

UNIVERZITET SINGIDUNUM
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

MASTER RAD

Energija vetra i vetroturbine

Mentor:
Prof. dr. Dragan Cvetković

Kandidat:
Marko Jovanović
Br.indeksa 412057/2014

Beograd, 2016.

1. Uvod.....	3
1.1 Predmet istraživanja.....	4
1.2 Cilj istraživanja.....	4
1.3 Metode i tehnike istraživanja.....	4
1.4 Struktura rada	4
2. Energija vetra	5
2.1 Vrste vetrova	7
3. Merenje vetra	9
3.1 Metod atlasa vetrova.....	10
3.2 Atlas vetrova u Srbiji.....	11
3.3 Merenje vetra pomoću kamera.....	13
4. Korišćenje energije vetra u svetu i kod nas	19
5. Vetroturbine	25
5.1 Vetroturbine sa horizontalnom osovinom	27
5.2 Vetroturbine sa vertikalnom osovinom	31
6. Mehaničke karakteristike vetroturbine.....	34
7. Senzori vetroturbine	36
8. Upravljanje vetroturbinom.....	37
9. Materijali za izradu vetroturbine.....	40
10. Izbor lokacije	43
11. Animacija vetroturbine	45
Zaključak	48
Spisak slika	49
Spisak tabela	50
Literatura.....	51

1. Uvod

Kada se misli na neobnovljive izvore energije, misli se na vid energije koji je jednom stvoren i za sada se ne može obnoviti. Tu spadaju fosilna goriva, prirodni gas, nuklearna goriva, nafta, ugalj. Najveći problem je u njihovoj rasprostranjenosti i količini.

Obnovljivi izvori energije su neiscrpan vid energije koji se nalazi svuda oko nas.

U obnovljive izvore energije spadaju:

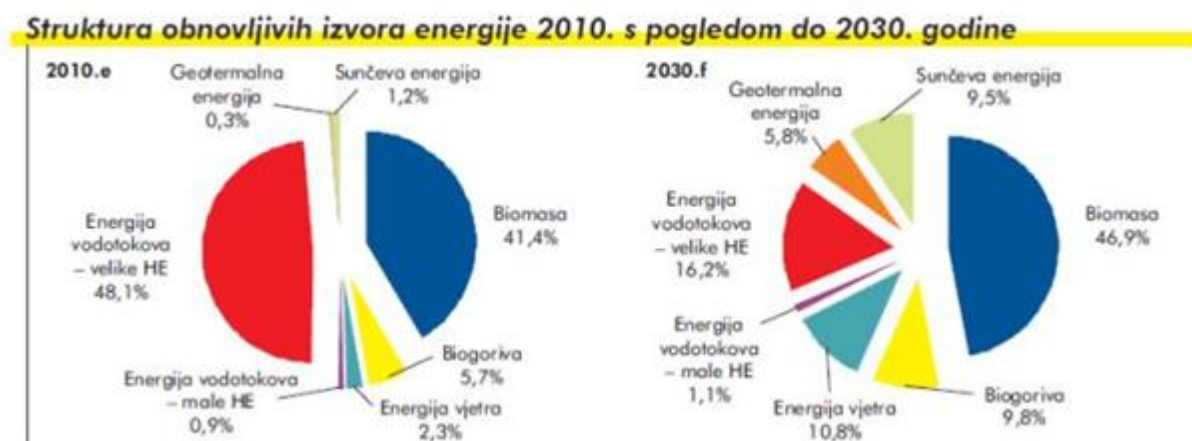
- Energija vetra
- Energija vode
- Sunčeva energija
- Biomasa

U suprotnosti od neobnovljivih oblika energije, obnovljivi izvori energije se ne mogu iscrpiti vremenom, ali je zato moguće u potpunosti iscrpiti njihove potencijale.

Par izvora obnovljivih izvora energije nije moguće skladištiti i transportovati u njihovom prirodnom obliku (zračenje sunca, vetar), a neke jeste (biogas, voda). Izvore koje nije moguće skladištiti treba iskoristiti u trenutku pojavljivanja ili ih pretvoriti u neki drugi oblik energije.

Specifičnosti obnovljivih izvora energije:

Neiscrpivost, prekidnost, promenljivost, periodičnost, nemogućnost skladištenja, stohastičnost.



Slika 1. Struktura obnovljivih izvora energije ¹

¹ http://www.poslovnipuls.com/wp-content/uploads/2011/10/tablica2_v.jpg

1.1 Predmet istraživanja

Predmet istraživanja master rada jesu vetar kao izvor obnovljivih izvora energije i vetroturbine koje su nastale kao plod sve češćeg korišćenja energije vetra za dobijanje električne energije.

1.2 Cilj istraživanja

Cilj istraživanja master rada je prikaz ekonomičnosti i značaja upotrebe energije vetra i vetroturbina.

1.3 Metode i tehnike istraživanja

Za prikupljanje podataka za izradu master rada korišćeno je više opštenaučnih metoda, komparativna metoda, sintetičke naučne metode.

Istraživanja u radu oslanjaju se na izvore iz domaćih i međunarodnih stručnih literatura.

1.4 Struktura rada

U prvom delu rada se govori o energiji vetra. Biće reči o vrstama vetra, merenju, metodi atlasa vetrova, vetrovima u Srbiji, merenju vetra pomoću kamera kao i o korišćenju energije vetra u svetu i u Srbiji.

U drugom delu rada se govori o vetroturbinama, podeli vetroturbina, njihovoj strukturi, mehaničkim karakteristikama, senzorima, upravljanju vetroturbina, materijalima koji se koriste za izradu vetroturbina, potrebnim merenjima i izboru lokacija.

2. Energija vetra

Energija vetra spada u obnovljive izvore energije, čista je, ne emituje CO₂ i ne zagađuje vazduh. Pri upotrebi energije vetra nema štetnih otpadaka. Energija vetra se koristi za dobijanje električne energije tako što se kinetička energija pretvara u mehaničku energiju, pa u daljoj transformaciji u električnu. Energija vetra se do sada pokazala kao veoma ozbiljan obnovljiv izvor energije.

Glavni razlozi za to:

- neograničena količina energije
- vetrogeneratori sada nisu preskupi
- ekološki način pretvaranja energije
- ne zauzima puno zemljišta

Energija vetra se koristi već par hiljada godina, na primer, čamac sa jedrima se koristi barem 6000 godina, a vetar je korišćen za ventilaciju još u antičko doba. Prve vetrenjače napravljene su u Avganistanu u VII veku, odatle se ideja proširila do Evrope, i prve vetrenjače za mlevenje zrna u brašno zabeležene su u XII veku u Holandiji.

Početkom 20. veka energija vetra počinje da se koristi za proizvodnju električne energije, tada u malim postrojenjima, ali posle naftne krize 1973. godine, veliki broj zemalja počinje planiranje za proizvodnju struje pomoću energije vetra. Sa povremenim usponima i padovima, razvoj se ubrzava početkom drugog milenijuma.

Zato što Sunce ne zagreva ravnomerno sve delove Zemlje javljaju se različiti pritisci u vazduhu te vetar nastaje kao težnja za izjednačavanjem tih pritisaka. Postoje lokalni i globalni vetrovi.

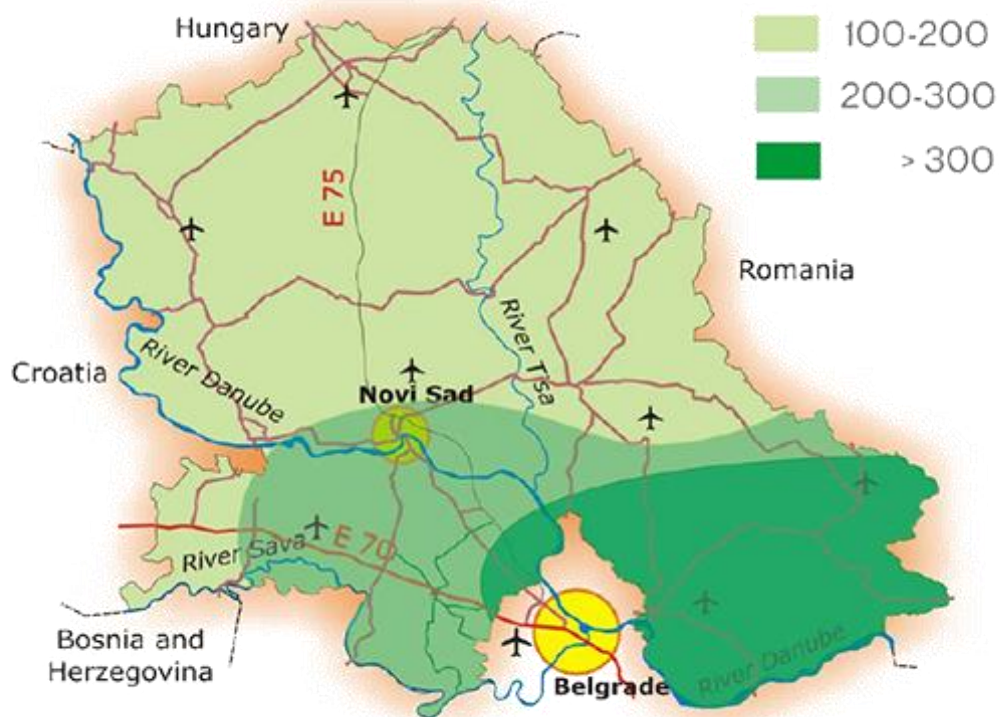
Lokalni vetrovi se javljaju u prizemnom sloju atmosfere i rezultat su lokalnih razlika u atmosferskom pritisku. Mogu biti planinski i morski. Planinski vetrovi nastaju kao rezultat zagrevanja sunčanih strana planine. Jačina vetra je veća na vrhu nego u podnožju. Postoji efekat koji se naziva tunel efekat, a to je strujanje vetra između dva brda, gde vetar može povećati brzinu i do 40% što može povećati njegovu snagu.

Zbog razlike između temperature kopna i mora nastaju morski vetrovi. Najbolja pozicija za morske vetrove jeste pučina zbog stalnog duvanja vetra ali je cena instalacije i prenosivosti energije previsoka.

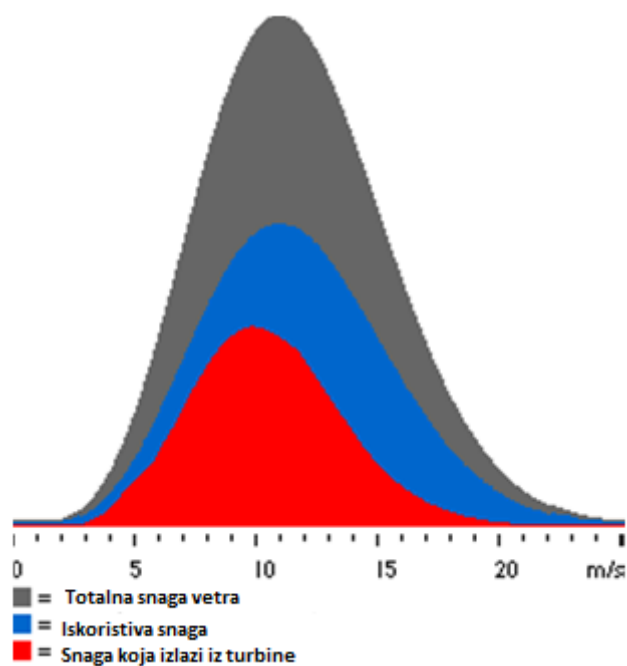
Globalni vetrovi su rezultat različitih zagevanja vazdušnih masa u zemljinoj atmosferi. Na ekvatoru vazduh se više zagreva nego na polovima pa ta razlika između temperatura stvara vetrove. Globalni vetrovi su uglavnom visinski, između 2km i 12 km, te nisu pogodni za korišćenje pri konverziji energije vetra u električnu.

Da bi se dobila najviša iskoristivost, potrebno je odrediti mikro lokaciju. To je lokacija na kojoj vetar ima najveću energiju i gde bi vetroturbina mogla najveći deo te energije konvertovati u upotrebljiv oblik. S obzirom da se vetrovi mogu koristiti i na visini od 150m iznad tla, najveći problem nalaženja mikro lokacije predstavljaju turbulencije.

Da bi se se pronašle lokacije sa najboljim vetrom, potrebno je izvršiti mnogobrojna merenja.



Slika 2. Prosečna brzina vetra na 100 metara ²



Slika 3. Raspodela energije vetra ³

² http://www.sr.vip.org.rs/upload/regular/Average_wind_power_map_452_452.png

³ <http://www.slideshare.net/jadrankom/3-energija-vetra2010>

2.1 Vrste vetrova

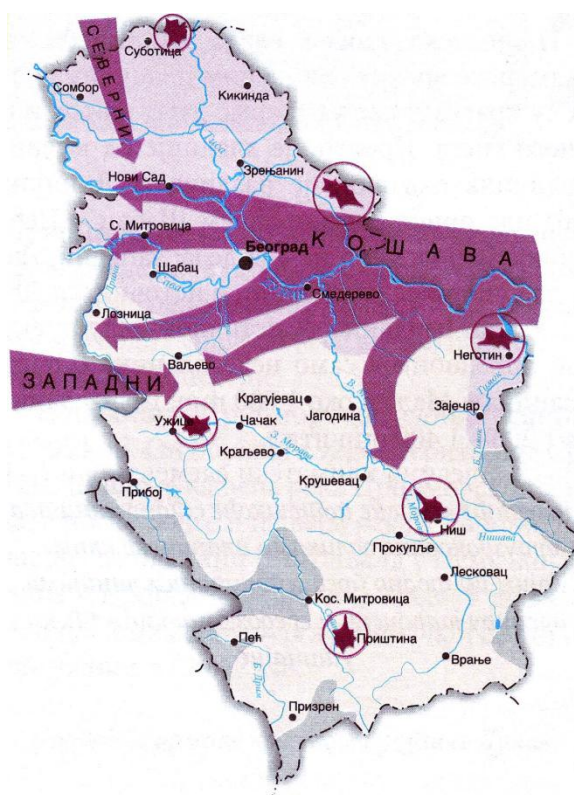
Postoje vetrovi koji duvaju stalno i povremeno. Povremeni vetrovi su npr. monsun. To su sezonski vetrovi u Južnoj Aziji, koji cele zime duvaju sa severa i donose kišu, jake zimske hladnoće, a preko leta menjaju pravac, duvajući sa okeana i donoseći kišu. Ovi vetrovi duvaju u Kini i Indiji.

Stalni vetrovi duvaju neprekidno. Stalni vetrovi:

- Pasati, duvaju stalno iznad tropskih predela.
- Antipasati, duvaju od ekvatora ka suptropskim regijama.
- Zapadni i istočni vetrovi.

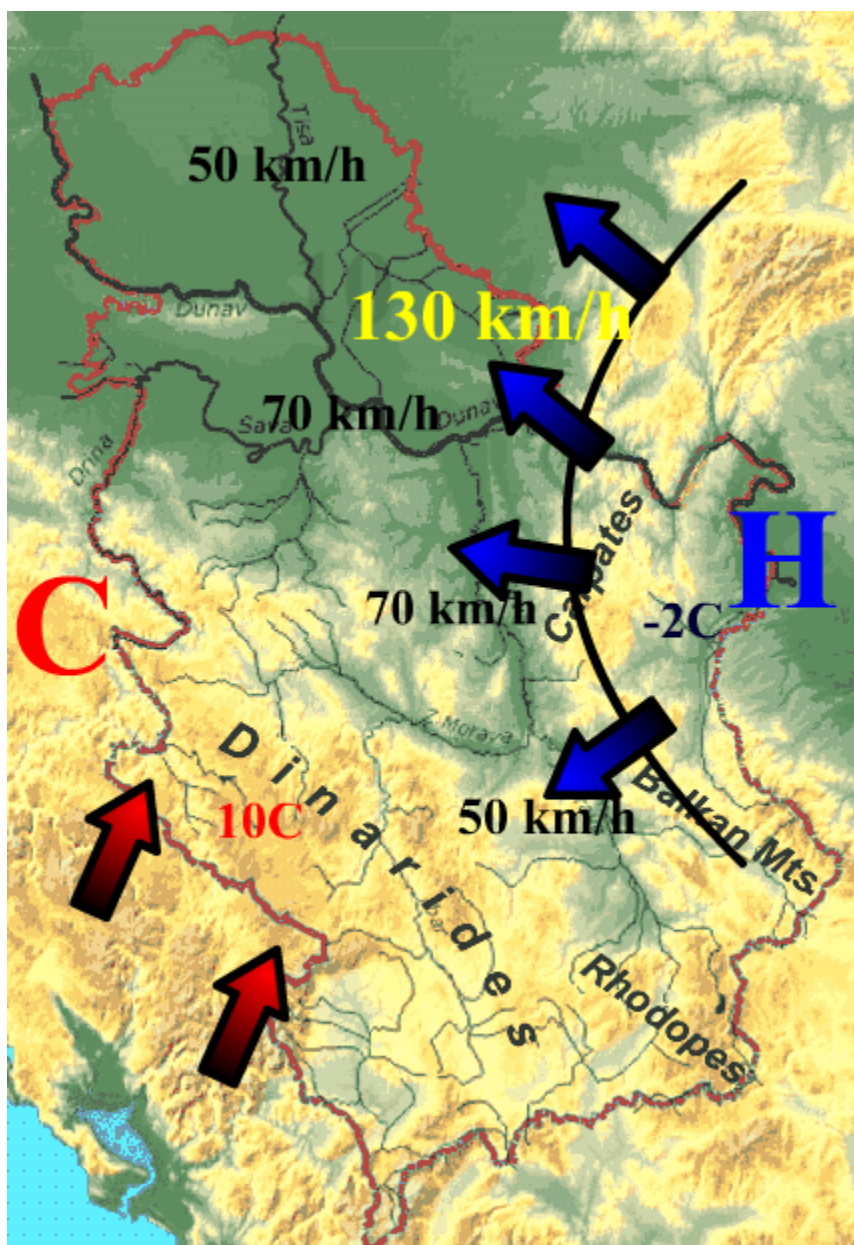
Lokalni vetrovi su:

- Fen, duva na Alpima, često izaziva lavine;
- Razvigor, duva u proleće;
- Košava, duva u severoistočnoj Srbiji, dolazi sa Karpata;
- Vardarac, duva na Balkanskom poluostrvu, često zimi;
- Severac, duva u Vojvodini;
- Maestral, duva na Jadranskom primorju;
- Bura, duva na istočnoj obali Jadranskog mora;
- Jugo
- Tornado itd.



Slika 4. Vetrovi u Srbiji ⁴

⁴ <https://geografijazaradoznale.files.wordpress.com/2015/10/d0b2.png>



Slika 5. Brzina Košave može biti i do 130 km/h ⁵

⁵ <http://serbianmeteo.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/12/ssss.png>

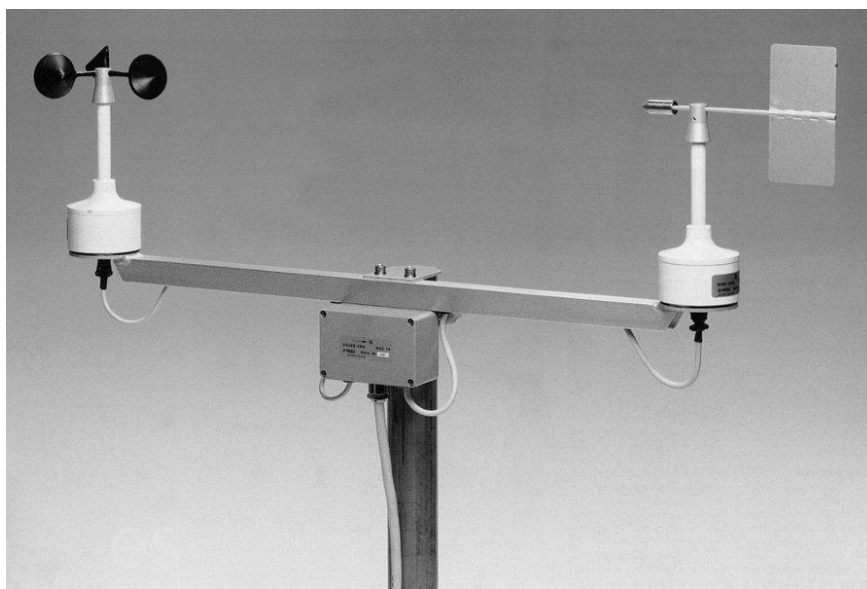
3. Merenje vetra

Merenje brzine vetra vrši se anemometrom ili anemografom. Brzina vetra se izražava u kilometrima na sat. Najviše se koristi Fusov anemograf, koji meri pravac, srednju i trenutnu brzinu vetra. Detektorski deo anemografa se nalazi obično na 10m od tla, na stubu u okviru meteorološke stanice.

Takođe postoji parametar koji definiše vetar, a to je udar vetra. To je brzina vetra u trajanju od nekoliko sekundi. Kod nas je veoma poznata košava, koja ima česte udare velikog intenziteta.



Slika 6. Anemometar ⁶



Slika 7. Anemograf ⁷

⁶ <http://www.edurashop.com/images/pro-LM81AM.JPG>

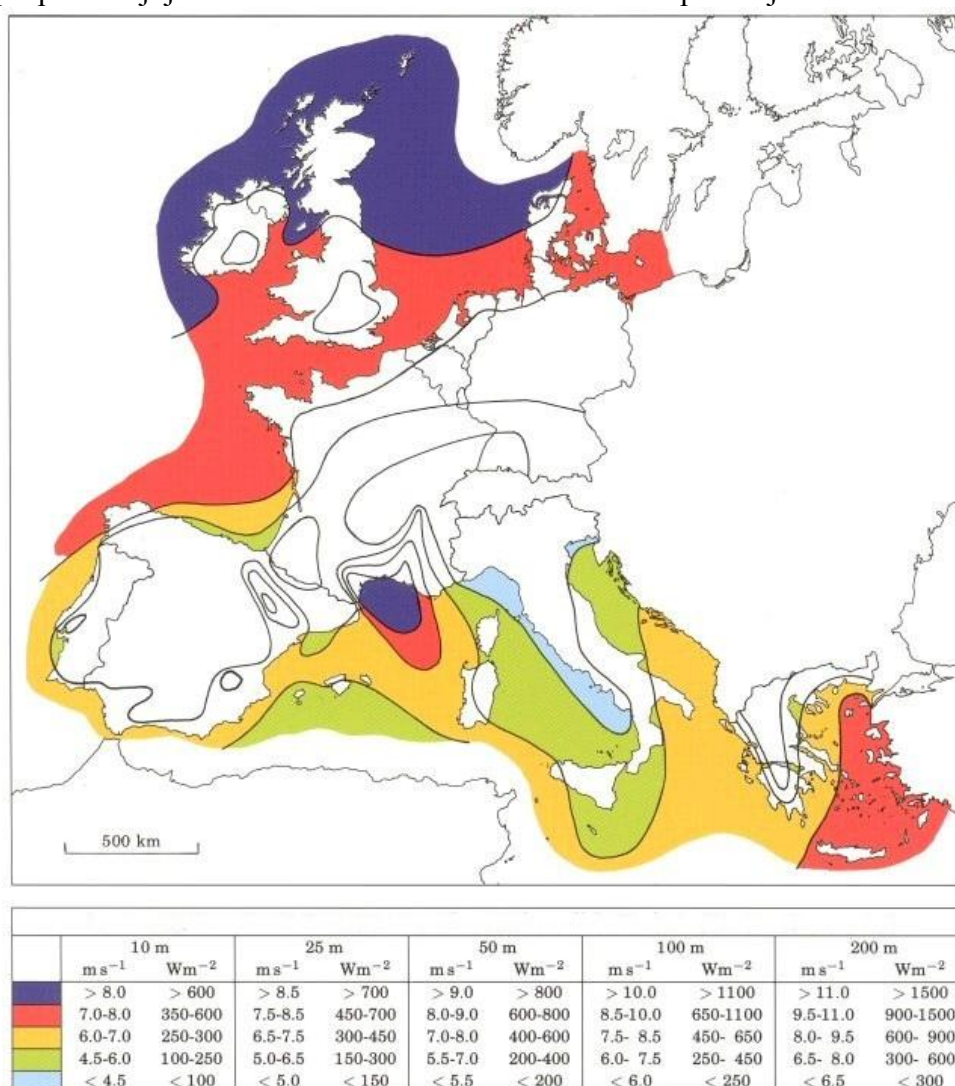
⁷ http://www.enciklopedija.hr/Ilustracije/HE1_0573.jpg

3.1 Metod atlasa vetrova

Atlas vetrova je skup geografskih karata na kojima su oblasti sa intenzitetima vetra ili gustine snage vetra. Podaci koji se nalaze na atlasu vetrova su dati u geografskom informacionom sistemu.

Prvi Evropski Atlas Vetra napravljen je 1989. godine, u institutu RISO u Danskoj. Atlas vetrova služi za identifikaciju mesta pogodnih za pretvaranje energije vetra u električnu energiju.

„Pri izradi atlasa vetra za neko područje koriste se baze podataka o karakteristikama vetra, meteorološkim stanicama u blizini, kao i podaci satelitskih merenja i meteoroloških balona. Podaci satelitskih merenja daju veoma pouzdane podatke o vetru za priobalno područje, ali je njihova upotrebljivost na kopnu veoma ograničena. Nove metode koje se stalno razvijaju, pomažu pri preciznijoj izradi atlasa vetra i na kontinentalnom području.“⁸



Slika 8. Evropski Atlas vetrova⁹

⁸ Miodrag Zlatanović, *Korišćenje energije vetra u Srbiji*, 2009

⁹ [http://www.wasp.dk/-](http://www.wasp.dk/-/media/Sites/WASP/Products/Wind%20atlas/European%20wind%20atlas/EWA_web_EuropeanWindResourcesAt50MetresAGL_323x363.ashx?h=363&w=323&la=da)

[/media/Sites/WASP/Products/Wind%20atlas/European%20wind%20atlas/EWA_web_EuropeanWindResourcesAt50MetresAGL_323x363.ashx?h=363&w=323&la=da](http://www.wasp.dk/-/media/Sites/WASP/Products/Wind%20atlas/European%20wind%20atlas/EWA_web_EuropeanWindResourcesAt50MetresAGL_323x363.ashx?h=363&w=323&la=da)

3.2 Atlas vetrova u Srbiji

Prvi atlas vetrova u Srbiji je urađen 2002. godine, utvrđen je ogroman potencijal energije vetra, posebno u jugoistočnoj i istočnoj Srbiji i u južnom Banatu. Energetski potencijal vetra u Srbiji se procenjuje na oko 1300 MW, dok bi godišnja proizvodnja električne energije mogla biti oko 2.3 TWh.

Na slici ispod je prikazana brzina vetra na visini od 100m iznad tla u zimskom periodu.

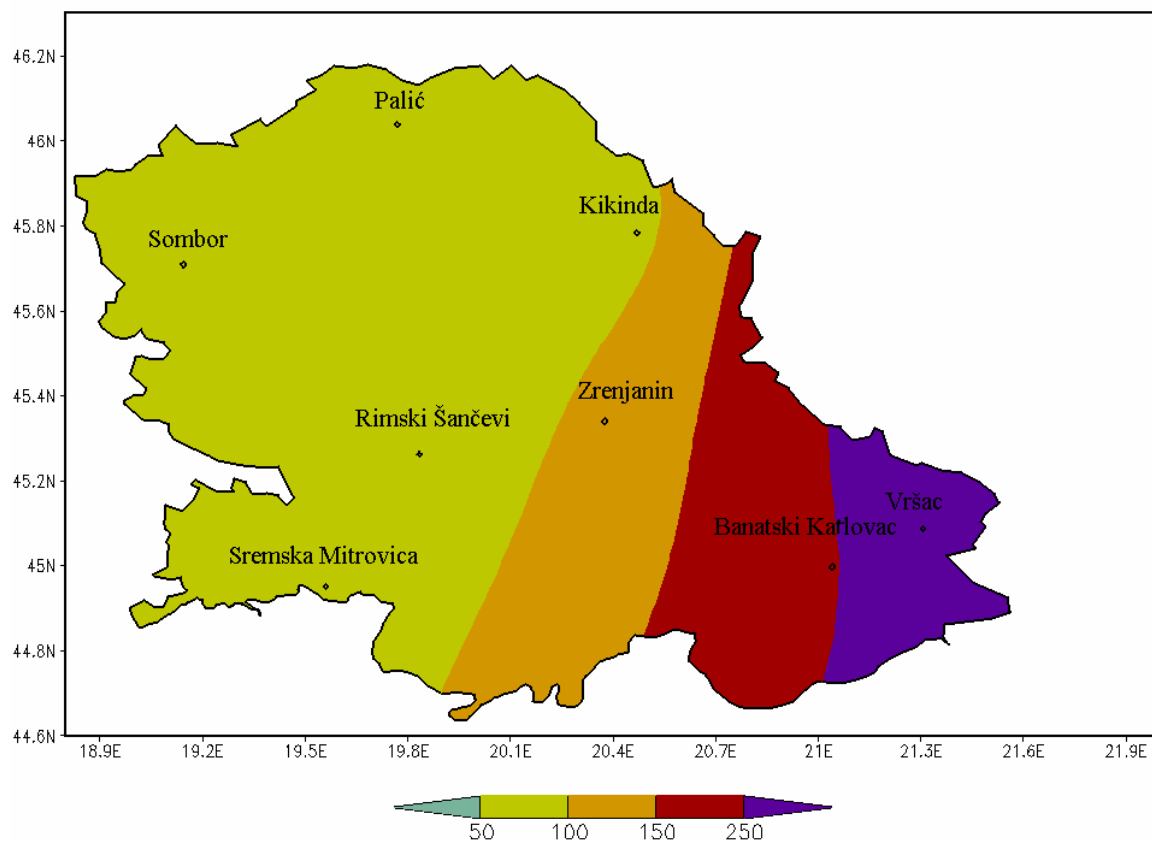


Slika 9. Brzina vetra u zimskom periodu ¹⁰

Za Vojvodinu su urađeni posebni atlas i jer Vojvodina ima dosta iskustva pri korišćenju energije vetra. Na slici 10 je prikazana gustina snage vetra na visini od 50m iznad tla.

¹⁰ <http://media1.efikasnost.rs/2012/08/prose%C4%8Dna-godi%C5%A1nja-snaga-vetra-na-visini-od-100-metara.png>

Srednja godišnja gustina snage vetra na 50 m iznad tla u Vojvodini $Z_0=0.03\text{m}$

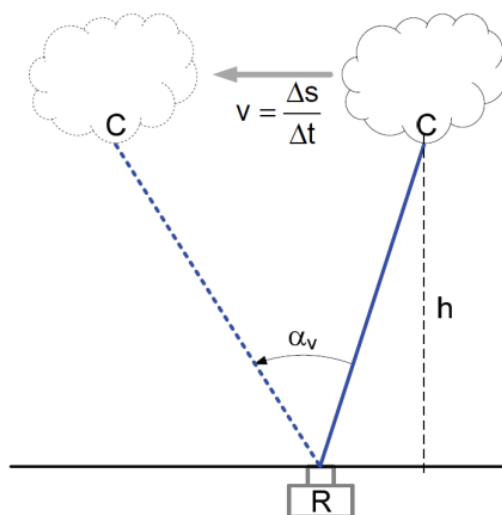


Slika 10. Atlas vetra Vojvodine ¹¹

¹¹ Miodrag Zlatanović, Korišćenje energije vetra u Srbiji – prirodni uslovi i praktična politika, 2009

3.3 Merenje vetra pomoću kamera

Brzina vetra se može meriti i pomoću kamera. Sistem sačinjen od dve digitalne kamere sa širokim uglom sočiva je razvijen i koristi se za merenje visine oblaka ali i brzine i pravca vetra. Ovakvo merenje se može vršiti triangulacijom, koristeći dve digitalne kamere postavljene na određenoj udaljenosti jedne od druge, stereo slikom se može izvesti triangulacija potrebna da se izmeri brzina vetra. Sledi primer:



Slika 11. Geometrija sistema za merenje brzine vetra¹²

Na slici je prikazana geometrija sistema za merenje brzine vetra pomoću digitalnih kamera, gde je :

Δt vreme koje je potrebno vetru da se spusti od oblaka

Δs distanca koju je vetar prošao

α_v ugao putovanja

h visina oblaka

$$\Delta s = \alpha_v h$$

Ovakav prototip se sastoji od dve DSLR kamere Canon EOS 1000D, kompjutera i kućnog alarmnog sistema zasnovanom na NI USB-6009 matičnoj ploči. Svaka kamera se nalazi u kutiji kako bi bila zaštićena od vremenskih uslova kao što je i prikazano na slici 12.

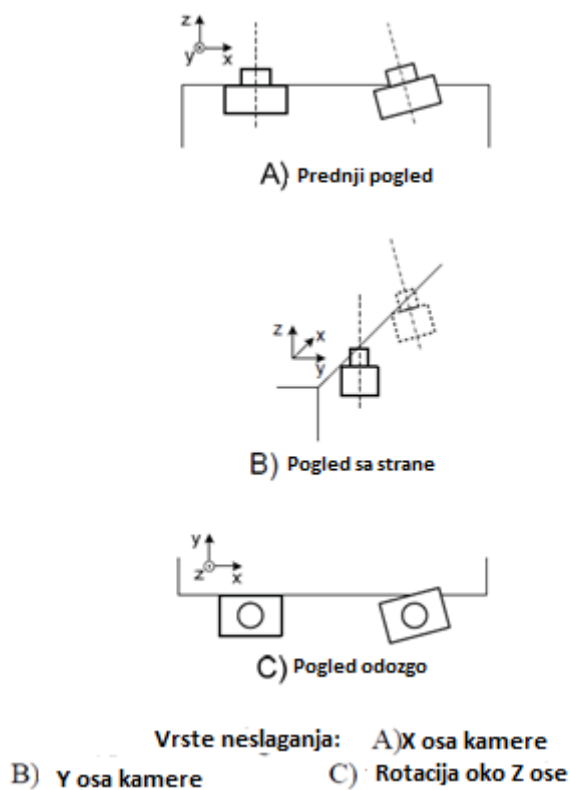
¹² Fernando M. Janeiro, Wind speed measurement using digital cameras, 2012



Slika 12 Zaštita kamere u kutiji i slika celokupnog sistema ¹³

Kamere su postavljene na razdaljini od 29 metara i povezane su sa kompjuterom preko usb kablova, kako bi se slike prebacile na kompjuter radi obrade. Kamere su podešene da slikaju slike formata jpeg sa rezolucijom $L=3888 \times W=2592$. Zumiranje je podešeno na minimum sa horizontalnim uglom od 65° i vertikalnim od 46° . Aktiviranje sistema kamera se postiže sa kompjutera. LabView program kontroliše podatke i matičnu ploču te šalje pulseve od po 5V svojim digitalnim izlaznim kanalima koji se nalaze na "okidačima" digitalnih kamera. Da bi kamere slikale "okidač" pravi kratku konekciju sa ulaznim linijama kamere. Testovi su pokazali da će se dve kamere pokrenuti u razmaku od 1ms.

Potreba za kalibrisanjem kamere proizilazi iz toga da je ponekad veoma teško postrojiti dobro obe kamere. Tri najčešća slučaja neslaganja kamera su prikazana na sledećoj slici:



Slika 13. Tipovi neslaganja kamera ¹⁴

¹³ Fernando M. Janeiro, Wind speed measurement using digital cameras, 2012

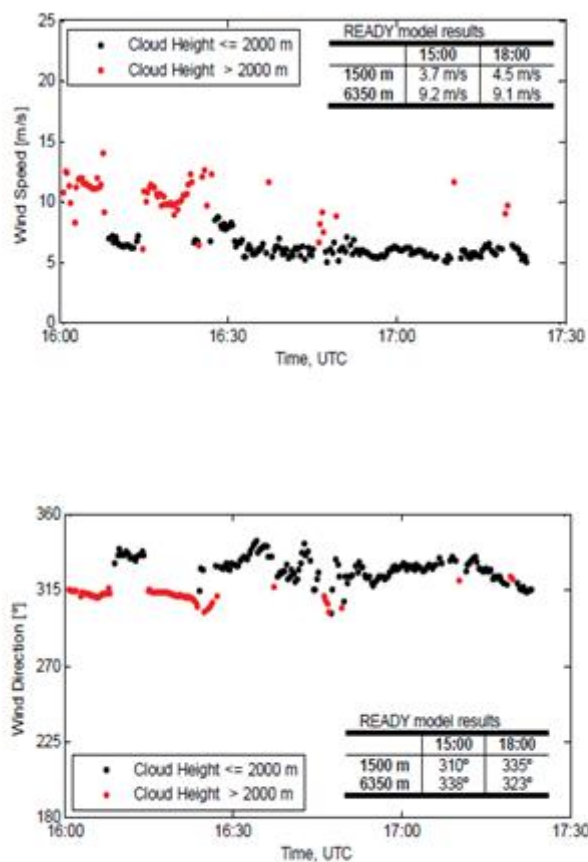
¹⁴ Fernando M. Janeiro, Wind speed measurement using digital cameras, 2012

Savršeno poklapanje kamera je praktično nemoguće. Stoga je pogodnije da se izvrši približno poravnavanje, a zatim odrediti ostatak neslaganja u sistemu i srediti ih pomoću softvera. Na kraju kada se dobiju slike, potrebno je pomoću softvera očitati parametre za Δx i Δy . Zatim, prema sledećim formulama se izračunava brzina.

$$V_x = \left(\frac{\Delta x}{L} \alpha_h \right) \frac{h}{\Delta t}$$

$$V_y = \left(\frac{\Delta y}{W} \alpha_v \right) \frac{h}{\Delta t}$$

$$V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$



Slika 14. Konačni rezultati merenja ¹⁵

¹⁵ Fernando M. Janeiro, Wind speed measurement using digital cameras, 2012

Moguće je meriti brzinu vetra pomoću slika kapljica kiše. Ovom novom metodom, slike ili video snimci kiše se obrađuju pomoću kompjuterskog programa, koji određuje nagib kišnih kapi. Zatim se taj nagib koristi za izračunavanje brzine vetra. U daljem tekstu biće prikazan i objašnjen jedan takav eksperiment.

U ovom eksperimentu je prikazana metoda izračunavanja ugla kapi vode preko slika. Korišćeni su kućno crevo, slavina, voda i kamera. Dva upravna zida su odabrana za lokaciju, kao što je prikazano na slici 15.



Slika 15. Početak eksperimenta i puštanje vode ¹⁶

Digitalne slike se onda analiziraju kako bi se pronašao nagib pada vode, kao što je prikazano na slici 19. Kada se analiza vrši pretpostavlja se da su slike ortogonalna projekcija pada vode. Tako, epipolarna geometrija se ne koristi u proračunima uključenim u analizi slika. Slike su štampane i koristi se lenjir kako bi se odredile strane trougla koje formiraju voda i zid



Slika 16. Analiza slika ¹⁷

¹⁶ Kuhan Muniam, Determing wind velocity from images of raindrops, 2012

¹⁷ Kuhan Muniam, Determing wind velocity from images of raindrops, 2012

Uglovi α_1 i α_2 se računaju na sledeći način:

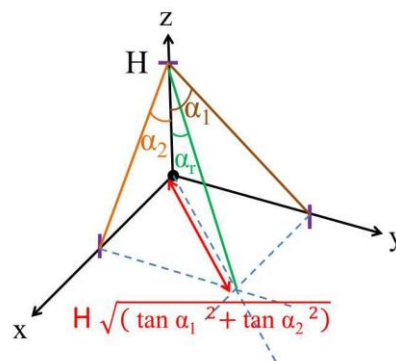
$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{1.2}{5.2} \right)$$

$$= 0.227 \text{ rad}$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{0.5}{3.9} \right)$$

$$= 0.128 \text{ rad}$$

Komponente nagiba vode su uglovi α_1 i α_2 , koji formiraju ugao α_r .

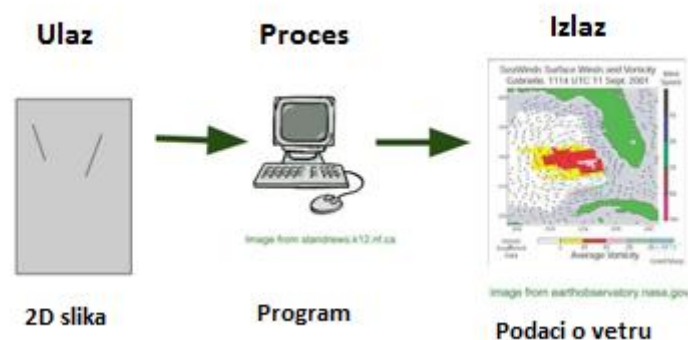


Slika 17. Trouglovi formiraju novi ugao ¹⁸

$$\alpha_r = \tan^{-1} \sqrt{\tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2}$$

$$= 0.259 \text{ rad}$$

Podaci se dalje šalju na obradu kompjuterskom programu koji izračunava brzinu vetra, kao što je prikazano na slici 18.



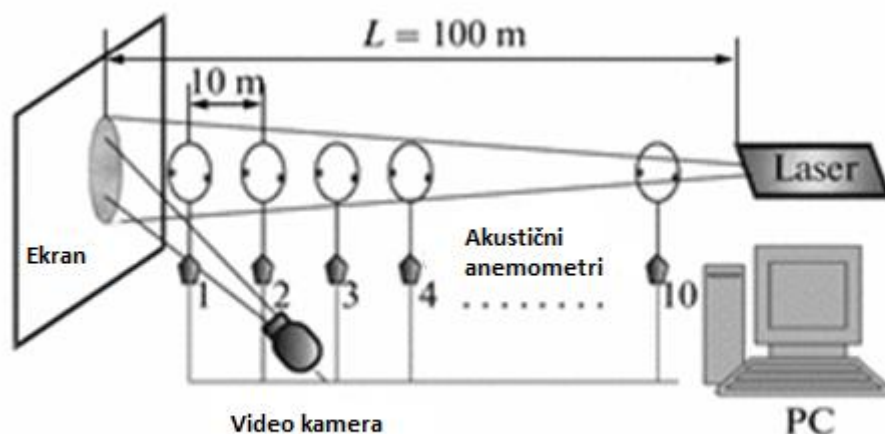
Slika 18. Prikaz kako metod funkcioniše ¹⁹

¹⁸ Kuhan Muniam, Determining wind velocity from images of raindrops, 2012

¹⁹ Kuhan Muniam, Determining wind velocity from images of raindrops, 2012

Takođe je moguće izmeriti brzinu vetra u atmosferi na osnovu analize turbulentnih distorzija laserskog zraka, pomoću slika registrovanih video kamerom. U sledećem eksperimentu korišćen je solidan laser, sa talasnom dužinom od 532nm i prosečnom snagom od 30mW. Prečnik snopa lasera je 0.4mm, a ugaona odstupanja su 1.2mrad. Merni put je nagnut. Visina se menja od 0.4m od izvora do 4m do prijemnika. Dužina je 100m.

Ekran koji se nalazi na kraju putanje se koristi za vizuelizaciju raspodele intenziteta u preseku zraka. Slika zraka na ekranu se registruje uz pomoć brze video kamere, sa frekvencijom snimanja od 4kHz u veličini rama 512x512 piksela i do 200kHz uz redukciju rama. U cilju dobijanja nezavisnih podataka o brzini vetra tokom atmosferskih eksperimenata, niz od deset jednodimenzionalnih ultrazvučnih anemometara je povezan na kompjutersku mrežu.



Slika 19. Šema eksperimenta²⁰

²⁰ Estimate of wind velocity in the atmosphere based on an analysis of turbulent distortions of laser beam images registered by video camera

4. Korišćenje energije vetra u svetu i kod nas

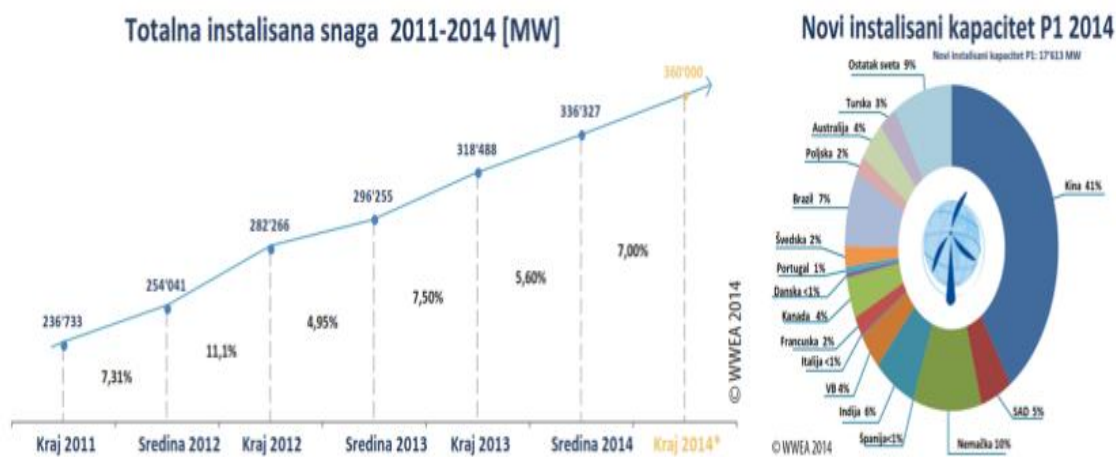
U periodu od 1991. do 2001. godine srednji godišnji rast vetroenergetskih kapaciteta je iznosio oko 29%, a u poslednjih 10 godina instalirana snaga se učetvorostručila. U 2014. godini Velika Britanija i Nemačka su imale najviše instalirane kapacitete sa 1900 MW i 3300 MW. Zatim Poljska sa 900 MW, Švedska i Rumunija sa 700 MW, Danska sa 650 MW, Turska i Francuska sa 600 MW. Druge zemlje sa preko 200 MW godišnje su Italija sa 450 MW, Austrija i Holandija sa 300 MW. Danas ove zemlje imaju preko 1GW instaliranih kapaciteta.

SAD su tokom osamdesetih bile lider, ali su to vođstvo izgubile tokom devedesetih kada su ukinule stimulaciju bez taksi. U zadnjih par godina se polako vraćaju na top mesto i trenutno imaju instalirano preko 65 GW. Samo u 2014. godini su imali instalirano preko 15 000 MW a već u 2015. godini su kretali sa instalacijom preko 13 000 MW.

Kanada je takođe pri vrhu zemalja sa instaliranim vetroenergetskim kapacitetima. Imala je odličnu 2014. godinu i jos bolju 2015. Trenutno imaju oko 9 000 MW instaliranih.

Da bi se vektroelektrana priključila na mrežu potrebno je da u sistemu postoje elektrane koje isporučuju energiju. Mogućnost transporta energije u nekom elektroenergetskom sistemu zavisi od karakteristika tog sistema, ali najviše od energetske izvora koji se koriste.

Podaci Svetske asocijacije energije vetra, World Wind Energy Association (WWEA), govore da je kapacitet proizvodnje el. energije uz pomoć energije vetra do kraja 2014. iznosio 340,452 MW. Samo u prvoj polovini 2014. godine je instalirano skoro 18 000 MW.



Slika 20. Totalna instalisana snaga na kraju 2014. godine²¹

²¹ <http://obnovljiviizvorienenergije.rs/energija-vetra/>

European Wind Energy Association (EWEA), ima podatke koji govore da ukupna instalisana snaga u Evropi na kraju 2014. godine bila skoro 12 000 MW za tu godinu, što je porast od skoro 4% u odnosu na 2013. godinu. Takođe je zanimljiv podatak da je u 2014. godini vetroenergetika zauzela 1.mesto sa 44% ukupnih novih izgradnji.

	Installed 2013	End 2013	Installed 2014	End 2014
EU Capacity (MW)				
Austria	308.4	1,683.8	411.2	2,095
Belgium	275.6	1,665.5	293.5	1,959
Bulgaria	7.1	681.1	9.4	690.5
Croatia	81.2	260.8	85.7	346.5
Cyprus	-	146.7	-	146.7
Czech Republic	8	268.1	14	281.5
Denmark*	694.5	4,807	67	4,845
Estonia	10.5	279.9	22.8	302.7
Finland	163.3	449	184	627
France	630	8,243	1,042	9,285
Germany	3,238.4	34,250.2	5,279.2	39,165
Greece	116.2	1,865.9	113.9	1,979.8
Hungary	-	329.2	-	329.2
Ireland	343.6	2,049.3	222.4	2,271.7
Italy	437.7	8,557.9	107.5	8,662.9
Latvia	2.2	61.8	-	61.8
Lithuania	16.2	278.8	0.5	279.3
Luxembourg	-	58.3	-	58.3
Malta	-	-	-	-
Netherlands	295	2,671	141	2,805
Poland	893.5	3,389.5	444.3	3,833.8
Portugal*	200	4,730.4	184	4,914.4
Romania	694.6	2,599.6	354	2,953.6
Slovakia	-	3.1	-	3.1
Slovenia	2.3	2.3	0.9	3.2
Spain	175.1	22,959.1	27.5	22,986.5
Sweden	689	4,381.6	1,050.2	5,424.8
UK	2,075	10,710.9	1,736.4	12,440.3
Total EU-28	11,357.3	117,383.6	11,791.4	128,751.4

	Installed 2013	End 2013	Installed 2014	End 2014
Candidate Countries (MW)				
FYROM	-	-	37	37
Serbia	-	-	-	-
Turkey	646.3	2,958.5	804	3,762.5
Total	646.3	2,958.5	841	3,799.5
EFTA (MW)				
Iceland	1.8	1.8	1.2	3
Liechtenstein	-	-	-	-
Norway	110	771.3	48	819.3
Switzerland	13.3	60.3	-	60.3
Total	125.1	833.4	49.2	882.6
Other (MW)				
Belarus	-	3.4	-	3.4
Faroe Islands	4.5	6.6	11.7	18.3
Russia	-	15.4	-	15.4
Ukraine	95.3	371.2	126.3	497.5
Total	99.8	396.7	138.0	534.7
Total Europe	12,228.5	121,572.2	12,819.6	133,968.2

Slika 21. Ukupan kapacitet u Evropi na kraju 2014. godine ²²

²² <http://obnovljiviizvorienenergije.rs/energija-vetra/>

Rezultati istraživanja pokazuju da je u Srbiji vetar veoma dobar izvor za proizvodnju električne energije i da se može koristiti na velikoj površini.

Srbija je stalno u energetskej krizi, te se vetroenergetika može iskoristiti kao idealan kapacitet. Tokom osamdesetih su izvršena mnoga istraživanja u oblasti obnovljivih izvora energije, među kojima je i vetroenergetika. Za njen razvoj u Srbiji se mogu iskoristiti oblasti Vojvodine, istočne Srbije, centralne Srbije kao i doline Save, Morave i Dunava.

Prema izveštajima istraživača, Balkan ima kapacitet u vetrovima od oko 1600 MW, ili oko 2.5 TWh godišnje. Najbolje lokacije za izgradnju vetroelektrana su:

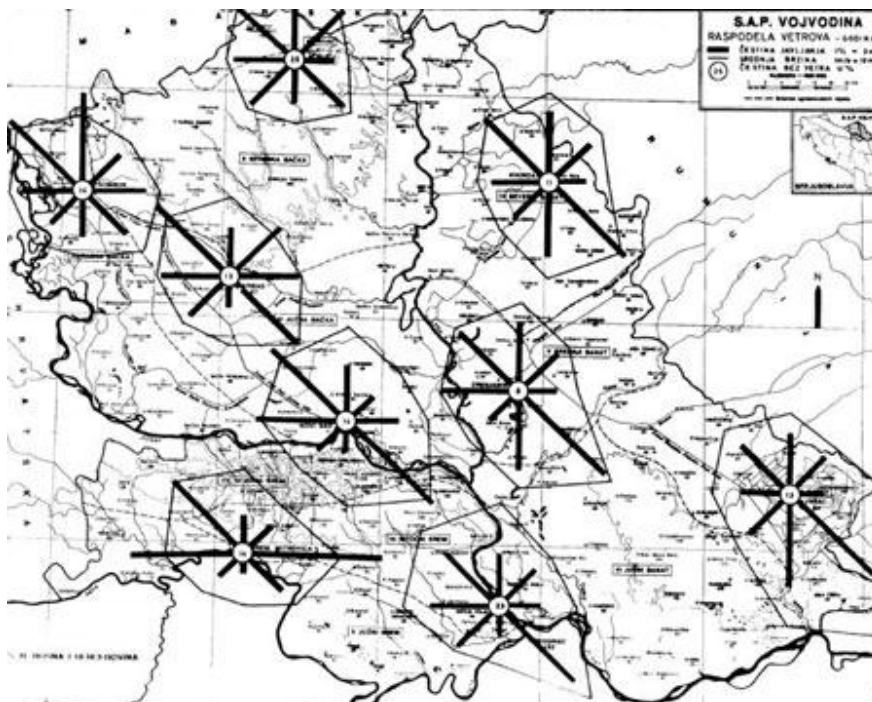
- Midžor gde je prosečna brzina vetra 7.7 m/s
- Suva planina sa prosečnom brzinom vetra 6.50 m/s
- Krepoljin sa prosečnom brzinom vetra 6.20 m/s
- Tupižnica sa prosečnom brzinom vetra 6.30 m/s
- Vršački breg sa prosečnom brzinom vetra 6.17 m/s
- Deli Jovan sa prosečnom brzinom vetra 6.10 m/s
- Juhor sa prosečnom brzinom vetra 6.05 m/s
- Jastrebac sa prosečnom brzinom vetra 6.02 m/s

Izrada Atlasa vetrova traje mesecima, u Vojvodini je trajalo 25 meseci, i snimano je na visini do 60m. Da bi neka lokacija bila pogodna za ulaganje u elektrane na vetar, najmanja godišnja brzina vetra mora biti između 5.0 i 5.9 m/s. Zato se moraju uraditi istraživanja na svakoj mikro-lokaciji da bi se znao budući prinos vektroelektrane. Ta istraživanja koštaju oko 6000 evra za merni stub. Mernim stubom se meri brzina vetra na određenim visinama, pritisak vazduha, vlažnost vazduha, što na kraju istraživanja može dovesti do troškova od oko 14 hiljada evra. Ovi troškovi istraživanja važe samo za procenu statističke vrednosti.

Savremene vetroturbine sadrže elisu od tri krila sa horizontalnom ili vertikalnom turbinom. Elisa pomoću senzora se okreće u pravcu vetra. Treba dobiti što ujednačeniju proizvodnu snagu. Jeftinija vetroturbina može biti visoka 50-80m, a skuplja i do 170m, sa cenom od 1.3 – 4.2 miliona evra po instaliranom sistemu, tj. od 0.8 do 2.2 miliona evra po megavatu nominalne snage. Ali, iako je nominalna snaga vetrogeneratora od 2MW do 5MW, on može dati između 45% i 60% te vrednosti zbog dinamične brzine vetra.

Na Vlasini je merena brzina vetra, istraživanja pokazuju da u junu, kada su vetrovi slabiji, prva dva dana u mesecu je srednja brzina vetra bila 13 m/s, do 20. juna srednja brzina vetra je bila 5 m/s, a do kraja meseca prosečna brzina vetra je bila 9 m/s, što je veoma dobar rezultat.

Trenutno je moguće instaliranje vetroturbina ukupnog kapaciteta do 1600 MW, što je oko 16% ukupnog kapaciteta Srbije, što može proizvesti oko 2.5 TWh električne energije godišnje.



Slika 22. Raspodela vetrova na visini od 10m, godišnji prosek²³

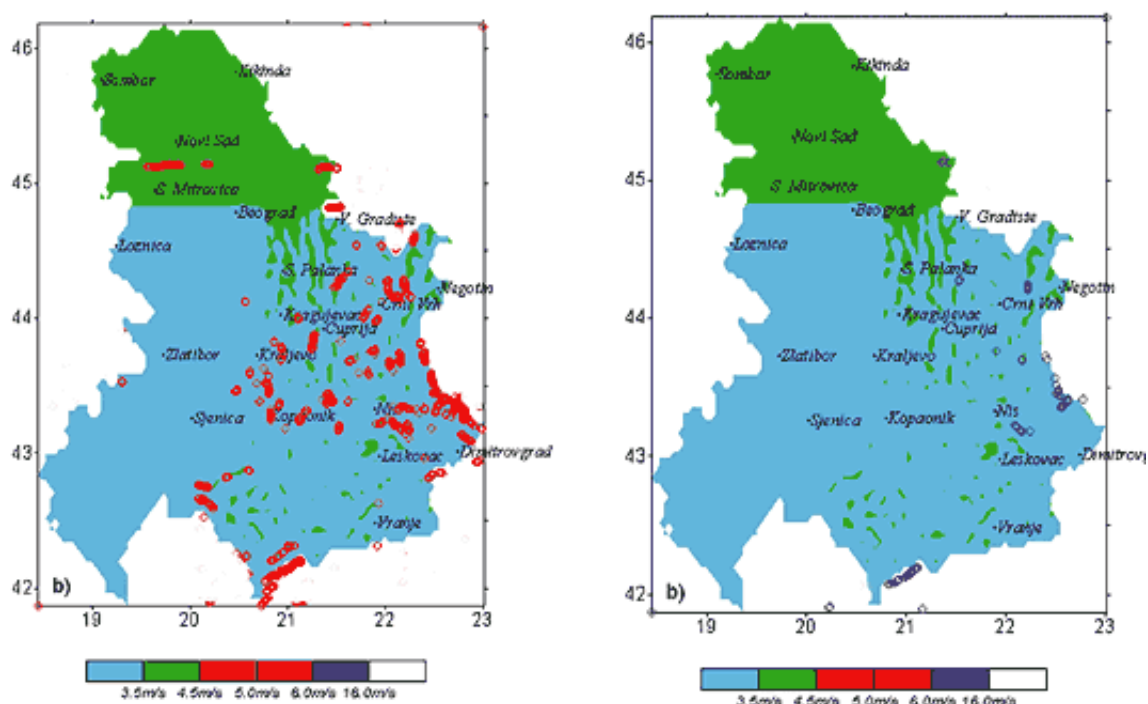
Veoma je važno izabrati pogodnu lokaciju. U primorskim zemljama vetar stalno duva uz obalu, na planinskim predelima blizu mora dok u kontinentalnim zemljama vetar snažno duva u planinskim oblastima na samo stotinak metara visine.

Mnogobrojna istraživanja su otkrila isplativost vetroturbina na par lokacija. Dozvole za izgradnju vektroelektrana je dobilo sedam kompanija, sa ukupnom snagom od 1.5 GW. Planira se postavljanje vetroturbina u Indiji, oblast oko Indije je pogodna te se planira oko 20 vetrenjača. U Pančevu je planiran vetropark Dolovo, koji bi imao vektroelektranu ukupne snage 26 MW. U oktobru 2016. godine je u Vršcu otvoren vetropark, koji je izgradila firma MK-Fintel Wind, u selu Zagajica. Ovaj vetropark se sastoji od 2 vetroturbine, ukupne snage 6.6 MW, vrednost investicije je 10 miliona evra.

²³ <http://www.solarnipaneli.org/wp-content/uploads/2010/11/Mapa-Raspored-Vetrova.jpg>

Br.	Lokacija	Mesec u godini					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Beograd	53,3	58,4	69,8	43,9	22,4	22,4
2.	Vlasina	6,8	12,1	6,8	9,2	5,8	4,1
3.	Smd. Palanka	36,8	59,3	54,2	49,6	26,6	23,6
4.	Kukavica	15,6	22,2	15,6	22,2	7,8	10,5
5.	Kruševac	32,0	34,6	32,0	40,4	22,6	24,8
6.	Dimitrovgrad	87,1	80,7	87,1	74,7	48,9	58,4
7.	Vranje	26,2	42,9	35,6	51,3	26,2	29,2
8.	Rekovac	4,6	13,4	12,2	17,9	10,9	6,9
Br.	Lokacija	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1.	Beograd	15,1	15,1	19,8	19,8	39,7	48,4
2.	Vlasina	4,9	3,4	4,1	5,8	4,9	5,8
3.	Smd. Palanka	20,8	14,0	18,4	18,4	33,1	29,8
4.	Kukavica	6,6	4,6	6,6	19,8	33,6	15,6
5.	Kruševac	18,8	18,8	22,6	29,4	69,8	46,7
6.	Dimitrovgrad	53,5	36,7	40,5	48,9	69,0	74,7
7.	Vranje	21,0	21,0	26,2	32,2	35,7	32,2
8.	Rekovac	6,9	2,9	4,0	6,9	6,9	6,1

Tabela 1. Energetski potencijal vetra u kWh/m² po mesecima u godini, na nekoliko lokacija u Srbiji²⁴



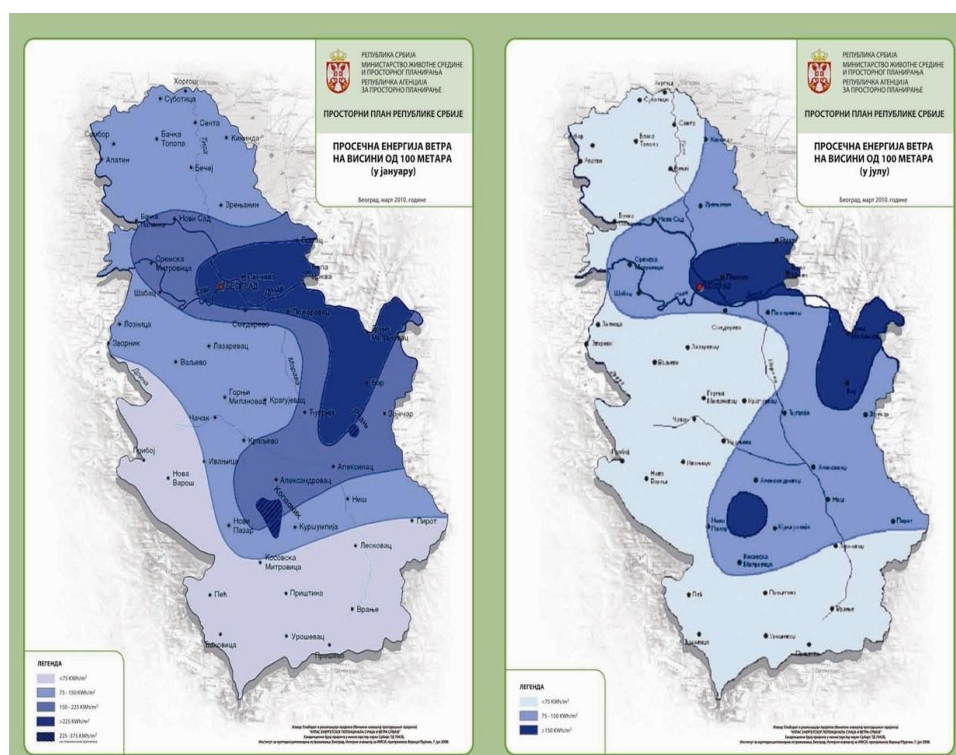
Slika 23. Mapa Srbije a) sa godišnjim srednjim brzinama vetra većim od 6m/s; b) sa godišnjim srednjim brzinama vetra²⁵

²⁴ <http://www.slideshare.net/jadrankom/3-energija-vetra2010>

²⁵ <http://scitech.sgi.co.rs/img/010/05/lp7.gif>

Brzina (m/s)	Beograd	Vršac	Zlatibor
0,0-0,9	0,03	0,15	0,04
1,0-1,9	3,40	1,30	3,44
2,0-2,9	13,59	6,99	5,29
3,0-3,9	24,21	11,98	17,7
4,0-4,9	24,58	15,21	25,19
5,0-5,9	22,90	22,90	33,33
6,0-6,9	26,29	27,00	41,87
7,0-7,9	27,37	30,03	32,85
8,0-8,9	14,35	38,28	28,94
9,0-9,9	7,63	48,67	18,13
10,0-10,9	3,01	68,29	19,90
11,0-11,9	1,69	72,79	7,90
12,0-12,9	1,35	90,58	8,70
13,0-13,9	-	115,01	9,13
14,0-14,9	-	105,19	2,26
15,0-15,9	-	78,75	4,14
16,0-16,9	-	90,00	-
17,0-17,9	2,0	90,03	2,00
18,0-18,9	-	39,93	-
19,0-19,9	-	16,51	-
20,0-20,9	-	15,48	3,20
Godišnje	175,38	985,07	263,01

Tabela 2. Teorijska iskoristiva energija vetra na nekim lokacijama u kWh/m² ²⁶



Slika 24. Prosečna brzina vetra u Srbiji u januaru i julu ²⁷

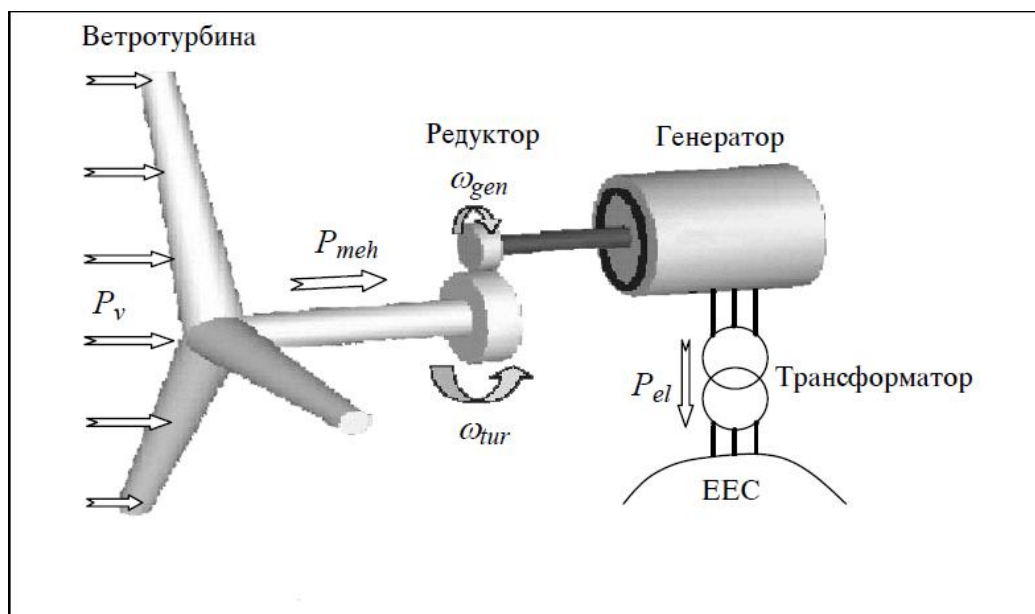
²⁶ <http://www.slideshare.net/jadrankom/3-energija-vetra2010>

²⁷ <http://195.250.98.80/media/New%20Folder/Zracenje%20sunca%20i%20energija%20vetra-tem.JPG>

5. Vetroturbine

Vetroturbine pretvaraju snagu vetra u električnu energiju. Ove mašine su povezane na električnu mrežu.

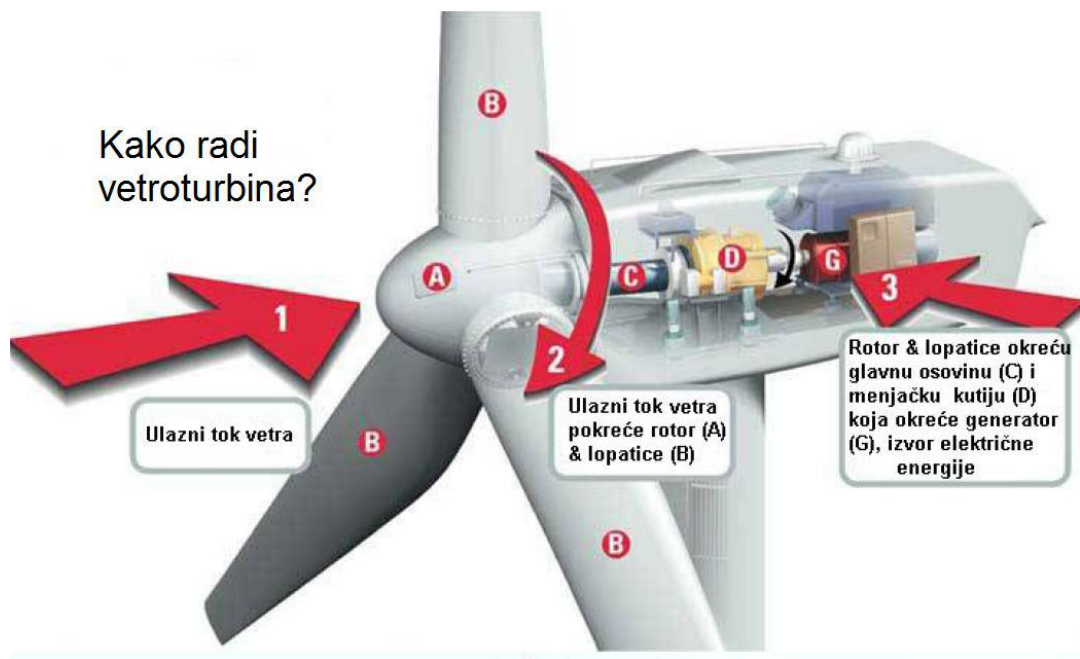
Za razvoj vektroenergetike su veoma važni površinski vetrovi do visine od 300m. Na odgovarajućim površinama se postavljaju vetroturbine koje pretvaraju energiju vetra u električnu energiju. Tako dobijena energija se šalje elektroenergetskom sistemu. Na slici ispod je data šema pretvaranja energije vetra u električnu u vetroturbini.



Slika 25. Principialna šema konverzije energije vetra u električnu ²⁸

Pomoću vetroturbine se kinetička energija pretvara u mehaničku energiju. Brzina okretanja vetroturbine, koja može biti nekoliko desetina obrtaja u minuti, mora se prilagoditi brzini generatora. To obavlja mehanički reduktor. Postoje 2 vrste električnog generatora, indukcion i sinhroni. Energetski transformator naponski prilagođava generator elektroenergetskom sistemu.

²⁸ <http://www.gradnja.rs/tag/vetroturbine/sema.jpg>



Slika 26. Kako radi vetroturbina ²⁹

Vetroturbina može biti različitih konstrukcija. Zadatak je postići što veći stepen iskorišćenja i siguran rad u što većem opsegu brzina vetra.

Vetroturbine mogu biti sa:

- **horizontalnom osovinom**
- **vertikalnom osovinom**

²⁹ Vetar ? Alternativni izvor električne energije, Željko Đurišić

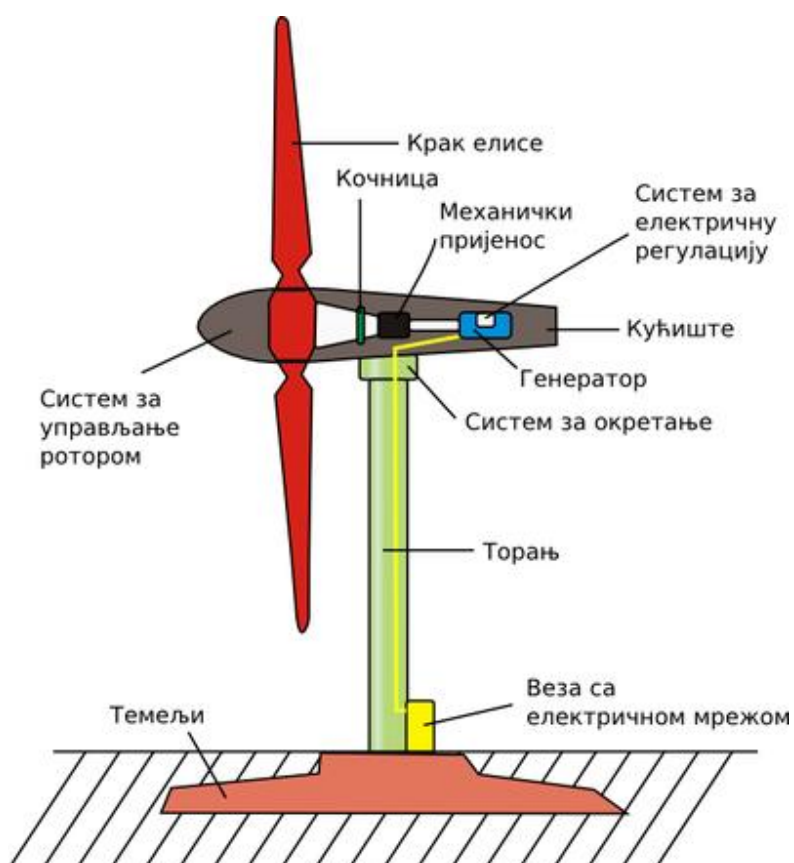
5.1 Vetroturbine sa horizontalnom osovinom

Ove vetroturbine se mogu postaviti uz ili niz vetar. Vetroturbine postavljene niz vetar se same prilagođavaju smeru vetra. Ogroman nedostatak im je to što stvaraju mehaničke vibracije i buku, jer lopatice prolaze kroz zavetrinu stuba. Ovakva konstrukcija se ne koristi za veće snage jer se stvara i turbulencija što dosta smanjuje efikasnost.

Današnje vetroturbine se prave sa horizontalnom osovinom, koja pomoću senzora okreće osovine prema pravcu vetra. Najčešće imaju tri lopatice, ali mogu imati i veći broj lopatica.

Vetroturbine sa horizontalnom osovinom mogu imati rotor prečnika od 20m za snagu od 200 kW do 120m za snagu od 5 MW.

Vetroturbina je postavljena na vertikalni stub, koji može biti visok i preko 120m, u zavisnosti od prečnika rotora. Najčešće je građen kao čelični konusni stub.



Slika 27. Vetroturbina sa horizontalnom osovinom³⁰

³⁰ <http://markolucic.files.wordpress.com/2013/12/400px-shemavjetroelektranevho.png>

Sve mrežno povezane vetroturbine su sa propelerom rotora na horizontalnoj osi. Svrha rotora je da konvertuje linearno kretanje vetra u rotacionu energiju koja se može koristiti za pogon generatora. Rotor se sastoji od čvorišta i lopatica vetroturbine. To su najvažniji delovi turbine, i što se tiče performansi i ukupnih troškova.

Pogonski deo se sastoji od drugih rotirajućih delova vetroturbine nizvodno od rotora. To obično uključuje spora vratila (na strani rotora), menjač i brzo vratilo. Ostali delovi pogona uključuju ležajeve, jednu ili više spojnice, kočnicu i rotirajuće delove generatora.

Svrha menjača je da ubrza stopu obrtaja rotora od niske vrednosti (desetine obrtaja u minuti) do stope obrtaja dovoljne da pokrenu standardni generator (stotine ili hiljade obrtaja u minuti). Postoje i vetroturbine koje koriste specijalno dizajnirane generatore, malih brzina, za koje ne treba menjač.

Skoro sve vetroturbine koriste ili indukcione ili sinhronne generatore. Ovaj dizajn podrazumeva stalne ili skoro konstantne obrtaje rotora kada je generator direktno povezan sa komunalnom mrežom. Ako se generator koristi sa elektronskim konvertorima, turbina će biti u mogućnosti da radi sa različitim brzinama. Mnoge turbine ugrađene u mreže koriste kavezne indukcione generatore. Kavezni indukcionni generatori rade u uskom rasponu brzina, nešto brže od sinhronog. Glavna prednost ovog generatora je da je jeftin i lako se može priključiti na električnu mrežu.

Sve popularnija opcija je vetroturbina sa promenljivom brzinom. Postoji veliki broj prednosti koje takva konfiguracija nudi, uključujući smanjenje habanja na turbini i maksimalna efikasnost u širokom opsegu brzine vetra, davajući povećano hvatanje energije vetra. Iako postoji veliki broj potencijalnih delova za vetroturbinu sa promenljivom brzinom, najčešće se koriste elektronske komponente. Kada se koriste sa odgovarajućim elektronskim konvertorima, i sinhroni i indukcionni generatori mogu raditi pri promenljivoj brzini.

Glavni okvir služi za montažu i pravilno poravnanje pogonskih komponentata. Poklopac štiti sadržaj od vremenskih uslova.

Sistem rotacionog skretanja je potreban da bi vratilo rotora bilo pravilno usklađeno sa vetrom. Njegova osnovna komponenta je veliki ležaj koji povezuje glavni okvir u toranj. Uvek se koristi na vetroturbinama uz vetar a ponekad i na turbinama niz vetar i sadrži jedan ili više rotaciona motora. Ovaj mehanizam se kontroliše automatskim sistemom kontrole skretanja sa svojim senzorom pravca vetra, koji se obično montira na poklopcu vetroturbine.

Kontrolni sistem vetroturbine ima važnu ulogu na rad mašine i proizvodnju električne energije.

Sistem za upravljanje vetroturbinom sadrži sledeće komponente:

- senzore: brzina, položaj, protok, temperatura, struja, napon, itd.
- kontrolori: mehanički mehanizmi, električna kola.
- pojačivači: prekidači, električna pojačala, hidraulične pumpe i ventili.
- pogoni: motori, klipovi, magneti, solenoidi.
- inteligencija: računari, mikroprocesori.

Dizajn kontrolnih sistema za vetroturbine prati tradicionalnu kontrolu inženjerske prakse.

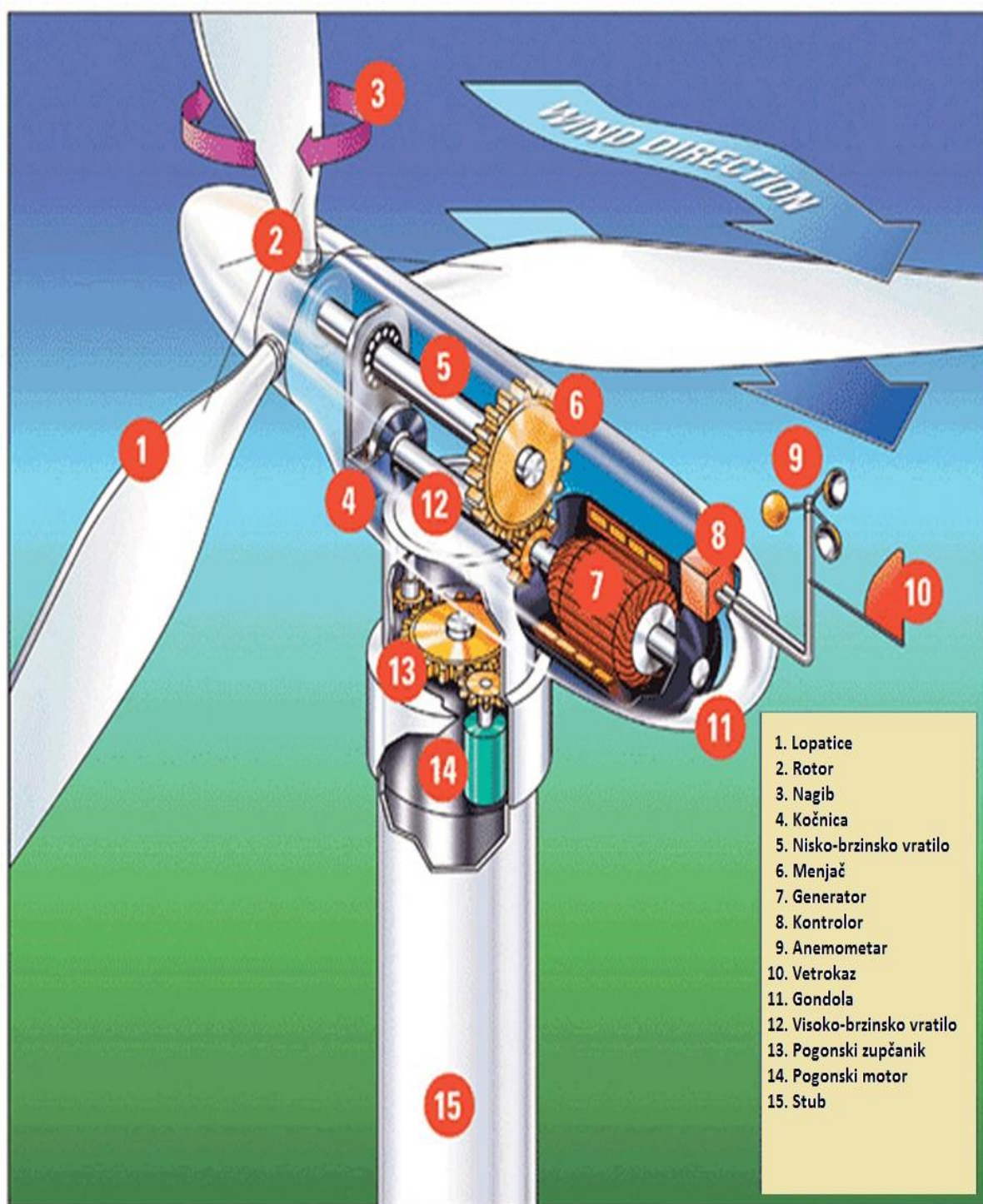
Kontrola vetroturbina podrazumeva sledeća tri glavna aspekta i razumno balansiranje njihovih zahteva:

- postavljanje gornje granice i ograničavanje snage i obrtnog momenta pogona
- povećanje životnog veka pogonskog rotora i drugih strukturnih komponenti pri promeni pravca vetra, brzine, turbulencije, kao i kreni-stani ciklus vetroturbine.
- povećanje stvaranja električne energije.



Slika 28. Vetroturbine sa horizontalnom osovinom ³¹

³¹ https://www.greenlivingtips.com/content_images/2007a/horizontal-axis-wind-turbine.jpg



Slika 29. Delovi vetroturbine sa horizontalnom osovinom ³²

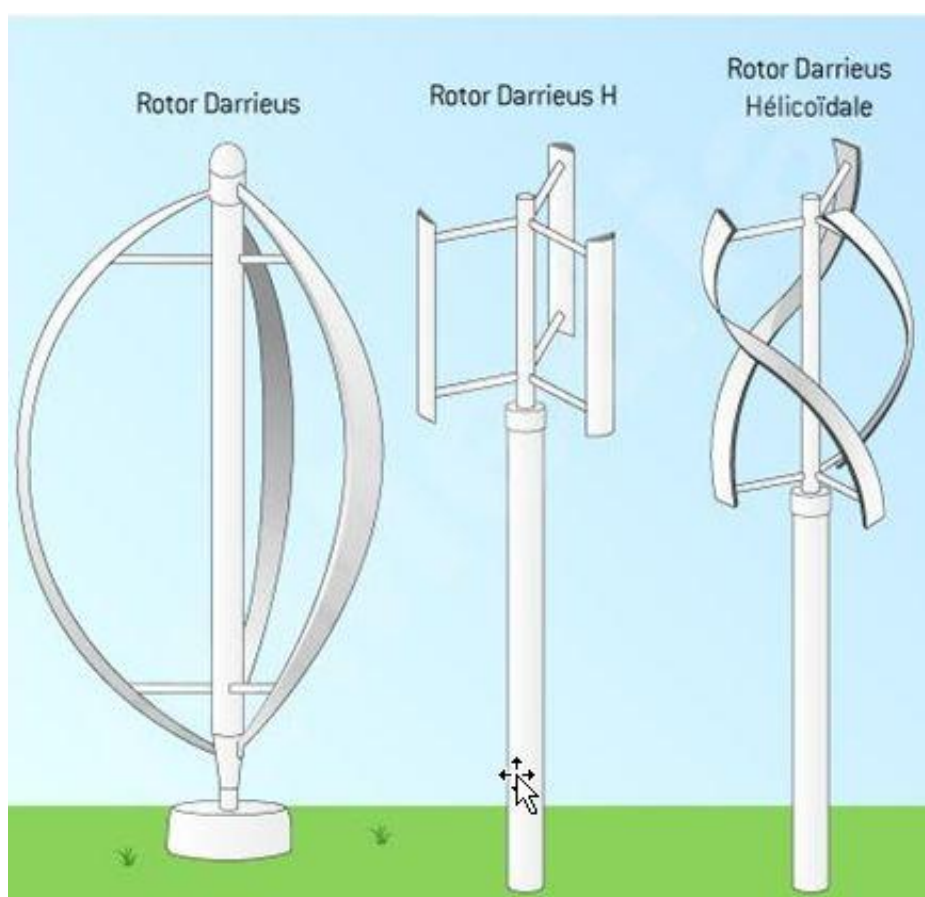
³² https://prezentacijavetroagregati.files.wordpress.com/2015/04/parts_of_wind_turbine_lg.jpg

5.2 Vetroturbine sa vertikalnom osovinom

Vetroturbine sa vertikalnom osovinom ne moraju se usmeravati prema smeru kretanja vetra, jer kod njih vetar struji normalno na osu rotacije. Kod ovih vetroturbina nisu potrebni tornjevi jer se kod njih generatori postavljaju u podnožju turbine.

Prvi ovakav patent je 1931. godine smislio francuski inženjer Žorž Darrius po kome je takva vetroturbina i dobila naziv Darrius-ova turbina. Darrius-ova vetroturbina ima dva ili tri luka.

Ova vetroturbina je u teoriji efikasna ako je brzina vetra konstantna, ali zbog fizičkog naprezanja i ograničenja zbog dizjana, u praksi je ta efikasnost veoma retka. Takođe postoji poseban tip Darrius-ove vetroturbine, tip H koja koristi lopatice povezane na vertikalnoj osovini umesto zaobljenih noževa.



Slika 30. Tipovi Darrius vetroturbine ³³

³³ <http://re.energybel.by/wp-content/uploads/2012/08/Darrieus.jpg>

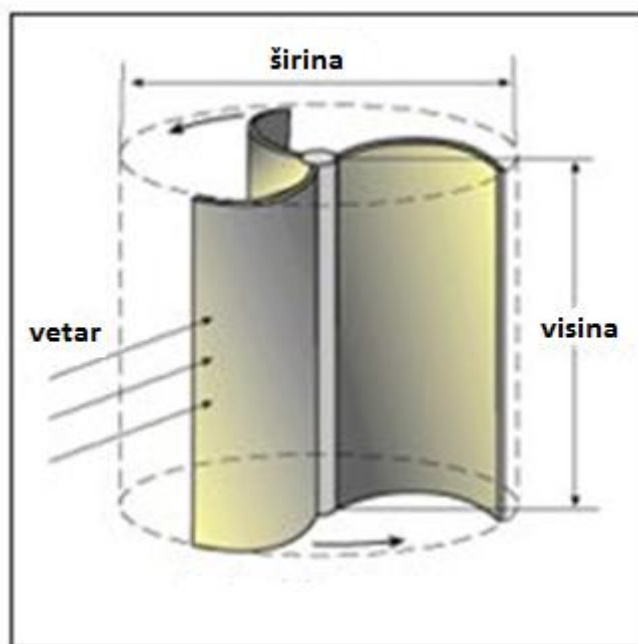
Još jednu vrstu vetroturbine sa vertikalnom osovinom je 1922. godine smislio finski inženjer Sigurd Savonijus.

Savonijusova vetroturbina se sama pokreće iz zaustavljene pozicije nezavisno od smera vetra. Ima zaobljene lopatice i radi na principu otpora vazduha, tako što jedna lopatica hvata vetar i ima veći otpor nego druga koja ide protiv njega. Zbog ovakvog načina rada obrtni mehanizam nije potreban jer razlika u otporu vazduha pokreće turbinu.

Savonijusove vetroturbine se koriste na mestima na kojima efikasnost nije na prvom mestu već pouzdanost. Takođe, morske plutače ili anemometri mogu koristiti ovu vetroturbinu zbog teškoće održavanja.

Fletner ventilator je najčešći primer primene Savonijusove vetroturbine. Takođe je veoma često koriste i za reklamu, gde se reklama rotira i privlači poglede.

Veoma je jednostavna za izgradnju i pouzdana je u radu.



Slika 31. Savonijusova vetroturbina ³⁴

³⁴ <http://re.energybel.by/wp-content/uploads/2012/08/Savonius-2.jpg>

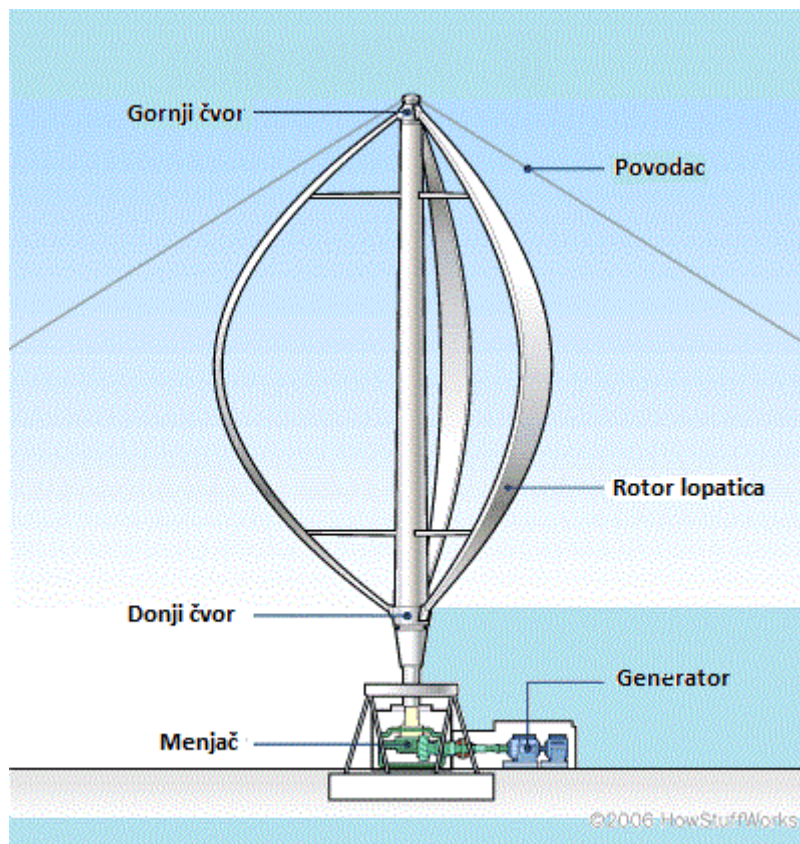
Vetroturbine sa vertikalnom osovinom se ne koriste za vetroagregate većih snaga jer imaju nizak stepen iskorišćenja.

Osnovne prednosti vetroturbina sa vertikalnom osovinom:

- Obrtni mehanizam nije potreban.
- Nije potreban toranj, generator, menjač i ostali delovi se mogu postaviti i na zemlju.

Osnovni nedostaci vetroturbina sa vertikalnom osovinom:

- Ukupna efikasnost vetroturbine sa vertikalnom osovinom i nije baš impresivna.
- Vetroturbine moraju imati žičanu podršku.
- Brzina vetra je veoma mala blizu tla, tako da iako se može izbeći toranj, na donjem delu rotora brzina vetra će biti veoma mala.
- Vetroturbina ne poseduje karakteristiku samo-pokretanja, potrebna je početna sila pre nego što krene.
- Zamena glavnog nosećeg ležaja rotora zahteva prethodno uklanjanje rotora, a to znači kidanje cele vetroturbine.
- Da bi proizvela istu količinu električne energije kao vetroturbina sa horizontalnom osovinom, morala bi imati toranj.

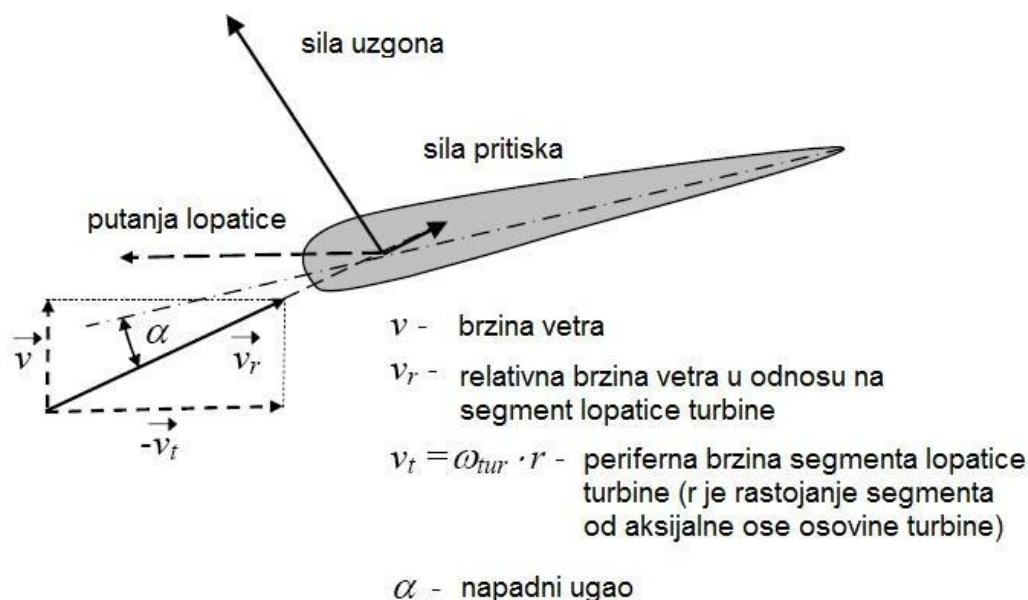


Slika 32. Delovi vetroturbine sa vertikalnom osovinom³⁵

³⁵ <http://www.visualdictionaryonline.com/images/energy/wind-energy/wind-turbines-electricity-production/vertical-axis-wind-turbine.jpg>

6. Mehaničke karakteristike vetroturbine

Lopatica vetroturbine je aerodinamičnog profila i zbog toga vazduh struji sporije na prednjoj a brže na zadnjoj strani prema smeru vetra. Zbog razlike u brzini strujanja vazduha, javlja se uzgonska sila, zbog razlike pritiska prednje i zadnje strane lopatice. Uzgonska sila generiše obrtni moment projekcijom na ravan rotacije. Osim uzgonske sile, na lopaticu deluje takođe i sila direktnog pritiska, ali ona manje utiče na obrtni moment.



Slika 33. Dijagram sila koje deluju na lopaticu vetroturbine ³⁶

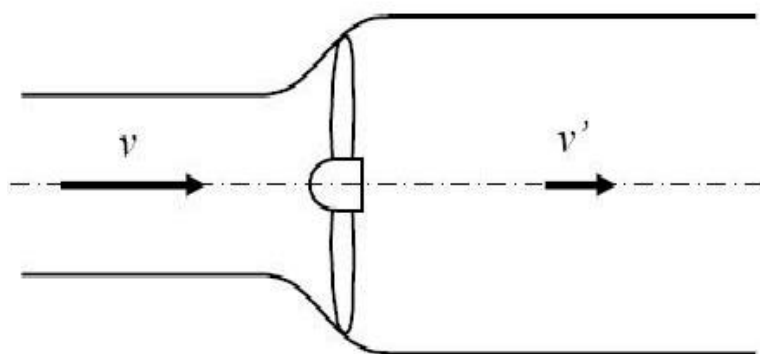
Duž aksijalne ose lopatice su uvijene zato što se od ose rotacije ka periferiji brzina vetra povećava dok se njen napadni ugao smanjuje. Delovi lopatice uz osu rotacije imaju veći ugao pre ravni rotacije a periferni delovi imaju manji ugao. Ako bi svi delovi imali veliki ugao prema ravni rotacije, stvorio bi se kočioni moment na perifernim delovima. Zato se ovaj efekat koristi pri velikim brzinama vetra, kako bi se zaustavila vetroturbina.

Na efikasnost rada vetroturbine mogu uticati:

- temperatura vazduha
- gustina vazduha
- jednolično strujanje vetra
- stanje lopatica
- vlažnost vazduha i dr.

Kada vetar prolazi kroz vetroturbinu on jedan deo njegove energije predaje rotoru, što dovodi do usporavanja vetra. Količina vazduha koja uđe u vetroturbinu jednaka je količini koja izlazi iz vetroturbine. Prilikom prolaska vazduha kroz vetroturbinu, dešava se efekat prelamanja vetra jer je ulazna brzina vetra veća od izlazne, što dovodi do toga da izlazeći vazduh ima veći prečnik od vazduha koji ulazi u vetroturbinu.

³⁶ <https://prezentacijavetroagregati.files.wordpress.com/2015/04/kokokokooko.jpg>



Slika 34. Prelamanje vetra u vetroturbini ³⁷

U stvarnosti, efekat prelamanja vetra se dešava i pre nego što vazduh uđe u vetroturbinu.

Vetroturbina smanjuje energiju vetra i ona je jednaka razlici energija vetra pre i posle prolaska kroz vetroturbinu. Mehanička snaga P_{meh} koja se javlja na vratilu vetroturbine je

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3$$

$$C_p = \frac{P_{meh}}{P_v}$$

gde je: C_p – koeficijent iskorišćenja snage vetroturbine

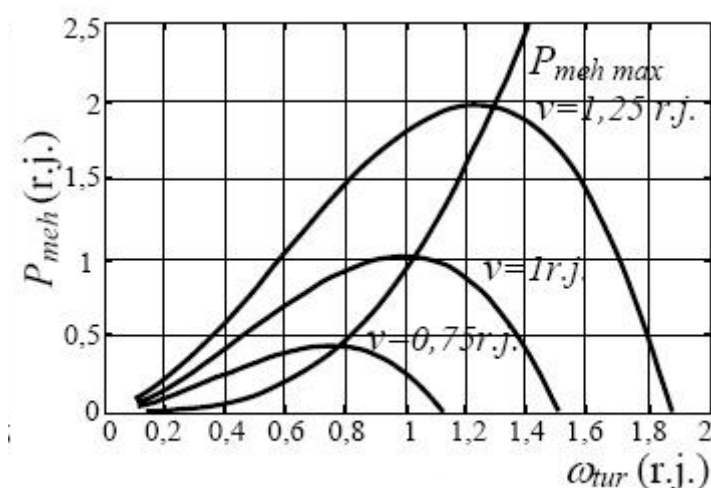
ρ – gustina vazduha

R – radijus vetroturbine

v - brzina vetra pri ulasku u vetroturbinu

P_v - snaga vetra pri ulasku u vetroturbinu

Maksimalan stepen iskorišćenja vetroturbine je oko 45%,



Slika 35. Mehanička karakteristika vetroturbine ³⁸

³⁷ <https://prezentacijavetroagregati.files.wordpress.com/2015/04/kikikiiiik.jpg>

³⁸ <https://prezentacijavetroagregati.files.wordpress.com/2015/04/kvkvkvkvkv.jpg>

7. Senzori vetroturbine

Na vetroturbinama koriste se mnogi senzori za prenošenje važnih podataka kontrolnom sistemu u toku rada vetroturbine. Ti podaci mogu podrazumevati:

- brzinu: generatora, rotora, vetra, smer rotacije...
- temperaturu: ulja u menjaču, hidrauličnog ulja, ležaja menjača, generatora, ležaja generatora, temperaturu električnih komponenti...
- poziciju: nagib noža, položaj lopatica, ugao nagiba, pravac vetra...
- električne karakteristike: snaga mreže, struja, faktor snage, napon, rad konvertora..
- parametre protoka fluida: hidraulični ili pneumatski pritisak, nivo hidrauličnog ulja, protok hidrauličnog ulja...
- kretanje, napone, vibracija, obrtni moment vratila...
- uslove za zaštitu životne sredine: zaleđivanje senzora ili turbine, vlažnost, sevanje munja...

U vetroturbini nalazi se veliki broj senzora na različitim delovima turbine. Ti senzori zajedno sa kontrolnim sistemom čine mrežu senzora. Mreža senzora je odgovorna za kontrolu, nadgledanje i zaštitu sistema vetroturbine.

Da bi senzorska mreža bila optimalna moraju se zadovoljiti četiri kriterijuma:

- senzorska mreža vetroturbine mora obezbediti fizičke promenljive za kontrolu, zaštitu i nadgledanje sistema vetroturbine.
- moraju se obezbediti informacije za dijagnozu grešaka.
- mora se omogućiti procena verovatnoće granične vrednosti vetra.
- mora se imati što manji broj senzora kako bi izgradnja i održavanje mreže bilo što ekonomičnije.



Slika 36. Senzor za merenje vetra ³⁹

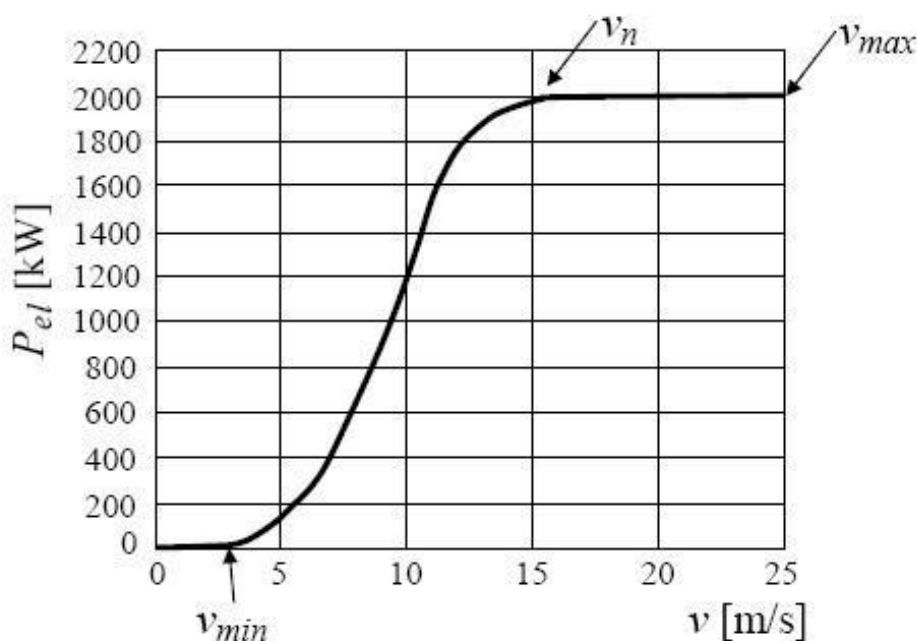
³⁹http://www.fttechnologies.com/ufiles/image/Wind%20Sensors/Mounting_of_heated_ultrasonic_anemometer_on_wind_turbine.jpg

8. Upravljanje vetroturbinom

Nije ekonomično napraviti vetroturbinu koja će pri svim brzinama vetra imati maksimalno iskorišćenje, jer se veoma retko javljaju vetrovi sa velikim brzinama, preko 15m/s. Vetroturbina se iz sigurnosnih razloga zaustavlja kada su brzine vetra preko 27 m/s.

Pri veoma malim brzinama vetra rad vetroturbine je nestabilan i nije efikasan te ona ima i minimalnu radnu brzinu, što znači da vetroturbina radi u tačnom opsegu brzine vetra. Opseg ima tri karakteristične brzine vetra:

- v_{min} je minimalna brzina vetra i to je brzina vetra kada vetroturbina počinje sa proizvodnjom električne energije. Opseg minimalne radne brzine $v_{min} = (2.7 - 3.7)$ m/s
- v_n je nominalna radna brzina vetra i to je brzina vetra sa kojom vetroturbina postiže nominalnu snagu. Nominalna brzina kod manje vetrovitih lokacija je $v_n = (11 - 14)$ m/s a kod vetrovitih lokacija je $v_n = (15 - 18)$ m/s.
- v_{max} je maksimalna radna brzina vetra i to je brzina vetra kada se vetroturbina zaustavlja. Brzina pri kojoj se vetroturbina isključuje je obično $v_{max} = 27$ m/s, ali može biti i $v_{max} = 35$ m/s. Vetroturbina u stanju mirovanja može izdržati i ekstremno velike brzine vetra koje mogu biti i preko 75 m/s.



Slika 37. Karakteristika snage vetroturbine snage 2 MW⁴⁰

⁴⁰ <https://prezentacijavetroagregati.files.wordpress.com/2015/04/jdvbskbsfbkbnkjsj.jpg>

Karakteristika snage se naziva “S krivom“. Ta karakteristika je najvažnija jer pokazuje punu snagu vetroturbine koju ona može postići pri različitim brzinama. Karakteristiku snage daje proizvođač vetroturbine i ona se daje za određen pritisak, nivo turbulentnosti, temperaturu i gustinu vazduha.

Mogu se razlikovati dve različite radne oblasti $v_n < v < v_{max}$ i $v_{min} < v < v_n$.

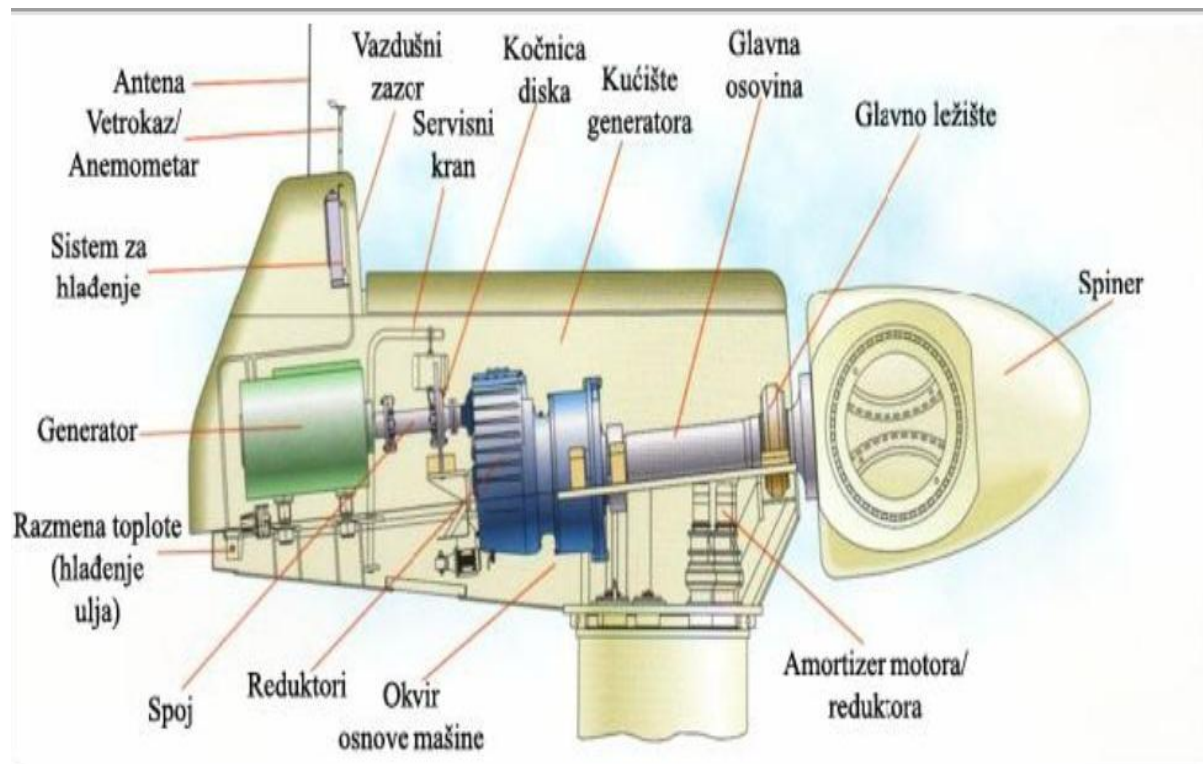
Kako bi stepen iskorišćenja bio maksimalan, anemometrom se izmeri brzina vetra pa se onda izračuna optimalna brzina okretanja turbine. Elektromagnetski moment služi za promenu brzine okretanja vetroturbine. Najveća prepreka ovog vida upravljanja je izmena parametara vetra koji mogu drastično izmeniti mehaničku karakteristiku vetroturbine i tako otežati nalaženje optimalne brzine okretanja. Postoje algoritmi koji pomažu pri određivanju optimalne brzine okretanja vetroturbine.

Generator je dostigao svoju nominalnu snagu kada je brzina vetra $v=v_n$. Kako se generator ne bi preopteretio treba smanjivati stepen iskoristivosti turbine. Tada je glavni zadatak umanjiti stepen iskorišćenja kako bi snaga vetroturbine ostala blizu nominalne vrednosti.

Snaga vetroturbine se može regulisati na par načina:

- Pasivnim sistemom tj. konstrukcijom lopatica. Lopatice se konstruišu tako da kada brzine vetra budu blizu nominalnoj brzini v_n na određenom delu lopatica, napadni ugao bude relativno velik. Tada počinje turbulencija jer se vazдушna struja odvaja od lopatica i sila uzgona slabi. Taj efekat se naziva stall efekat.
- Zakretanjem lopatica. Ovaj vid regulacije snage se koristi kod vetroturbina sa promenljivom brzinom okretanja. Servo motor zakreće lopatice vetroturbine i ima opseg promene ugla od 0 do 40 stepeni. Ovom metodom se menja napadni ugao vetra a sa njim i uzgonska sila.
- Kombinacijom prethodnih metoda, tj. konstrukcijom i zakretanjem lopatica. Ovaj vid regulacije se još naziva Combi stall regulacija i služi kako bi se eliminisali negativni efekti stall efekta. Takođe štiti vetroturbinu prilikom neplaniranog isključenja sa mreže.

Ako je brzina vetra veća od maksimalne radne brzine, iz sigurnosnih razloga, vetroturbina se zaustavlja i ostaje u stanju mirovanja uz pomoć hidraulične kočnice koja se nalazi na visokobrzinskoj osovini.



Slika 38. Konstrukcija vetrogeneratora⁴¹

⁴¹ Vetar ? Alternativni izvor električne energije, Željko Đurišić

9. Materijali za izradu vetroturbine

Pri izradi vetroturbine koristi se širok spektar materijala. Postoje značajne razlike između malih i velikih mašina i tu su projektovane izmene u dizajnu koji će prilagoditi uvođenje novih materijalnih tehnologija i metoda za proizvodnju. Procenjeni materijali koji se koriste i u velikim i u malim vetroturbinama prikazani su na tabeli 3.

Komponenta/ Materijal (% po težini)	Magnetni materijali	Beton	Čelik	Aluminijum	Bakar	Stakloplastika	Drvena smola	Ugljen-vlakno ojačana plastika
Rotor								
Čvor			(95) - 100	(5)				
Lopatice			5			95	(95)	(95)
Gondola	(17)		(65) - 80	3 - 4	14	1 - (2)		
Menjač			98 - (100)	(0) - 2	(<1) - 2			
Generator	(50)		(20) - 65		(30) - 35			
Ram i školjka			85 - (74)	9 - (50)	4 - (12)	3 - (5)		
Stub		2	98	(2)				

Tabela 3. Materijali korišćeni pri izradi vetroturbine ⁴²

Male mašine imaju tendenciju da koriste lakše odlivke težine u nastojanju da smanje troškove. Mnogi delovi su od livenog aluminijuma u malim turbinama, dok su u velikim mašinama potrebni čelični odlivci da ispune zahteve snage i strukturnog zamora. Veličina čeličnih odlivaka za velike vetroturbine je jedan od proizvodnih izazova.

Zamor svojstva materijala je važna stavka u dizajnu i izboru materijala za izradu turbine. Tokom očekivanog tridesetgodišnjeg rada vetroturbine, mnoge komponente treba da budu u stanju da izdrže ciklus zamora, koji je veći nego kod aviona, automobilskih motora, mostova i većine drugih veštačkih struktura koje je napravio čovek.

Generalno postoje trendovi da se smanji težina materijala, sve dok je životni ciklus kraći.

Većina lopatica rotora danas je izrađena od plastično-armirane-staklo vune (stakloplastike ili fiberglass). Ostali materijali koji su pokušani uključuju čelik, razne kompozite i polimer ojačan ugljeničnim vlaknima. Kako se povećava veličina rotora na većim mašinama, sve će se više obraćati pažnja na čvrstoću materijala otporne na zamore.

Mnogi menjači vetroturbine danas koriste magnetne materijale.

Jeftiniji materijali su posebno važni za tornjeve, jer tornjevi mogu predstavljati čak 65% ukupne težine vetroturbine. Prednapregnuti beton je materijal koji počinje da se koristi u većim količinama u evropskim vetroturbinama.

⁴² Wind turbine- Materials and Manufacturing Fact Sheet, Dan Ancona and Jim McVeigh

Beton u tornju ima potencijal da smanji troškove, ali može uključivati skoro istu količinu čelika u armaturi.

Upotreba čelika pri izradi vetroturbine će nastaviti da dominira, ali postoji mogućnost uvođenja aluminijuma ili drugih kompozita malih težina, pod uslovom da se ispune uslovi o snazi i umoru komponenata.

Obim proizvodnje malih turbina se povećava što znači da se može prilagoditi proizvodnja mehanizacije i inovacija koje će smanjiti troškove.

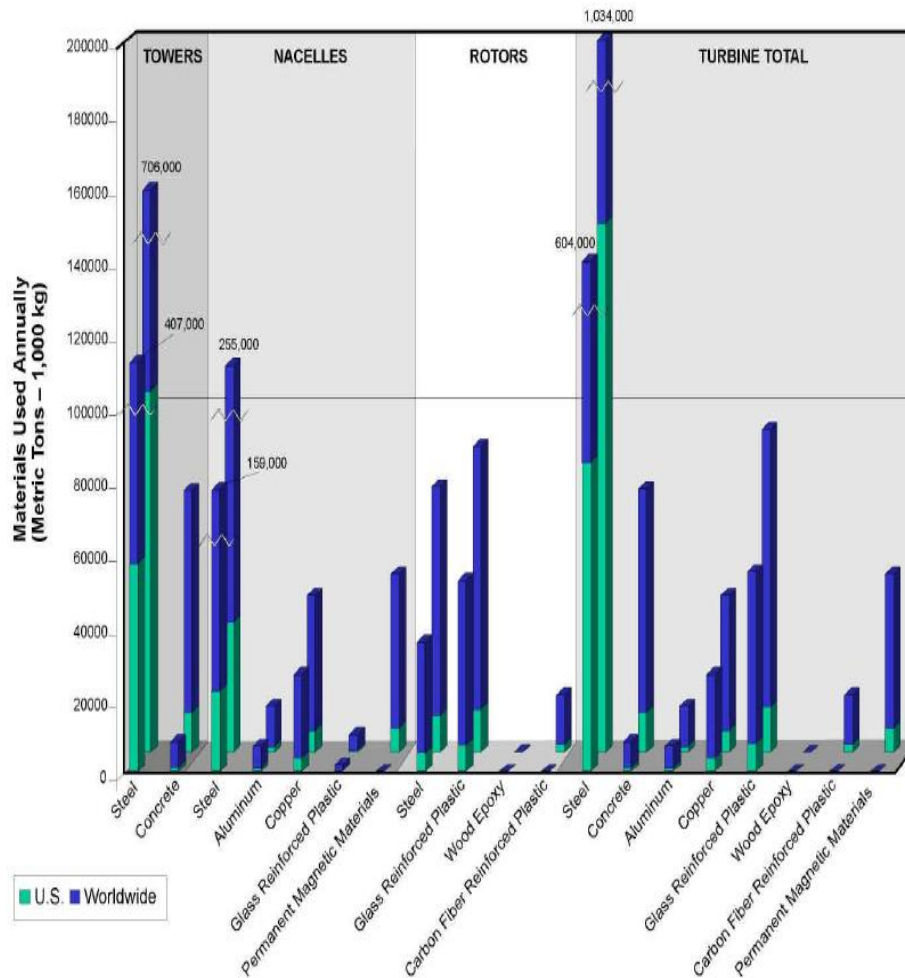
Novi materijali elektrike velike snage će smanjiti potrebu za menjačem, a smanjiće i gubitak koji se javlja tokom prenosa energije vetra do udaljenih centara opterećenja.

Drveni lepak koji se u početku koristio za izradu lopatica, ne očekuje se da bude izabrani materijal, uprkos odličnim zamornim svojstvima.

Tipična vetroturbina sadrži 89,1% čelika, 5,8% fibreglassa, 1,6% bakra, 1,3% betona, 1,1% lepila, 0,8% aluminijuma i 0,4% osnovnih materijala (pre svega pena, plastika i drvo).

Materijali za izradu vetroturbina su glavni i rastući deo poslovanja, koji će u narednih 10 godina dosta proširiti svoje mogućnosti.

Wind Turbine Materials Usage



Slika 39. Materijali za izradu vetroturbine ⁴³

⁴³ Wind turbine- Materials and Manufacturing Fact Sheet, Dan Ancona and Jim McVeigh

10. Izbor lokacije

Najvažniji deo planiranja izgradnje vetroelektrane jeste izbor lokacije i najbitniji parametar kod analize lokacije je brzina vetra. Na osnovu meteoroloških podataka i srednjih godišnjih brzina vetra, treba izdvojiti pogodne lokacije za izgradnju vetroturbina.

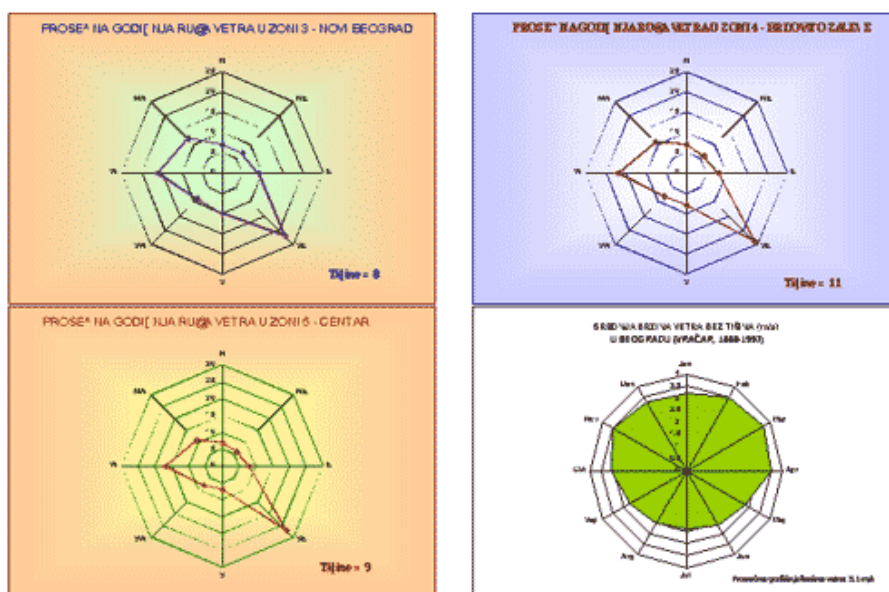
Lokacije na kojima je srednja brzina vetra na 10m iznad tla $v_{sr} \geq 7$ m/s su od velikog značaja. Inače se na tim visinama u hidrometeorološkoj stanici postavljaju anemometri.

Sa odgovarajućom opremom je potrebno izvršiti namenska merenja parametara vetra. Oprema mora biti pouzdana jer i najmanja greška od npr. 5% pri merenju brzine vetra, može se odraziti sa greškom preko 20% pri proračunu snage vetra. Merenja se moraju sprovoditi svakodnevno bar jednu godinu. Takođe se koristi softver za obradu merenih veličina i grafički prikaz brzine, pravca i snage vetra. Taj grafički prikaz se naziva Ruža vetrova.

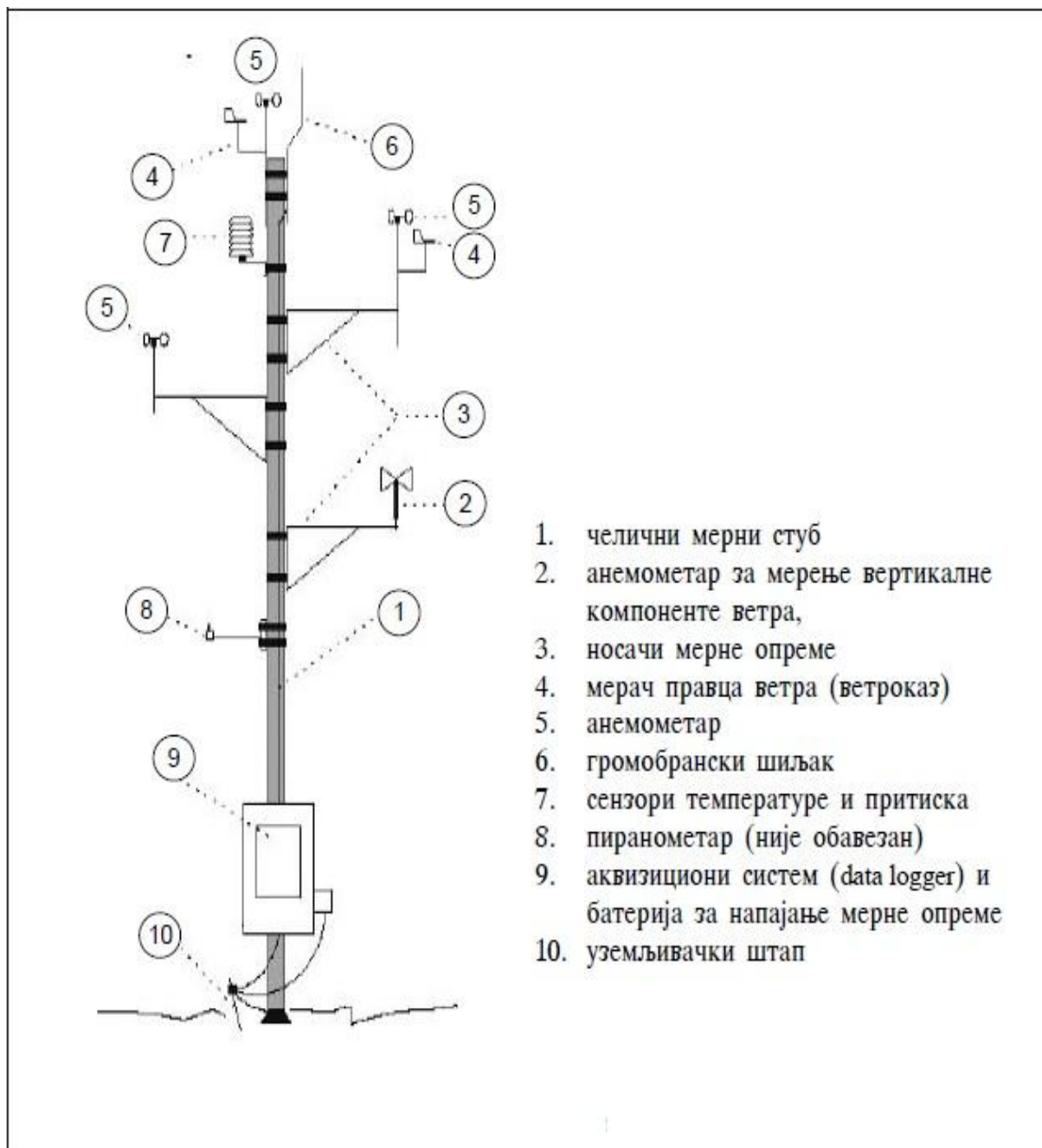
Ruža vetrova se prikazuje u polarnom koordinatnom sistemu. Horizont koji ima 360 stepeni se deli na 12 jednakih delova od 30 stepeni. Za svaki deo se prikazuje procentualna učestanost vetra i crta se proizvod srednje brzine i procentualne učestanosti u tom delu. Kada se prikazuju lokacije koje su najpogodnije, lokacije koje imaju najbolji pravac brzine vetra, ruža vetrova je spljoštena.

Unosom karakteristike snage i visine stuba u softver takođe se može prikazati i grafikon električne energije koju bi proizvela vetroturbina na datoj lokaciji.

Prilikom izbora lokacije, potrebno je voditi računa i o drugim stvarima, kao što je mogućnost postojeće elektroenergetske, putne ili telekomunikacione mreže. Kada su u pitanju lokacije blizu naselja potrebno je voditi računa i o buci koju vetroturbina stvara prilikom rada.



Slika 40. Ruža vetrova ⁴⁴



Slika 41. Merno-akvizicioni sistem za određivanje vektroenergetskog potencijala ⁴⁵

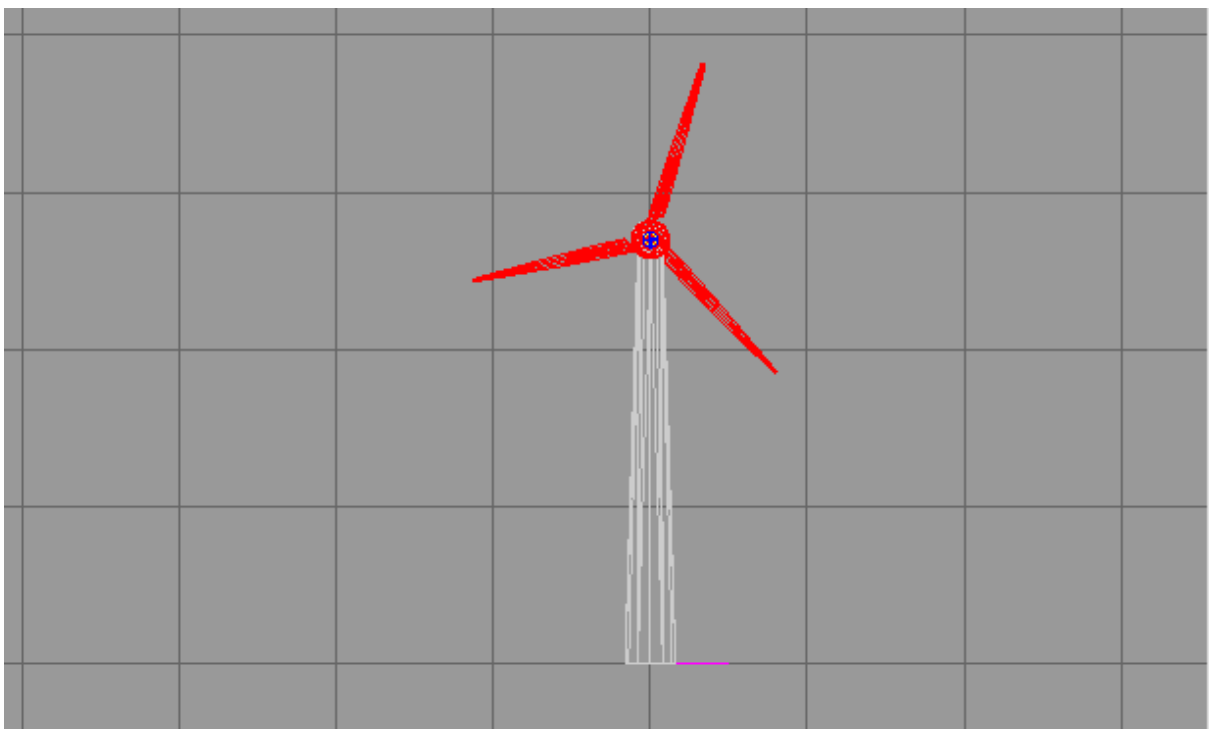
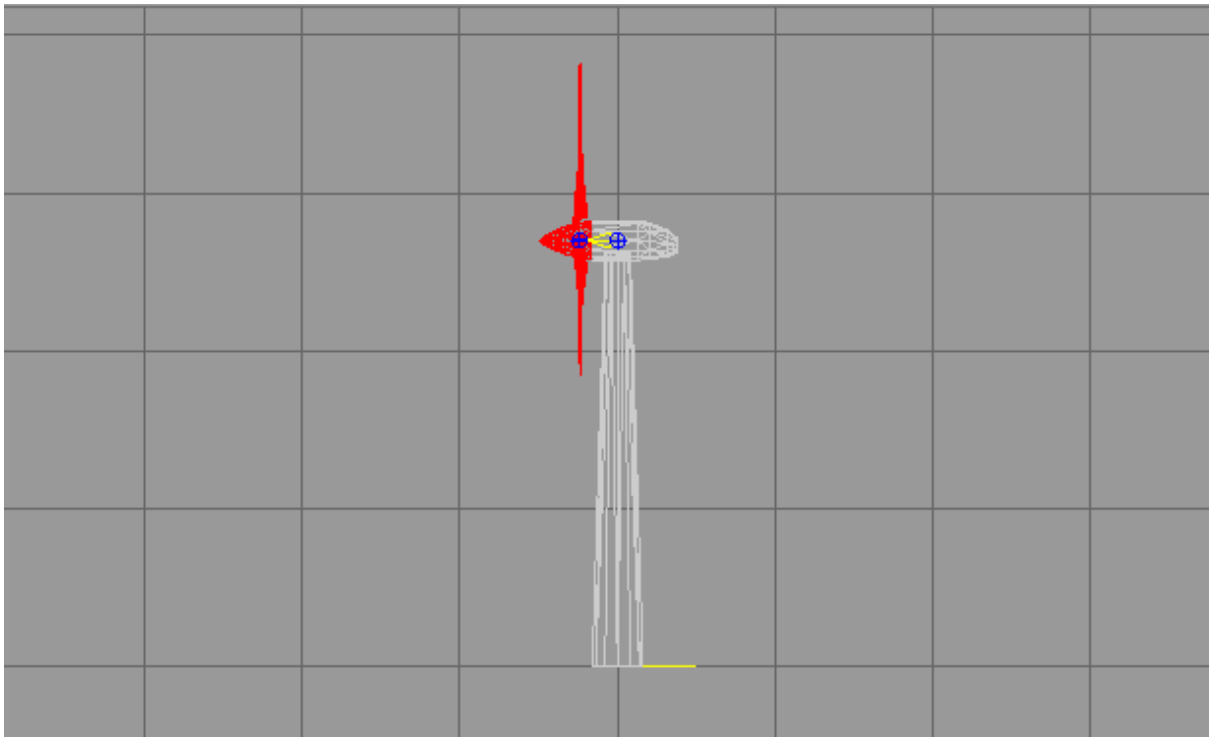
⁴⁴ <http://www.zdravlje.org.rs/ekoatlas/vola/04a7.gif>

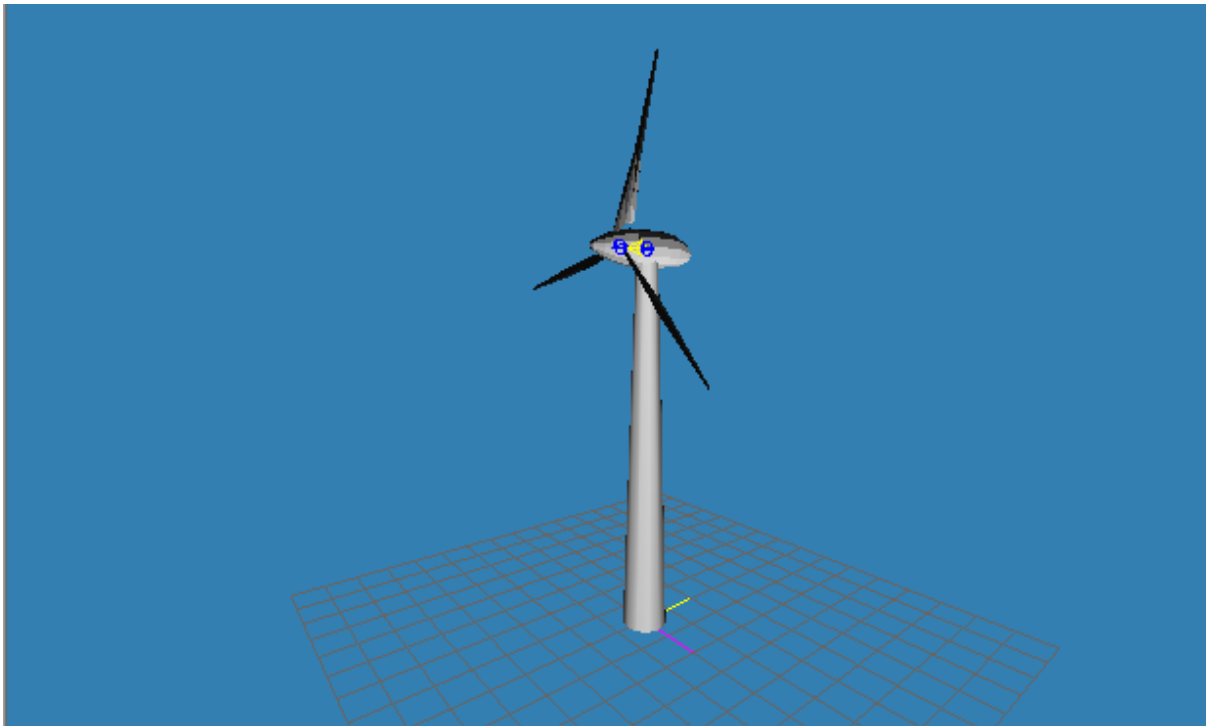
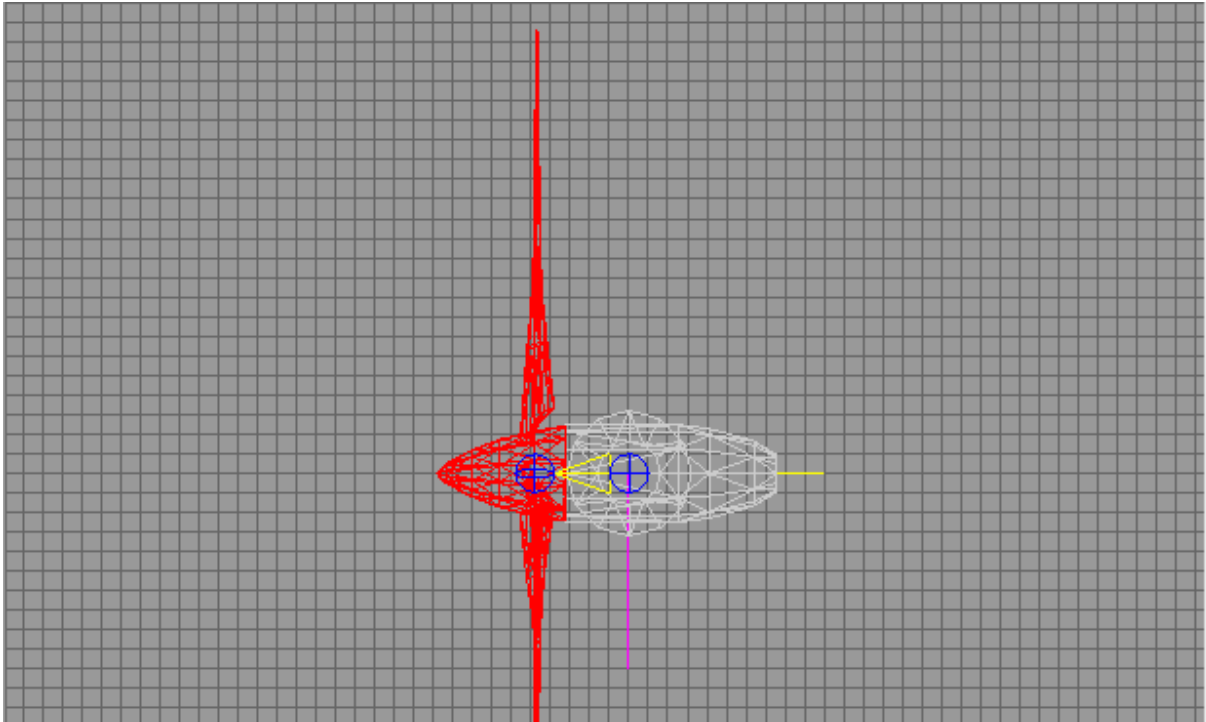
⁴⁵ Vetar ? Alternativni izvor električne energije, Željko Đurišić

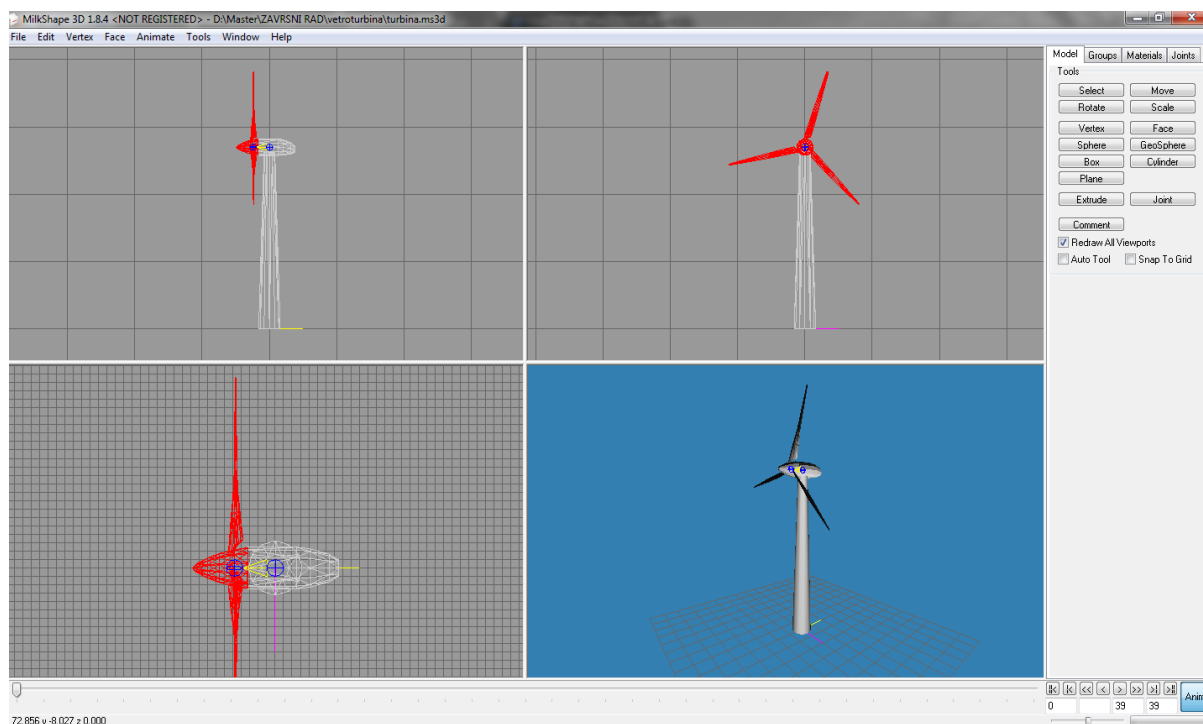
11. Animacija vetroturbine

U programu Milkshape 3D je urađena animacija vetroturbine. Program je moguće besplatno preuzeti na adresi www.milkshape3d.com a 3D model koji je izrađen u programu moguće je naći na adresi www.sendspace.com/file/yjstvk

Slede slike iz animacije:







Kao što se može videti na slici iznad, u desnom donjem uglu postoji dugme Anim na koji se programu daje na znanje da treba pripremiti animaciju, a zatim animacija počinje na dugme Play forward koje je pored. Moguće je podesiti jačinu rotacije, od sporije ka bržoj rotaciji lopatica.

Zaključak

Ljudska populacija sve više raste što dovodi do sve veće potrošnje električne energije. Energija vetra dosta pomaže pri proizvodnji električne energije. Takođe spada u obnovljive izvore energije i nije štetna po ljudsko zdravlje. Zašto onda ne iskoristiti ono što nam je darovano?

Vetroenergetika se sve više razvija. Vetroturbine su danas tehnološki razvijenije nego pre par decenija.

Evropska Unija ima čak 85% instaliranih kapaciteta u odnosu na ostatak sveta. Ali čak iz tolikog kapaciteta ona podmiruje tek oko 3% ukupnih potreba za električnom energijom. Zato se predviđa da će se tek dogoditi rast na polju vetronergetike.

Spisak slika

- Slika 1. Struktura obnovljivih izvora energije, str. 3
Slika 2. Prosečna brzina vetra na 100 metara, str. 6
Slika 3. Raspodela energije vetra, str. 6
Slika 4. Vetrovi u Srbiji, str. 7
Slika 5. Brzina Košave može biti i do 130 km/h, str. 8
Slika 6. Anemometar, str. 9
Slika 7. Anemograf, str. 9
Slika 8. Evropski Atlas vetrova, str. 10
Slika 9. Brzina vetra u zimskom periodu, str. 11
Slika 10. Atlas vetra Vojvodine, str. 12
Slika 11. Geometrija sistema za merenje brzine vetra, str. 13
Slika 12. Zaštita kamere u kutiji i slika celokupnog sistema, str. 14
Slika 13. Tipovi neslaganja kamera, str. 14
Slika 14. Konačni rezultati merenja, str. 15
Slika 15. Početak eksperimenta i puštanje vode, str. 16
Slika 16. Analiza slika, str. 16
Slika 17. Trouglovi formiraju novi ugao, str. 17
Slika 18. Prikaz kako metod funkcioniše, str. 17
Slika 19. Šema eksperimenta, str. 18
Slika 20. Totalna instalisana snaga na kraju 2014. godine, str. 19
Slika 21. Ukupan kapacitet u Evropi na kraju 2014. godine, str. 20
Slika 22. Raspodela vetrova na visini od 10m, godišnji prosek, str. 22
Slika 23. Mapa Srbije a) sa godišnjim srednjim brzinama vetra većim od 6m/s; b) sa godišnjim srednjim brzinama vetra, str. 23
Slika 24. Prosečna brzina vetra u Srbiji u januaru i julu, str. 24
Slika 25. Principijska šema konverzije energije vetra u električnu, str. 25
Slika 26. Kako radi vetroturbina, str. 26
Slika 27. Vetroturbina sa horizontalnom osovinom, str. 27
Slika 28. Vetroturbine sa horizontalnom osovinom, str. 29.
Slika 29. Delovi vetroturbine sa horizontalnom osovinom, str. 30
Slika 30. Tipovi Darrius vetroturbine, str. 31
Slika 31. Savonijusova vetroturbina, str. 32
Slika 32. Delovi vetroturbine sa vertikalnom osovinom, str. 33
Slika 33. Dijagram sila koje deluju na lopaticu vetroturbine, str. 34
Slika 34. Prelamanje vetra u vetroturbini, str. 35
Slika 35. mehanička karakteristika vetroturbine, str. 35
Slika 36. Senzor za merenje vetra, str. 36
Slika 37. Karakteristika snage vetroturbine snage 2 MW, str. 37
Slika 38. Konstrukcija vetrogeneratora, str. 39
Slika 39. Materijali za izradu vetroturbine
Slika 40. Ruža vetrova, str. 43
Slika 41. Merno-akvizicioni sistem za određivanje vektroenergetskog potencijala, str. 44

Spisak tabela

Tabela 1. Energetski potencijal vetra u kWh/m^2 po mesecima u godini, na nekoliko lokacija u Srbiji, str. 23

Tabela 2. Teorijska iskoristiva energija vetra na nekim lokacijama u kWh/m^2 , str. 24

Tabela 3. Materijali korišćeni pri izradi vetroturbine, str. 40

Literatura

1. Dragan Marković, *Procesna i energetska efikasnost*, Univerzitet Singidunum, 2010.
2. Miodrag Zlatanović, *Korišćenje energije vetra u Srbiji – prirodni uslovi i praktična politika*, 2009.
3. Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe and Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2011.
4. Aldo V. Da Rosa, *Fundamentals of renewable energy processes*, 2005.
5. Wind turbine- Materials and Manufacturing Fact Sheet, Dan Ancona and Jim McVeigh.
6. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf
7. <http://meteoplaneta.rs/meteoroloski-instrumenti-i-osmatranja/meteoroloska-stanica-i-instrumenti/>
8. <https://www.gerenewableenergy.com/wind-energy/turbines.html>
9. <http://www.nationalgeographic.rs/vesti/5937-nove-vetroturbine-generisu-struju-bez-elisa.html>
10. <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/>
11. <http://theearthproject.com/wind-turbines-and-their-home-use/>