

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**IZBIRA PRIMERNE VETRNE TURBINE ZA RAZMERE
NA KANALSKEM VRHU**

DIPLOMSKO DELO

Peter Levpušček

Mentor: prof. dr. Božidar Šarler

Nova Gorica, 2012

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Božidarju Šarlerju za pomoč pri izdelavi in oblikovanju diplomskega dela.

Prav tako se zahvaljujem kolektivu podjetja Soške elektrarne, posebno Primožu Bergoču, za pomoč pri analizah.

Zahvala pa je namenjena tudi moji puncici Maji, ki mi je stala ob strani, ter staršem, ki so me podpirali in omogočili šolanje.

NASLOV

Izbira primerne vetrne turbine za razmere na Kanalskem Vrh

IZVLEČEK

V diplomskem delu smo obravnavali idejni projekt postavitve vetrnih turbin v okolici akumulacijskega jezera črpalne hidroelektrarne Avče. Najprej smo se posvetili opisu teoretičnih zakonitosti, ki veljajo pri pretvarjanju kinetične energije vetra v uporabno mehansko energijo, ki poganja generator turbine. V nadaljevanju so opisani temeljni deli, kot so menjalnik, generator, varnostni sistemi in načini priključitve elektrarne na omrežje. Glavni del diplomskega dela predstavlja analiza meritev hitrosti vetra in analiza 25 vetrnih turbin različnih proizvajalcev. Podatke o meritvah hitrosti in smeri vetra, ki so last podjetja Soške elektrarne Nova Gorica, smo pridobili z merilne postaje na Kanalskem vrhu in jih analizirali. Analize so pokazale zadovoljive vrednosti, ki dajejo upanje za postavitev polja vetrnih turbin. V obdobju meritev od novembra 2009 do novembra 2010 je bila na višini 80 m povprečna hitrost vetra 4,75 m/s. Največ vetra pa je prihajalo iz smeri 60° - 80° (sever, severovzhod), kar je značilno za burjo. Analizo turbin smo opravili na podlagi analize hitrosti vetra, ki nam je omogočila pridobitev rezultatov o proizvodnji turbin in njihovih izkoristkih. Ker imajo naprave različne moči, nismo mogli opraviti izbire le na podlagi preučevanja tehničnih dejavnikov, zato smo uvedli še ekonomsko raziskavo. S tem smo na podlagi proizvedene energije posamezne turbine ugotovili čas povrnitve investicije nakupa. Kot najboljša izbira se nam je pokazala turbina proizvajalca General Electric, model 1.5 XLE - 82.5 M. Z močjo generatorja 1,5 MW, bi v enem letu proizvedla 2.863,36 MWh električne energije in dosegla izkoristek 22,22 %. V ekonomskem pogledu bi letno z njo zaslužili 273.106,88 €, pri čemer niso upoštevani stroški vzdrževanja, investicija pa bi se povrnila v približno šestih letih.

KLJUČNE BESEDE

nastanek vetrov, energija iz vetra, sistemi vetrnih turbin, meritve hitrosti in smeri vetra, analiza vetrne turbine, ekonomska analiza

TITLE

Selecting a suitable wind turbine for the conditions at Kanalski Vrh

ABSTRACT

Layout design of wind turbines around the artificial pumped storage plant Avče was considered in the diploma thesis. At first, the theoretical description of the conversion laws for transformation of kinetic wind energy into useful mechanical, which drives the turbine generator, was brought into focus. Further, the basic components such as gearbox, generator, security systems and the grid connection were described. The main part of the thesis was to analyze the wind speed measurements and analysis of 25 wind turbines different, which differ in the manufacturer and power. Wind speed and direction data, which is owned by Soške elektrarne Nova Gorica, was obtained from the measuring station at Kanalski Vrh and then analyzed. The results showed satisfactory values and brought us hope for the installation of wind turbines. The average wind speed at 80 m height, for the period from november 2009 to november 2010 was 4,75 m/s, mainly from the direction of 60° - 80° (north, northeast), which is typical for burja (north-eastern katabatic wind). Analysis of wind speed was used to investigate the production and efficiency of wind turbines. Since the power plants are of various technical factors it was not possible to display the best choice. This is why the economic research was introduced. The results indicated that the best wind turbine for conditions on Kanalski Vrh is 1.5 XLE - 82.5 m from company General Electric. Its generator power is 1,5 MW and it would produce 2.863,36 MWh electricity in a year with a 22,22% efficiency. Its year profit would reach € 273.100,88 without maintenance costs. Investment would return after approximately six years.

KEYWORDS

formations of winds, energy from wind, wind turbine systems, measurements of wind speed and direction, wind turbine analysis, economic analysis

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Namen in cilji diplomskega dela.....	1
2	VETROVI	2
2.1	Coriolisova sila.....	2
2.2	Geostrofski vetrovi.....	3
2.3	Površinski vetrovi.....	3
3	ENERGIJA IZ VETRA – FIZIKALNE OSNOVE	4
3.1	Porazdelitev hitrosti vetra	5
3.2	Betzov zakon	7
3.3	Aerodinamika lopatic	8
3.4	Faktor razmerja med proizvedeno energijo in maksimalno proizvedeno energijo turbine v določenem časovnem obdobju (capacity factor).....	10
3.5	Graf moči vetrnice.....	10
4	ENERGIJA IZ VETRA – OSNOVE VETRNE TURBINE	11
4.1	Oblika lopatic	11
4.2	Velikost lopatic glede na proizvodno moč.....	11
4.3	Maksimalna moč in kontrola vetrne turbine	12
4.4	Strojnična košara	12
4.5	Generator.....	12
4.6	Stolp	14
4.7	Menjalnik	14

4.8	Zaščita prekoračitve hitrosti vrtenja.....	15
4.9	Priključitev turbine na električno omrežje	15
5	OKOLJSKI VIDIK	17
6	VETRNE TURBINE PO SVETU.....	18
6.1	Statistika instalirane moči	18
6.2	Tržni deleži proizvajalcev	19
7	VPLIV TERENA NA PROIZVODNJO ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	20
7.1	Hrapavost površja.....	20
7.2	Ovire.....	21
7.3	Učinek zmanjševanja energije za vetrnico ali vpliv ovire.....	22
7.4	Učinek polja vetrnic ali vpliv polja	22
7.5	Učinek doline ali vpliv tunela	23
7.6	Učinek hriba	24
8	MERITVE VETRNIH RAZMER NA KANALSKEM VRHU.....	25
8.1	Opis lokacije.....	25
8.2	Izvajanje meritev vetra	26
9	OBRAVNAVA IN ANALIZA MERITEV VETRA	28
9.1	Analiza hitrosti vetra	28
9.2	Letna porazdelitev hitrosti vetra.....	35
9.3	Frekvenčna porazdelitev hitrosti vetra po smernih razredih [m/s].....	35
9.4	Frekvenčna porazdelitev pogostosti hitrosti vetra po smernih razredih [m/s] ...	37

9.5 Weibullova porazdelitvena funkcija hitrosti vetra [m/s].....	37
10 IZBIRA PRIMERNE VETRNE TURBINE ZA RAZMERE NA KANALSKEM VRHU	39
10.1 Kriteriji izbire.....	40
10.2 Primerjava turbin.....	41
10.3 Podrobna analiza najboljše turbine – General Electric 1.5 XLE – 82.5 M.....	42
10.4 Letna porazdelitev moči turbine pri normirani hitrosti vetra	44
10.5 Frekvenčna porazdelitev hitrosti in proizvodnja turbine [kWh].....	47
10.6 Mesečna in letna proizvodnja energije [MWh].....	48
10.7 Proizvodne ure turbine	50
11 ZAKLJUČEK.....	51
12 LITERATURA.....	53
13 PRILOGA 1: IZRAČUNI GLAVNIH KARAKTERISTIK ZA VETRNE TURBINE	55

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz delovanja Coriolisove sile	3
Slika 2: Koeficient moči v odvisnosti od hitrosti vetra.....	5
Slika 3: Raylieghova porazdelitev glede na spreminjajoče se hitrosti vetra.....	6
Slika 4: Prehod vetra skozi turbino	7
Slika 5: Naraščanje in upadanje tlaka skozi turbino	8
Slika 6: Prehod zraka nad in pod lopatico.....	9
Slika 7: Upor in udarni kot.....	9
Slika 8: Graf moči vetrne turbine.....	10
Slika 9: Shema napajalnega stroja.....	14
Slika 10: Postavitev vetrnih elektrarn	22
Slika 11: Postavitev vetrne turbine v dolino	23
Slika 12: Postavitev vetrne turbine na hribu	24
Slika 13: Tok vetra skozi turbino	24
Slika 14: Panorama Kanalskega Vrha.....	26
Slika 15: Predvidena mesta postavitve vetrnih turbin.....	26
Slika 16: Merilni stolp.....	27
Slika 17: Lokacija merilnega stolpa.....	27
Slika 18: Porazdelitev hitrosti na višini 20 m od 11. 2009 do 04. 2010, Kanalski Vrh	28
Slika 19: Porazdelitev hitrosti na višini 20 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh	29

Slika 20: Porazdelitev hitrosti na višini 40 m od 11. 2009 do 04. 2010; Kanalski Vrh	29
Slika 21: Porazdelitev hitrosti na višini 40 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh	30
Slika 22: Porazdelitev hitrosti na višini 60 m od 11. 2009 do 04. 2010; Kanalski Vrh	30
Slika 23: Porazdelitev hitrosti na višini 60 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh	31
Slika 24: Porazdelitev hitrosti na višini 80 m od 11. 2009 do 04. 2010; Kanalski Vrh	31
Slika 25: Porazdelitev hitrosti na višini 80 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh	32
Slika 26: Porazdelitev hitrosti na višini 20 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh	32
Slika 27: Porazdelitev hitrosti na višini 40 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh	33
Slika 28: Porazdelitev hitrosti na višini 60 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh	33
Slika 29: Porazdelitev hitrosti na višini 80 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh	34
Slika 30: Grafični prikaz letne porazdelitve hitrosti vetra	35
Slika 31: Vetrna roža frekvenčne porazdelitve hitrosti vetra [m/s]	36
Slika 32: Frekvenčna porazdelitev pogostosti hitrosti vetra po smernih razredih [m/s]	37
Slika 33: Weibullova porazdelitev pogostosti hitrosti vetra	38

Slika 34: Moč in koeficient moči turbine General Electric 1.5 XLE v odvisnosti od hitrosti vetra	43
Slika 35: Moč turbine General Electric 1.5 XLE pri normirani hitrosti vetra za obdobje od 11. 2009 do 04. 2010	45
Slika 36: Moč turbine General Electric 1.5 XLE pri normirani hitrosti vetra za obdobje od 04. 2010 do 11. 2010	46
Slika 37: Grafični prikaz proizvodnje po mesecih za General Electric 1.5 XLE.....	49
Slika 38: Grafični prikaz razmerja med dejansko in maksimalno proizvedeno energijo vetrne turbine General Electric 1.5 XLE (faktor kapacitete)	49
Slika 39: Grafični prikaz porazdelitve proizvodnih ur obratovanja turbine	50

KAZALO TABEL

Tabela 1: Tabela instaliranih moči v Evropi	18
Tabela 2: Vrednost hrapavosti glede na značilnost površja	21
Tabela 3 Povprečne hitrosti glede na višino meritev, Kanalski Vrh.....	28
Tabela 4: Povprečne hitrosti glede na višino meritev, Kanalski Vrh.....	32
Tabela 5: Weibullova porazdelitvena tabela	38
Tabela 6: Osnovni podatki analiziranih turbin.....	40
Tabela 7: Struktura stroškov vetrne turbine	41
Tabela 8: Rezultati analize vetrnih turbin	42
Tabela 9: Osnovni podatki o turbini General Electric 1.5 XLE.....	42
Tabela 10: Podatki o moči turbine in moči vetra ter koeficient moči za General Electric 1.5 XLE.....	43
Tabela 11: Del prikaza moči turbine General Electric 1.5 XLE glede na normirano hitrost vetra.....	44
Tabela 12: Frekvenčna porazdelitev hitrosti in proizvodnja turbine General Electric 1.5 XLE	47
Tabela 13: Mesečna proizvodnja energije iz vetrne turbine General Electric 1.5 XLE	48
Tabela 14: Letna proizvodnja vetrne turbine General Electric 1.5 XLE	48
Tabela 15: Porazdelitev proizvodnih ur nad in pod delovno hitrostjo turbine.....	50

1 UVOD

Vetrna energija predstavlja poleg sončne in geotermalne energije eno najbolj čistih oblik pridobivanja električne energije. Pri svojem obratovanju na razmere v okolju skoraj ne vpliva, saj je veter edini dejavnik, ki ga potrebuje za delovanje. Število vetrnih elektrarn po svetu vsako leto močno narašča. K temu dejstvu pripomore, da so fosilni viri vse dražji in njihove kapacitete strmo upadajo. Poleg tega pa svet teži k vse strožjim ukrepom zmanjševanja izpustov CO₂, katerega povzročajo zgoraj omenjeni fosilni viri. Drugi pomemben razlog je moderna tehnologija, ki omogoča vse večje izkoristke proizvodnje energije iz obnovljivih virov. V podjetju Soške elektrarne so se za izgradnjo vetrnih elektrarn odločili zaradi vizije, da bi se energija v prihodnje pridobivala kar se le da čisto in brez prevelikih posegov v okolje. Ti dejavniki so pripeljali do ideje, da bi postavili prvo večje polje vetrnih turbin v Sloveniji ob akumulacijskem jezeru črpalne hidroelektrarne Avče. Lokacija je z vidika umestitve naprav v okolje primerna, saj je okolica zaradi gradnje jezera že degradirana in vsebuje infrastrukturo, ki je potrebna za izgradnjo vetrnega polja.

1.1 Namen in cilji diplomskega dela

Namen diplomskega dela je izbrati primerno vetrno turbino za razmere na Kanalskem Vrh. Za cilje smo določili analizo meritev vetra z merilne postaje Kanalski Vrh in analizo 25 različnih vetrnih turbin. Analiza meritev vetra vsebuje analizo hitrosti vetra, letno porazdelitev hitrosti vetra, frekvenčno porazdelitev hitrosti in pogostost vetra glede na smerne razrede neba ter Weibullovo porazdelitveno funkcijo hitrosti vetra. Pri analizi turbin smo podali osnovne podatke o turbinah, letno porazdelitev moči pri normirani hitrosti vetra, proizvodnjo energije glede na frekvenčno porazdelitev hitrosti vetra, mesečno in letno proizvodnjo energije ter število delovnih ur turbine. Poleg tehničnih analiz smo opravili tudi ekonomsko analizo povrnitve investicije na podlagi približne cene vetrne turbine.

2 VETROVI

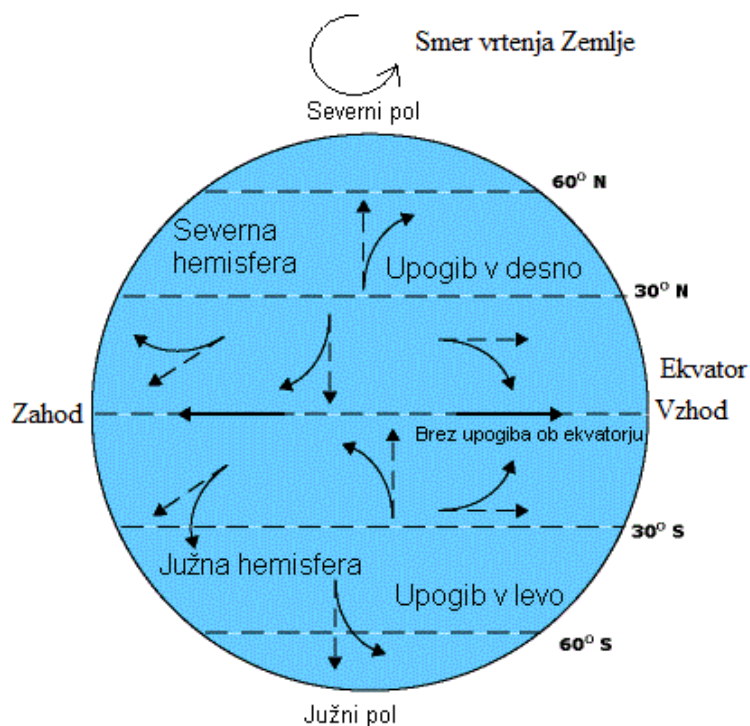
Plinast ovoj ali atmosfero nad kopnim zadržujejo sile gravitacije. Zemeljska atmosfera je razdeljena na več slojev, z višino se redči, njena temperatura pa se pri tem znižuje. Na višini med 10 in 16 kilometrov se temperatura zniža na $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ in je dokaj konstantna. Do te višine sega troposfera (to je del atmosfere), ki je povezana z vremenskimi pojavi in vetrovi. V troposferi je mnogo majhnih lokalnih vrtincev, ki merijo nekaj deset kilometrov, pa tudi velika območja visokega in nizkega zračnega tlaka ali cikloni in anticikloni. Spodnja plast teh prehodnih pojavov se giblje kot posledica segrevanja zraka in vrtenja zemlje. Tako nastajajo vetrovi (Kariž, 2008).

2.1 Coriolisova sila

Coriolisova sila je sila, ki povzroča odklon, oziroma ukrivljenje gibajočih teles z vidika opazovalca, ki se nahaja na vrtečem sistemu, na primer na Zemlji. Ime je dobila po francoskem fiziku, inženirju in matematiku Gaspardu Gustavu de Coriolisu, ki je leta 1835 razpravljal o njej.

Je navidezna sila, ki se v mirujočem sistemu opazovanja ne pojavlja, saj je tam gibanje, na katero ne deluje nobena sila, premočrtno. Pojavlja se zgolj v primerih, kjer se opazovani sistem vrti. Coriolisova sila pojasni kako se zračni tokovi gibljejo v zemeljskem ozračju (Wikipedija, 2012).

Zračne mase (Slika 1) se dvigajo nad ekvatorjem in se premikajo proti severnemu in južnemu polu v višjih plasteh atmosfere. Na okoli 30° zemljepisne širine, na obeh hemisferah, se zračne mase spustijo in vetrovi pihajo nazaj proti ekvatorju. Slika 1 prikazuje, kako Coriolisova sila upogne vetrove na severni in južni polobli (povezane ukrivljene puščice). Smer vetrov brez delovanja Coriolisove sile prikazujejo nepovezane puščice. Na severni se vetrovi ukrivijo v desno, na južni pa v levo. Vse to je posledica vrtenja Zemlje od zahoda proti vzhodu. Coriolisova sila tudi pripomore, da se zrak hitreje giblje (Kariž, 2008).



Slika 1: Prikaz delovanja Coriolisove sile

2.2 Geostrofski vetrovi

Geostrofski vetrovi nastajajo na višini okoli 1000 metrov nad zemeljskim površjem in ne segajo do tal. Vodijo jih spremembe temperature in spremembe tlaka v tem delu atmosfere in niso odvisni od oblike zemeljskega površja. Mogoče jih je izmeriti z vremenskimi baloni. Hitrost teh vetrov pri temperaturi 273 °K (0 °C) in na višini 11 kilometrov je približno 15 m/s (Medved in Novak, 2000).

2.3 Površinski vetrovi

Površinski vetrovi so za pridobivanje energije bolj zanimivi in jih zato natančneje preučujemo. Segajo do višine 100 metrov in so zelo odvisni od oblike zemeljskega površja in ovir na njem. Hitrost vetra se z višino povečuje, saj je vpliv ovir na površju vedno manjši. Prav zaradi tega je važno, da je vetrna turbina postavljena čim višje, saj s tem pridobimo večjo moč. Smer vetra blizu zemeljskega površja je odvisna tudi od prej omenjenih geostrofskih vetrov in Coriolisove sile (Medved in Novak, 2009).

3 ENERGIJA IZ VETRA – FIZIKALNE OSNOVE

Vetrna turbina izkorišča kinetično energijo vetra za poganjanje elis in s tem posledično rotorja generatorja. Količina energije, ki se prenese preko elis do rotorja je odvisna od gostote zraka, hitrosti vetra in površine rotorja. Čim večja je gostota zraka, tem večja je energija vetra za pogon generatorja. Gostota se spreminja glede na temperaturo in vlago v zraku. Gostota je manjša pri večji vlažnosti ali pri višji temperaturi (Medved in Novak, 2000).

Da bi napovedali, koliko energije vetra bo pretvorila neka vetrnica v določenem časovnem obdobju (običajno v letu dni), moramo poznati porazdelitev hitrosti vetra v tem času. Določimo jo s pomočjo Weibullove porazdelitvene funkcije.

V fiziki kinetično energijo (W_k) (1) podamo kot produkt mase (m) in kvadrata hitrosti (v^2):

$$W_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

V dinamiki tekočin, med katere štejemo tudi tok vetra, je masni pretok (\dot{m}) podan kot gostota zraka (ρ) s površino (A) in hitrostjo (v) (2). Moč vetra (P) izrazimo kot:

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (2)$$

in pri tem upoštevamo definicijo masnega pretoka

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3)$$

Tako vidimo, da je moč vetra je sorazmerna tretji potenci hitrosti vetra (3). Upoštevati moramo, da je moč turbine enaka razliki moči vetra pred in za rotorjem vetrne turbine.

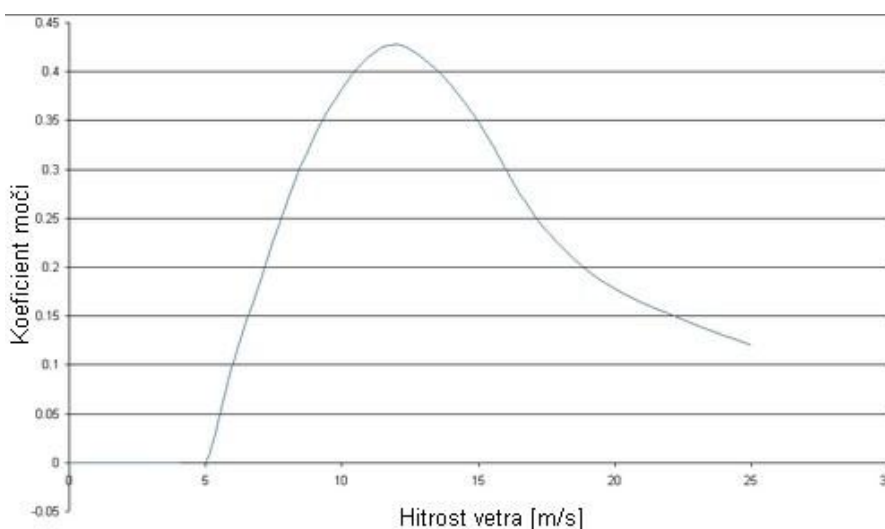
Koeficient moči vetrne turbine (C_p - power coefficient) je definiran kot delež moči vetra, ki jo je turbina sposobna pridobiti iz njega. Njegova maksimalna vrednost je 59 % (Betzova limita). Najmodernejše turbine imajo koeficient 0,42, kar pomeni 42 % izkoristek vetra (Graham, 2000).

Kako se koeficient moči spreminja prikazuje enačba (8) na strani 7.

Iz tega sledi izraz za moč (P) vetrne turbine (4):

$$P = C_p \frac{\rho A v^3}{2} \quad (4)$$

V resnici pa moč turbine ni sorazmerna s kubom hitrosti vetra, saj koeficient moči ni konstanten, temveč je v splošnem funkcija hitrosti vetra. Slika 2 prikazuje graf izkoristka vetrne turbine, kako se ta spreminja s hitrostjo vetra. Najvišji je pri hitrosti okoli 12 m/s, znaša pa $\approx 0,42$.



Slika 2: Koefficient moči v odvisnosti od hitrosti vetra

3.1 Porazdelitev hitrosti vetra

Za porazdelitev hitrosti vetra je bilo preizkušenih veliko različnih modelov, ampak v uporabi sta le dva; Weibullova in Rayleighova porazdelitev. Weibullova porazdelitvena funkcija (5) je funkcija gostote verjetnosti hitrosti vetra (f_v), določena z dvema parametroma; parameter merila (c), v našem primeru hitrost vetra (m/s), in parameter oblike (k), ki določa obliko krivulje. Za regije s stalnimi vetrovi je parameter oblike visok, med 4 in 5, kar pomeni da so izmerjene hitrosti vetra blizu povprečne hitrosti. Za območje Evrope in Amerike pa je ta vrednost med 1,8 in 2,4.

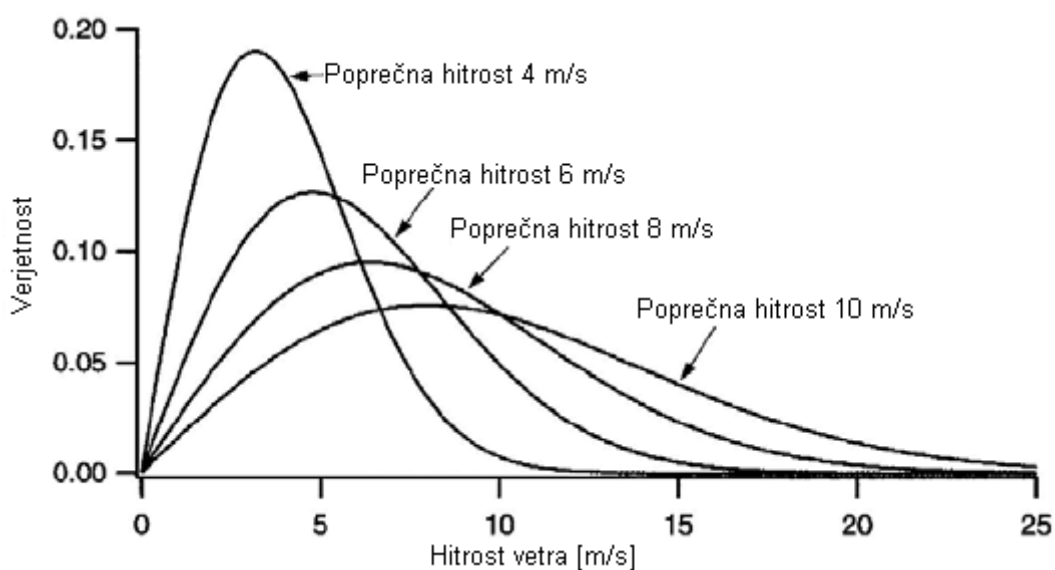
$$f_{(v, k, c)} = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{1/k} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (5)$$

Rayleighova porazdelitvena funkcija je poseben primer Weibullove porazdelitve (Slika 3) (6) kjer ima parameter k vrednost 2.

$$f_{(v)} = \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2}, 0 < v < \infty \quad (6)$$

Parameter Rayleighove porazdelitve lahko opišemo s povprečno hitrostjo (\bar{v}) izraženo eksplicitno (7):

$$f_{(v)} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{v}{\bar{v}^2}\right) e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2}, 0 < v < \infty \quad (7)$$

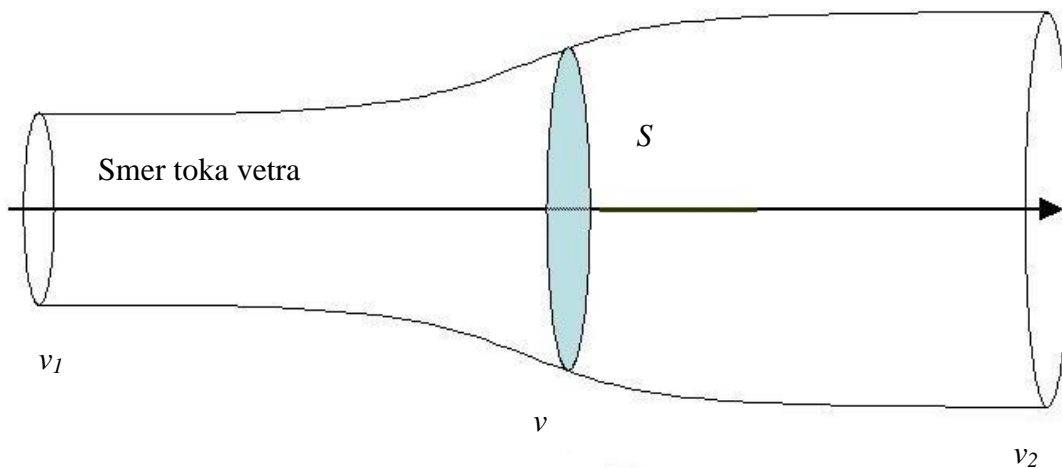


Slika 3: Rayleighova porazdelitev glede na spreminjajoče se hitrosti vetra

Tako Weibullova kot Rayleighova porazdelitev pogostosti podata bolj natančno napoved hitrosti pri višjih povprečnih hitrostih vetra. Za področja s stalnim vetrom je bolje uporabiti Weibullovo porazdelitveno funkcijo. Z omenjenimi tehnikami dobimo natančnejša povprečja hitrosti vetra, katera so pomembna pri načrtovanju elektrarne in pri doseganju čim višjega izkoristka le te. (Nelson, 2009).

3.2 Betzov zakon

Več kinetične energije kot turbina zajame iz vetra, bolj se zmanjša njegova hitrost za rotorjem. Ker izraba celotne energije ni možna, nam Betzov zakon pove, koliko jo je mogoče pretvoriti v mehansko energijo. Idealna vetrna turbina upočasni hitrost vetra za $2/3$, kar pomeni, da je najvišja možna pretvorba kinetične energije v mehansko 59 %. Betzovo število je limita koeficienta moči (Medved in Arkar, 2009).



Slika 4: Prehod vetra skozi turbino

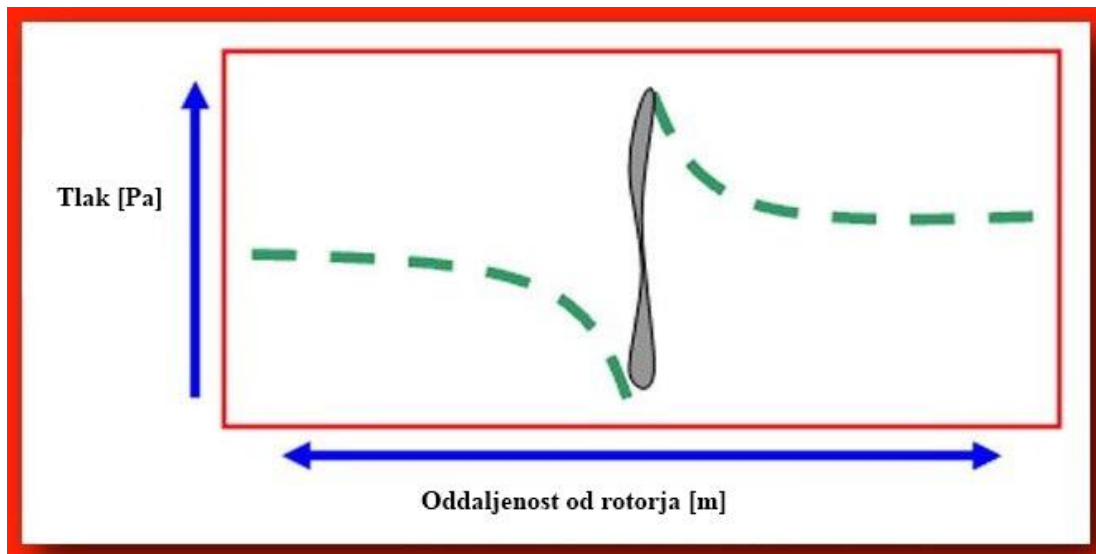
Povprečna hitrost vetra (v) ob turbini je odvisna od hitrosti, s katero vstopa v turbino (v_1) ter hitrosti vetra, ki izstopa iz nje (v_2) (Slika 4).

Izkoristek vetrne turbine lahko izračunamo z izrazom (8), kjer je moč, ki jo razvije turbina (P_t) in moč vetra (P_v). Kot smo že omenili je najvišji teoretični izkoristek (MAX) 0,59 ali 59 %.

$$MAX = \frac{P_t}{P_v} \quad (8)$$

Poleg prehoda vetra skozi turbino pa se spreminja tudi tlak (Slika 5). Pred vetrnico tlak postopoma narašča, takoj za njo upada nato pa se umiri na normalen zračni tlak. Te razlike so minimalne.

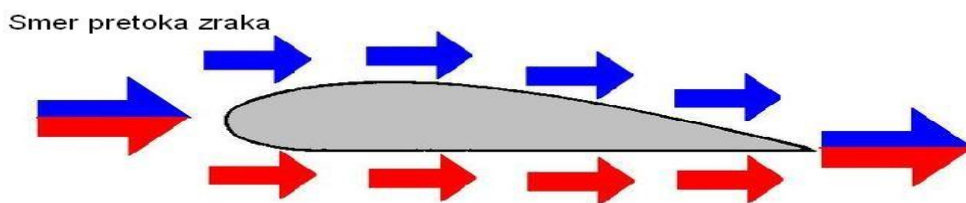
Omenjeni pojav je tudi vzrok za nastanek turbulenc, ki nastanejo zaradi vdora zraka, ki prehaja preko rotorja in zadene ob mirujoč zrak za njim (Medved in Arkar, 2009).



Slika 5: Naraščanje in upadanje tlaka skozi turbino

3.3 Aerodinamika lopatic

Moderna turbina navadno sestoji iz dveh oz. treh lopatic, ki so narejene iz visoko kvalitetnega, gostega lesa, pleksi stekla ali kompozitnih materialov. Lopatice so izdelane po vzoru letalskih kril in dopolnjene s specifičnimi dodatki za vetrno turbino. Razvite so tako, da čim bolje ujamejo energijo iz vetra. Preden so bile razvite moderne oblike lopatic smo poznali mline na veter, katerih izkoristek lovljenja vetra je bil veliko slabši od današnjih. Moderne lopatice so razvite na podlagi mnogih študij o aerodinamiki. Testirajo jih v vetrovnikih, ki pokažejo ali je izdelek narejen dobro oziroma kakšen izkoristek bo imela turbina na izbranem mestu. Zrak, ki drsi po zgornji strani lopatice ima višjo hitrost od tistega, ki teče po spodnji strani. Pri tlaku pa je ravno obratno. Tlak na zgornji strani je manjši od tistega na spodnji, kar povzroči vzgon in vrtenje vetrnice. (Slika 6)



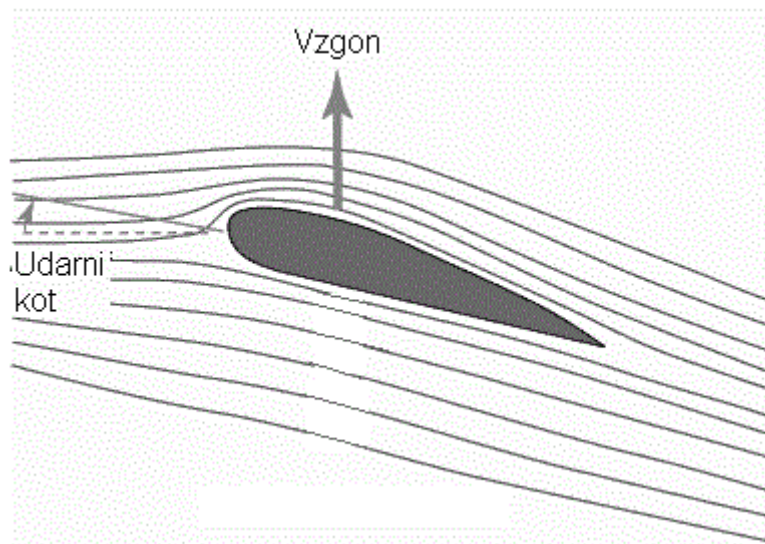
Slika 6: Prehod zraka nad in pod lopatico

Izračun vzgona (9), kjer je sila vzgona (F_v), koeficient dinamičnega vzgona (C_v), gostota zraka (ρ), projekcija površine telesa prečno na smer gibanja zraka (A_v) in hitrost pretoka zraka (v^2):

$$F_v = \frac{1}{2} C_v \rho A_v v^2 \quad (9)$$

Lopaticice so nesimetrične oblike, kar povzroči nesimetrične tokovnice zraka, posledično so hitrosti na zgornji in spodnji strani različne (Graham, 2000).

Poleg tega pa nanje deluje tudi sila upora (Slika 7).



Slika 7: Upor in udarni kot

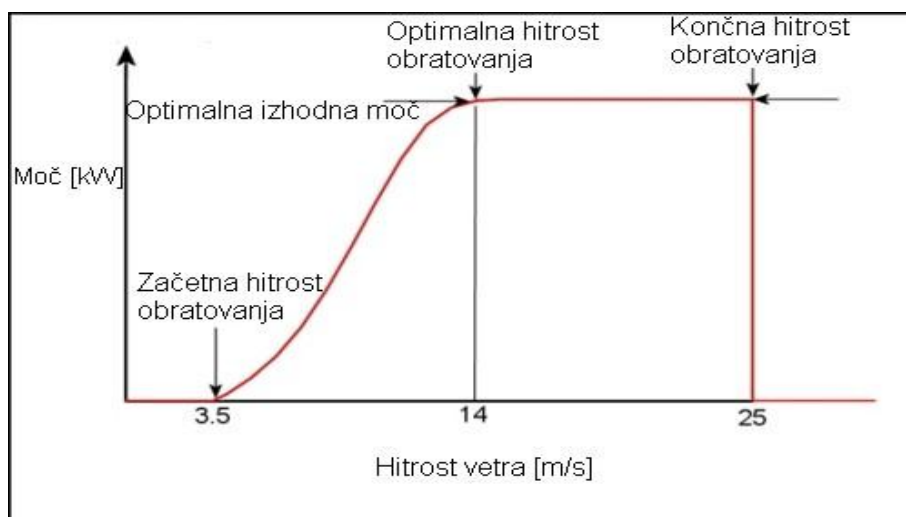
Pri večanju vpadnega kota se tokovnice odmaknejo na zgornjem robu in se oblikujejo v vrtince, kar povzroči veliko zmanjšanje vzgona in koeficienta dinamičnega vzgona (C_v), poleg tega pa poveča silo in koeficient trenja. Strokovno se ta pojav imenuje »stall« (The wind turbine, 2011).

3.4 Faktor razmerja med proizvedeno energijo in maksimalno proizvedeno energijo turbine v določenem časovnem obdobju (capacity factor)

Je pomemben podatek, ki nam pove koliko nazivne moči doseže turbina v določenem časovnem obdobju. Je povprečje med dejansko proizvodnjo energije in maksimalno proizvodnjo, ki bi jo vetrna turbina dosegla, če bi obratovala s polno nazivno močjo, 24 ur na dan v nekem obdobju, lahko pa mu rečemo tudi procent dosežene nazivne moči. To razmerje je največkrat med 20 in 40 %.

3.5 Graf moči vetrnice

Graf moči vetrnice (Slika 8) pove osnovne karakteristike o delovanju vetrne turbine. Sestavljen je iz treh točk, ki prikazujejo začetek delovanja vetrne turbine (začetna hitrost obratovanja), točke kjer je izhodna moč optimalna in končne hitrosti, kjer se naprava zaustavi. Za pravilno delovanje tega sistema skrbi merilnik hitrosti vetrnice. Ob nepravilnem delovanju le tega so posledice lahko katastrofalne, saj lahko pride do mehanskih poškodb elis ali celo do zrušitve celotnega stolpa. Proizvajalec lahko na podlagi podatkov vetrnih razmer prilagodi območje delovanja in tako poskrbi za optimalno delovanje (Graham, 2000).



Slika 8: Graf moči vetrne turbine

4 ENERGIJA IZ VETRA – OSNOVE VETRNE TURBINE

Pri sistemu vetrnih turbin poznamo tri glavne sestavne dele:

- Turbina
- Košara z generatorjem in mehanizmom za obračanje
- Stolp

Turbina ujame vetrno energijo z rotacijo košare v kateri je generator. V tej košari se poleg generatorja in mehanizma za obračanje turbine v smer pihanja vetra nahaja še menjalnik, senzor za hitrost in smer vetra ter sistem za kontrolo delovanja. V stolpu pa so navadno kanali za vodnike, motor za obračanje košare in dostop do samega vrha vetrnice za vzdrževanje.

4.1 Oblika lopatic

Lopatice se vrtijo s kotno hitrostjo. Obodne hitrosti lopatice so pri različnih oddaljenostih od osi različne. Ker so lopatice pri sodobnih vetrnicah načrtovane tako, da je napadni kot konstanten za celo lopatico, morajo biti le te od vrha proti korenu (glede na vzdolžno os, ki je pravokotna na os vrtenja) čedalje bolj zavite (The wind turbine, 2011).

4.2 Velikost lopatic glede na proizvodno moč

Poleg aerodinamike in materialov iz katerih so lopatice zgrajene, vpliva na proizvodno moč tudi njihova velikost. Vsi trije dejavniki pa se dopolnjujejo pri izkoristku vetrne turbine. Vedeti moramo, da imajo velike turbine, ki se uporabljajo za komercialno rabo in majhne, ki so v uporabi za privatne namene zelo različno filozofijo oblikovanja. Majhni vetrni sistemi so proizvedeni bolj robustno in jih ni treba vzdrževati kot velike. Njihove lopatice so krajše in debelejše glede na stolp, medtem ko so elektrarne za komercialno rabo optimizirane, da imajo največji možen izkoristek, aerodinamično in proizvodno pa so mnogo bolj dovršene kot majhne. Poleg tega pa so obratovalni in vzdrževalni stroški dosti večji in obsežnejši (The wind turbine, 2011).

4.3 Maksimalna moč in kontrola vetrne turbine

Če hitrost vetra narašča, hitrost rotorja ustreza maksimalni izhodni moči iz turbine, ki ravno tako narašča zaradi aerodinamičnih lastnosti lopatic turbine. Če se hitrost vetra na določenem kraju spreminja smo v prednosti, če razvijemo sistem, ki bo spreminjal obratovalno hitrost turbine glede na hitrost vetra. Na ta način bo turbina izkoristila ves potencial vetra in proizvedla največ možne energije. Največ turbin obratuje najbolj učinkovito pri relativno konstantnem hitrostnem razmerju, ki je razmerje med hitrostjo lopatic turbine in hitrostjo vetra. Optimalno hitrostno razmerje je podano s strani proizvajalca na podlagi njihovih testiranj. Razmerje ostane dokaj konstantno skozi celotno življenjsko dobo turbine. Spreminja se le v primerih erozije lopatic in ostalih mehanskih poškodb. Na podlagi omenjenih poškodb je priporočljivo opravljanje testov tudi med obratovanjem, saj s tem zagotovimo večjo učinkovitost turbine, vendar pa so takšni testi dragi (Graham, 2000).

4.4 Strojnična košara

Strojnična košara vsebuje vse najbolj pomembne dele vetrne turbine. Zajema menjalnik, generator električne energije, elektroniko za kontrolo, merilne naprave in mehanizem za obračanje vetrnice. Vrteči rotor je povezan preko gredi (glavna gred) do menjalnika in potem preko druge gredi (visoko-hitrostna gred) do generatorja. Velike turbine imajo le 15-20 obratov na minuto, ko je veter konstanten. Visoko razmerje menjalnika pa poveča hitrost gredi, ki gre v generator (The wind turbine, 2011).

4.5 Generator

Vloga generatorja je, da mehansko delo, ki ga proizvaja rotor pretvarja v električno energijo.

Glede na način delovanja poznamo več vrst generatorjev:

- Sinhroni generatorji
- Asinhroni generatorji
- Dvojno napajani (double fed) generatorji

Sinhroni generatorji: Ta model generatorjev lahko obratuje le pri konstantni hitrosti vrtenja, kar je pri vetrnih turbinah skoraj nemogoče zagotoviti. Dobra stran sinhronih generatorjev je, da lahko proizvajajo jalovo moč. Jalova moč je del električne moči, ki vzpostavlja in vzdržuje električna in magnetna polja v napravah izmeničnega toka. Pred sinhronizacijo z omrežjem se mora rotor vrteti s sinhrono hitrostjo, zagon rotorja pa mora zagotoviti veter (Bergoč in drugi, 2009).

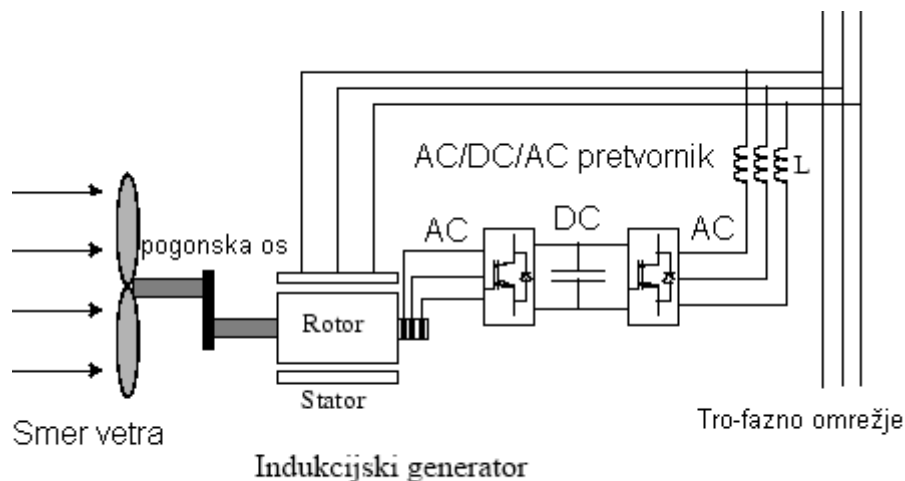
Asinhroni generatorji: Hitrost vrtenja asinhronih generatorjev ni povsem konstantna, vendar je območje delovanja zelo ozko - to je le nekaj odstotkov sinhronne hitrosti vrtenja. Ta lastnost pa je bistvenega pomena za dinamični odziv na spremembe vetra ali bremena. Zato je odziv asinhronnega generatorja na nenadne spremembe precej bolj ugoden kot pri sinhronem generatorju.

Odlikuje jih tudi nizka cena, enostavna konstrukcija, robustnost in enostavnost za priklop v omrežje. Zagon generatorja lahko poteka tako kot pri zagonu motorja, zato ni nujno, da rotor premakne veter (Bergoč in drugi, 2009).

Dvojno napajan DFG generator: Razvoju dvojno napajanega DFG generatorja je botroval sam razvoj vetrnih turbin. Stroj omogoča prilagajanje hitrosti vrtenja rotorja tako, da je izkoristek največji. Vse to je mogoče doseči tudi z generatorjem, ki je v omrežje priključen preko frekvenčnega pretvornika. Vendar pa je ta možnost zaradi dimenzioniranja pretvornika slabša.

Če napajamo preko pretvornika stator, mora biti pretvornik dimenzioniran na navidezno moč agregata. V primeru dvojno napajanega stroja pa je moč pretvornika bistveno manjša, saj napaja le rotor asinhronskega stroja.

Dvojno napajan (Slika 9) stroj je dobil ime po njegovi glavni lastnosti, da je odvzem moči možen tako preko rotorja, kot preko statorja. Samo delovanje pa je zelo podobno asinhronemu stroju. Pri vetrnih elektrarnah je najbolj uporabljen generator v zadnjih letih.



Slika 9: Shema napajalnega stroja

Malo prirejen generator z dvojnim napajanjem se uporablja tudi v črpalnih hidroelektrarnah, saj je pri njih, podobno kot pri vetrnih turbinah, problem konstanten tok vode. DFG generatorji pa imajo sposobnost, da se lažje prilagajajo na spremembe toka vode ali vetra (Bergoč in drugi, 2009).

4.6 Stolp

Stolp ni nujno le nosilec košare in lopatic ampak tudi blažilnik vibracij, ki jih povzroča veter, vrtenje rotorja, mehanizem za premikanje košare ... Raziskave kažejo, da lahko pride v primeru slabega dimenzioniranja stolpa do katastrofalnih posledic kot na primer zrušenje vetrne turbine.

Pri majhnih vetrnicah je stolp navadno visok nekaj premerov vetrnice, da se zmanjša vpliv površja na pretok zraka skozi rotor. Pri večjih napravah so stolpi lahko visoki od 50 pa do 110 metrov. Za zagotavljanje varnosti in vzdrževanja stolp vsebuje označevalne luči in barve, da je ta dovolj viden. Glede samega vzdrževanja, so v notranjosti speljane stopnice za dostop do košare (Wind power, 2011).

4.7 Menjalnik

Eden najbolj pomembnih delov vetrne turbine ja prav gotovo menjalnik. Stoji med glavno gredjo in generatorjem.

Njegov namen je, da poveča število vrtljajev rotorja na hitrost, ki je potrebna za proizvodnjo elektrike v generatorju, to je od 1000 do 1500 obratov v minuti (Wind power, 2011).

4.8 Zaščita prekoračitve hitrosti vrtenja

Da lahko preprečimo morebitne mehanske poškodbe vetrne turbine, mora ta imeti vgrajene varnostne ukrepe, ki turbino zaustavijo in preprečijo poškodbe rotorja in elektromehanskega sistema (Wind power, 2011).

Za zaustavitev poznamo štiri metode za nadzor in zmanjšanje hitrosti turbine:

- Nadzor za prisilno zaustavitev (stall control): Ko je hitrost vetra velika (nad 25 m/s) se lopatice turbine zaustavijo in tako preprečijo mehanske poškodbe zaradi prevelike hitrosti vrtenja le teh.
- Nadzor za reguliranje hitrosti rotorja (pitch control): Zaustavitev je podobna kot pri prisilni zaustavitvi, le da se rotor še vedno vrti tudi pri visokih hitrostih, ampak le s hitrostjo, ki je še varna za obratovanje. To se doseže z obračanjem lopatic, tako da te nimajo velikega vzgona in tako manjšo hitrost vrtenja.
- Nadzor za obračanje košare v smer vetra (yaw control): Os rotorja je obrnjena v smer vetra. Pri nadzoru obračanja košare se ta obrne na mesto od kjer piha veter.

4.9 Priključitev turbine na električno omrežje

V elektroenergetskem sistemu morajo elektrarne poleg proizvodnje električne energije skrbeti tudi za druge dejavnike, na primer regulirati napetost in frekvenco v omrežju. Trenutno elektrarne v svetu ne igrajo vloge pri napetostni in frekvenčni regulaciji. Poleg tega jih zaščita ob nastanku napake v omrežju po pravilu izklopi, ponovno pa jih vklopi šele po ponovno vzpostavljenem normalnem stanju v omrežju. Konvencionalni energetske viri torej ohranjajo izključno vlogo v zagotavljanju sistemskih storitev, kot da vetrne elektrarne sploh ne bi bile prisotne.

Ker pa vemo, da se v svetu vsako leto proizvodnja iz teh virov povečuje, moramo pričakovati tudi vplive na stabilnost frekvence, napetosti in kota (Bergoč in drugi, 2009).

Direktna priključitev na omrežje: Posebnost tega načina priključitve je, da se mora rotor turbine vrteti enakomerno.

Hitrost vrtenja je odvisna od električnega omrežja, zato je velikokrat učinkovitost turbine zmanjšana, razen če je rotor možno mehansko kontrolirati. Direktna priključitev je značilna za sinhrono generatorje, ki obratujejo le pri konstantni hitrosti vrtenja (Bergoč in drugi, 2009).

Indirektna priključitev na omrežje: Pri tej izvedbi teče generator v ločenem sistemu, ki je na omrežje priključeno preko AC – DC – AC pretvornika. Na ta način turbina proizvaja električni tok s frekvenco, ki je odvisna od hitrosti vrtenja rotorja. Izmeničen tok, ki ga proizvede generator, se najprej pretvori v enosmerno napetost (DC), z uporabo močnostnih tranzistorjev. Enosmerni tok se s tuljavami in kondenzatorji stabilizira, potem pa se znova pretvori v izmenični tok (AC). Slabost tega sistema je visoka cena upravljanja (Bergoč in drugi, 2009).

5 OKOLJSKI VIDIK

Okolje samo po sebi kliče po korenitih spremembah glede ravnanja z njim. Ogljikov dioksid (CO₂) je največji krivec za pojav tople grede in podnebnih sprememb. Ena od rešitev za čistejše okolje je v vetrni energiji, ki je poleg sončne okolju najbolj prijazna. Kot vsi obnovljivi viri je tudi veter naravni pojav in ne prinaša posledic, ki jih poznamo pri fosilnih gorivih.

Vetrna elektrarna med svojim delovanjem ne proizvaja škodljivega ogljikovega dioksida, le pri njeni gradnji in pri proizvodnji njenih delov se sproščajo manjše količine tega plina.

Za enako količino proizvodnje elektrike, kot jo letno proizvedejo vetrne elektrarne, bi morali preko leta porabiti preko 25 milijonov ton premoga ali 17 milijonov ton olja. Letni porast energije iz vetra do leta 2020 naj bi bil 1.000 GW, to je 2.600 TWh na leto.

Poleg ogljikovega dioksida pa bi se s proizvodnjo elektrike iz vetrnih turbin povečala kvaliteta zraka, ki ga dihamo. Fosilna goriva pri gorenju sproščajo še strupen žveplov dioksid (SO₂) in dušikove okside (NO_x), ki so za naše zdravje škodljivi (Wind power, 2011).

6 VETRNE TURBINE PO SVETU

Število vetrnih elektrarn po svetu vsako leto strmo narašča. K temu pripomore tehnologija, ki je danes na takem nivoju, da omogoča smotrno izkoriščanje moči vetra za proizvodnjo električne energije, poleg tega pa so fosilni viri vse dražji in njihove kapacitete strmo upadajo. Zavedamo pa se tudi, da svet teži k vse večjim ukrepom zmanjševanja izpustov CO₂, katerega povzročajo fosilni viri (Wind in power, 2010).

6.1 Statistika instalirane moči

Sorazmerno z napredovanjem tehnologije se je tudi moč instaliranih in postavljenih vetrnih elektrarn po svetu povečevala in še vedno raste. Če primerjamo količino instalirane moči skozi leta vidimo, da se je ta od leta 2000 do leta 2010 povečala približno 12 krat.

Letna svetovna vsota moči je bila leta 2000 17.400 MW, medtem ko je konec leta 2010 znašala kar 194.400 MW.

K tej številki je tudi Evropa doprinesla velik delež, saj je bilo do konca leta 2010 instaliranih za 86.279 MW turbin (Wind in power, 2010).

Prav tako se Evropa lahko pohvali z največjim proizvajalcem Danskim Vestasom. Slovenija je imela po koncu leta 2010 le majhen delež glede na Evropo in sicer 0.03 MW. Glede na zastavljene projekte pa lahko do leta 2020 pričakujemo za 700 MW instaliranih vetrnih turbin. Celotna Evropa pa bi do tega leta imela za 265.000 MW elektrarn (Wind in power, 2010).

Primerjavo moči po državah prikazuje tabela 1

Tabela 1: Tabela instaliranih moči v Evropi

Država	Nemčija	Španija	Francija	Portugalska
Instalirana moč [MW]	27214	20676	566	390

6.2 Tržni deleži proizvajalcev

Na trgu proizvajalcev vetrnih turbin poteka veliko rivalstvo. Ker je panoga dokaj nova, je možnosti za razvoj veliko. Proizvajalci v razvoj novih tehnologij vlagajo veliko sredstev, saj so le na ta način lahko konkurenčni.

Evropa se lahko pohvali z največjim svetovnim proizvajalcem, Danskim Vestasom, ki je imel konec leta 2009 skoraj 15 % svetovni delež. Vestas ima trenutno instaliranih preko 41.000 turbin po vsem svetu. Podjetje zaposluje 22.000 ljudi, njegov delež pa se je v primerjavi z letom 2007 skrčil za skoraj polovico, kar dokazuje, da je tekma proizvajalcev neizprosna (Wind in power, 2011).

Vestasu sledijo drugi svetovni proizvajalci:

- Sinovel, ki ima 11 % svetovni delež in je lociran na Kitajskem
- GE Wind energy z 9,9 % svetovnim deležem
- Enercon s 7,2 % svetovnim deležem
- Gamesa, špansko podjetje s 6,6 % svetovnim deležem.

7 VPLIV TERENA NA PROIZVODNJO ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za učinkovito delovanje vetrnih turbin je ključnega pomena oblika terena na katerem so postavljene. Glavni problem postavitve turbin predstavljajo tako naravne kot umetne ovire, ki preusmerjajo tok zraka, zmanjšujejo njegovo hitrost in vplivajo na nezaželene turbulence. Zato moramo pred postavitvijo dodobra preučiti teren in njegovo okolico. Pri tem nam pomagajo tehnike, ki smo ji opisali v tem poglavju.

7.1 Hrapavost površja

Hrapavost je merilo zgradbe oziroma oblike površja. Določena je kot razlika vertikalnih sprememb med realnim in idealnim tipom površja. Merilo hrapavosti površja, čez katerega teče zračni tok, je definiran kot (9):

$$h_0 = \frac{\varepsilon}{30} \quad (9)$$

Kjer je hrapava dolžina (h_0) in povprečna višina naravne površine (ε).

Pri vetrni energiji ga opišemo kot vzrok upadanja hitrosti vetra proti tlom. Tak učinek imenujemo vetrna senca. Razred hrapavosti površja je v tabeli definiran na osnovi hrapave dolžine (Tabela 2) (Mikelj, 2006).

Kot primer lahko navedemo vetrno turbino, ki ima generator postavljen na višini 40 m in premer rotorja ravno tako 40 m. Če je hitrost vetra na višini, ko so elise vetrnice na najvišji točki 9,3 m/s, je hitrost, ko so na najnižji le 7,7 m/s. Sprememba hitrosti vetra je posledica omenjenega učinka.

Če povzamemo prejšnje ugotovitve in izkušnje iz prakse je priporočljivo postaviti čim višji stolp in se s tem izogniti nezaželenim spremembam hitrosti in vrtinčenju vetra bližje površju zemlje. Višina postavitve novodobnih, večjih vetrnih turbin je nekje med 80 in 120 metri (Wind power, 2011).

Tabela 2: Vrednost hrapavosti glede na značilnost površja (Mikelj, 2006)

Razred hrapavosti (α)	Razred hrapavosti (m)	Značilnosti površja
0	0,0002	Vodna površina
0,5	0,0024	Odprte površine brez izboklin, npr. letališča, pokošeni travniki, puščava.
1	0,03	Polja brez ograj ali grmičevja, samo zaobljeni griči in raztresena postavitev zgradb.
1,5	0,055	Kmetijske površine z nekaj zgradbami, grmičevjem, drevesi do višine 10 m, na razdalji do 1300 m.
2	0,1	Kmetijske površine z nekaj zgradbami, grmičevjem, drevesi do višine 10 m, na razdalji do 500 m.
2,5	0,2	Kmetijske površine z veliko hišami, grmovjem in drevesi do 10 m. Razdalja med objekti manj od 300 m.
3	0,4	Vasi in majhna mesta.
3,5	0,8	Velik mesta s hišami.
4	1,6	Velika mesta s hišami in nebotičniki.

7.2 Ovire

Pri postavitvi vetrnih elektrarn moramo biti zelo pozorni na teren okoli nje. Vedeti moramo, da bo vsaka ovira v njeni neposredni bližini vplivala na dotok zraka do njenega rotorja. Pri izvajanju študij za postavitev vetrnih elektrarn so v pomoč tudi določena orodja, ki na podlagi vnesenih parametrov prikažejo optimalno mesto za postavitev.

Velikokrat pa je teren tako kompleksen, da tudi računalniki ne zmorejo izračuna. Izogibati se je treba obal pred katerimi so otoki, kateri mečejo »vetrno senco« na celotno območje za njimi (Wind power, 2011).

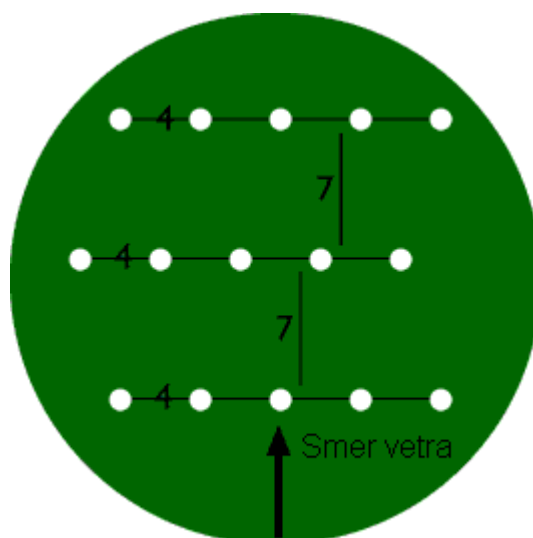
7.3 Učinek zmanjševanja energije za vetrnico ali vpliv ovire

Veter ima manjšo energijo, ko zapusti rotor, kot pred tem, ko vstopa vanj. Ko veter prehaja skozi rotor, ta izčrpa energijo iz njega, posledično se kinetična energija vetra zmanjša. Za rotorjem nastane turbulentna sled, katera meče vetrno senco na turbino za njo. Teorija pravi, da se energije ne da ustvariti iz nič, prav tako se je ne da uničiti. Če se je na račun oddanega dela skupna energija porabila, se je na račun prejetega dela za natanko toliko povečala energija okolice (Wind power, 2011).

7.4 Učinek polja vetrnic ali vpliv polja

Kot smo videli pri vplivu ovire, energija vetra za vetrnico pade, zato moramo polje vetrnic pravilno razporediti. Pri razporejanju je zelo pomembno, da je učinek vetrnega polja čim večji. V praksi so turbine ena ob drugi narazen vsaj za 4 premere rotorja, vrste pa morajo biti narazen za vsaj 7 premerov rotorja (Slika 10).

Četudi turbine pravilno razporedimo, še vedno ne ubežimo celotnim izgubam, ki v tem primeru znašajo 5 % (Wind power, 2011).



Slika 10: Postavitev vetrnih elektrarn

7.5 Učinek doline ali vpliv tunela

Če vzamemo za primer tlačilko za polnjene kolesarskih gum vidimo, da je hitrost zraka skozi šobo tlačilke, veliko večja kot je hitrost pritiskanja nanjo s cilindrom znotraj tlačilke.

Kot drugi primer lahko vzamemo visoke stavbe v mestu. Ko se sprehajamo med njimi, začutimo pospeševanje vetra. Na podlagi teh dveh primerov lahko potrdimo teorijo postavljanja vetrnih turbin med hribi.

Ko veter piha po dolini med hribi, se pred dolino začne stiskati, za tem pa močno pospeševati po dolini. Ta učinek pospeševanja vetra je opisan z Bernoullijevo enačbo, ki opisuje stacionarni laminarni tok nestisljive in neviskozne tekočine vzdolž tokovnice. Če na prostem piha veter s hitrostjo 6 m/s, doseže hitrost v »naravnem tunelu« tudi do 9 m/s. Več vetra pomeni večjo proizvodnjo električne energije. Postavljanje turbin na ta območja (Slika 11) je zaradi doseganja višjih hitrosti glede na okoliške kraje, pametna odločitev.

Za doseganje čim boljših rezultatov pa moramo upoštevati, da je dolina gladka, »mehko« umeščena v teren. V primeru, da je dolina neravna oz. hrapava, pride do nezaželenih turbulenc in s tem do nedefiniranih smeri pihanja vetra.

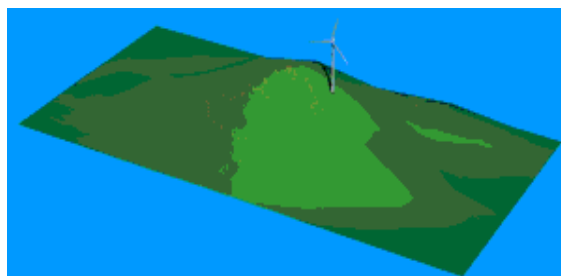
V najslabšem primeru pa tudi do kompletne izgube vseh prednosti pospeševanja vetra v dolini (Wind power, 2011).



Slika 11: Postavitev vetrne turbine v dolino

7.6 Učinek hriba

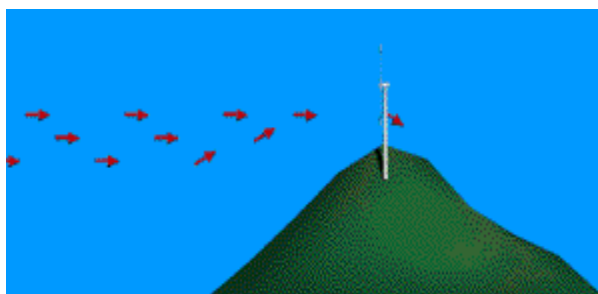
Današnja praksa je, da se vetrne turbine postavlja na vrhove hribov (Slika 12) in po grebenih. Poleg postavitve na danem kraju pa moramo upoštevati tudi bližnjo in širšo okolico, zaradi morebitnih ovir pri pihanju vetra na našo lokacijo. Če je okolica »čista« je »čist« tudi veter, ki piha konstantno in brez nezaželenih turbulenc.



Slika 12: Postavitev vetrne turbine na hribu

Na vetrni strani hriba se veter stiska proti površju, da na vrhu doseže največjo hitrost. Vetrnica ima tako tam največji možen izkoristek.

Na drugi strani hriba pa zaradi upadanja terena tlak upade, poleg tega pa postane tok vetra zelo nepredvidljiv in zelo turbulenten.



Slika 13: Tok vetra skozi turbino

Kot nam prikazuje (Slika 13), se lahko smer vetra kdaj pa kdaj začne upogibati že preden doseže vrh hriba, ker se območje visokega tlaka raztegne že pred hribom (Wind power, 2011).

8 MERITVE VETRNIH RAZMER NA KANALSKEM VRHU

Za relevantne rezultate v diplomskem delu smo potrebovali dejanske meritve vetra z mesta, na katerem bodo postavljene vetrne turbine. Najprej smo se posvetili analizi vetra. Začeli smo urejati surove podatke meritev hitrosti in smeri vetra z merilnega stolpa. Pridobili smo podatke s štirih različnih višin.

Začeli smo z analizo hitrosti vetra za dve različni obdobji meritev in sicer od novembra 2009 do novembra 2010, ter od novembra 2010 do aprila 2011. V rezultatih so razvidne povprečne hitrosti z vseh štirih meritvenih višin (20 m, 40 m, 60 m in 80 m), grafično pa smo prikazali obe obdobji meritev. Analizo smo nadaljevali z grafičnim prikazom frekvenčne porazdelitve hitrosti po smernih razredih neba in frekvenčne porazdelitve pogostosti pihanja vetra, končali pa z grafičnim prikazom Weibullove porazdelitvene funkcije. Slednje analize so bile opravljene s podatki meritev iz obdobja od novembra 2009 do novembra 2010 in z višine 80 m.

Za analiziranje podatkov smo uporabili program Microsoft Excel.

8.1 Opis lokacije

Podjetje Soške elektrarne Nova Gorica je za lokacijo postavitve vetrnih elektrarn izbralo okolico majhne vasi Kanalski Vrh (Slika 14), ki leži na robu Banjške planote in je od prvega večjega mesta, Nove Gorice, oddaljena 20 kilometrov. Pokrajina je v večini pokrita z gozdovi in pašniki, ki segajo povsem do roba planote.



Slika 14: Panorama Kanalskega Vrha

Do ideje je prišlo med gradnjo akumulacijskega jezera za črpalno hidroelektrarno v Avčah. Delavci in nadzorniki gradnje so bili vsaki dan izpostavljeni konstantnemu vetru, kar jim je dalo idejo o postavitvi vetrnih elektrarn na tem mestu. Lokacija je primerna zaradi dobrega vetrnega potenciala, pa tudi v smislu umestitve naprav v okolje, saj je okolica jezera okoljsko že degradirana. Slika 15 prikazuje približno postavitev vetrnih turbin v okolici akumulacijskega jezera.



Slika 15: Predvidena mesta postavitve vetrnih turbin

8.2 Izvajanje meritev vetra

Meritve hitrosti vetra izvaja podjetje Soške Elektrarne ob akumulacijskem jezeru črpalne hidroelektrarne Avče. Merilni stolp (Slika 16) je postavljen na nadmorski višini 634 m. Merilci so klasični propelerski anemometri, ki zajemajo hitrost in smer pihanja vetra na štirih različnih višinah; 20 m, 40 m, 60 m in 80 m. Podatki se v bazi zbirajo kot 10-minutna povprečja, njihov prenos do glavnega računalnika pa je urejen preko GSM linije.

Stolp je zaradi svoje višine tudi ustrezno označen in zaščiteno. Lokacijo postavitve merilnega stolpa prikazuje oranžna pika na satelitski sliki (Slika 17).



Slika 16: Merilni stolp



Slika 17: Lokacija merilnega stolpa (Google zemlja, 2011)

9 OBRAVNAVA IN ANALIZA MERITEV VETRA

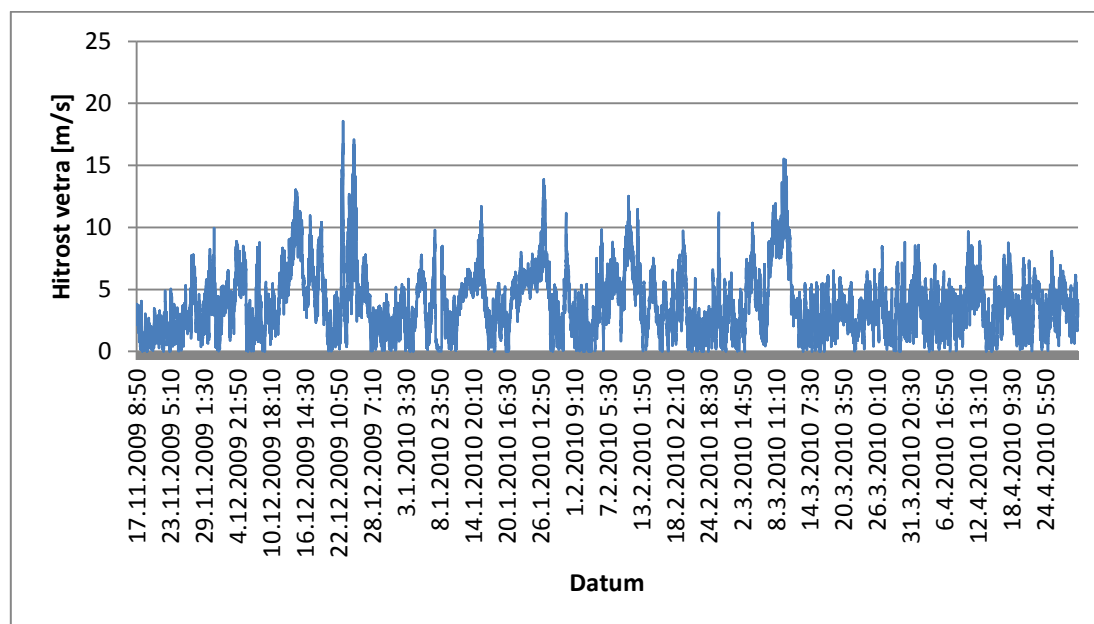
9.1 Analiza hitrosti vetra

V analizi meritev vetra smo podali rezultate povprečnih hitrosti s štirih različnih višin; 20 m, 40 m, 60 m in 80 m. Podatki so razdeljeni na dve različni obdobji; od novembra 2009 do novembra 2010 in od novembra 2010 do aprila 2010.

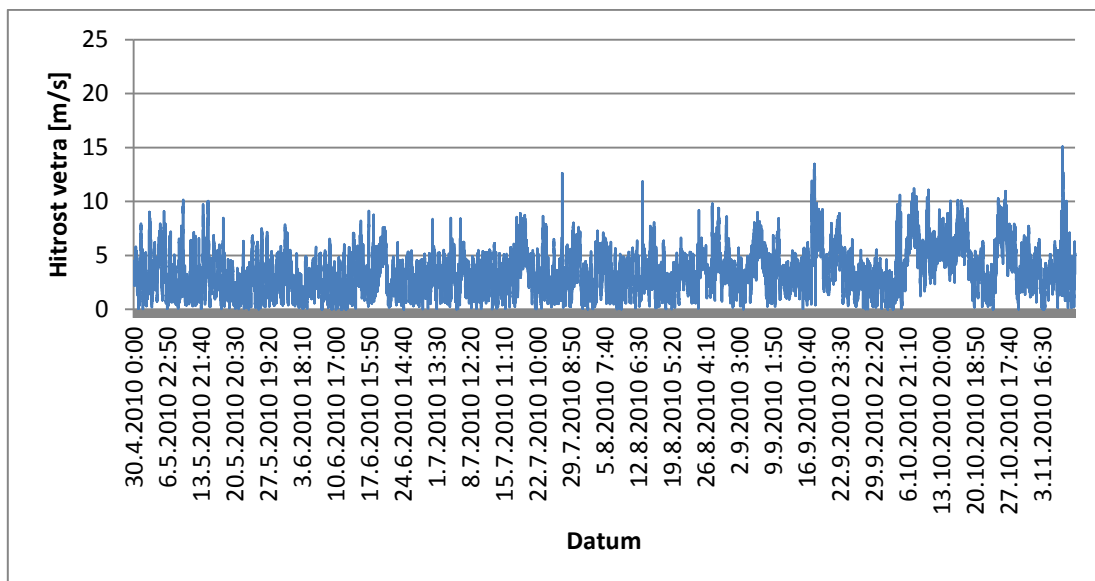
Dobljeni rezultati za obdobje od novembra 2009 do novembra 2010:

Tabela 3 Povprečne hitrosti glede na višino meritev, Kanalski Vrh

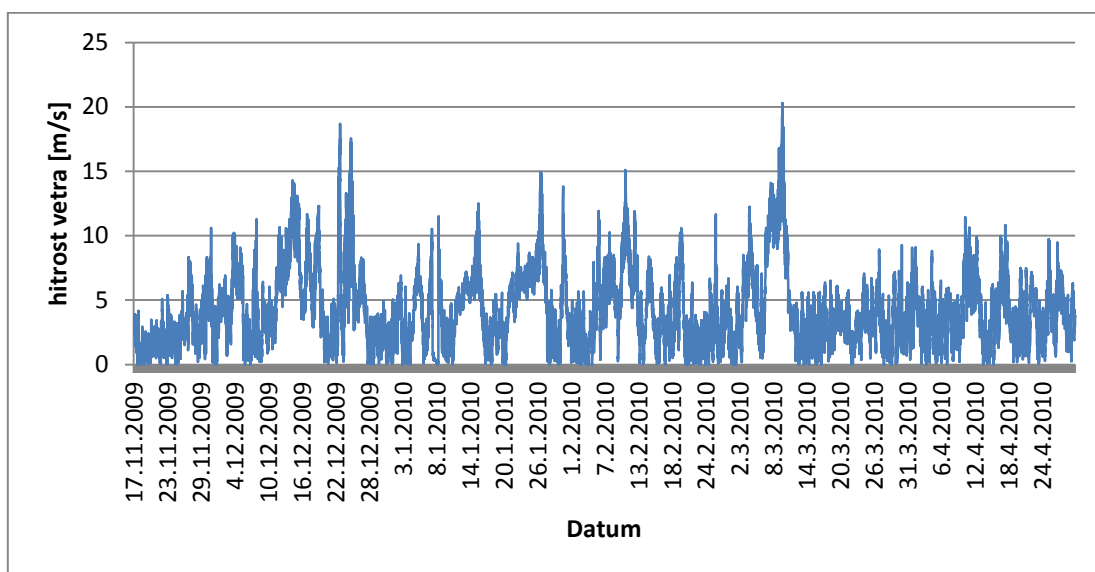
Višina meritev	20m	40m	60m	80m
Povprečna hitrost v [m/s]	3,66	4,02	4,30	4,75



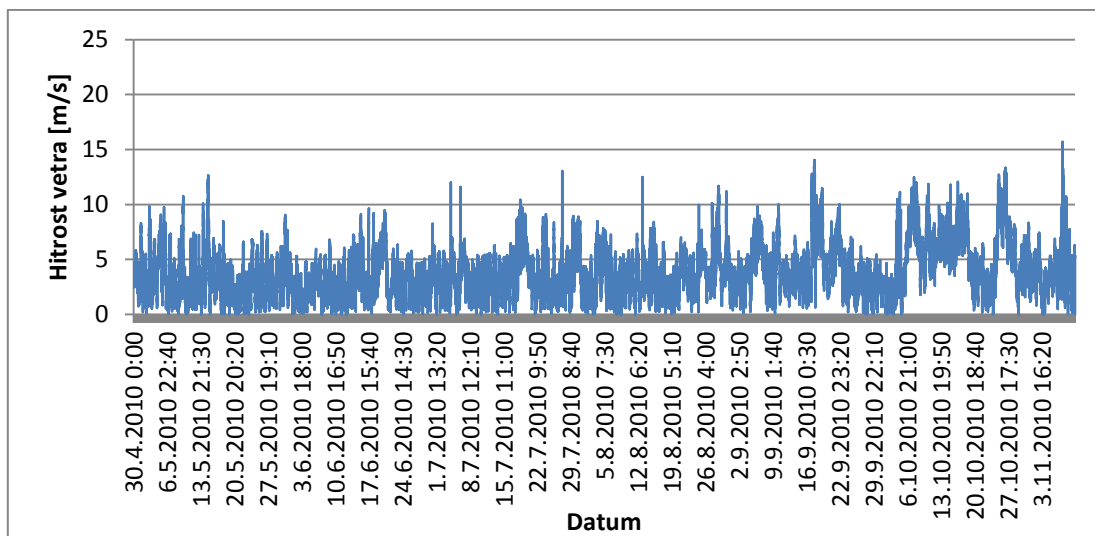
Slika 18: Porazdelitev hitrosti na višini 20 m od 11. 2009 do 04. 2010, Kanalski Vrh



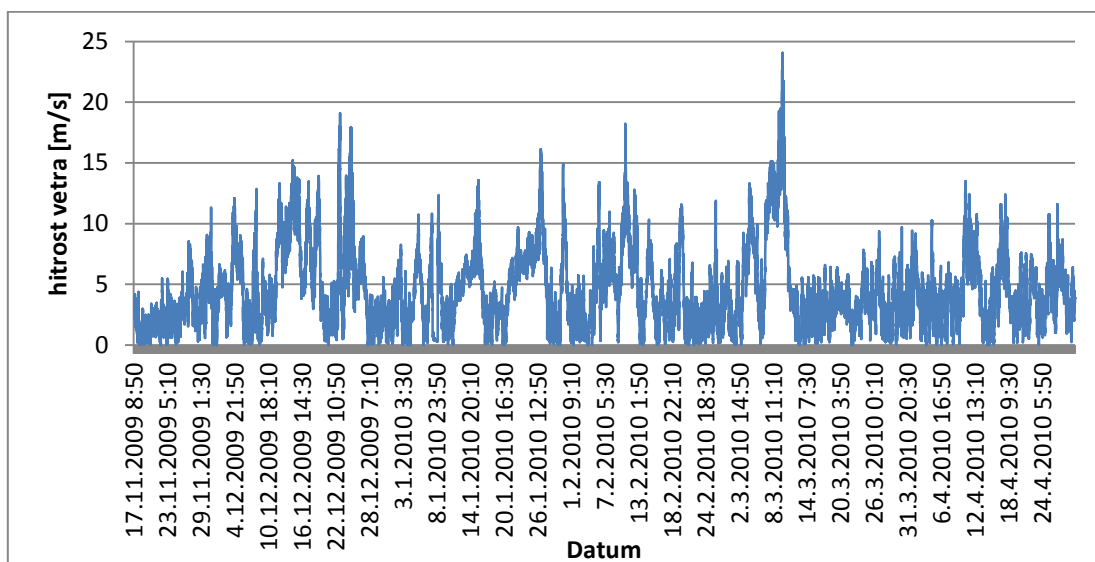
Slika 19: Porazdelitev hitrosti na višini 20 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh



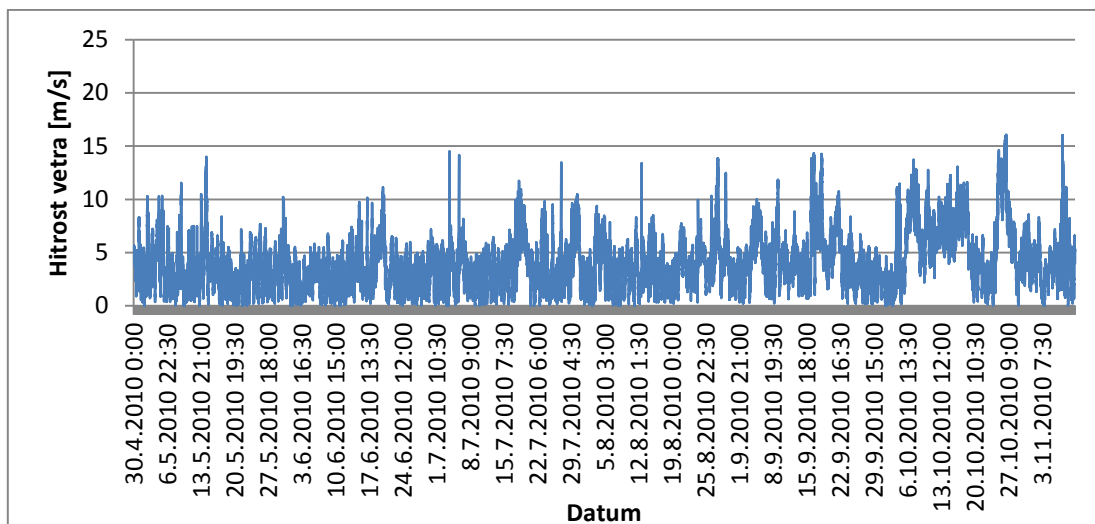
Slika 20: Porazdelitev hitrosti na višini 40 m od 11. 2009 do 04. 2010; Kanalski Vrh



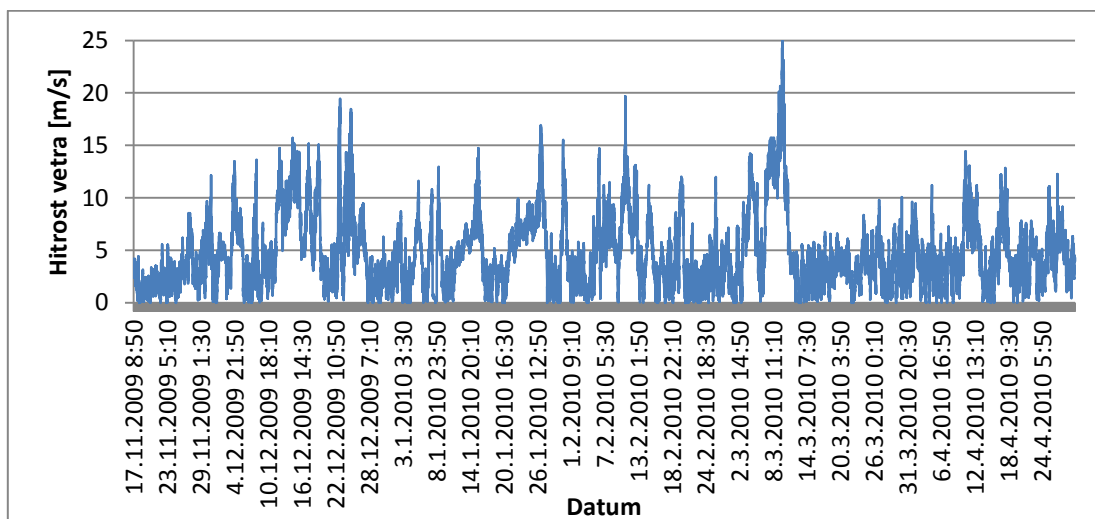
Slika 21: Porazdelitev hitrosti na višini 40 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh



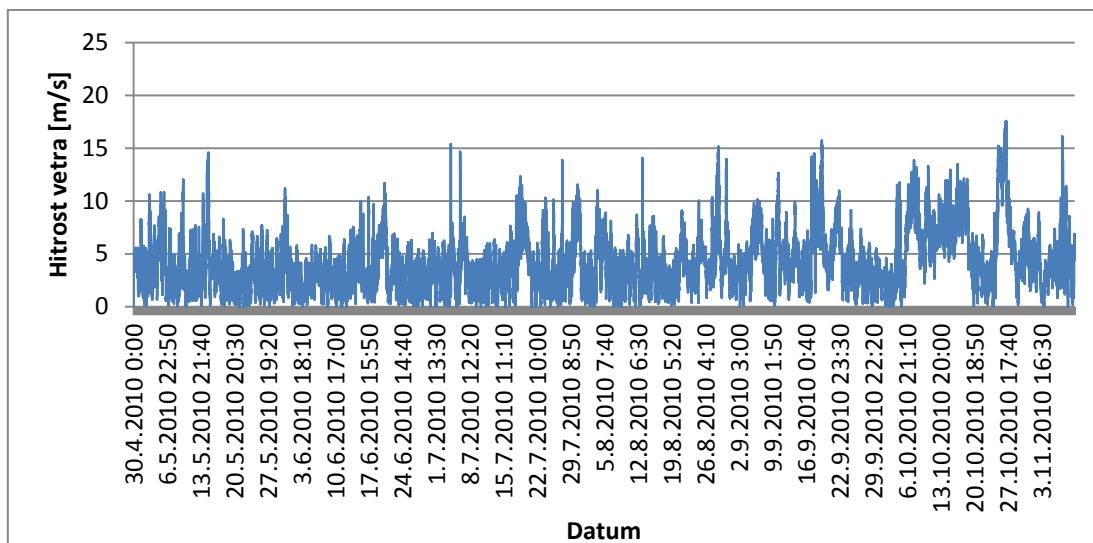
Slika 22: Porazdelitev hitrosti na višini 60 m od 11. 2009 do 04. 2010; Kanalski Vrh



Slika 23: Porazdelitev hitrosti na višini 60 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh



Slika 24: Porazdelitev hitrosti na višini 80 m od 11. 2009 do 04. 2010; Kanalski Vrh

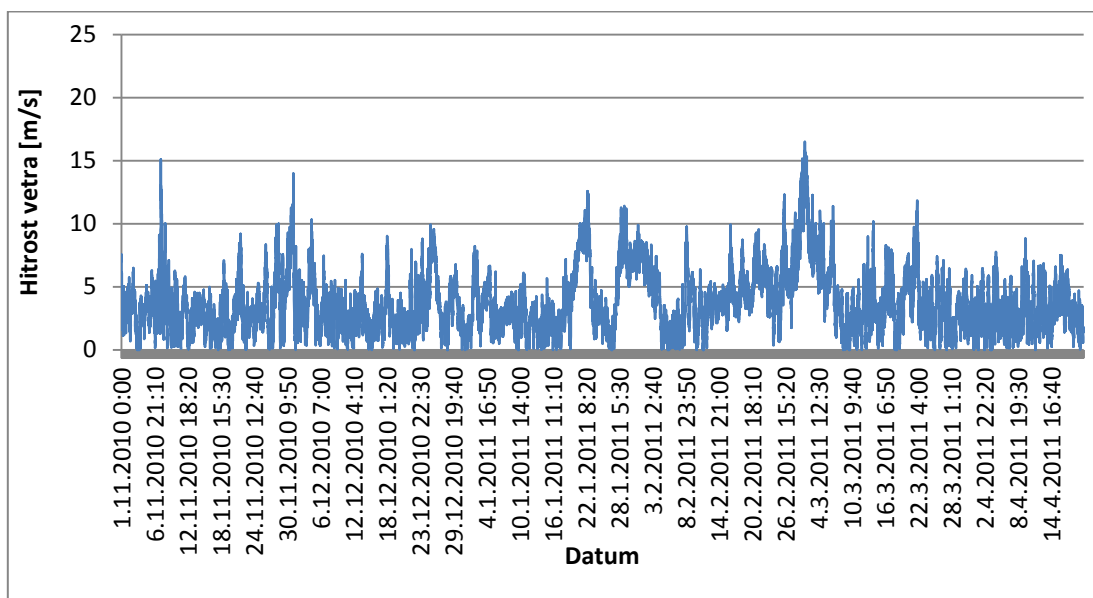


Slika 25: Porazdelitev hitrosti na višini 80 m od 04. 2010 do 11. 2010; Kanalski Vrh

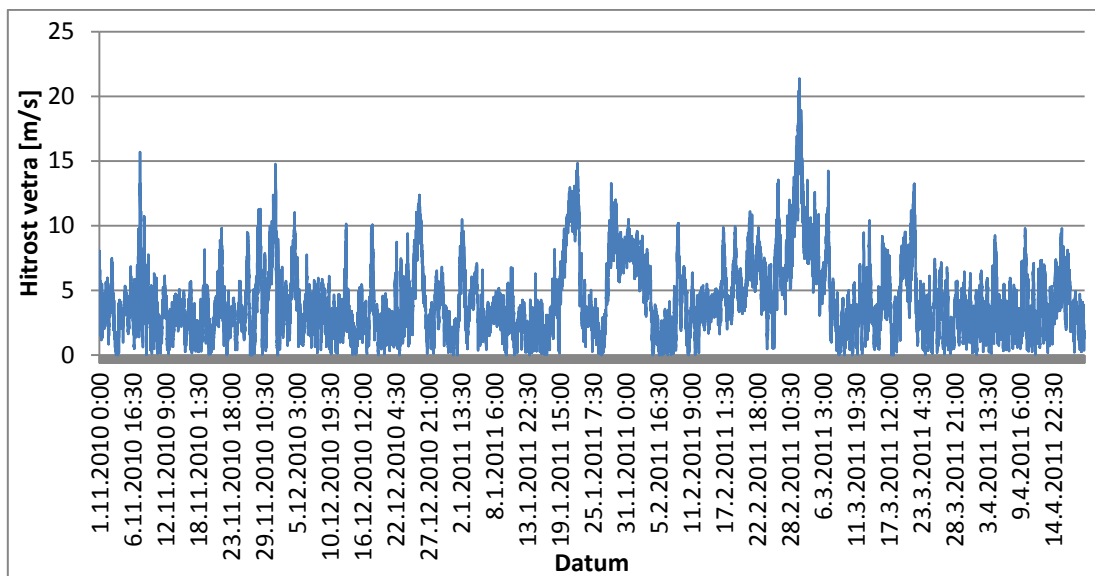
Dobljeni rezultati za obdobje od novembra 2010 do aprila 2011:

Tabela 4: Povprečne hitrosti glede na višino meritev, Kanalski Vrh

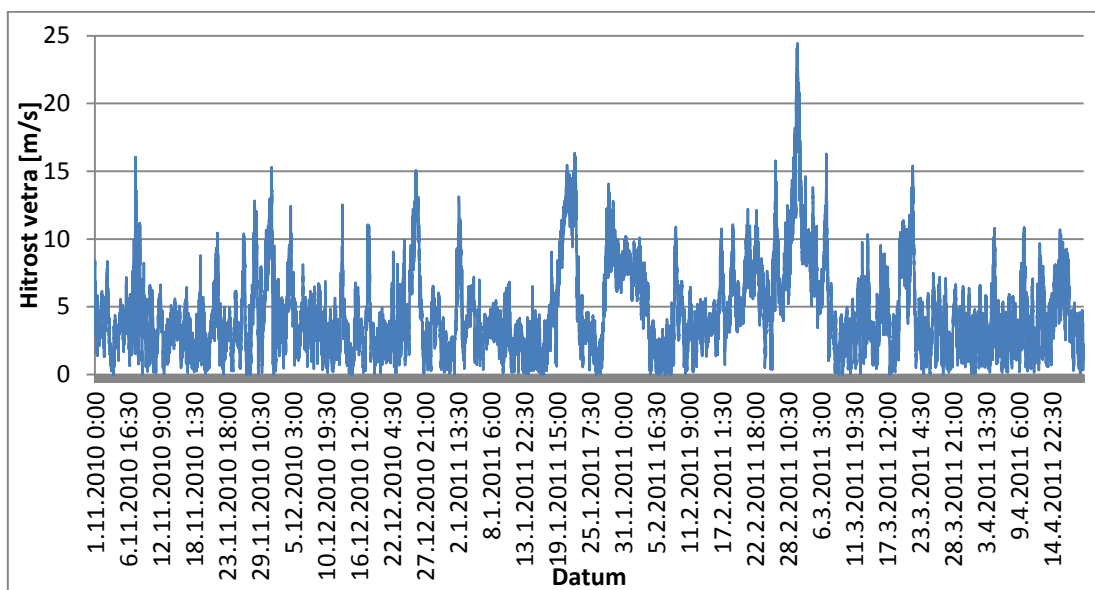
Višina meritev	20m	40m	60m	80m
Povprečna hitrost v [m/s]	3,74	4,15	4,47	4,68



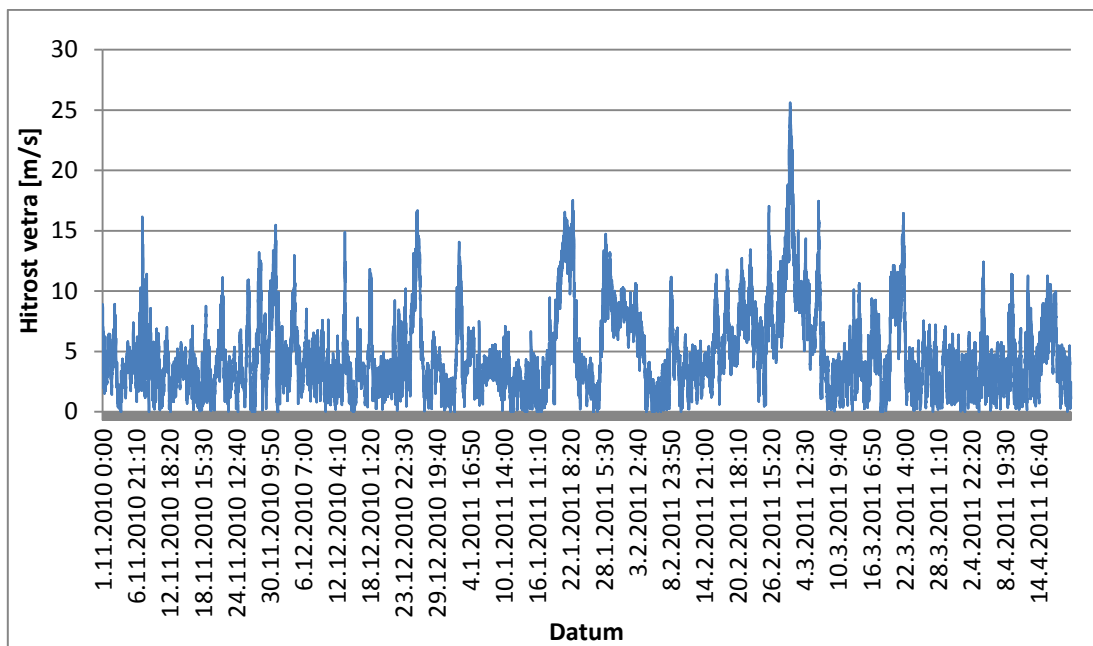
Slika 26: Porazdelitev hitrosti na višini 20 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh



Slika 27: Porazdelitev hitrosti na višini 40 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh



Slika 28: Porazdelitev hitrosti na višini 60 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh

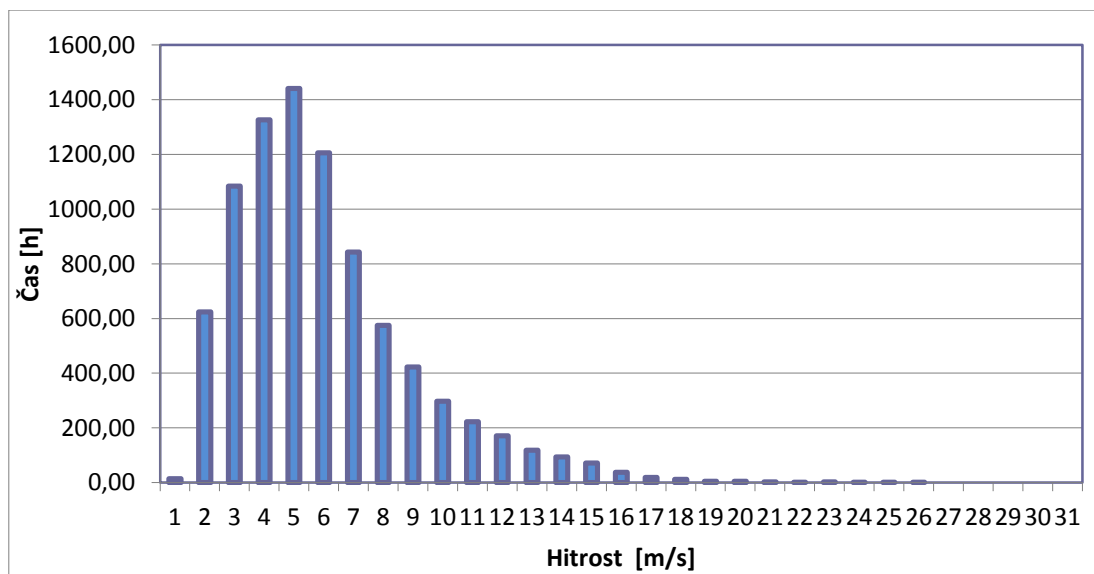


Slika 29: Porazdelitev hitrosti na višini 80 m od 11. 2010 do 04. 2011; Kanalski Vrh

Pri analizi hitrosti vetra bi najprej radi izpostavili višanje hitrosti vetra z višino. Omenjeni pojav smo omenili že v teoretičnem delu, pokazal pa se je tudi pri realnih meritvah. V prvem obdobju meritev smo zaznali štiri močnejša odstopanja hitrosti vetra, ki so se zgodila od 24. 12. 2009 do 9. 3. 2010. Na dan 9. 3. 2010 smo ugotovili, da je bila hitrost na višini 20 m 16 m/s, na višini 80 m pa se je ta povišala preko 25 m/s. Ta razlika je posledica vpliva terena na nižjih višinah. Po 12. 3. 2009 pa je bila hitrost vetra dokaj konstantna.

V drugem obdobju meritev so bila obdobja močnejšega vetra pogostejša, tako da o nekem konstantnem vetru ne moremo govoriti. Izpostaviti gre 1. 3. 2011, pri katerem je bila hitrost na višini 80 m preko 25 m/s. Ta dan je zaznamovalo neurje, ki je prizadelo celotno Primorsko.

9.2 Letna porazdelitev hitrosti vetra



Slika 30: Grafični prikaz letne porazdelitve hitrosti vetra

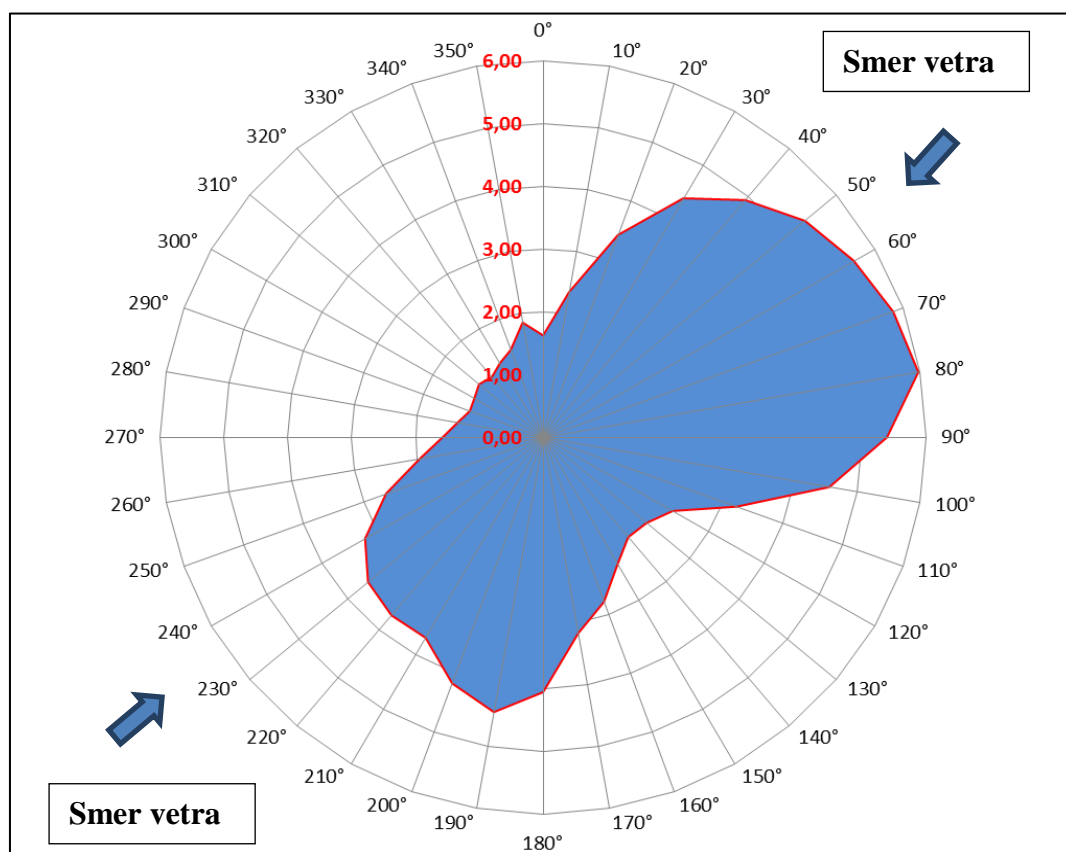
V letni porazdelitvi hitrosti vetra (Slika 30) smo prikazali pogostost posameznih hitrosti, ki so bile zajete pri meritvah. Iz rezultatov razberemo, da so bile najbolj pogoste hitrosti od 4 m/s do 6 m/s. Hitrosti vetra so povzete z višine 80 m in veljajo za obdobje meritev od novembra 2009 do novembra 2010.

9.3 Frekvenčna porazdelitev hitrosti vetra po smernih razredih [m/s]

Pri frekvenčni porazdelitvi hitrosti smo za vsak smerni razred, v korakih po 10° , izračunali povprečno hitrost vetra. Iz dobljenih rezultatov smo narisali graf, ki je značilen za analizo vetra in se imenuje vetrna roža (Slika 31). Hitrost in smer vetra sta povzeta z višine 80 m in veljajo za obdobje meritev od novembra 2009 do novembra 2010. Smer pihanja vetra na grafu je prikazana od zunanjega roba proti središču.

Smerni razredi neba so definirani kot:

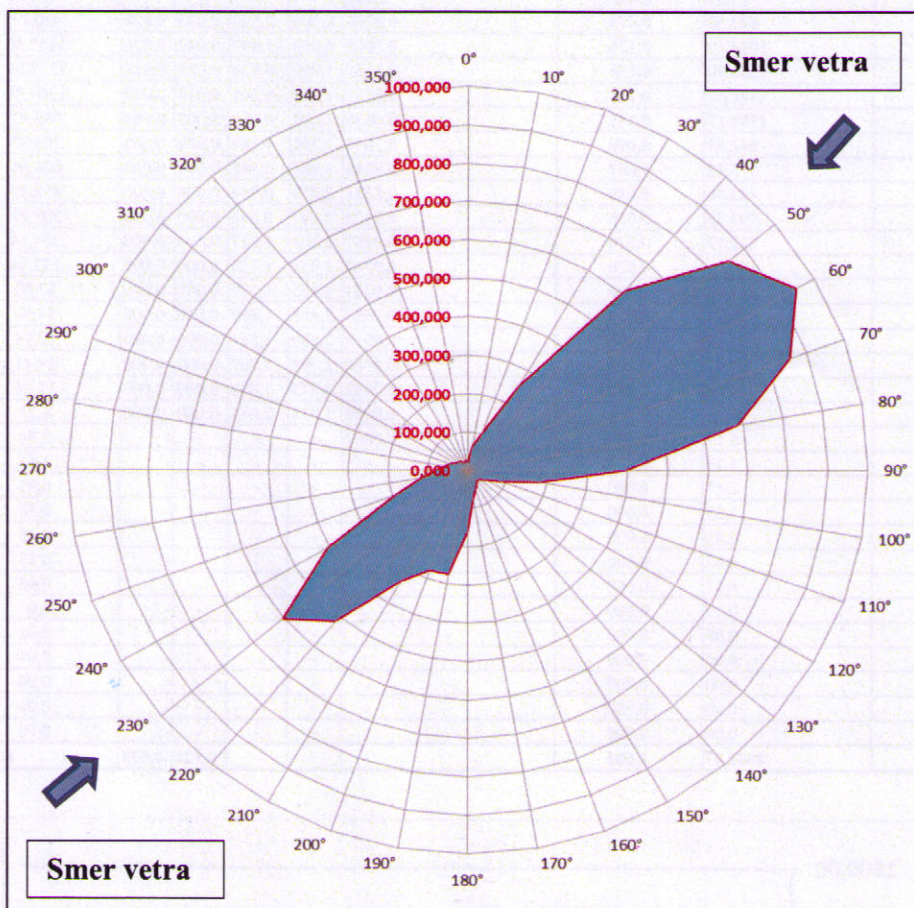
- 0° = sever
- 90° = vzhod
- 180° = jug
- 270° = zahod



Slika 31: Vetrna roža frekvenčne porazdelitve hitrosti vetra [m/s]

Iz rezultatov je razvidno, da je bila najvišja povprečna hitrost dosežena iz smeri 80° (severovzhod), ki je značilna za burjo.

9.4 Frekvenčna porazdelitev pogostosti hitrosti vetra po smernih razredih [h]



Slika 32: Frekvenčna porazdelitev pogostosti hitrosti vetra po smernih razredih [m/s]

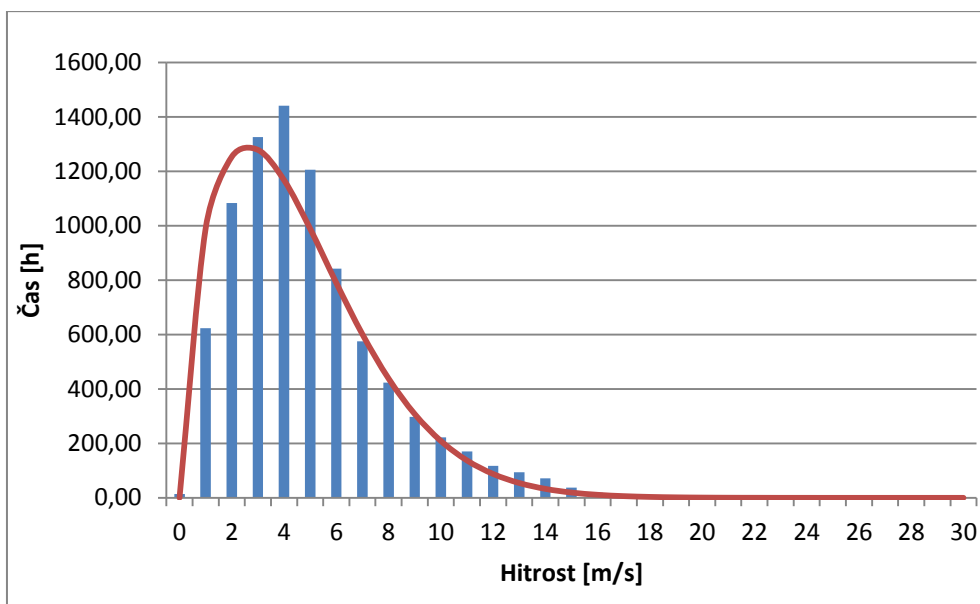
Frekvenčna porazdelitev (Slika 32) je podobna kot prejšnja, le da je pri tej razvidna pogostost vetra [h] glede na smerni razred. Najpogostejši je bil veter iz smeri 60° in sicer nekaj manj kot 1000 ur v obeh obdobjih. Hitrost in smer vetra sta povzeti z višine 80 m in veljata za obdobje meritev od novembra 2009 do novembra 2010.

9.5 Weibullova porazdelitvena funkcija hitrosti vetra [m/s]

Weibullova porazdelitvena funkcija (Tabela 5) je nepogrešljiv pripomoček za analizo povprečnih hitrosti vetra, saj upošteva tudi ekstremne razmere kot so orkanska burja in brezvetrje. Parameter merila (c), ki smo ga uporabili znaša 4,75, kar je enako povprečni hitrosti vetra, parameter oblike (k) pa 1,75,. Hitrosti vetra so povzete z višine 80 m in veljajo za obdobje meritev od novembra 2009 do novembra 2010.

Tabela 5: Weibullova porazdelitvena tabela

Hitrost [m/s]	Frekvenca [h/leto]	Frekvenca [0-1]	Kumulativna frekvenca	Xi	Yi	N	D	Verjetnost [h/leto]
0	13,83	0,002	0,002	-	-	-	-	0,00
1	623,50	0,073	0,0743	0,000	-2,562	0,032	0,020	990,27
2	1084,17	0,126	0,2006	0,693	-1,497	0,042	0,026	1253,80
3	1326,00	0,154	0,3551	1,099	-0,824	0,029	0,018	1279,09
4	1441,67	0,168	0,5231	1,386	-0,301	0,014	0,010	1167,95
5	1206,17	0,141	0,6636	1,609	0,086	0,003	0,003	988,97
6	842,67	0,098	0,7618	1,792	0,361	0,000	0,000	789,93
7	575,33	0,067	0,8288	1,946	0,568	0,000	0,000	601,06
8	423,00	0,049	0,8781	2,079	0,744	0,000	0,000	438,49
9	297,83	0,035	0,9128	2,197	0,892	0,000	0,000	308,07
10	222,17	0,026	0,9387	2,303	1,027	0,000	0,000	209,14
11	170,50	0,020	0,9585	2,398	1,158	0,000	0,000	137,54
12	118,00	0,014	0,9723	2,485	1,277	0,000	0,000	87,80
13	94,33	0,011	0,9833	2,565	1,409	0,000	0,000	54,50
14	71,17	0,008	0,9916	2,639	1,564	0,000	0,000	32,94
15	37,67	0,004	0,9960	2,708	1,707	0,000	0,000	19,41
16	19,00	0,002	0,9982	2,773	1,841	0,000	0,000	11,16
17	11,83	0,001	0,9996	2,833	2,043	0,000	0,000	6,27
18	5,17	0,001	1,0002	-	-	-	-	3,44
19	5,17	0,001	-	-	-	-	-	1,85
20	2,17	0,000	-	-	-	-	-	0,97
21	1,33	0,000	-	-	-	-	-	0,50
22	2,83	0,000	-	-	-	-	-	0,25
23	0,67	0,000	-	-	-	-	-	0,13
24	0,17	0,000	-	-	-	-	-	0,06
25	0,17	0,000	-	-	-	-	-	0,03
26	0,00	0,000	-	-	-	-	-	0,01
27	0,00	0,000	-	-	-	-	-	0,01
28	0,00	0,000	-	-	-	-	-	0,00
29	0,00	0,000	-	-	-	-	-	0,00
30	0,00	0,000	-	-	-	-	-	0,00
	8582,67	1,002				0,122	0,078	8383,68



Slika 33: Weibullova porazdelitev pogostosti hitrosti vetra

Rezultati analize (Slika 33) kažejo, da je najbolj pogosta hitrost pridobljena z navadno analizo 4 m/s, z Weibullovo porazdelitvijo pa 3 m/s.

10 IZBIRA PRIMERNE VETRNE TURBINE ZA RAZMERE NA KANALSKEM VRHU

Izbira primerne vetrne turbine je predstavljala najbolj kompleksen del izdelave diplomskega dela. Glede na veliko ponudbo na tržišču smo se odločili, da analiziramo 25 vetrnih turbin (Tabela 6). S tem smo smiselno pokrili raznovrstnost pri izbiri najprimernejše. Skupaj s strokovnjaki v podjetju Soške elektrarne, smo pri izbiri proizvajalcev dali prednost tistim, ki imajo v tej panogi največ izkušenj in največje število postavljenih vetrnih turbin po svetu. Pri tej izbiri se je pokazala slabost, saj imajo nekatera podjetja sedež izven Evrope in tako je kontakt z njimi nekoliko težji.

Pri analizi smo pridobili osnovne podatke o napravi (nazivno moč, višino stolpa, premer rotorja, začetno in končno hitrost delovanja, ime proizvajalca in model turbine). Glede na hitrost vetra smo izračunali moč turbine in moč iz vetra, ter določili faktor razmerja med dejansko proizvodnjo in maksimalno proizvodnjo turbine (capacity factor). Poleg tega pa smo ugotovili še letno porazdelitev moči glede na normirano hitrost vetra, proizvodnjo turbine glede na frekvenčno porazdelitev hitrosti vetra, mesečno in letno proizvodnjo energije ter število proizvodnih ur turbine. Poleg tehnične smo naredili tudi ekonomsko analizo, ki prikazuje dobo vračila investicije.

Vsi rezultati so pridobljeni na podlagi stalnih vrednosti tlaka ($p=101,3$ kPa oz. 1,013 bar oz. 1 atm), plinske konstante ($R=8,314$ J/mol K) in gostote zraka ($\rho=1,225$ kg/m³).

Tabela 6: Osnovni podatki analiziranih turbin

Proizvajalec	Model	Nazivna moč generatorja [MW]	Višina stolpa [m]	Premer rotorja [m]
GAMESA	G 52	0.850	44,00	52,00
GAMESA	G 58	0.850	74,00	58,00
GAMESA	G 80	2.0	78,00	80,00
GAMESA	G 83	2.0	78,00	83,00
GAMESA	G 87	2.0	78,00	87,00
GAMESA	G 90	2.0	78,00	90,00
GAMESA	G 97	2.0	78,00	97,00
ENERCON	E 44	0.900	65,00	44,00
ENERCON	E 48	0.800	76,00	48,00
ENERCON	E 53	0.800	75,00	53,00
ENERCON	E 82	2.0	78,00	82,00
ENERCON	E 70	2.3	85,00	71,00
ENERCON	E 82	2.3	78,00	82,00
GENERAL ELECTRIC	1.5 SL	1.5	80,00	77,00
GENERAL ELECTRIC	1.5 SLE	1.5	80,00	77,00
GENERAL ELECTRIC	1.5 XLE	1.5	80,00	82,50
NORDEX	S 70	1.5	70,00	70,00
NORDEX	S 77	1.5	80,00	77,00
SIEMENS	SWT - 2.3	2.3	80,00	93,00
SIEMENS	SWT - 2.3	2.3	80,00	101,00
VESTAS	V 80	2.0	78,00	80,00
VESTAS	V 39	0.500	40,00	39,00
VESTAS	V 52	0.850	74,00	52,00
VESTAS	V 82	1.65	78,00	82,00
VESTAS	V 90	2.0	80,00	90,00

10.1 Kriteriji izbire

Kot glavne kriterije izbire smo določili letno proizvodnjo vetrne turbine [MWh] in faktor razmerja med dejansko in maksimalno proizvodnjo energije. Zaradi različnih moči turbin je potrebno vpeljati tudi ekonomsko analizo časa povrnitve investicije, ki nam dokončno pomaga izbrati primerno napravo. Za ekonomsko analizo smo poleg letne proizvodnje energije potrebovali tudi tržno ceno turbine in ceno za 1 MWh, ki znaša 95,38 € (SENG, 2011).

Tržna cena je poslovna skrivnost proizvajalcev dokler ni z njihove strani in kupca podpisan sporazum o zaupnosti podatkov, zato bomo pri izračunih uporabili evropsko povprečje. Sama vrednost ni pogojena le od modela turbine ampak je sestavljena tudi iz dovoljenj za postavitve, dovoznih poti ter drugih stroškov, ki so prisotni pri postavitvi (Tabela 7).

Tabela 7: Struktura stroškov vetrne turbine (Wind energy the facts, 2011)

Vrsta stroška	Investicija (1000 €/MW)	Odstotek celotne investicije
Turbina	928	75,6
Temelji	80	6,5
Električna inštalacija	18	1,5
Priključitev v omrežje	109	8,9
Sistem za kontrolo	4	0,3
Svetovanje	15	1,2
Zemljišče	48	3,9
Stroški financiranja	15	1,2
Ceste	11	0,9
Skupaj	1227	100

10.2 Primerjava turbin

Na podlagi analiz smo ugotovili, da je najprimernejša turbina GENERAL ELECTRIC 1.5 XLE – 82,5 M. Za najboljšo se je izkazala tako v tehničnem kot na ekonomskem področju. Njen faktor razmerja med dejansko in maksimalno proizvedeno energijo znaša 22,22 %, kar dokazuje smotrnost postavitve. Letna proizvodnja energije znaša 2.863 MWh, kar je sicer ne postavlja na prvo mesto, to dejstvo pa opravičuje podatek časa povrnitve investicije, ki je najkrajši in znaša 6,74 let. Edina naprava, ki bi še bila primerna za postavitve je GAMESA G 97 2.0 MW. Njen faktor razmerja znaša 20,95 %, letna proizvodnja pa 3.599 MWh in je večja kot pri najboljši turbini. Na drugo mesto jo postavlja dejstvo, da je čas povrnitve investicije daljši, ta znaša 7,15 leta. Tabela 8 prikazuje najvažnejše izsledke vetrnih turbin, celotna analiza najprimernejše turbine pa je predstavljena v naslednjem poglavju.

Tabela 8: Rezultati analize vetrnih turbin

Proizvajalec in model	Letna proizvodnja [MWh]	Faktor kapacitete [%]	Doba vračila investicije [LETA]
GAMESA G52 - 850 kW	848	11,61	12,89
GAMESA G58 - 850 kW	1329	18,19	8,23
GAMESA G80 - 2.0 MW	2631	15,31	9,78
GAMESA G83 - 2.0 MW	2712	15,78	9,49
GAMESA G87 - 2.0 MW	3007	17,50	8,56
GAMESA G90 - 2.0 MW	3205	18,65	8,03
GAMESA G97 - 2.0 MW	3599	20,95	7,15
ENERCON E44 - 900 kW	858	11,10	13,49
ENERCON E48 - 800 kW	1081	15,73	9,52
ENERCON E53 - 800 Kw	1269	18,47	8,11
ENERCON E82 - 2.0 MW	3069	17,86	8,38
ENERCON E70 - 2.3 MW	2541	12,86	11,64
ENERCON E82 - 2.3 MW	3140	15,89	9,42
GE 1.5 SL - 77 M	2174	16,87	8,87
GE 1.5 SLE - 77 M	2863	17,53	8,54
GE 1.5 XLE - 82.5 M	2260	22,22	6,74
NORDEX S70 - 1.5 MW	1923	14,92	10,03
NORDEX S77 - 1.5 MW	2191	17,00	8,81
SIEMENS SWT - 2.3 MW - 93 M	3449	17,45	8,58
SIEMENS SWT - 2.3 MW - 101 M	3931	19,89	7,57
VESTAS V80 - 2.0 MW	2459	14,31	10,46
VESTAS V39 - 500 Kw	416	9,69	15,46
VESTAS V52 - 850 kW	1098	15,04	9,95
VESTAS V82 - 1.65 MW	2559	18,05	8,30
VESTAS V90 - 2.0 MW	3007	17,50	8,56

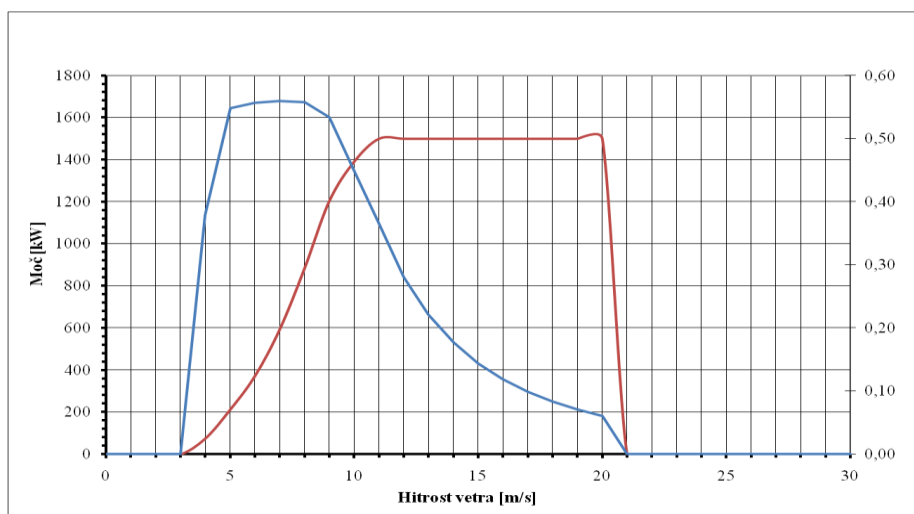
10.3 Podrobna analiza najboljše turbine – General Electric 1.5 XLE – 82.5 M

Tabela 9: Osnovni podatki o turbini General Electric 1.5 XLE

Podatki	Enota	Vrednost
nazivna moč	kW	1.500
višina stolpa	m	80,0
premer rotorja	m	82,5
hitrost cut-in	m/s	3,5
hitrost cut-out	m/s	20,0
proizvajalec		GENERAL ELECTRIC
model		GE 1.5 XLE - 82.5 M

Tabela 10: Podatki o moči turbine in moči vetra ter koeficient moči za General Electric 1.5 XLE

Hitrost vetra [m/s]	Moč turbine [kW]	Moč vetra [kW]	Koeficient moči
0	0,00	0,00	0,00
1	0,00	3,10	0,00
2	0,00	24,76	0,00
3	0,00	83,57	0,00
4	75,00	198,09	0,38
5	212,00	386,89	0,55
6	372,00	668,54	0,56
7	594,00	1.061,62	0,56
8	884,00	1.584,70	0,56
9	1204,00	2.256,34	0,53
10	1391,00	3.095,11	0,45
11	1500,00	4.119,59	0,36
12	1500,00	5.348,35	0,28
13	1500,00	6.799,96	0,22
14	1500,00	8.492,99	0,18
15	1500,00	10.446,00	0,14
16	1500,00	12.677,58	0,12
17	1500,00	15.206,28	0,10
18	1500,00	18.050,69	0,08
19	1500,00	21.229,37	0,07
20	1500,00	24.760,89	0,06
21	0,00	28.663,83	0,00
22	0,00	32.956,75	0,00
23	0,00	37.658,23	0,00
24	0,00	42.786,83	0,00
25	0,00	48.361,12	0,00
26	0,00	54.399,69	0,00
27	0,00	60.921,09	0,00
28	0,00	67.943,89	0,00
29	0,00	75.486,68	0,00
30	0,00	83.568,02	0,00



Slika 34: Moč in koeficient moči turbine General Electric 1.5 XLE v odvisnosti od hitrosti vetra

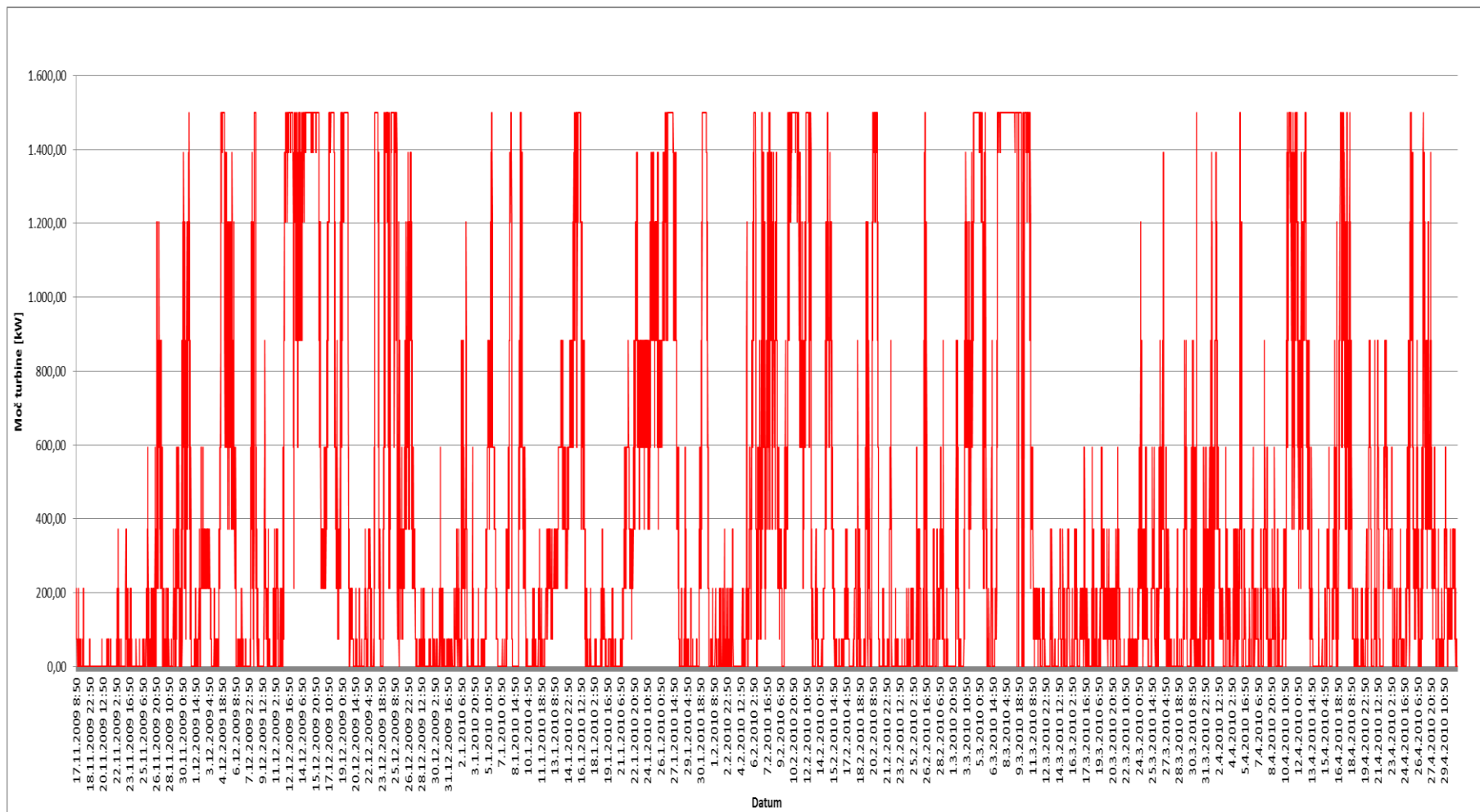
Vetrna turbina ima območje delovanja od 3,5 m/s do 20 m/s, njena nazivna moč pa je 1,5 MW. Izkoristek turbine je najvišji pri hitrosti od 6 m/s do 8 m/s (Tabela 10), kar znaša 56 %, takrat je razmerje med močjo turbine in močjo vetra najmanjše. Z naraščanjem hitrosti in moči vetra pa izkoristek upada, najnižji je pri končni hitrosti delovanja turbine in sicer 6 %. Iz grafa moči (Slika 34) je razvidno, da se najvišja moč vzpostavi pri hitrosti vetra 11 m/s in traja do 20 m/s, kjer se turbina izklopi. Koeficient moči smo izračunali na podlagi razmerja med močjo turbine in močjo vetra.

10.4 Letna porazdelitev moči turbine pri normirani hitrosti vetra

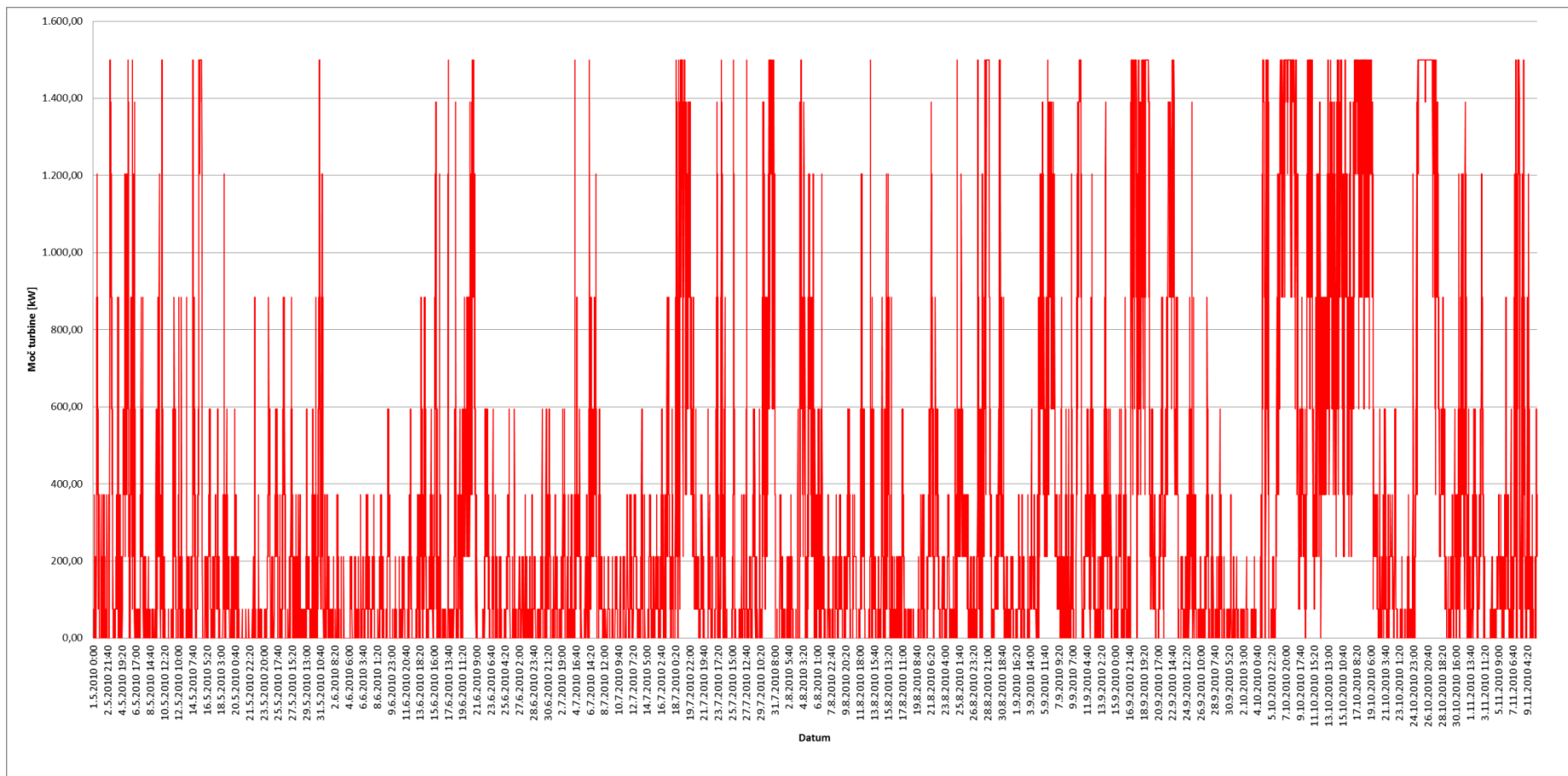
Tabela 11: Del prikaza moči turbine General Electric 1.5 XLE glede na normirano hitrost vetra

Datum	Povprečna hitrost vetra [m/s]	Normirana hitrost vetra [m/s]	Moč turbine pri normirani hitrosti [kW]
17.11.2009 8:50	3,474	4	75,00
17.11.2009 9:00	3,659	4	75,00
17.11.2009 9:10	4,189	5	212,00
17.11.2009 9:20	4,08	5	212,00
17.11.2009 9:30	3,391	4	75,00
17.11.2009 9:40	3,431	4	75,00
17.11.2009 9:50	3,414	4	75,00
17.11.2009 10:00	3,129	4	75,00
17.11.2009 10:10	3,552	4	75,00
17.11.2009 10:20	3,491	4	75,00
17.11.2009 10:30	3,589	4	75,00
17.11.2009 10:40	3,512	4	75,00
17.11.2009 10:50	3,299	4	75,00
17.11.2009 11:00	3,486	4	75,00
17.11.2009 11:10	3,522	4	75,00
17.11.2009 11:20	2,946	3	0,00
17.11.2009 11:30	2,933	3	0,00
17.11.2009 11:40	2,879	3	0,00

Tabela 11 prikazuje del analize, v kateri smo povprečne hitrosti najprej normirali in nato izračunali moč turbine. Celotna analiza je za predstavitev v diplomski nalogi preobsežna, zato smo jo prikazali grafično (Slika 35 in Slika 36). Pri zadnjih dveh vrednostih je v koloni moč turbine pri normirani hitrosti vrednost nič, ker je normirana hitrost pod začetno hitrostjo delovanja turbine.



Slika 35: Moč turbine General Electric 1.5 XLE pri normirani hitrosti vetra za obdobje od 11. 2009 do 04. 2010



Slika 36: Moč turbine General Electric 1.5 XLE pri normirani hitrosti vetra za obdobje od 04. 2010 do 11. 2010

10.5 Frekvenčna porazdelitev hitrosti in proizvodnja turbine [kWh]

Tabela 12: Frekvenčna porazdelitev hitrosti in proizvodnja turbine General Electric
1.5 XLE

Hitrost vetra [m/s]	Frekvenčna porazdelitev hitrosti vetra	Frekvenčna porazdelitev hitrosti vetra [h]	Proizvodnja turbine [kWh]
0	83	13,83	0
1	3741	623,50	0
2	6505	1084,17	0
3	7956	1326,00	0
4	8650	1441,67	108.125
5	7237	1206,17	255.707
6	5056	842,67	313.472
7	3453	575,50	341.847
8	2539	423,17	374.079
9	1787	297,83	358.591
10	1333	222,17	309.034
11	1023	170,50	255.750
12	708	118,00	177.000
13	566	94,33	141.500
14	427	71,17	106.750
15	226	37,67	56.500
16	114	19,00	28.500
17	71	11,83	17.750
18	31	5,17	7.750
19	31	5,17	7.750
20	13	2,17	3.250
21	8	1,33	0
22	11	1,83	0
23	6	1,00	0
24	4	0,67	0
25	1	0,17	0
26	1	0,17	0
27	0	0,00	0
28	0	0,00	0
29	0	0,00	0
30	0	0,00	0

Tabela 12 prikazuje porazdelitev hitrosti skozi celotno obdobje meritev. V drugem stolpcu je podana količina vsake hitrosti, ki se je pojavila pri meritvah. V tretjem je prikaz podoben kot v drugem, le da so tukaj hitrosti podane glede na časovno trajanje. Zadnji stolpec pa prikazuje proizvodnjo turbine [kWh].

Pri 4 m/s smo zabeležili maksimalno gostoto hitrosti, pojavila se je 8650 krat. Pri 8 m/s pa maksimalno proizvodnjo, 374.078 kWh.

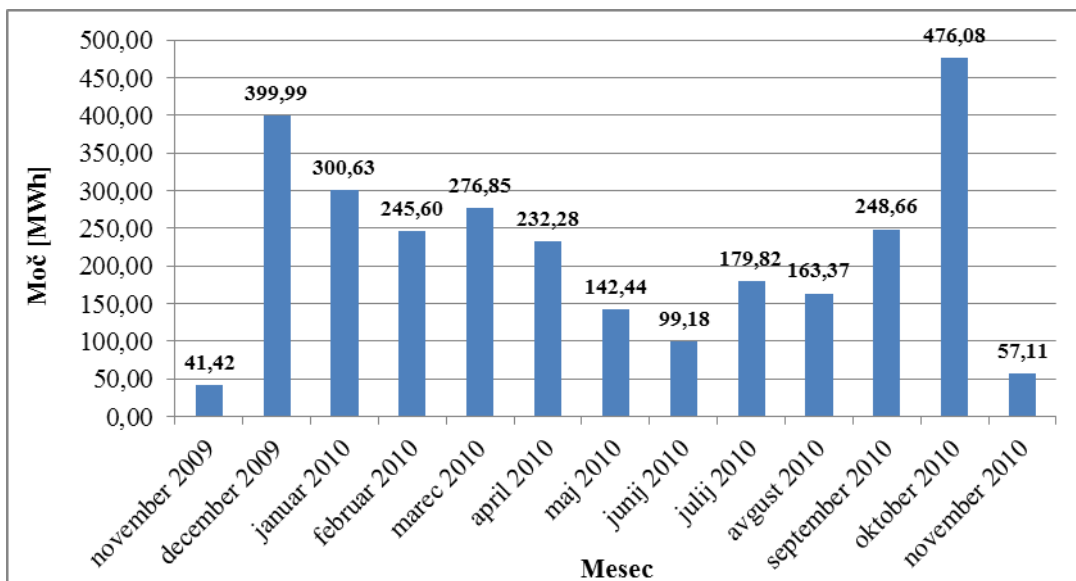
10.6 Mesečna in letna proizvodnja energije [MWh]

Tabela 13: Mesečna proizvodnja energije iz vetrne turbine General Electric 1.5 XLE

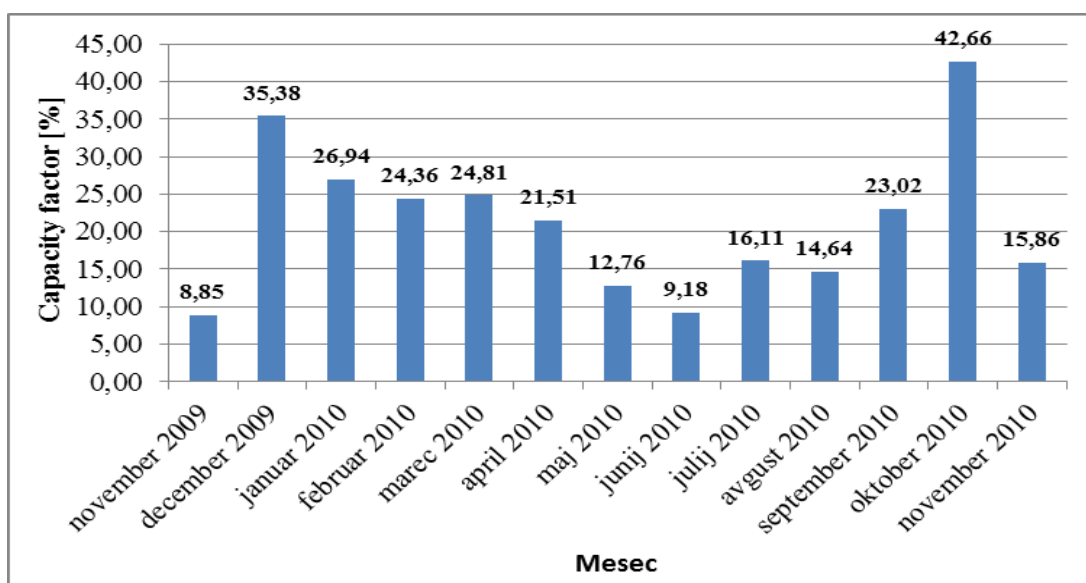
Mesec	Mesečna proizvodnja turbine [MWh]	Maksimalna mesečna proizvodnja turbine [MWh]	Faktor kapacitete [%]
november 2009	41,42	468	8,85
december 2009	399,99	1.116	35,38
januar 2010	300,63	1.116	26,94
februar 2010	245,60	1.080	24,36
marec 2010	276,85	1.116	24,81
april 2010	232,28	1.080	21,51
maj 2010	142,44	1.116	12,76
junij 2010	99,18	1.080	9,18
julij 2010	179,82	1.116	16,11
avgust 2010	163,37	1.116	14,64
september 2010	248,66	1.080	23,02
oktober 2010	476,08	1.116	42,66
november 2010	57,11	360	15,86

Tabela 14: Letna proizvodnja vetrne turbine General Electric 1.5 XLE

Letna proizvodnja turbine [MWh]	2.863,36
Maksimalna letna proizvodnja turbine [MWh]	12.888,00
Faktor kapacitete [%]	22,22
Povprečna moč turbine [MW]	0,326
Letna proizvodnja turbine [EUR]	273.107,27
Cena energije za 1 MWh [EUR]	95,38
Doba vračila investicije [LETA]	6,74



Slika 37: Grafični prikaz proizvodnje po mesecih za General Electric 1.5 XLE



Slika 38: Grafični prikaz razmerja med dejansko in maksimalno proizvedeno energijo vetrne turbine General Electric 1.5 XLE (faktor kapacitete)

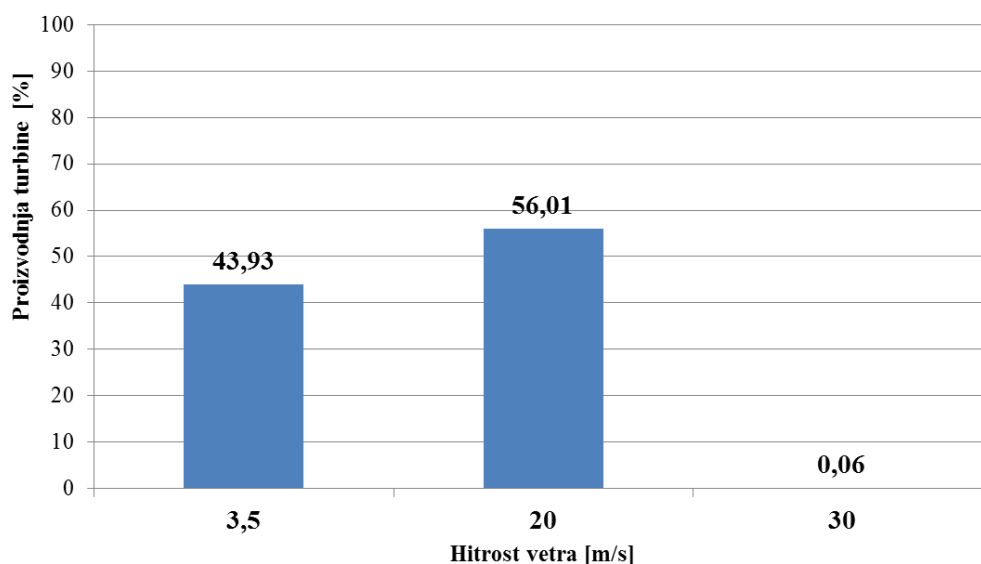
Rezultati za november 2009 in november 2010 niso točni, ker vsebujejo le del mesečnih meritev, saj so bili v tem času prisotni tehnični problemi na merilnikih. Če primerjamo ostale mesece vidimo, da je bila najvišja proizvodnja turbine decembra 2009, znašala je skoraj 400 MWh, in oktobra 2010, ko je proizvodnja znašala 476 MWh (Slika 37).

V teh dveh mesecih je bilo tudi razmerje med dejansko in maksimalno proizvodnjo turbine (Slika 38) najvišje. Najnižja proizvodnja je bila zabeležena junija 2010 in sicer slabih 100 MWh. Celotna proizvodnja turbine je znašala 2.863,36 MWh, izkoristek je znašal 22,22 %, celotna investicija pa bi se povrnila v dobrih šestih letih.

10.7 Proizvodne ure turbine

Tabela 15: Porazdelitev proizvodnih ur nad in pod delovno hitrostjo turbine

Hitrost vetra [m/s]	Proizvodnja turbine [h]	Proizvodnja turbine [%]	Čas glede na proizvodnjo turbine [h]
3,5	3776	43,93%	Pod proizvodnjo
20	4815	56,01%	Med proizvodnjo
30	5	0,06%	Nad proizvodnjo



Slika 39: Grafični prikaz porazdelitve proizvodnih ur obratovanja turbine

Analiza prikazuje količino obratovanja vetrne elektrarne v obdobju od novembra 2009 do novembra 2010. Drugi stolpec potrjuje dejstvo, da bi turbina delovala več kot polovico časa.

11 ZAKLJUČEK

Vetrna energija je ena izmed množice obnovljivih virov, ki jih ponuja naš življenjski prostor na zemlji. Da bi ga ohranili do take meje, da bo življenje v njem prijazno in zdravo, bo potrebno v prihodnosti narediti korenite spremembe pri uporabi fosilnih goriv. Pridobivanje energije iz njih zastruplja celoten planet v obliki izpustov toplogrednih plinov kot sta CO₂ in SO₂, ki sta tudi glavna krivca za globalno segrevanje. Če se želimo izogniti problemom v prihodnosti, je potrebno več pozornosti posvetiti obnovljivim virom, ki za proizvodnjo energije tako rekoč ne vplivajo na spremembe v ozračju. Vetrne elektrarne za svoje delovanje izkoriščajo kinetično energijo vetra, katero preko rotorja najprej pretvorijo v mehansko in nato preko generatorja v električno energijo.

V diplomski delo s praktičnega usposabljanja nadgradili in dopolnili z večjo izbiro vetrnih turbin in dodatnimi analizami. V uvodu je razložen celoten fizikalni del pretvorbe kinetične energije vetra v mehansko, kakšne so pri tem izgube in kakšni so najvišji izkoristki turbin. V delu nadalje obravnavamo opis posameznih delov, njihovo zgradbo in vplivu na proizvodnjo energije. Posvetimo se tudi različnim vrstam generatorjev, ki so v rabi ter pojasnimo, kako je celotna elektrarna priključena na električno omrežje. Obširno smo opisali vplive površja in izpostavili določene učinke, katerim se je za uspešno delovanje vetrne elektrarne potrebno izogibati.

Glavni namen diplomskega dela je izbrati primerne vetrne turbine za razmere na Kanalskem vrhu. Za izvedbo te analize nam je podjetje Soške elektrarne odstopilo podatke meritev hitrosti in smeri vetra. Meritve so se izvajale na štirih višinah (20 m, 40 m, 60 m in 80 m), za nadaljnjo raziskavo pa smo uporabljali le podatke z višine 80 m. Izračunali smo povprečne hitrosti, izdelali vetrne rože hitrosti in pogostosti vetra, podali letno porazdelitev hitrosti vetra in za konec analize še Weibullovo porazdelitev pogostosti. Pri izračunu slednje smo uporabili parameter oblike (k) 1,57, ki je določen za naše področje in parameter merila (c) 4,75, kar je povprečna hitrost meritev vetra za obdobje od novembra 2009 do novembra 2010, na višini 80 m.

Na podlagi rezultatov meritev vetra smo analizirali 25 različnih vetrnih turbin. Glavni kriteriji izbire so bili letna proizvodnja, izkoristek in čas vračila investicije.

Vetrna turbina proizvajalca GENERAL ELECTRIC, model 1.5 XLE – 82.5 m se je izkazala kot najbolj racionalna izbira.

Njena letna proizvodnja je znašala 2.863,36 MWh, izkoristek je dosegel vrednost 22,22 %, investicija pa bi se povrnila v dobrih šestih letih. Slednji podatek smo izračunali na podlagi evropskega povprečja o ceni vetrne turbine za 1 MW, ki znaša 1.227.000 €.

Opravljen delo bi bilo v prihodnosti smiselno nadgraditi v obliki konkretnega izračuna povrnitve investicije, za to pa bi potrebovali realno ceno, katere pa proizvajalec ne objavi, dokler ni med njimi in stranko podpisana pogodba o delitvi podatkov.

V skrbi za boljši jutri bo torej potrebno gledati tudi v tej smeri. Izraba vetrne energije je v današnjih časih napredovala do te meje, da je njeno izkoriščanje smotrno in priporočljivo. Kanalski vrh pa bi s postavitvijo vetrnih turbin, poleg samih turbin, pridobil tudi nekakšen učni center obnovljivih virov, ki bi javnost поблиže seznanil o delovanju vetrnih elektrarn.

12 LITERATURA

Bergoč, P., Leban, M., Volk, R. (2009). ČHE Avče. Interno gradivo SENG.

Google zemlja. Pridobljeno 1.10.2011 s svetovnega spleta:
<http://www.google.com/earth/index.html>

Guided tour on wind energy. Pridobljeno 2.6.2011 s svetovnega spleta:
<http://www.windpower.org/>

Graham, I. (2000). Energija vetra. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije

Kariž, T. (2008). Analiza možnosti izrabe vetrne energije v kmetijstvu. Diplomsko delo. (Biotehniška fakulteta, Univerze v Ljubljani), Ljubljana: [T. Kariž]

Medved, S., Arkar, C. (2009). Energija in okolje: obnovljivi viri energije. Ljubljana: Zdravstvena fakulteta.

Medved, S., Novak, P. (2000). Varstvo okolja in obnovljivi viri energije. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

Mikelj, Š. (2006). Izkoriščanje vetra v SV Sloveniji nekoč in danes – vpliv na vidne kakovosti okolja. Dipl. delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 105 str.

Nelson, V. (2009). Wind energy: renewable energy and the environment. Združene države Amerike.

SENG, (2005). Energija = Zelena = Modra = Smaragdna = Narava. Soške elektrarne Nova Gorica, d.o.o. Nova Gorica: Grafika Soča.

The wind turbine, operation and components. Pridobljeno s svetovnega spleta 15.8.2011: www.windmission.dk/workshop/BonusTurbine.pdf

Wikipedija. Pridobljeno s svetovnega spleta 31.1.2012:
http://sl.wikipedia.org/wiki/Coriolisova_sila

Wikipedija. Pridobljeno s svetovnega spleta 4.7.2011:
http://sl.wikipedia.org/wiki/Rayleighjeva_porazdelitev

Wind in power, 2010 European statistic. Pridobljeno 1.10.2011 s svetovnega spleta:
www.ewea.org

Wind energy the facts. Pridobljeno 24.10.2011 s svetovnega spleta:
<http://www.wind-energy-the-facts.org/>

Wind power, Danish wind industry association. Pridobljeno 20.10.2011 s svetovnega spleta: <http://www.windpower.org/en/>

13 PRILOGA 1: Izračuni glavnih karakteristik za vetrne turbine

Protizjalec in model	Letna proizvodnja [MWh]	Maksimalna letna proizvodnja [MWh]	Capacity factor [%]	Povprečna moč [kW]	Cena za 1 MWh v EUR	Proizvodnja v EUR	Varičilo investicije [€ETA]
GAMBESA G52 - 850 kW	848,08	7.303,20	11,61	96,75	95,38	80.889,84	12,89
GAMBESA G58 - 850 kW	1.328,64	7.303,60	18,19	151,57	95,38	126.726,03	8,23
GAMBESA G80 - 2,0 MW	2.631,28	17.184,00	15,31	300,17	95,38	250.971,93	9,78
GAMBESA G83 - 2,0 MW	2.712,22	17.184,00	15,78	309,40	95,38	258.691,38	9,49
GAMBESA G87 - 2,0 MW	3.006,90	17.184,00	17,50	343,02	95,38	286.798,29	8,56
GAMBESA G90 - 2,0 MW	3.204,65	17.184,00	18,65	365,58	95,38	305.659,89	8,03
GAMBESA G97 - 2,0 MW	3.599,25	17.184,00	20,95	410,59	95,38	343.296,39	7,15
ENERCON E44-900 kW	858,23	7.732,80	11,10	97,90	95,38	81.858,28	13,49
ENERCON E48-800 kW	1.080,89	6.873,60	15,73	123,30	95,38	103.094,86	9,52
ENERCON E53-800 kW	1.269,47	6.873,60	18,47	144,82	95,38	121.081,95	8,11
ENERCON E82-2,0 MW	3.069,43	17.184,00	17,86	350,15	95,38	292.762,33	8,38
ENERCON E70 - 2,3 MW	2.541,28	19.761,60	12,80	289,90	95,38	242.387,00	11,64
ENERCON E82 - 2,3 MW	3.140,14	19.761,60	15,89	358,22	95,38	299.506,39	9,42
GE 1.5 SL-77 m	2.174,39	12.888,00	16,87	248,05	95,38	207.393,16	8,87
GE 1.5 SLE-77 m	2.259,51	12.888,00	17,53	257,76	95,38	215.511,59	8,54
NORDEX S70-1,5 MW	1.923,05	12.888,00	14,92	219,38	95,38	183.420,59	10,30
NORDEX S77-1,5 MW	2.190,68	12.888,00	17,00	249,91	95,38	208.947,27	8,81
SIEMENS SWT-2,3 MW-93 m	3.449,11	19.761,60	17,45	393,46	95,38	328.976,05	8,58
SIEMENS SWT-2,3 MW-101 m	3.930,97	19.761,60	19,89	448,43	95,38	374.935,60	7,53
VESTAS V80 m 2,0 MW	2.459,33	17.184,00	14,31	280,55	95,38	234.570,94	10,46
VESTAS V39-500 kW	416,16	4.296,00	9,69	47,47	95,38	93.693,23	15,46
VESTAS V52-850 kW	1.098,49	7.303,49	15,05	125,31	95,38	104.773,85	9,95
VESTAS V82-1,65 MW	2.558,87	14.167,80	18,05	291,91	95,38	244.064,86	8,30
VESTAS V90-2,0 MW	3.006,87	17.184,00	17,50	343,02	95,38	286.795,56	8,56