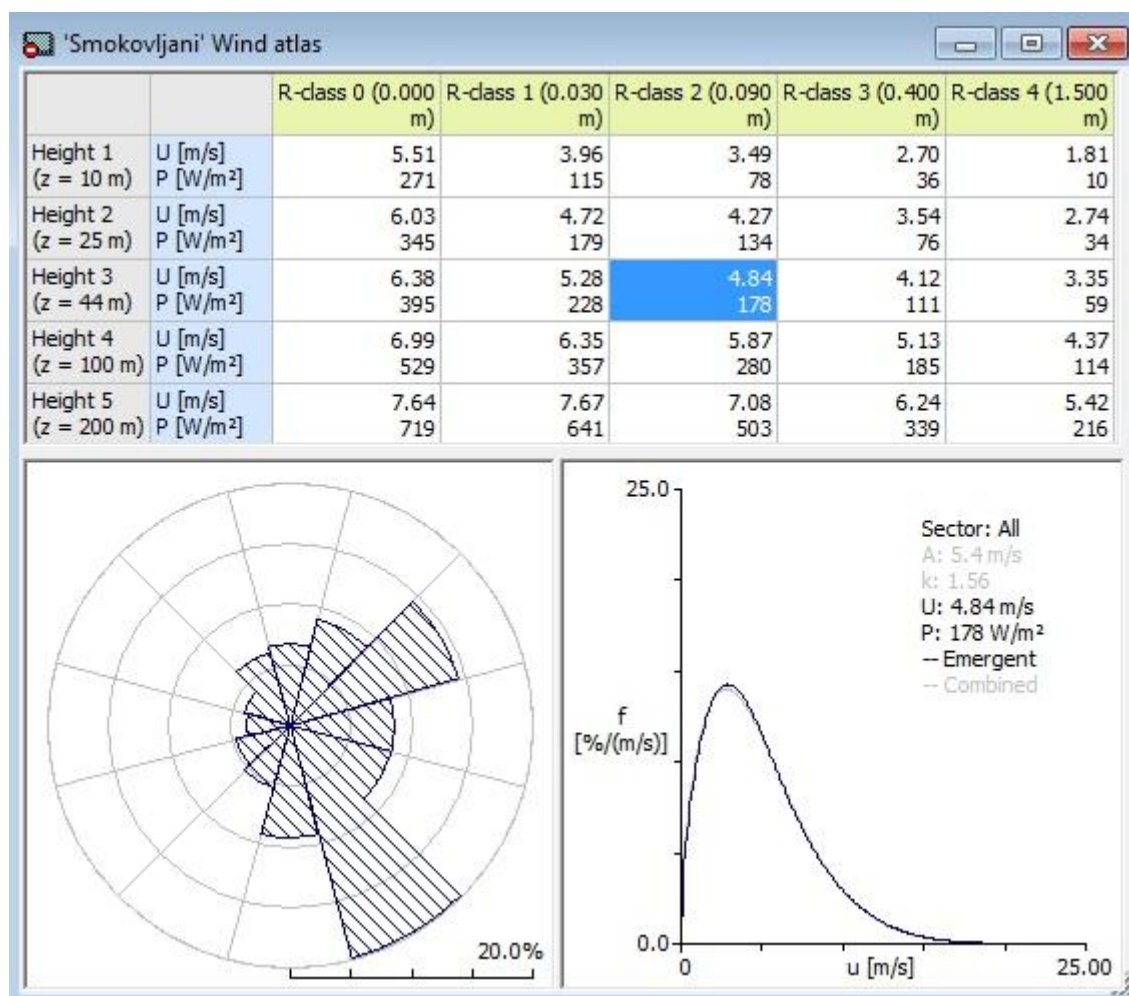
Nakon što su se povelili ovi koraci bilo je potrebno još izraditi generalizirani atlas vjetra, odabrati vjetroagregat i proračunati AEP tj. prosječnu godišnju proizvodnju električne energije.

3.5. Izračun prosječne godišnje proizvodnje električne energije (AEP)



Slika 3-12 Siemens Wind Power SWT-3.6-107 generator vjetroturbine [17]

Prije izračuna AEP trebalo je odabrati vjetroagregat za svaku vjetroelektranu. Budući da u zadatku nije zadano koji se vjetroagregati odabiru niti u Registru OIEKPP nije navedeno koji se vjetroagregati koriste, oni su izabirani proizvoljno prema veličini pojedine vjetroelektrane u rasponu snaga od najmanjeg snage 1,65 MW do najvećeg snage 3,6 MW. Na slici 3-12 prikazan je vjetroagregata korišten za vjetroelektranu Dubrovačko primorje. Snaga vjetroagregata je 3,6 MW, a postiže se kod brzine od oko 16 m/s. Brzina uključjenja generatora je 3 m/s, a brzina isključenja je 25 m/s. Visina stupa vjetroturbine je 80 m, a promjer lopatica rotora je 107 m.



Slika 3-13 Generalizirani atlas vjetra za Dubrovačko-neretvansku županiju

Za izračun generaliziranog atlasa vjetra za područje Dubrovačko-neretvanske županije u WAsP su uneseni svi potrebni podaci. Podaci o brzini i smjeru vjetra uneseni su u obliku OWC podataka, a podaci o topografiji terena pomoću topografske karte. Preostalo je još samo na karti unijeti lokaciju mjernog stupa Smokovljani i izračunati generalizirani atlas vjetra za Dubrovačko-neretvansku županiju. Budući da visina na kojoj su mjereni podaci za vjetar i zadana hrapavost terena ne odgovara uobičajenim postavkama atlasa vjetra u WAsP trebalo je promijeniti te postavke. Generalizirani atlas vjetra za Dubrovačko-neretvansku županiju sa

izmjenjenim postavkama prikazan je na sljedećoj slici 3-13. Iz slike vidimo da su prevladavajući smjerovi vjetra na visini od 44 m i kod hrapavosti čija je visina 0,09 metara sjeveroistočni i jugoistočni. Srednja brzina vjetra za sve sektore je 4,84 m/s, a gustoća snage vjetra 178 W/m². Klikom miša na pojedini sektor u ruži vjetrova prikazat će se dijagram i podaci za taj sektor.

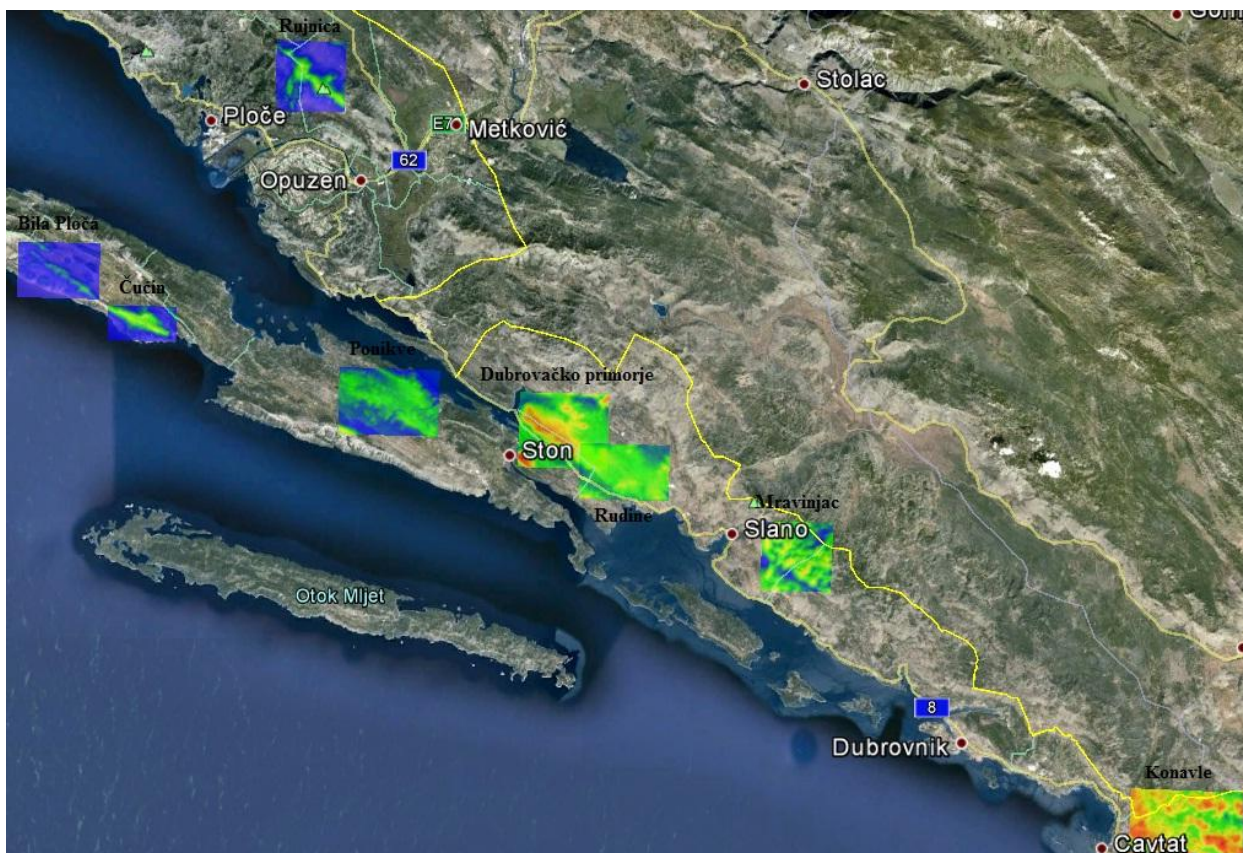
Budući da su uneseni svi potrebni podaci moglo se pristupiti proračunu AEP tj. prosječne godišnje proizvodnje električne energije za Dubrovačko-neretvansku županiju. Rezultati proračunu biti će prikazani u sljedećem poglavlju.

4. Rezultati proračuna

Prikaz rezultata proračuna biti će raspodijeljen u tri dijela. U prvom dijelu biti će prikazani rezultati procjene ukupne godišnje proizvodnje za vjetroelektrane koje se nalaze u Registru OIEKPP. U drugom dijelu će se tim rezultatima dodati rezultati dodatnih kapaciteta koji su predviđeni prostornim planom i onih koji se nalaze na otoci, a u trećem dijelu biti će detaljnije analizirani rezultati za VE Dubrovačko primorje.

4.1. Rezultati procjene proizvodnje električne energije za vjetroelektrane koje se nalaze u Registru OIEKPP

Prije prikaza samih rezultata potrebno je spomenuti da su se podaci u Registru OIEKPP promijenili od trenutka službenog zadavanja zadatka do trenutka kada je ovaj zadatak izvršen. U trenutku zadavanja zadatka u Registru OIEKPP je bilo navedeno 14 vjetroelektrana koje su bile ukupne snage 641 MW. S vremenom broj vjetroelektrana se smanjio na 8 čija je ukupna snaga 491 MW i to je stanje prema kojem je izrađena ova procjena. Tih 8 vjetroelektrana prikazano je na slici 4-1.



Slika 4-1 Prikaz vjetroelektrana prema Registru OIEKPP

Tablica 4-1 Podaci o predviđenoj proizvodnji električne energije za vjetroelektrane unesene u Registar OIEKPP prema podacima mjerenima na lokaciji Smokovljani

Vjetroelektrane	Snaga P (MW)	Bruto AEP (GWh)	Neto AEP (GWh)	wake losses (%)	faktor opterećenja (%)
Rujnica	22	84,759	83,229	1,81	43,19
Bila Ploča	33	97,02	94,032	3,08	32,53
Čučin	30	121,745	116,798	4,06	44,44
Ponikve	34	114,889	111,397	3,04	37,40
Dubrovačko primorje	125	346,317	304,583	12,05	27,82
Rudine	70	205,159	190,76	7,02	31,11
Mravinjac	57	216,86	196,072	9,59	39,27
Konavle	120	386,97	345,488	10,72	32,87
Σ	491	1573,719	1442,359		

Maksimalna ukupna moguća proizvodnja električne energije s obzirom na uvjete koji su postavljeni u ovom modelu za vjetroelektrane koje se nalaze u Registru OIEKPP prema podacima mjerenima u Smokovljanima na visini 44 metra je 1573,719 GWh godišnje, ako se u obzir uzmu gubici koje računa WAsP, a to su *wake losses*, gubici vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine, proizvodnja se smanji na 1442,359 GWh godišnje, a *wake losses* iznose 8,35%. *Wake losses* moguće je smanjiti boljim rasporedom vjetroturbina. Faktor opterećenja (*Load Factor*) računali smo s obzirom na proizvodnju električne energije kada su uračunati gubici vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine. On ukupno iznosi za sve vjetroelektrane 33,53%. U tablici 4-1 prikazane su vjetroelektrane pojedinačno te njihova bruto i neto godišnja proizvodnja električne energije, *wake losses* i faktor opterećenja.

Faktor opterećenja izračunat je prema sljedećoj formuli:

$$L = \frac{AEP}{8760 \cdot P} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.1.)$$

Kod proračuna faktora opterećenja je obratiti pažnju na uvrštavanje AEP i snage vjetroelektrane u odgovarajućim mjernim jedinicama.

Postoje još neki dodatni gubici koje WASP ne računa, a prema [5] iznose uglavnom od 5 do 10% izračunate proizvodnje električne energije pomoću WASP. Mogući dodatni gubici se događaju zbog nedostupnosti električne mreže, električnih gubitaka generatora, lošijeg rada turbine nego što je to navedeno u specifikacijama, degradacije i onečišćenja lopatica turbine te zbog ograničenja radi prevelike buke.

Ako se za ovaj slučaj Neto AEP umanjuje za vrijednost dodatnih gubitaka od 7,5% dobije se godišnja proizvodnja električne energije od 1334,182 GWh, a faktor opterećenja u tom slučaju iznosi 31,02%.

Budući da su nam bili dostupni podaci s meteorološke postaje Dubrovnik i oni su iskorišteni za izračun moguće godišnje proizvodnje električne energije. Rezultati prema ovim podacima prikazani su u tablici 4-2.

Tablica 4-2 Podaci o predviđenoj proizvodnji električne energije za vjetroelektrane unesene u Registar OIEKPP prema podacima mjerenima na meteorološkoj postaji Dubrovnik

Vjetroelektrane	Snaga P (MW)	Bruto AEP (GWh)	Neto AEP (GWh)	wake losses (%)	faktor opterećenja (%)
Rujnica	22	74,512	73,406	1,48	38,09
Bila Ploča	33	92,031	88,065	4,31	30,46
Čučin	30	104,457	98,322	5,87	37,41
Ponikve	34	108,774	105,588	2,93	35,45
Dubrovačko primorje	125	347,873	311,088	10,57	28,41
Rudine	70	200,245	186,58	6,82	30,43
Mravinjac	57	201,301	184,071	8,56	36,86
Konavle	120	371,195	334,933	9,77	31,86
Σ	491	1500,388	1382,053		

Iz tablice se mogu usporediti rezultati proračuna prema obje mjerne lokacije. Iznos faktora opterećenja za podatke dobivene prema mjernoj postaji Dubrovnik je 32,13%, a ukupni *wake losses* je 7,89%. Ako se uračunaju dodatni gubici od 7,5% godišnja proizvodnja električne energije iznosi 1278,399 GWh, a faktor opterećenja iznosi 29,72%.

Radi provjere rezultata odlučeno je da se podaci za brzinu i smjer vjetra izmjereni na mjernoj lokaciji Smokovljani ubace u WASP na lokaciju koja se nalazi negdje u vjetroelektrani Rujnica jer su za nju dobiveni rezultati koji premašuju očekivane prosječne vrijednosti. Cilj je da se vidi na koji način utječu lokacija mjerne postaje tj. nadmorska visina mjerne postaje i faktor

orografske performanse na brzine vjetra i godišnju proizvodnju električne energije dobivenu modeliranjem u WAsP. U tablici 4-3 navedeni su rezultati za taj slučaj.

Tablica 4-3 Podaci o predviđenoj proizvodnji električne energije za vjetroelektrane unesene u Registar OIEKPP prema podacima mjerenima na lokaciji Smokovljani, a postavljeni na planinu Rujnica u WAsP simulaciji

Vjetroelektrane	Snaga P (MW)	Bruto AEP (GWh)	Neto AEP (GWh)	wake losses (%)	faktor opterećenja (%)
Rujnica	22	57.667	56.231	2.49	29.18
Bila Ploča	33	57.748	55.855	3.28	19.32
Čućin	30	84.387	80.807	4.24	30.75
Ponikve	34	71.345	68.345	4.20	22.95
Dubrovačko primorje	125	196.774	165.779	15.75	15.14
Rudine	70	121.148	109.771	9.39	17.90
Mravinjac	57	140.435	122.761	12.59	24.59
Konavle	120	235.795	204.602	13.23	19.46
Σ	491	965.299	864.151		

Iznos ovako izračunatog ukupnog faktora opterećenja iznosi 20,09% što je nekih desetak posto manje nego kada je proizvodnja računata prema lokaciji Smokovljani i mjernoj postaji Dubrovnik. Proizvodnja električne energije u ovom slučaju, ako se za dodatne gubitke pretpostavi da iznose 7,5% je 799,340 GWh, a faktor opterećenja iznosi 18,58%.

Usporedbom rezultata u tablicama vidljivo je da rezultati predviđanja u WAsP za kompleksne terene ovise o razlici između visina mjerne lokacije i lokacije turbine i da ovise o faktoru orografske performanse. U slučaju da je mjerna lokacija na visini nižoj od lokacije vjetroturbine dolazi do preuveličavanja brzine vjetra što rezultira nerealno velikom proizvodnjom električne energije, a u slučaju da je mjerna lokacija na višem položaju od vjetroturbine dolazi do prevelikog smanjenja brzine vjetra i do nerealno male proizvodnje električne energije. Slična je stvar i s utjecajem dRIX faktora. Ako je dRIX faktor veći od nule dolazi do preuveličavanja brzine vjetra i zbog toga do nerealno velike proizvodnje električne energije, a ako je dRIX manji od nule dolazi do prevelikog smanjenja brzine vjetra u modelu i do nerealno male proizvodnje električne energije. Iz toga se nameće zaključak da je za mogućnost kvalitetnog predviđanja proizvodnje električne energije pomoću WAsP potrebno imati podatke mjerene na lokaciji buduće vjetroelektrane, ili negdje u blizini te lokacije uz uvjet da je lokacija mjerenja slična lokaciji buduće vjetroelektrane.

Za svaku vjetroelektranu korišten je drugi vjetroagregat pa su vjetroagregati zajedno sa nekim svojim svojstvima navedeni u tablici 4-4.

Tablica 4-4 Vjetroagregati korišteni za proračun AEP

Vjetroelektrana	Korišteni vjetroagregat	Proizvođač	Broj vjetroagregata	Visina stupa [m]	Promjer lopatica rotora [m]	Brzina uključenja/isključenja [m/s]
Rujnica	Bonus 2 MW	Bonus Energy A/S	11	60	76	4/25
Bila Ploča	Vestas V66 – 1,65 MW	Vestas Wind Systems	20	67	66	4/25
Čučin	Vestas V80 – 2,0 MW	Vestas Wind Systems	15	67	80	4/25
Ponikve 1	Vestas V66 – 1,75 MW	Vestas Wind Systems	4	67	66	4/25
Ponikve 2	Vestas V90 – 1,8 MW	Vestas Wind Systems	15	80	90	4/25
Dubrovačko primorje	SWT – 3,6 - 107	Siemens Wind Power A/S	35	80	107	3/25
Rudine	Nordex N90-2500 LS	Nordex Energy GmbH	28	100	90	3.5/25
Mravinjac	SWT – 2,3 - 93	Siemens Wind Power A/S	25	80	93	3/25
Konavle	Vestas V112-3,0 MW	Vestas Wind Systems	40	84	112	3/25

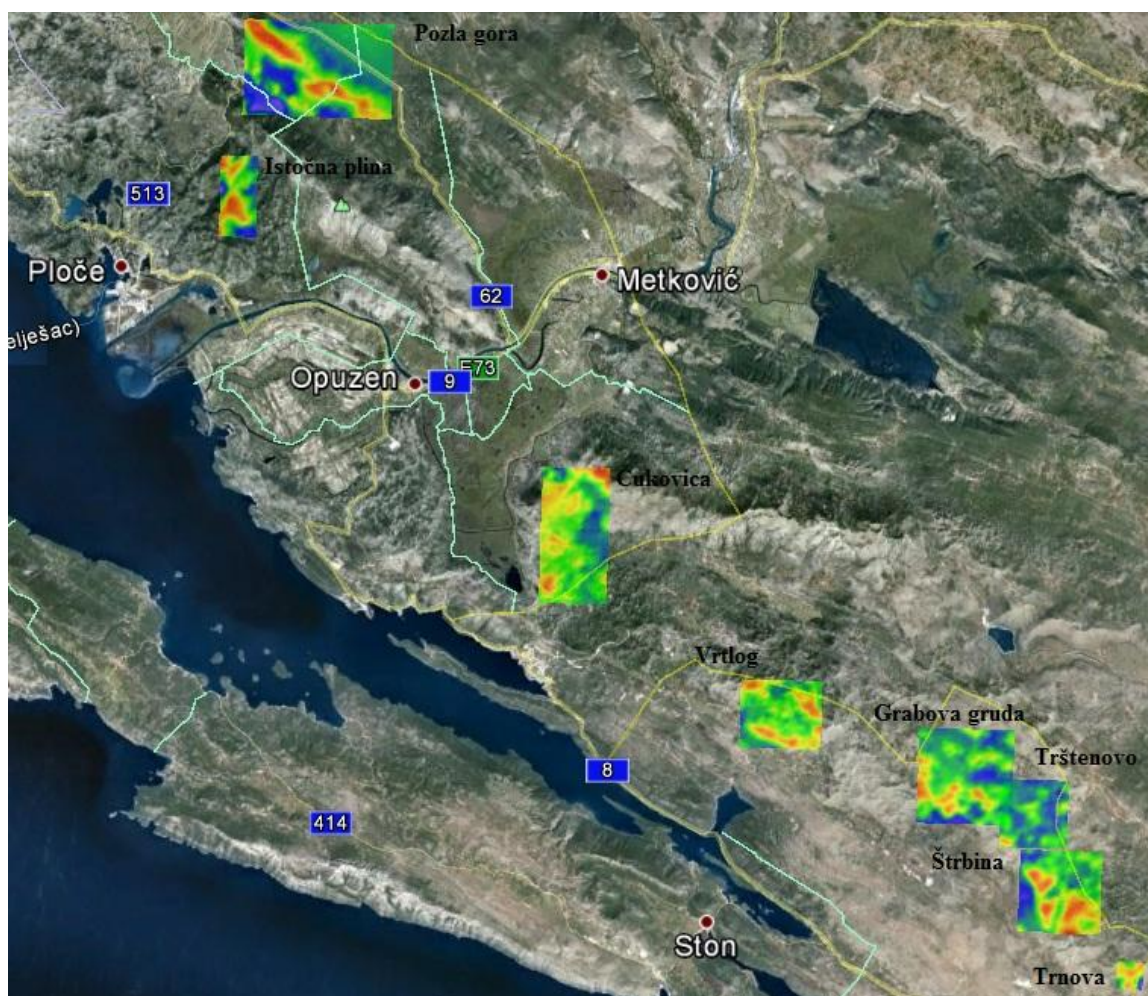
4.2. Rezultati procjene AEP-a za slučaj kada se dodaju dodatni kapaciteti prema prostornom planu i otocima

Prema prostornom planu Dubrovačko-neretvanske županije postoji 8 lokacija za gradnju vjetroelektrana koje se još ne nalaze u Registru OIEKPP. Lokacijama smo za ovaj rad dodijelili

imena prema mjestima blizu kojih se nalaze ili nekim geografskim obilježjima na kojima se ili blizu kojih se nalaze. Lokacije se, krećući od sjevera prema jugu nazivaju Pozla gora, Istočna plina, Čukovica, Vrtlog, Grabova gruda, Trštenovo, Štrbina, Trnova, a lokacije na otocima smo nazvali imenima otoka, a to su Korčula, Lastovo i Mljet. Lokacije koje su ucrtane na prostornom planu prikazane su na slici 4-2.

Za proračun AEP na lokacijama koje su predviđene za vjetroelektrane prema prostornom planu korišten je vjetroagregat Vestas V90-2 MW koji proizvodi *Vestas Wind Systems A/S*. Visina stupa je 80 metara, a promjer rotora je 90 metara. Agregat počinje proizvoditi struju kod brzine vjeta od 4 m/s, a isključuje se kod brzine od 25 m/s. Za lokacije na otocima korišten je vjetroagregat Vestas V100-2.0 MW istog proizvođača, visine stupa 80 metara, a promjera rotora 100 metara. Agregat se uključuje pri brzini od 3 m/s, a isključuje kod 20 m/s.

Rezultati moguće godišnje proizvodnje električne energije prema podacima za vjetar mjerne lokacije Smokovljani prikazani su u tablici 4-5, a rezultati prema podacima za vjetar meteorološke postaje Dubrovnika nalaze se u tablici 4-6.



Slika 4-2 Prikaz lokacija prema prostornom planu Dubrovačko-neretvanske županije

Ukupna moguća proizvodnja električne energije za lokacije prema prostornom planu i na otocima na godišnjoj razini je 721,292 GWh prema podacima dobivenim od mjerne postaje Smokovljani, a 683,652 GWh prema podacima sa meteorološke postaje Dubrovnik. Razlika je kod ovih rezultata nešto veća nego kod rezultata za vjetroelektrane koje se nalaze u Registru OIEKPP jer su lokacije na otocima odabirane prema mogućnosti najveće proizvodnje prema podacima sa postaje Smokovljani i vjetroturbine nisu raspoređivane u vjetroelektrane nego su razbacane po cijelom otoku pa se iz toga može zaključiti da je proizvodnja iz vjetroelektrana na otoku pomalo uvećana.

Nakon što se sumiraju proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana koje se nalaze u Registru OIEKPP i dodatnih vjetroelektrana dobije se godišnja proizvodnja od 2295,011 GWh tj. ako se oduzmu gubici vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine 2146,946 GWh, a faktor opterećenja iznosi 35,47% prema podaci sa mjerne lokacije Smokovljani. Ako se uzimaju podaci sa meteorološke postaje Dubrovnik ukupna proizvodnja je 2184,04 GWh, kada se oduzmu gubici 2052,712 GWh, a faktor opterećenja iznosi 33,91%. Vidljivo je da su rezultati dobiveni korištenjem padataka sa meteorološke postaje Dubrovnik manji, a do toga je došlo zbog toga jer je za Dubrovnik izmjerena manja brzina vjetra nego za Smokovljane.

Tablica 4-5 Podaci o predviđenoj proizvodnji za vjetroelektrane prema prostornom planu i na otocima prema podacima mjerenima na lokaciji Smokovljani

Vjetroelektrane	Snaga P (MW)	Bruto AEP (GWh)	Neto AEP (GWh)	wake losses (%)	faktor opterećenja (%)
Pozla gora	20	69,766	68,558	1,73	39,13
Istočna plina	10	33,467	32,473	2,97	37,07
Čukovica	10	29,927	29,072	2,86	33,19
Vrtlog	20	65,499	63,297	3,36	36,13
Grabova gruda	20	57,087	55,323	3,09	31,58
Trštenovo	10	26,778	25,364	5,28	28,95
Štrbina	20	73,493	70,358	4,27	40,16
Trnova	10	34,747	33,45	3,73	38,18
Korčula	50	203,745	202,518	0,60	46,24
Lastovo	10	41,519	40,434	2,61	46,16
Mljet	20	85,264	83,74	1,79	47,80
Σ	200	721,292	704,587		

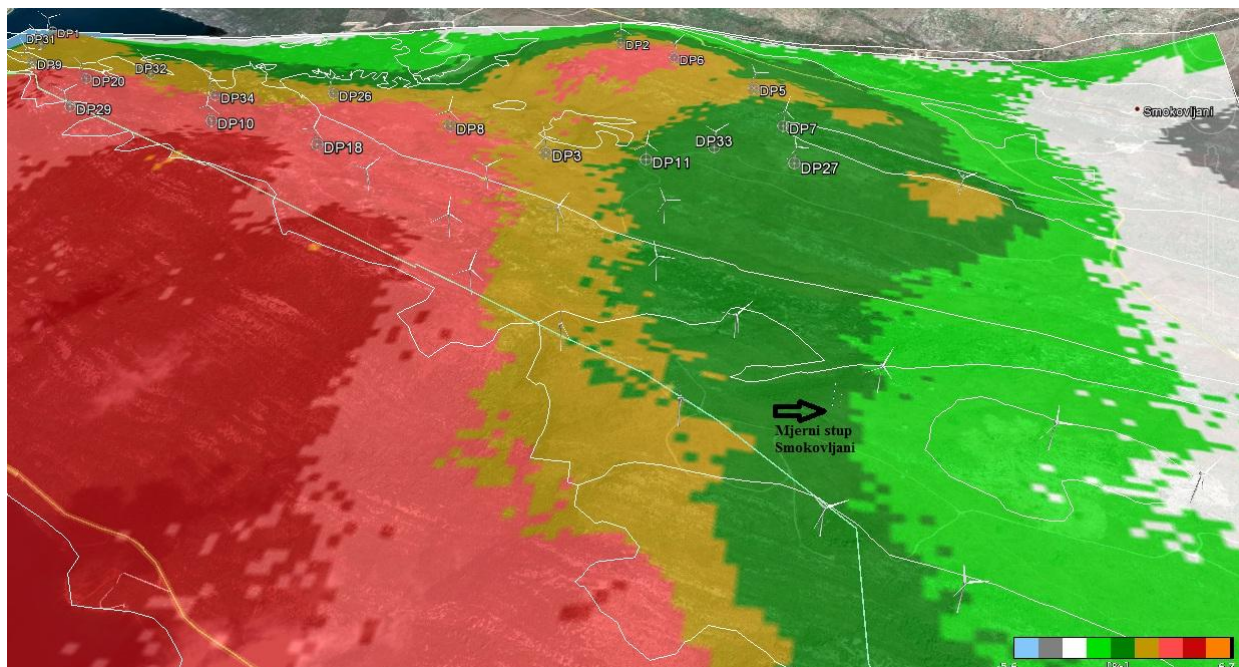
Tablica 4-6 Podaci o predviđenoj proizvodnji za vjetroelektrane prema prostornom planu i na otocima prema podacima mjerenima na meteorološkoj postaji Dubrovnik

Vjetroelektrane	Snaga P (MW)	Bruto AEP (GWh)	Neto AEP (GWh)	wake losses (%)	faktor opterećenja (%)
Pozla gora	20	69,12	67,941	1,71	38,78
Istočna plina	10	33,665	33,082	1,73	37,76
Čukovica	10	31,23	30,755	1,52	35,11
Vrtlog	20	66,248	64,382	2,82	36,75
Grabova gruda	20	58,274	57,045	2,11	32,56
Trštenovo	10	29,155	28,122	3,54	32,10
Štrbina	20	72,159	69,92	3,10	39,91
Trnova	10	34,326	33,184	3,33	37,88
Korčula	50	179,974	178,974	0,56	40,86
Lastovo	10	37,061	36,1	2,59	41,21
Mljet	20	72,44	71,154	1,78	40,61
Σ	200	683,652	670,659		

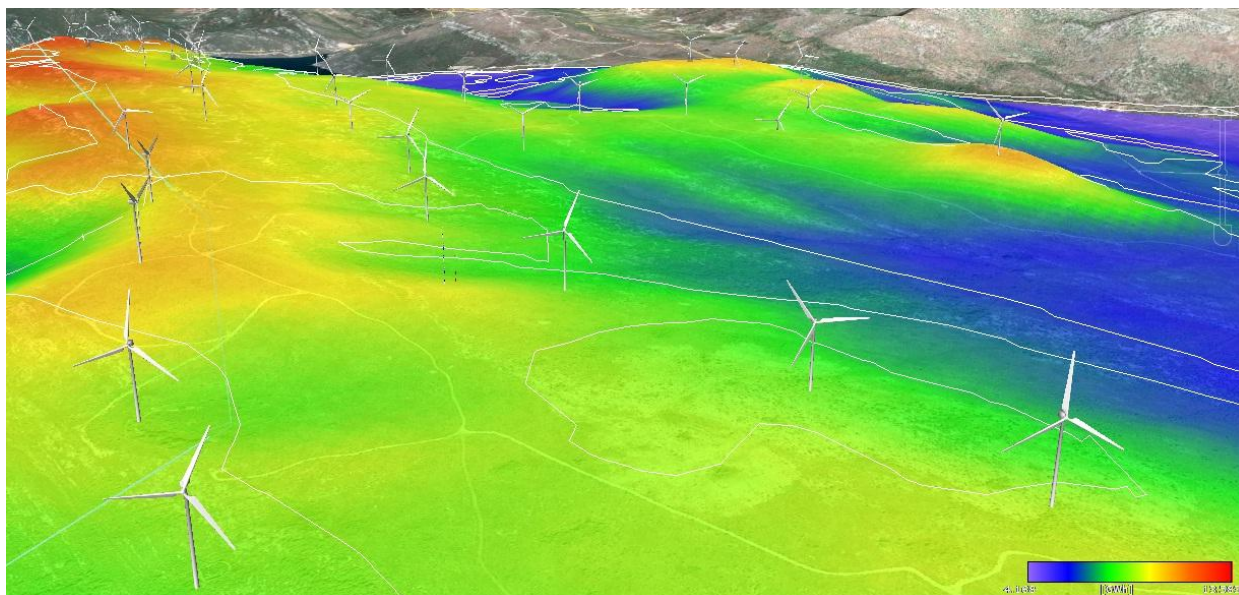
Ako se i za ovaj slučaj kao i u prethodnima uzmu u obzir dodatni gubici koji su petpostavljeni da iznose 7,5% dobit ćemo električnu energiju koju vjetroelektrane predaju u mrežu. Prema mjernoj lokaciji Smokovljani tada je moguća godišnja proizvodnja električne energije, ako se sumiraju sve proizvodnje, 1985,925 GWh, a prema lokaciji Dubrovnik 1898,759 GWh, dok faktori opterećenja iznose 32,81% za Smokovljane, a 31,37% prema Dubrovniku. Može se zaključiti da su rezultati preuveličani pogotovo za lokacije koje se nalaze na višoj nadmorskoj visini od mjerne lokacije i koje imaju dRIX faktor puno veći od nula, a dodatno stvar povećavaju otoci na kojima su vjetroturbine postavljane na vrhovima brda pa je dodatno povećana proizvodnja električne energije. Lokacije iz Registra OIEKPP za koje je primjetan utjecaj nadmorske visine i dRIX faktora u pretjeranom povećanju brzine vjetra, a samim time i preuveličavanjem proizvodnje električne energije su vjetroelektrane Rujnica, Čućin i Mravinjac. Na Rujnici su lokacije pojedine vjetroelektrane od 100 do 400 metara više od lokacije mjerenja Smokovljani, a vrijednost dRIX faktora kreće se u rasponu od 13,5 do 24%. Za lokaciju Čućin dRIX vrijednosti su u rasponu od 15,5 i 23%, a razlika u visini je od 100 do 250 metara, dok je za Mravinjac razlika u visini od 300 do 550 metara, a dRIX vrijednost iznosi od 11 do 19%.

4.3. Detaljnija analiza rezultata za VE Dubrovačko primorje

Prije pregleda samih rezultata potrebno je izdvojiti neke detalje koji su izmjenjeni s obzirom na model koji je korišten kod proračuna proizvodnje električne energije za VE Dubrovačko primorje u prethodnom poglavlju.



Slika 4-3 Razmještaj vjetroturbina prema što nižem dRIX faktoru

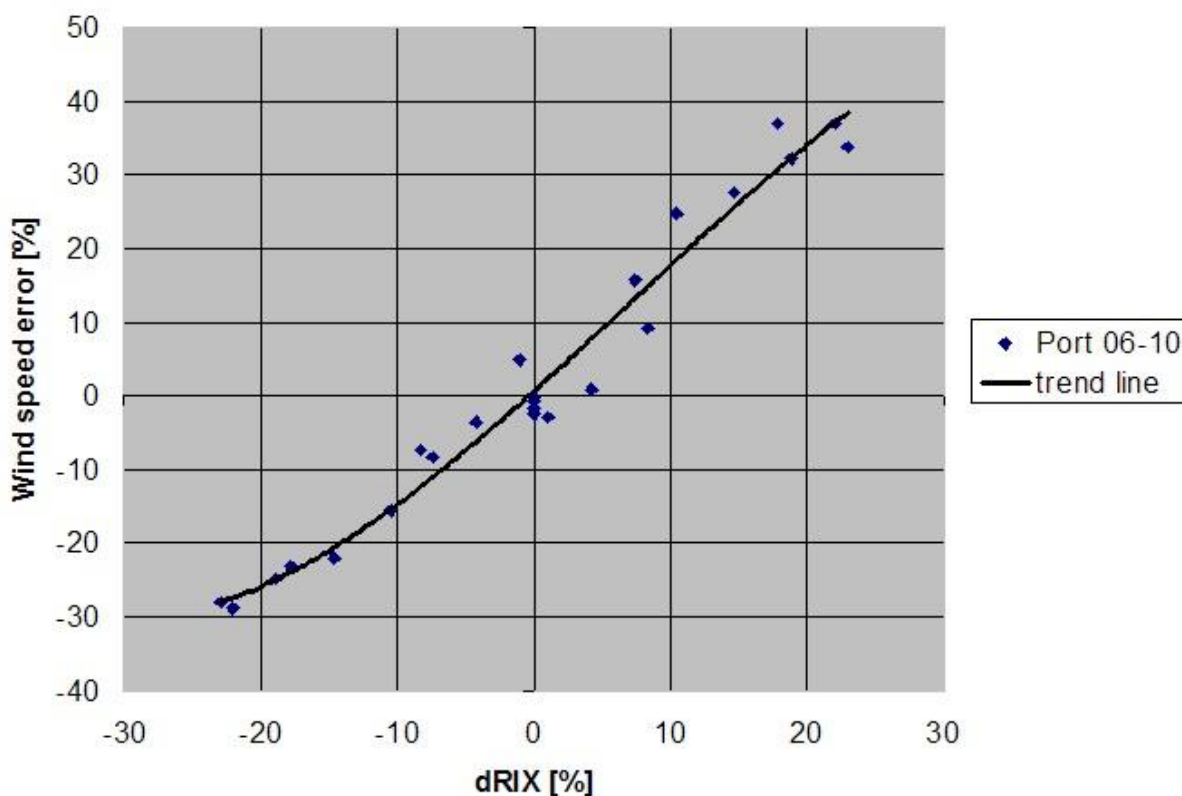


Slika 4-4 Razmještaj vjetroturbina prema što većoj proizvodnji električne energije

Za potrebe detaljnije analize izrađena je detaljnija topografska karta te je izrađena i karta hrapavosti terena. Lokacije pojedinih vjetroturbina u vjetroelektrani izmjenjene su u odnosu na

prijašnji model jer se ovdje osim o mogućnosti proizvodnje što veće količine električne energije vodilo računa da faktor brdovitosti terena (RIX) za svaku lokaciju bude što sličniji lokaciji mjernog stupa Smokovljani, tj. željelo se da faktor orografske performanse (dRIX) bude što bliže nuli. To je bilo potrebno učiniti kao bi se anuliralo moguće nerealno povećanje ili smanjenje brzine vjetra zbog toga jer WASP nije dizajniran za primjenu u kompleksnim terenima. Ako je predviđena brzina vjetra realna i rezultati proizvodnje električne energije će biti realni. Na slici 4-3 i slici 4-4 nalazi se razmještaj vjetroturbina prema što nižem faktoru orografske performanse i prema što većoj proizvodnji električne energije.

Vjetroagregat koji je korišten za proizvodnju električne energije na lokaciji Dubrovačko primorje je SWT-3,6-107. Proizvođač ovog agregata je Siemens Wind Power A/S, visina stupa je 80 metara, a promjer lopatica iznosi 107 metara. Godina proizvodnje agregata je 2006., brzine uključenja i isključenja su 3 i 25 m/s. Na ovoj lokaciji postavljeno je 35 takvih vjetroagregata. Sama lokacija se nalazi na visoravni visine otprilike 300 metara pored Malostonskog zaljeva, a okolica lokacije je slabo naseljena. Najbliža naseljena mjesta lokaciji su Zaton Doli i Smokovljani, a najmanja zračna udaljenost između kuće i vjetroturbine iznosi oko 1000 metara. Pored lokacije bi trebala prolaziti autocesta A-1, a prolaze državna cesta D-8 i županijska cesta Ž-6228. Uz lokaciju prolazi i dalekovod 220 kV.



Slika 4-5 Utjecaj faktora orografske performanse na brzinu vjetra [5]

Utjecaj faktora orografske performance na brzinu vjetra u kompleksnim terenima prikazan je na slici 4-5. Iako je ovaj graf dobiven za mjerenja izvedena u Portugalu, smatra se da približno dobro određuje korelaciju između dRIX faktora i brzine vjetra za bilo koji kompleksni teren.

Ukupna moguća proizvodnja električne energije na godišnjoj razini bez uzimanja u obzir gubitaka iznosi 336,756 GWh, ako se u obzir uzmu gubici u vrtložnom tragu iza vjetroturbine (*wake losses*) koji iznose 13,32% dobije se proizvodnja od 291,907 GWh. U ovom slučaju primjetan je gubitak električne energije zbog velikog iznosa *wake losses* što može značiti da je instalirana prevelika snaga na tom području, da bi trebalo poraditi na rasporedu postojećih vjetroturbina ili da bi trebalo razmisliti o manjem broju vjetroagregata. Faktor opterećenja za VE Dubrovačko primorje iznosi 26,66%. Vrijednost faktora dRIX za sve vjetroturbine bio je između -1.8 i 3.5% što znači da je za ovo predviđanje greška u izračunu brzina vjetra mala tj. prema slici 4-5 da se nalazi unutar $\pm 5\%$.

Ako za ovaj slučaj uzmemo da su dodatni gubici vjetroelektrane oko 7,5% dobit ćemo godišnju proizvodnju električne energije koja se predaje u mrežu u iznosu od 270,01 GWh, a faktor opterećenja tada iznosi 24,66% što je iznad 23% koje se smatra granicom isplativosti.

5. ZAKLJUČAK

Prema provedenim procjenama moguće proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana na području Dubrovačko-neretvanske županije može se zaključiti da sve lokacije koje su odabrane za gradnju vjetroelektrana ili koje su po prostornom planu predviđene za gradnju vjetroelektrana imaju veliki potencijal. Naravno za svaku lokaciju potrebno je provesti opsežnija istraživanja i što se tiče mjerenja brzine i smjera vjetra i što se tiče izrade što je moguće detaljnijih topografskih karata te karata hrapavosti terena. Za predviđanje ukupne proizvodnje u radu je korištena topografska karta u kojoj su generirane izohipse razmaka 25 metara, da bi se dobili točniji rezultati potrebno je generirati kartu s manjim razmakom između izohipsi, otprilike 5 metara i manje, što u ovom slučaju nije bilo moguće zbog veličine analiziranog područja. Također potrebno bi bilo vizualno ispitati svaku pojedinu lokaciju da bi se prepreke u vidu raznih objekata mogle unijeti u model kako bi on bio što precizniji.

Da bi se dobili točniji rezultati pomoću WASP potrebno je na svakoj lokaciji vjetroelektrane instalirati minimalno jedan mjerni stup koji bi na visini rotora buduće vjetroturbine mjerio brzinu i smjer vjetra. Mi smo raspolagali sa samo dvije mjerne lokacije od kojih se samo mjerni stup Smokovljani nalazi u blizini lokacije buduće vjetroelektrane. Srednja brzina vjetra za promatrani period u Smokovljanima na visini od 44 metra iznosila je 6,31 m/s. Također bi bilo poželjno da se prikupe podaci o brzini i smjeru vjetra kroz duži vremenski period, poželjno bi bilo nekoliko godina, a minimum je jedna godina kako ne bi došlo do pogrešnih rezultata zbog sezonskog puhanja vjetra.

Osim o brzini i smjeru vjetra kod odabira lokacije za vjetroelektranu potrebno je voditi računa o parametrima poput udaljenosti vjetroturbina od naselja, ometanju radara, očuvanju prirodnih krajolika, udaljenosti vjetroturbina od aerodroma i sl. O tome se kod ovog rad nije vodilo računa nego se pretpostavilo da su ti parametri zadovoljeni odabirom lokacija u Registru OIEKPP i u prostornom planu Dubrovačko-neretvanske županije. Lokacije na otocima koje imaju izrazito veliki potencijal za proizvodnju električne energije iz vjetroelektrana nisu provjerene po niti jednom od ovih kriterija, izuzev da se nisu postavljale vjetroturbine unutar Nacionalnog parka Mljet. Unatoč velikom potencijalu prema trenutno važećem Zakonu o prostornom uređenju i gradnji, izgradnja vjetroelektrana na otocima u Republici Hrvatskoj je zabranjena.

Moguća proizvodnja električne energije iz detaljnije obrađene vjetroelektrane kada se uračunaju svi gubici iznosi 270,01 GWh, a faktor opterećenja tada iznosi 24,66%. Gubici vrtložnog traga iza vjetroturbine (*wake losses*) su jako veliki i iznose 13,32%, što je možda posljedica lošeg rasporeda vjetroturbina, prevelike instalirane snage ili prevelikog broja vjetroagregata.

Vrijednost faktora orografske performanse je prihvatljiva i kreće se u rasponu od -1,8 do 3,5%, a predviđena proizvodnja električne energije bi mogla biti realna.

Ukupna moguća proizvodnja električne energije za Dubrovačko-neretvansku županiju kada se oduzmu svi gubici iznosi 1985,925 GWh, ako se zanemare postavljeni kapaciteti na otocima, zbog toga jer je na otocima trenutno zabranjena gradnja vjetroelektrana dobije se proizvodnja od 1683,735 GWh što je oko 10% neto potrošnje električne energije Republike Hrvatske ili promatrano sa strane županije oko 4 puta više nego što iznosi potrošnja električne energije za distribucijsko područje Elektrojug Dubrovnik. Ako se uzme u obzir proizvodnja iz vjetroelektrana koje se nalaze u Registru OIEKPP, koja iznosi 1334,182 GWh, proizvodnja je 3 puta veća od potrošnje koja iznosi 413,294 GWh prema [23].

6. LITERATURA

- [1] F. Lutgens i E. Tarbuck, *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*, Prentice Hall, 1994.
- [2] F. D. Bianchi, H. D. Battista i R. J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems*, London, Springer, 2007.
- [3] A. Bajić, S. Ivatek-Šahdan, K. Horvath i M. Perčec Tadić, »Državni hidrometeorološki zavod,« <http://mars.dhz.hr/web/images/v80.png>. [14. Veljače 2013.].
- [4] I. S., »VIDI: Leteće vjetroturbine,« <http://www.vidi.hr/Pop-Tech/Letece-vjetroturbine>. [20. Veljače 2013.].
- [5] N. Mortensen, »Planning and Development of Wind Farms: Wind Resource Assessment and Siting,« Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Roskilde, Danska, 2012.
- [6] V. Warudkar i S. Ahmed, »Assessment of Wind Power Potential by Wind Speed Probability Distribution at Complex Terrain in Central Part of India Using Wasp Tool,« *International Journal of Wind and Renewable Energy*, svez. I, br. 4, pp. 174-182, 2012.
- [7] I. Fyrrippis, P. J. Axaopoulos i G. Panayiotou, »Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece,« *Applied Energy*, p. 577–586, 2010.
- [8] J. MONSEES, M. EICHHORN i C. OHL, »SECURING ENERGY SUPPLY AT THE REGIONAL LEVEL – THE CASE OF WIND FARMING IN GERMANY: A COMPARISON OF TWO CASE STUDIES FROM NORTH HESSE AND WEST SAXONY,« u *Energy Options Impact on Regional Security*, Springer, 2010., pp. 269-289.
- [9] »Vjetroelektrane u Hrvatskoj,« 2013.
http://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj. [17. Veljače 2013.].
- [10] The European Wind energy, »Wind in power: 2012 European statistics,« The European Wind energy association, Brussels, 2013.
- [11] I. Profaca, »Poslovni dnevnik,« <http://www.poslovni.hr/hrvatska/acciona-energia-otvorila-prvu-hrvatsku-vjetroelektranu-228481>. [20. Veljače 2013.].
- [12] E. Jerkić, »Vjetroelektrane.com,« <http://www.vjetroelektrane.com/aktualno/1047-vjetroelektrane-u-hrvatskoj-u-2013>. [20. Veljače 2013.].
- [13] A. Kalajdžić, »Slobodna Dalmacija,«
<http://www.slobodnadalmacija.hr/Dalmacija/Dubrovnik/tabid/75/articleType/ArticleView/articleId/200250/Poinje-izgradnja-vjetroelektrane-Rudine-.aspx>. [20. Veljače 2013.].
- [14] »Registar OIEKPP,« <http://oie-aplikacije.mingo.hr/pregledi/>. [15. Veljače 2013.].

- [15] »WindData,« http://130.226.17.201/extra/web_docs/hornsrev/draw_1.jpg. [12. Veljače 2013.].
- [16] »The Hamburg Weather Mast,« http://wettermast-hamburg.zmaw.de/Bilder/Mast010_ObererTeilEng.jpg. [12. Veljače 2013.].
- [17] »WasP,« Riso DTU Wind Energy, Roskilde, 2012.
- [18] N. Karadža, L. Horváth i Z. Matić, »Progress of wind resource assessment program in Croatia,« u *European Wind Energy Conference & Exhibition*, Brussels Expo, Belgium, 2008.
- [19] I. Troen i E. Petersen, *European Wind Atlas*, Roskilde: Riso National Laboratory, 1989.
- [20] »oie-aplikacije.mingo/pregledi,« <http://oie.aplikacije.mingo.hr/pregledi/PopupIzvjestaj.aspx?ReportId=17ed7352-2f8d-416b-b2fb-cec912e96428>. [15. Veljače 2013.].
- [21] »oie-aplikacije.mingo/pregledi,«http://oie-aplikacije.mingo.hr/pregledi/PopupIzvjestaj.aspx?ReportId=5b47346e-67aa-4df2-9603-fa83c47061e3#P4f6c435ce00c437_da982c4197bcde946_2_179iT1R0x0. [12. Veljače 2013.].
- [22] »WasP Help-About Resource grids,« Riso DTU Wind Energy, Roskilde, 2012.
- [23] Ministarstvo gospodarstva, »Energija u Hrvatskoj 2011. - Godišnji energetske pregled,« Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske, Zagreb, 2012.