Mogućnosti za iskorištavanje vjetra na području sjeverozapadne Hrvatske

Zbiljski, Sandra

Master's thesis / Diplomski rad

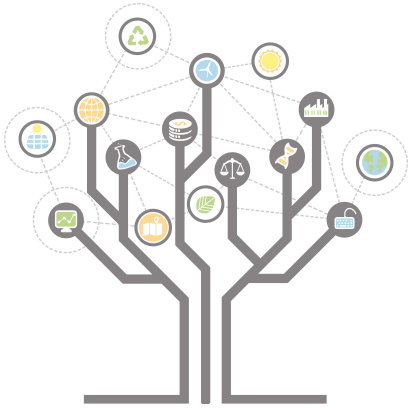
2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:353505

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Mogućnosti za iskorištavanje vjetra na području sjeverozapadne Hrvatske

Zbiljski, Sandra

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:353505

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-09**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

SANDRA ZBILJSKI

MOGUĆNOSTI ZA ISKORIŠTAVANJE VJETRA NA PODRUČJU SJEVEROZAPADNE HRVATSKE

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

MOGUĆNOSTI ZA ISKORIŠTAVANJE VJETRA NA PODRUČJU SJEVEROZAPADNE HRVATSKE

KANDIDAT: MENTOR:
SANDRA ZBILJSKI Prof. Dr. sc. MIROSLAV GOLUB dipl. ing.

VARAŽDIN, 2016.

SAŽETAK

Autor: Sandra Zbiljski

Naslov diplomskog rada: Mogućnosti za iskorištavanje vjetra na području sjeverozapadne Hrvatske

U ovom radu, počevši od stanja vjetroenergetike u svijetu, Europi i Hrvatskoj, dat je kratki opis nastanka vjetra gdje se zbog razlike u temperaturama odnosno tlakovima pretvara u kinetički oblik energije. Također, navedena su bitna obilježja vjetra, a to su smjer i brzina vjetra te utjecaj hrapavosti površine na brzinu vjetra. Opisani su sustavi za iskorištavanje energije vjetra, odnosno vjetroturbine koje koriste kinetičku energiju vjetra za pokretanje generatora te značajke rada same vjetroturbine, te područje njihove primjene.

Napravljena je analiza potencijala energije vjetra u sjeverozapadnoj Hrvatskoj na temelju izmjerenih srednjih brzina vjetra na postajama Varaždin, Čakovec i Zagreb. Osim tih podataka korišten je i atlas vjetra Hrvatske sa srednjim godišnjim brzinama vjetra pri 10 m i 80 m iznad tla te je dat primjer proračuna potencijala vjetra za područje Čakovca, Varaždina i Zagreba. Također, spomenute su i ekološke karakteristike vjetroelektrana i njihov utjecaj na okoliš.

Ključne riječi: vjetar, brzina vjetra, vjetroturbine, potencijal energije vjetra

SADRŽAJ

1. Uvod ... 1
2. Vjetroenergetika u svijetu ... 2
   2.1. Europa ... 6
      2.1.1. Najveće vjetroelektrane u Europi ... 9
   2.2. Hrvatska ... 10
3. Energija vjetra ... 12
   3.1. Mjerenje brzine vjetra ... 15
   3.2. Utjecaj hrapavosti površine na brzinu vjetra ... 18
4. Vjetroturbine ... 20
   4.1. Značajke rada vjetroturbina ... 21
      4.1.1. Betzov zakon ... 24
   4.2. Konstrukcijski oblici vjetroturbina ... 25
      4.2.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO ... 25
      4.2.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje ili VSVO ... 28
      4.2.3. Male vjetroturbine ... 31
5. Potencijal energije vjetra u Sjeverozapadnoj Hrvatskoj ... 35
   5.1. Primjer izračuna potencijala vjetra na području Čakovca, Varaždina i Zagreba 39
6. Ekološke karakteristike i doprinos zaštiti okoliša ... 47
   6.1. Aspekti buke ... 47
   6.2. Elektromagnetske smetnje ... 48
   6.3. Vizualna degradacija prostora ... 49
   6.4. Efekt erozije tla ... 49
   6.5. Rizici za ptičje vrste ... 49
   6.6. Prenamjena zemljišta ... 50

6.7. Nastali otpad 51
7. Zaključak 52
Popis literature 53
Popis slika 57
Popis tablica 58

1. Uvod

Povijest korištenja energije vjetra seže u doba kada su ljudi prvi puta postavili jedra na brodove i time omogućili daleka putovanja i isto tako odlučili svoje živote povjeriti u ruke tog nepredvidljivog izvora energije. Može se reći da je na neki način vjetar bio taj koji je pokrenuo eru istraživanja i omogućio prijenos robe i dobara na velike udaljenosti. Dugo vremena nakon prvih jedara uslijedilo je korištenje energije vjetra za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima i za pokretanje vodenih pumpi. U modernim vremenima s dolaskom i izumom električne energije počinje se upotrebljavati u svrhu njene proizvodnje [1].

Glavna prednost električne energije jest mogućnost njenog lakog transporta do krajnjeg korisnika. Problem koji se javlja jest proizvodnja, naime najveći udio u svjetskoj proizvodnji el. energije imaju termoelektrane koje koriste fosilna goriva. Osim što su ograničen resurs, fosilna goriva značajno zagađuju Zemljinu atmosferu. Zbog toga javlja se potreba za novim izvorom energije, a to je vjetar [2].

Energija vjetra se u posljednjih 10 godina promovirala u najbrže rastuću granu industrije te u jedan od izvora energije s kojim svaka elektroenergetska mreža mora računati u svom sustavu [3].

2. Vjetroenergetika u svijetu

Energija vjetra danas stvara stotine tisuća novih radnih mjesta diljem svijeta. Vjetroelektrane su u zadnjih par godina zaslužne za većinu novoinstalirane snage za proizvodnju električne energije u energetskom sektoru. Vjetroagregati su postali specijalizirani za skoro sve vrste terena i klimatskih uvjeta te ih se može pronaći u tropskim područjima, ali i arktičkim uvjetima. Kombinirana visina stupa i lopatice na najvećim vjetroagregatima dosiže visine i iznad 200 m, što je skoro dvije trećine visine Eiffelovog tornja [3].

Istovremeno razvojem dimenzija razvile su se i nove tehnologije i spoznaje o učinku vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu, razvijeni su vjetroagregati koji pružaju potporu mreži i imaju pozitivan utjecaj na stabilnost sustava, razvijeni su napredni prognostički modeli vjetra sa visokom točnošću do nekoliko dana unaprijed, a posebno za razdoblja do 24 sata unaprijed, cijene proizvedenog kWh padaju, a energija je čista i besplatna [3].

Rekordna godina za industriju vjetra bila je 2015., kada je po prvi put nadmašena instalirana snaga od 60 GW/g. Ukupne investicije u sektor čiste energije prošle su godine iznosile oko 300 milijardi eura što je rast od 4% u odnosu na 2014. godinu kada su investicije iznosile oko 240 milijardi eura [4].

Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana je na kraju prošle godine bila 432,9 GW uz godišnji rast za više od 17%. Za ovaj rast zaslužna je Kina sa novim instalacijama od 30,753 MW [4].

Početkom 2015. godine, očekivanja za rast na tržištu energije vjetra nisu bila velika zbog usporenog rasta gospodarstva u Europi i političke neizvjesnosti u SAD-u. Procjena je bila da će se ostvariti 53,5 GW instalirane snage godišnje, ali nije uzeta u obzir sposobnost Kine [4].

U tablicama 1. i 2. prikazane su instalirane snage po vodećim državama u svijetu tokom 2015. godine, te ukupna instalirana snaga u MW.

Tablica 1. Instalirana snaga po vodećim državama u svijetu tokom 2015. godine, te ukupna instalirana snaga u MW (1. dio) [4].

Afrika i Bliski istok	Države	Na kraju 2014.	Tijekom 2015.	Ukupno na kraju 2015.
	Južna Afrika	570	483	1.053
	Maroko	787	-	787
	Egipat	610	200	810
	Tunis	245	-	245
	Etijopija	171	153	324
	Jordan	2	117	119
	Druge	151	-	151
	Ukupno:	**2536**	**270**	**3.489**
Azija				
	Kina	114.609	30.753	145.362
	Indija	22.465	2.623	25.088
	Japan	2.794	245	3.038
	Južna Koreja	610	225	835
	Tajvan	633	14	647
	Pakistan	256	-	256
	Tajland	223	-	223
	Filipini	216	-	216
	Druge	167	-	167
	Ukupno:	**141.973**	**33.860**	**175.831**
Europa				
	Njemačka	39.128	6.013	44.947
	Španjolska	23.025	-	23.025
	UK	12.633	975	13.603
	Francuska	9.285	1.073	10.358
	Italija	8.663	295	8.958
	Švedska	5.425	615	6.025
	Poljska	3.834	1.266	5.100
	Portugal	4.947	132	5.079
	Danska	4.881	217	5.063
	Turska	3.738	956	4.694
	Nizozemska	2.865	586	3.431
	Rumunjska	2.953	23	2.976
	Irska	2.262	224	2.486
	Austrija	2.089	323	2.411
	Belgija	1.959	274	2.229
	Druge	6.564	833	7.387
	Ukupno:	**134.251**	**13.805**	**147.771**

Tablica 2. Instalirana snaga po vodećim državama u svijetu tokom 2015. godine, te ukupna instalirana snaga u MW (2. dio) [4].

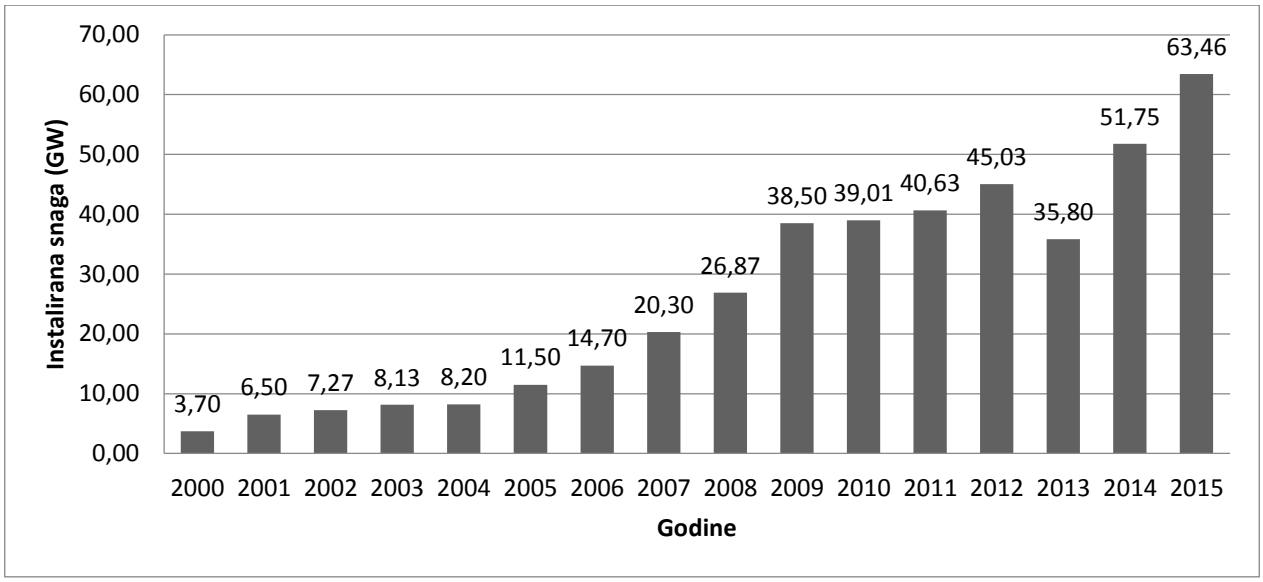
Južna Amerika	Države	Na kraju 2014.	Tijekom 2015.	Ukupno na kraju 2015.
	Brazil	5.962	2.754	8.715
	Čile	764	169	933
	Urugvaj	529	316	845
	Argentina	271	8	279
	Panama	35	235	270
	Kostarika	198	70	268
	Honduras	126	50	176
	Peru	148	-	148
	Guatemala	-	50	50
	Karibi	250	-	250
	Druge	285	-	285
	Ukupno:	**8.568**	**3.652**	**12.220**
Sjeverna Amerika				
	SAD	65.877	8.598	74.471
	Kanada	9.699	1.506	11.205
	Meksiko	2.359	714	3.073
	Ukupno:	**77.935**	**10.817**	**88.749**
Pacifik				
	Australija	3.807	380	4.187
	Novi Zeland	623	-	623
	Pacifički otoci	12	0.6	13
	Ukupno:	**4.442**	**380.6**	**4.823**
Ukupno		**369.705**	**63.467**	**432.883**

Kina je još jednu godinu imala rekordni rast te je ostala na prvom mjestu, na drugom mjestu je Europa, a Sjeverna Amerika je treća.

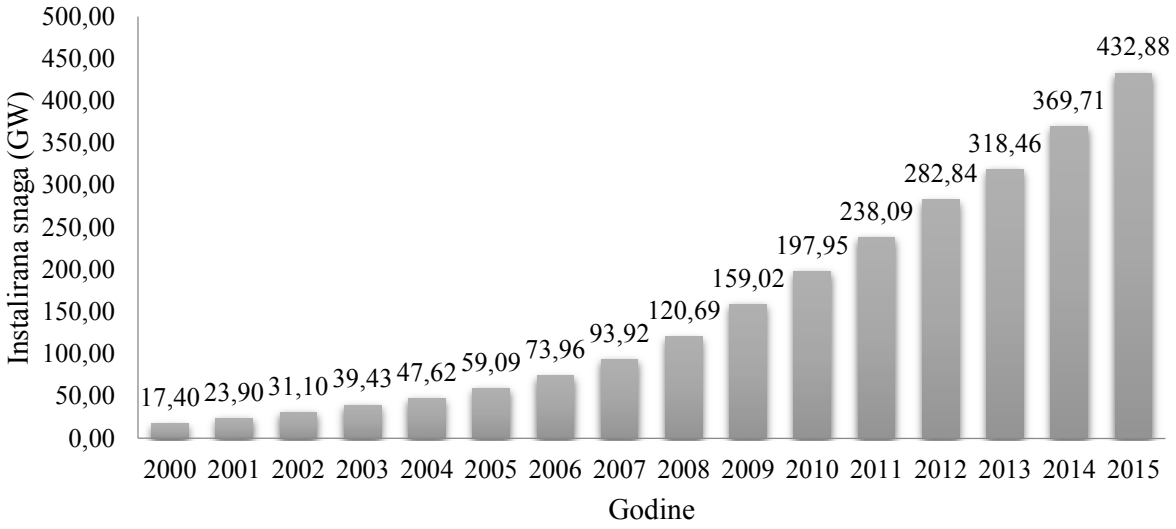
Na kraju prošle godine, 26 zemalja imalo je instaliranu snagu veću od 1.000 MW pri čemu je njih:

- 17 u Europi,
- 4 u Azijsko–Pacifičkoj regiji (Kina, Indija, Japan i Australija),
- 3 u Sjevernoj Americi (SAD, Kanada i Meksiko),
- 1 u Južnoj Americi (Brazil),
- 1 u Africi (Južna Afrika) [4].

Instaliranu snagu veću od 10.000 MW je imalo 8 zemalja, uključujući: Kinu (145.362 MW), SAD (74.471 MW), Njemačku (44.947 MW), Indiju (25.088 MW), Španjolsku (23.025 MW), Veliku Britaniju (13.603 MW), Kanadu (11.205 MW) i Francusku (10.358 MW) [4].



Slika 1. Godišnja instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu od 2000. do 2015. Godine (GW) [4].

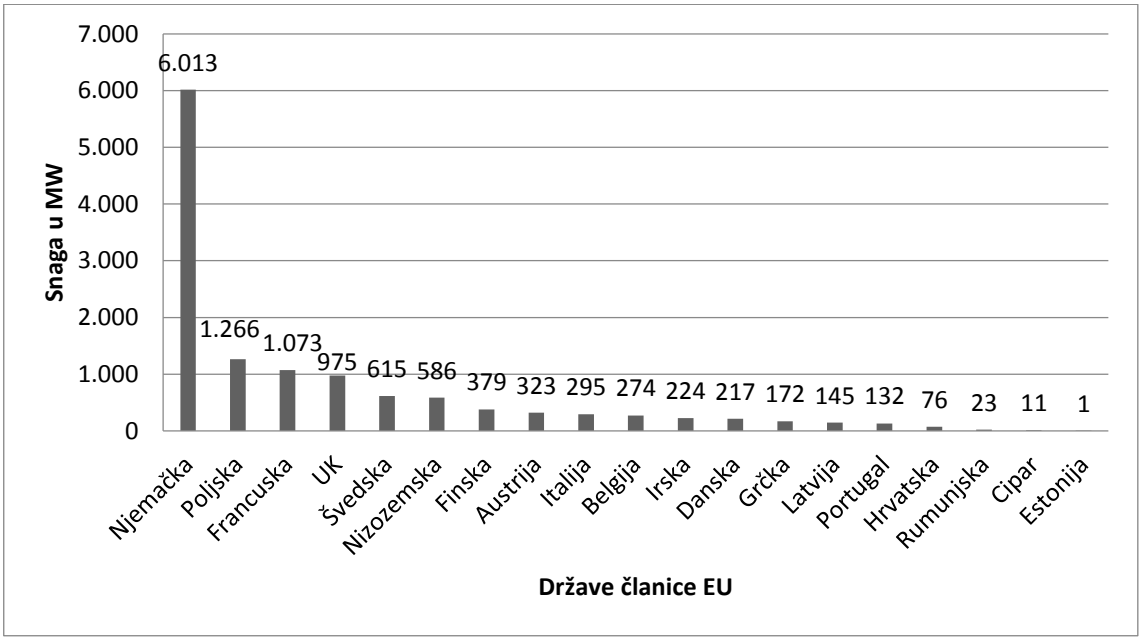


Slika 2. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu od 2000. do 2015. godine [4].

Slike 1. i 2. prikazuju dosadašnje stanje instalirane snage u svijetu, a predviđa se da će u razdoblju od 2016. do 2020. godine Azija i dalje dominirati te zauzimati najmanje 50% globalnog tržišta [4].

2.1. Europa

Tijekom 2015. godine, instalirano je 13.805,2 MW što je 5,4% više nego u prethodnoj godini. Na zemlje članice Europske Unije otpada 12.800,2 MW [5].

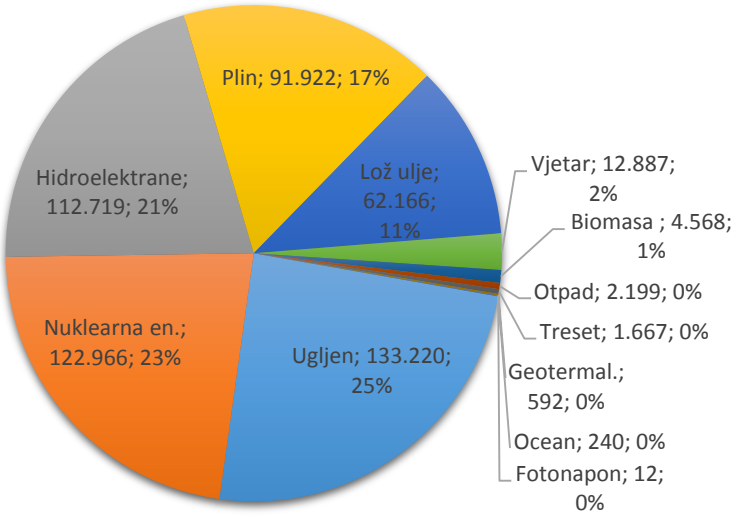


Slika 3. Instalirana snaga vjetroelektrana po državama EU u 2015. god [5].

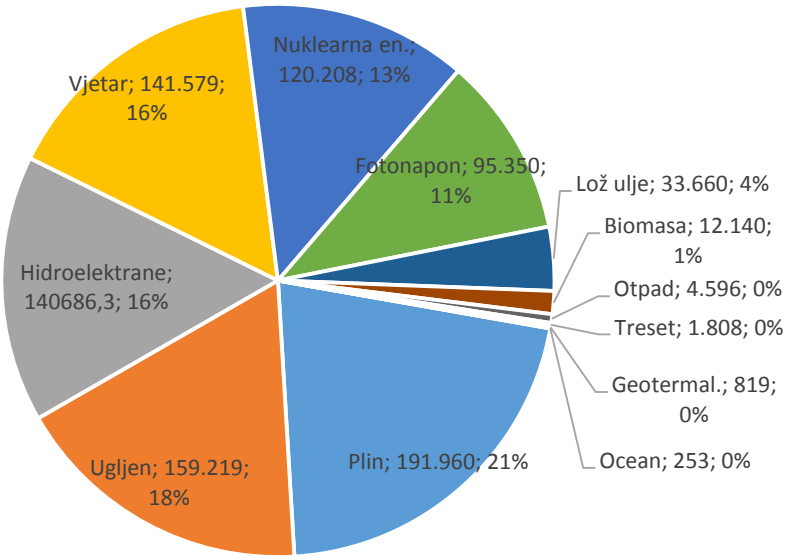
Na slici 3 mogu se vidjeti značajne razlike između zemalja u segmentu instaliranih kapaciteta. Njemačka značajno nadmašuje s više od 6 GW novo instalirane snage [5].

Kapacitet proizvodnje električne energije u Europskoj uniji odmiče od loživog ulja, ugljena, nuklearne energije i plina sa većim udjelom vjetra, solarne energije i drugih obnovljivih izvora [5].

Udio ukupne instalirane snage povećan je za šest puta u 2015. godini u odnosu na 2000. godinu, s 2,4 % na 15,6 %. U istom razdoblju, obnovljivi izvori energije povećali su svoj udio ukupnog kapaciteta snage u 2000. godini sa 14 % na 44 % u 2015. godini (Slika 4 i 5) [5].



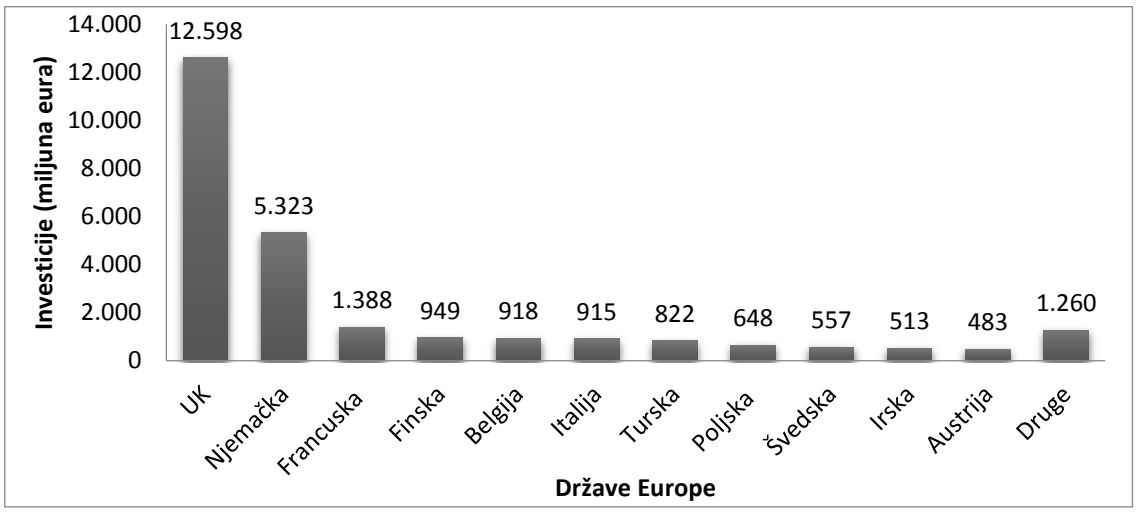
Slika 4. Udio pojedinog izvora energije u instaliranoj snazi u 2000. godini [5].



Slika 5. Udio pojedinog izvora energije u instaliranoj snazi u 2015. godini [5].

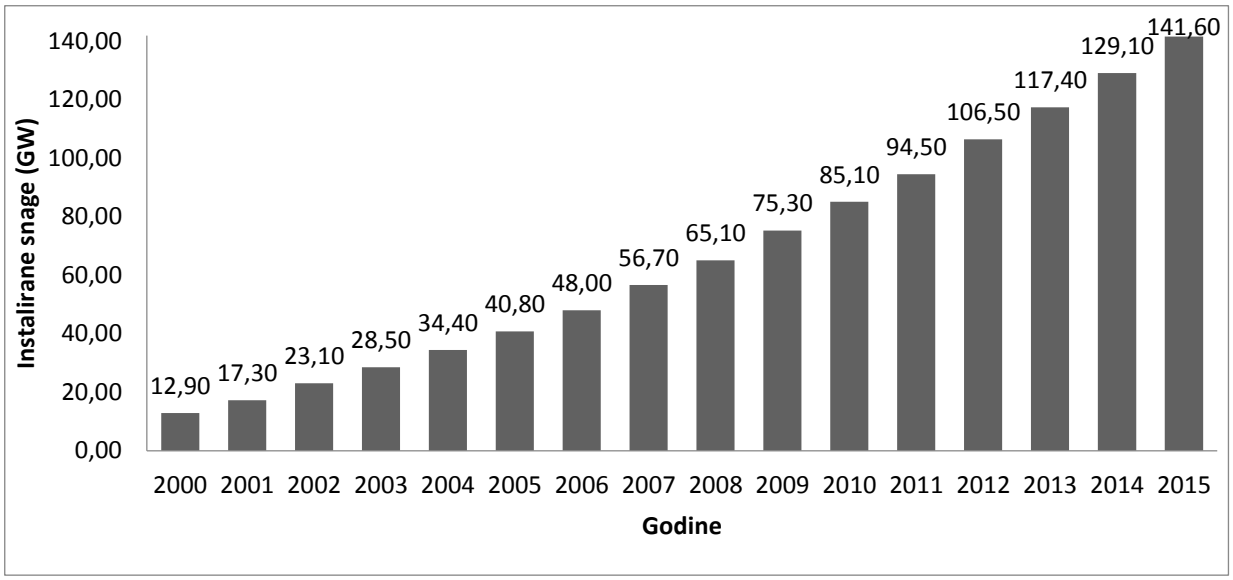
Rekordna godina za ulaganje u sektor energije vjetra bila je 2015. kada su investicije dosegle 26,4 milijardi eura. Investicije u nove kopnene vjetroelektrane porasle su za 6,3 %, a investicije u priobalne vjetroelektrane se udvostručio u odnosu na prethodnu godinu. Ukupno je financirano 9,7 GW novih kapaciteta [5].

Velika Britanija je imala najvišu razinu ulaganja u 2015. Godini sa 12,6 milijardi eura za izgradnju novih kopnenih i priobalnih vjetroelektrana. To čini 48% ukupnih ulaganja u 2015. godini (Slika 6) [5].



Slika 6. Investicije u energiju vjetra za 2015. godine, uključujući i investicije u opremu [5].

Ukupno je u Europskoj uniji (EU) instalirano 141,6 GW zbog rekordnog rasta od 9,7 % 2015. godini (Slika 7) [5].



Slika 7. Kumulativne instalacije energije vjetra u EU (GW) [5].

2.1.1. Najveće vjetroelektrane u Europi

Europsko udruženje za energiju vjetra (EWEA - The European Wind Energy Association) je objavilo popis deset najvećih vjetroelektrana u Europi čija je ukupna snaga 3.176 MW s ukupno 1.214 vjetroagregata (Tabela 3). Procijenjena proizvodnja električne energije na godišnjoj razini tih vjetroelektrana, kada budu u potpunosti dovršene je 6,7 TWh što je dovoljno za pokrivanje potrošnje od oko 2 miljuna kućanstva [6].

Najveća vjetroelektrana u Europi je u Rumunjskoj, Fantanele & Cogealac, ima snagu od 600 MW. Slijedeće četiri pozicije na listi drže priobalne vjetroelektrane u Velikoj Britaniji, a prva na toj listi je Whitelee, priobalna vjetroelektrana snage 539 MW koja koristi 215 Siemensovih vjetroagregata te je u vlasništvu Scottish Powera [6].

U top 10 se nalaze još vjetroelektrana Alto Minho u Portugalu, Andau u Austriji, Maranchon u Španjolskoj, Jadraas u Švedskoj, te još jedna vjetroelektrana u Velikoj Britaniji [6].

Tablica 3. Popis najvećih vjetroelektrana u Europi (izgrađenih, u gradnji ili odobrenih) [6].

Lokacija ili ime	Zemlja	Kapacitet (MW)	Datum završetka
Fantanele & Cogealac	Rumunjska	600	2012
Whitelee	Ujedinjeno Kraljevstvo	539	2013
Viking	Ujedinjeno Kraljevstvo	371	2018
Clyde	Ujedinjeno Kraljevstvo	350	2012
Pen y Cymoedd	Ujedinjeno Kraljevstvo	256	2016
Alto Minho	Portugal	240	2009

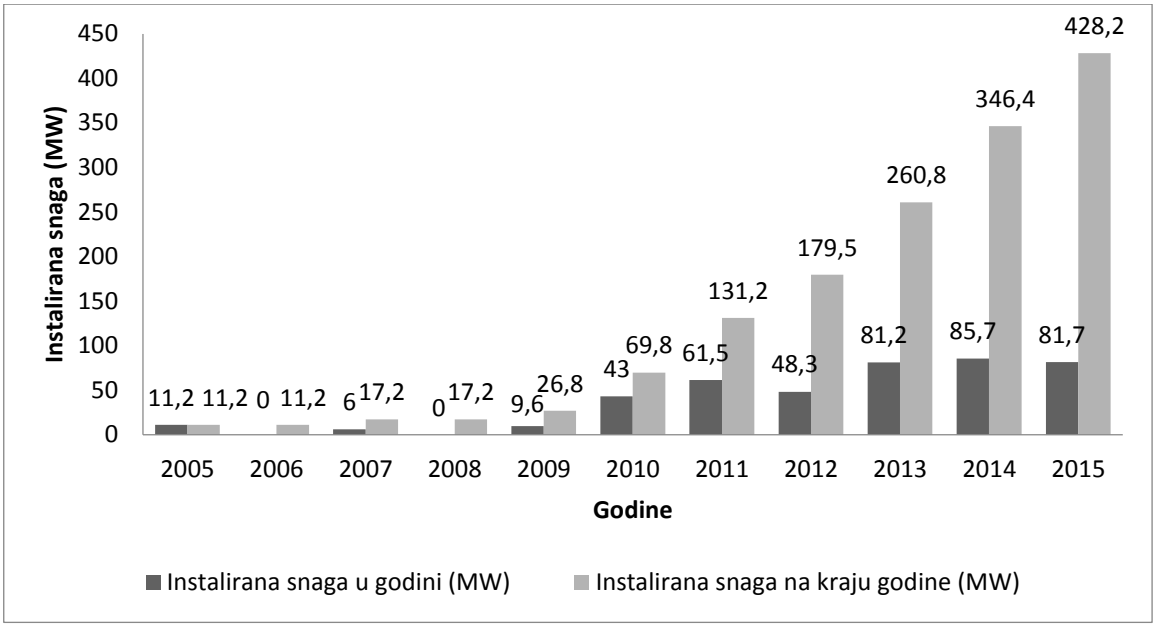
Andau	Austrija	237	2014
Maranchon	Španjolska	208	2007
Jadraas	Švedska	198	2013
Dorenell	Ujedinjeno Kraljevstvo	177	2018
Ukupno		3.176	

2.2. Hrvatska

Gledajući kroz povijest vjetar je znatno doprinosio gospodarskom razvitku i to najviše na obalnom i otočnom području Hrvatske. Na srednjodalmatinskim otocima nalazilo se oko 400 mlinova koji su koristili energiju vjetra za pogon. Kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj, jeftina energija iz fosilnih goriva je usporila korištenje obnovljivih izvora energije. U Hrvatskoj se prišlo sustavnom istraživanju korištenja energije vjetra od 1978. godine [7].

Cilj koji je Hrvatska postavila o izgradnji i puštanju u pogon 360 MW vjetroelektrana do kraja 2010. godine, a koji je postavljen 2007. godine, uz svoju potvrdu kroz energetsku strategiju 2009. godine nije bio ostvaren. Tako danas u Hrvatskoj u punom pogonu ima 14 vjetroparkova ukupne instalirane snage 348,95 MW. U probnom pogonu su još dvije vjetroelektrane ukupne snage 79,2 MW, a sveukupno iznosi 428,2 MW [8].

Prva vjetroelektrana u Hrvatskoj puštena je u pogon 2005. godine (Vjetroelektrana Ravna 1 na otoku Pagu, instalirane snage 5,95 MW). U idućih nekoliko godina izgradnja vjetroelektrane je tekla usporeno, pa su do kraja 2009. godine izgrađene i puštene u pogon još dvije vjetroelektrane, od ukupno 26,8 MW instalirane snage. U razdoblju 2010. – 2015. godine u redovni pogon ulazilo prosječno 71,9 MW godišnje novih instaliranih kapaciteta (Slika 8) [9].

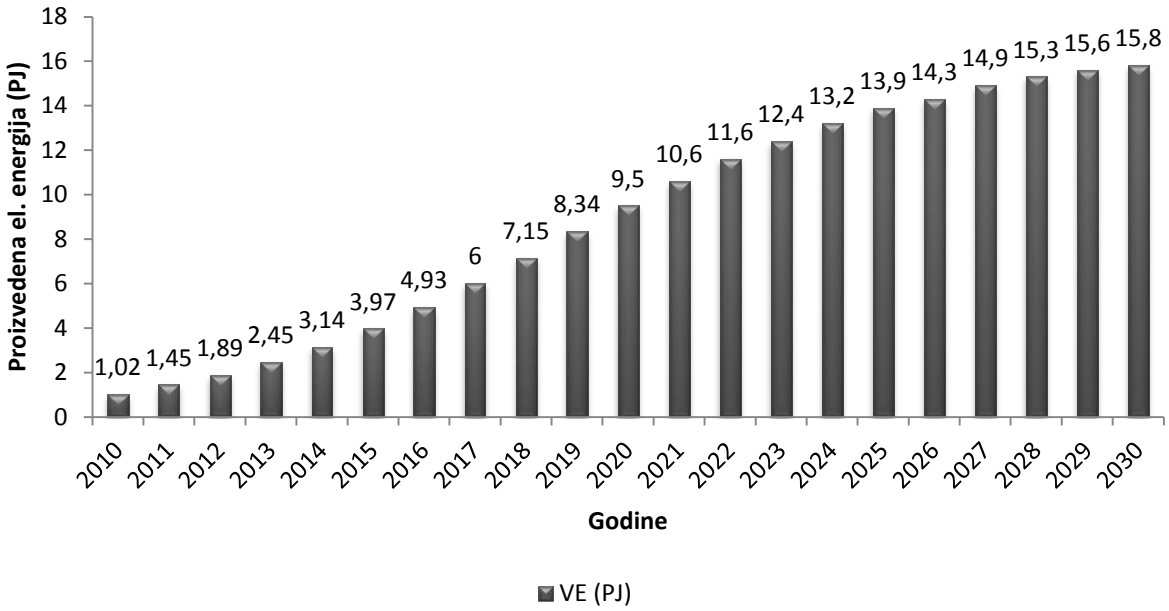


Slika 8. Vremenska dinamika izgradnje u Hrvatskoj [9].

Hrvatska treba do 2020. godine, prema energetskoj strategiji, ostvariti 1200 MW instalirane snage na 1.000 stanovnika, a do 2030. godine Hrvatska na 1.000 stanovnika mora imati 450 kW instalirane snage u vjetroelektranama, što ukupno iznosi 2.000 MW instalirane snage. Potrebna godišnja stopa rasta za ispunjavanje cilja od 1.200 MW do 2020. godine trebala bi biti 25% novoinstaliranih kapaciteta godišnje (Tablica 4) [9].

Tablica 4. Dinamika rasta instaliranih kapaciteta i proizvodnje električne energije iz vjetroparkova do 2020. godine (s pogledom do 2030. godine) [9].

	2010.	2020.	2030.
Instalirana snaga (MW)	129	1200	2000
Proizvedena el. energija (TWh)	0,28	2,64	4,40
Proizvedena el. energija (PJ)	1,02	9,50	15,84



Slika 9. Dinamika rasta proizvodnje električne energije u vjetroelektranama do 2020. godine [9].

3. Energija vjetra

Vjetar je zrak koji horizontalno struji u odnosu na Zemljinu površinu. Zbog neravnomjernog zagrijavanja površine Zemlje na različitim geografskim širinama dolazi do gibanja zračnih masa u atmosferi. Zrak se indirektno zagrijava preko tla. Polovi Zemlje dobivaju manje energije od ekvatora, a kopno se grije brže od mora. Zbog razlika temperatura u slojevima zraka stvaraju se razlike tlaka koji se pretvara u kinetički oblik energije vjetra [2].

Vjetar je posljedica djelovanja sila, koje su:

- gradijent tlaka,
- Coriolisova sila,
- sila teža i
- sila trenja [11].

Gradijent tlaka (Gr) je veći kada je razlika tlaka veća, a udaljenost manja. Brzina vjetra je razmjerna tom gradijentu. Budući da leži u smjeru najveće promjene tlaka, gradijent je uvijek okomit na izobare (ib), a usmjeren je od višeg tlaka prema nižem. Iako vjetar puše iz područja višeg tlaka u područje nižeg tlaka, ne puše direktno najkraćim putem, odnosno ne puše paralelno sa smjerom gradijenta tlaka. Vjetar nije poput gradijenta tlaka okomit na izobare, nego s njima zatvara određeni kut. Taj kut je veći nad kopnom nego nad morem, a porastom geografske širine se smanjuje. Iz toga možemo zaključiti da smjer vjetra (v) određuju još neke sile osim sile gradijenta tlaka, odnosno sile koje također skreću vjetar i utječu na njega, a to su sila trenja (Tr) i Coriolisova sila (Co), kao što je prikazano na slici 10 [12].



Slika 10. Smjer prizemnog vjetra na sjevernoj polutci pri pravocrtnim izobarama nakon uspostave ravnoteže među silama Gr, Co i Tr [11].

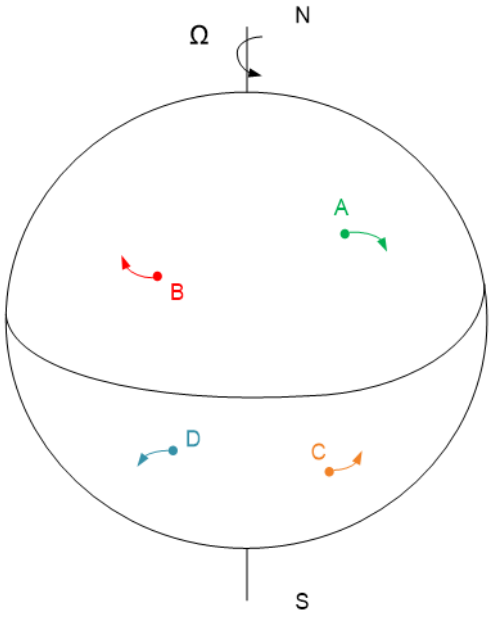
Na malim nadmorskim visinama, zbog hrapavosti podloge, uvijek djeluje sila trenja. Trenje između zraka i podloge, ali i između raznih slojeva zraka, suprotstavlja se započetom gibanju i smanjuje mu brzinu, a donekle mu mijenja i smjer [12].

Coriolisova sila djeluje na vektor brzine vjetra. Coriolisovu komponentu generira vrtložno strujanje kao posljedica rotacije Zemlje [2]. Posljedica djelovanja ove sile otklona je skretanje vjetrova, tako da vjetrovi na sjevernoj hemisferi skreću udesno, a na južnoj u lijevo (Slika 11) [12].



Slika 11. Posljedica djelovanja Coriolisove sile [11]..

Atmosferske čestice koje se na sjevernoj hemisferi gibaju prema istoku otklanjat će se zbog Coriolisove sile prema jugu (čestica A). Slično, čestice koje se gibaju prema zapadu otklanjat će se prema sjeveru (čestica B). Suprotno, na južnoj hemisferi za gibanja prema istoku otklon je prema sjeveru (čestica C), a za gibanja prema zapadu otklon je prema jugu (čestica D) (Slika 12) [11].



Slika 12. Smjer atmosferskih čestica na sjevernoj i južnoj hemisferi djelovanjem Coriolisove sile [12].

3.1. Mjerenje brzine vjetra

U svakoj točki vjetar ima određeni smjer i brzinu (jačinu), prema tome, vjetar je definiran ako mu se odredi brzina i smjer [11].

Brzina ili jačina vjetra mjeri se pomoću anemometra. Zdjelasti anemometar koji se najčešće koristi sastoji se od tri poluloptaste čašice koje se nalaze na vrhu osovine te se okreću u smjeru vjetra. Broj okretaja registrira se elektronički. Uz anemometar se postavlja i mehanizam koji registrira smjer vjetra. Tako se dobivaju podatci o brzini i smjeru pomoću kojih se izrađuje ruža vjetrova određenog područja (Slika 13) [2].



Slika 13. Anemometar [13].

Izražava se u metrima u sekundi (m/s) ili u čvorovima (1 čvor /1 čv/= 1 naut. milja/sat; 1 naut. milja= 1 852 m). Jačina vjetra se također može odrediti prema učinku na objektima u prirodi, a izražava se u boforima. Skala ide od 0 do 12 stupnjeva za jačinu vjetra pri tlu, a za vjetrove po visini do 16 stupnjeva. Beaufortova skala sadrži za svaki stupanj jačine vjetra kratki opis učinka što ga vjetar stvara (Tablica 5) [11].

Smjer vjetra se određuje geografski po strani svijeta s koje puše, tj. otkuda dolazi struja zraka. Osim glavnih strana svijeta, upotrebljavaju se i sporedne strane i među smjerovi. Najčešće se uzima 8 smjerova, a imena tih smjerova se uglavnom obilježavaju prema engleskim nazivima za strane svijeta (north, east, south, west) pa prema tome slijede

oznake: N, NE, E, SE, S, SW, W i NW [11]. Ruža vjetrova je razdioba pojave vjetra određene brzine u određenom smjeru nastala mjerenjem i/ili korelacijom na određenoj mikrolokaciji [15]. Opisuje brzinu vjetra iz 12 različitih smjerova, a izgleda kao kompas. Svaki od 12 smjerova obuhvaća 30° horizonta što je standard za europski atlas vjetrova. Karakteristike vjetrova na nekoj lokaciji mogu se razlikovati iz godine u godinu i do 10%, pa je preporučljivo mjerenja provesti kroz nekoliko godina [2].

Tablica 5. Beaufortova skala [14].

Bofora	**Naziv vjetra**	**Učinak vjetra na kopnu**	**Učinak vjetra na moru**	**Brzina vjetra**
0	Tišina	Dim se diže vertikalno u vis (dimnjak), lišće i zastave su nepomične	Površina vode kao ogledalo	do 0.3 m/s do 1 km/h
1	Lahor	Vjetrulja se ne miče, može se razaznati smjer prema dimu	Mreškanje vode	0.4 - 1.5 m/s 1 - 5 km/h
2	Povjetarac	Vjetrulja se pokreće, lišće treperi	Mali valići	1.6 - 3.3 m/s 6 - 11 km/h
3	Slab vjetar	Zastava lepršа, lišće se neprekidno njiše i šušti	Veći valići	3.4 - 5.4 m/s 12 - 19 km/h
4	Umjeren vjetar	Diže prašinu, suho lišće i papir s tla, njiše manje grane	Mali valovi	5.5 - 7.9 m/s 20 - 28 km/h
5	Umjereno jak vjetar	Njiše čitava mala stabla	Umjereni valovi	8.0 - 10.7 m/s 29 - 38 km/h
6	Jak vjetar	Savijaju se velike grane, teško je nositi otvoren kišobran	Veliki valovi se formiraju	10.8 - 13.8 m/s 39 - 49 km/h
7	Vrlo jak vjetar	Hodanje prema vjetru je otežano, njiše se neprekidno veće lisnato drveće	Vjetar počinje otpuhivati pjenu sa valova niz vjetar	13.9 - 17.1 m/s 50 - 61 km/h
8	Olujni vjetar	Njiše čitava stabla i lomi velike grane, sprječava svako hodanje prema vjetru	Umjereno visoki valovi, velike dužine	17.2 - 20.7 m/s 62 - 74 km/h
9	Oluja	Pomiče manje predmete i baca crijep, čini manje štete na kućama i drugim objektima	Visoki valovi, smanjena vidljivost	20.8 - 24.4 m/s 75 - 88 km/h
10	Jaka oluja	Obara drveće i čupa ga s korijenjem, čini znatne štete na zgradama	Vrlo visoki valovi	24.5 - 28.4 m/s 89 - 102 km/h
11	Teška oluja	Čini teške štete, na većem području djeluje razorno	Ekstremno visoki valovi, vidljivost jako smanjena	28.5 - 32.6 m/s 103 - 117 km/h
12	Orkan	Opustoši čitav jedan kraj	Jako mala vidljivost, zrak je ispunjen kapljicama vode i pjenom	32.7 - 36.9 m/s 118 - 133 km/h

3.2. Utjecaj hrapavosti površine na brzinu vjetra

Hrapavost površine ima veliki utjecaj na brzinu vjetra pa tako s porastom hrapavosti raste i otpor te se vjetar usporava. Šume i veliki gradovi očito su mjesta velike hrapavosti dok ceste i betonske površine stvaraju vrlo mali otpor gibanju vjetra. Vodene površine stvaraju najmanje otpora vjetru dok s druge strane travnate površine pune grmlja značajno usporavaju vjetar [2].

Na temelju meteoroloških mjerenja na standardnim visinama od 10 metara iznad tla i s pripadnim faktorom hrapavosti moguće je izračunati brzinu vjetra na potrebnoj visini od tla. Proračun brzine vjetra na traženoj visini izračunava se pomoću eksponencijalnog ili logaritamskog zakona. Ipak, ovi zakoni pojednostavljuju raspodjelu brzine vjetra s visinom jer ne uzimaju u obzir efekt topografije terena i moguće prepreke, promjene trenja kao i promjene stabilnosti atmosfere. Pokazani su zakoni primjenjivi za homogeni teren i atmosfersku stabilnost [2].

Ta promjena profila brzine vjetra po vertikali naziva se okomiti gradijent brzine vjetra [2].

Vertikalni gradijent brzine definira se kao:

- eksponencijalna jednadžba:

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{z - z_o}{z_r} \right)^{\alpha}, \tag{1}$$

gdje su:

v - brzina vjetra na visini koja se traži

v_r - brzina na referentnoj visini

z - visina koja se traži

z_r - referentna visina mjerenja

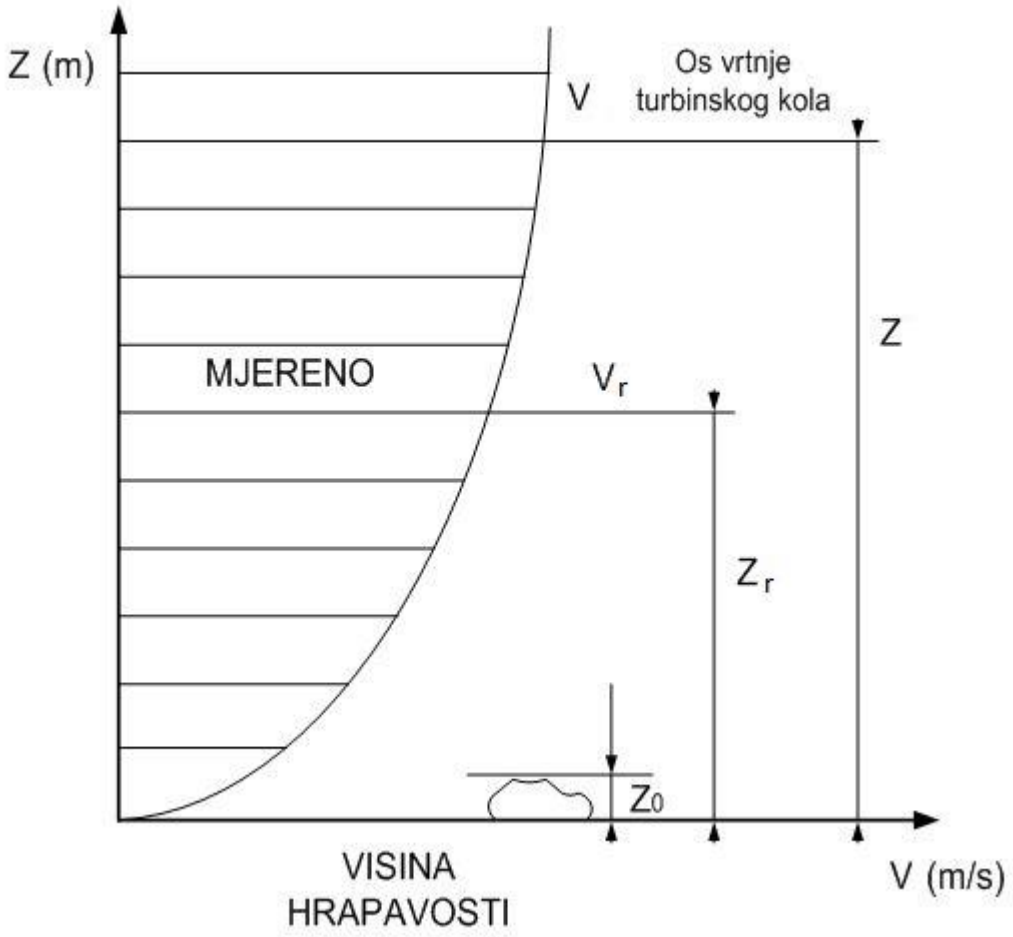
z_o - visina iznad sloja trenja (za nisko raslinje može se uzeti da je jednaka nuli)

α - koeficijent hrapavosti površine (0,1 – 0,32) [2].

- logaritamska funkcija:

$$v = v_r \frac{\ln(z / z_0)}{\ln(z_r / z_0)} \tag{2}$$

Pomoću danih jednadžbi računaju se brzine vjetra na većim visinama na temelju mjerenja brzine v_r na visini z_r koja se obično mjeri na visini od 10 m iznad tla (Slika 14) [2].

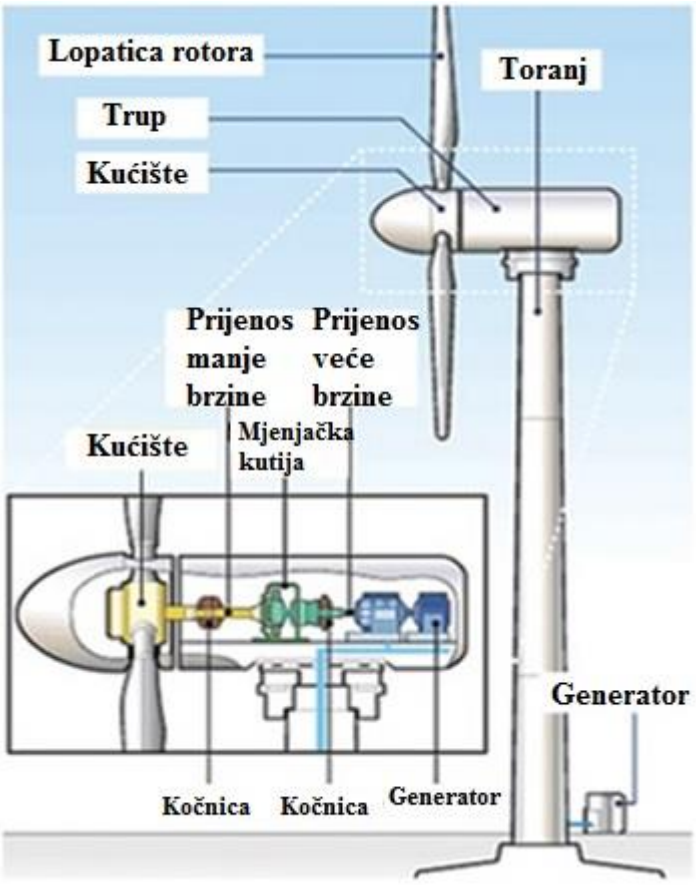


Slika 14. Promjena brzine vjetra s visinom [2].

4. Vjetroturbine

Današnji sustavi za iskorištavanje energije vjetra su pretežito vjetroturbine. Vjetroturbina je još poznata pod nazivima vjetroagragat i vjetrogenerator. Vjetroturbina je rotirajući stroj koji pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju. Pri tome se rotor vjetroturbine i rotor električnog generatora nalaze na istom vratilu [16].

Vjetar okreće lopatice vjetroturbine pričvršćene na vratilu povezanu s mjenjačkom kutijom. U mjenjačkoj kutiji se pomoću reduktora povećava brzina vrtnje osovine. Mjenjačka je kutija s jedne strane spojena na osovinu turbine, a s druge na osovinu velike brzine vrtnje. Vratilo okreće rotor generatora te se tako proizvodi električna energija. Svaki se vjetar ne može na ovaj način iskoristiti za proizvodnju električne energije [17].



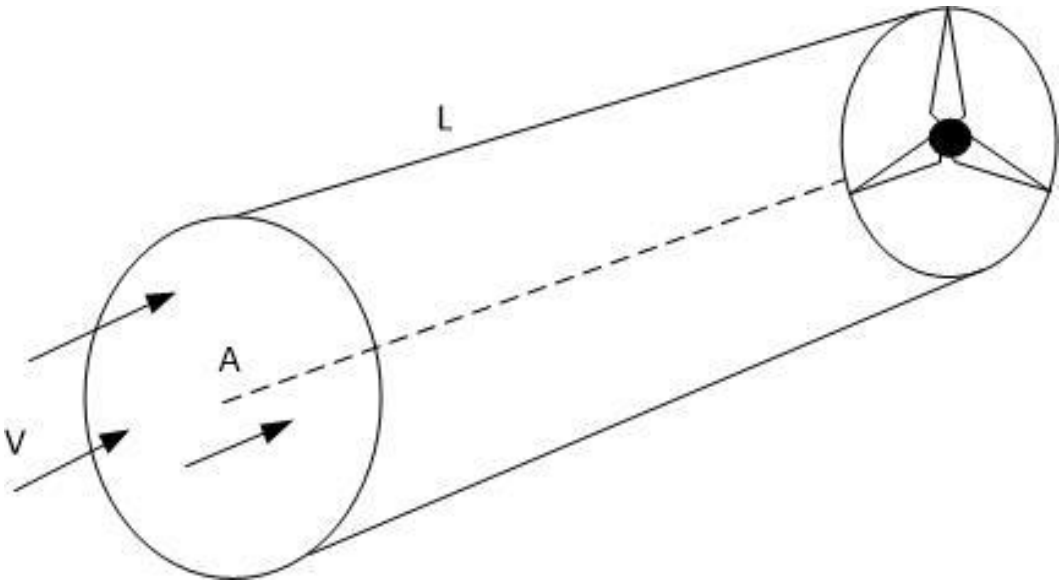
Slika 15. Dijelovi vjetroturbine [17].

Glavna karakteristika vjetra kao pogonskog fluida jest njegova obnovljivost. Nakon što zrak napusti sustav kojem je predao energiju vraća se u okolinu ne promijenjenih fizikalnih i kemijskih svojstava [2].

4.1. Značajke rada vjetroturbina

Molekule zraka koje se gibaju imaju kinetičku energiju, tako da količina molekula zraka koje prolaze preko nekog područja u određenom vremenskom periodu određuje energiju vjetra [18].

Budući da lopatice turbine prilikom vrtnje opisuju zamišljeni krug površine A i ako se uzme neki cilindar duljine L, tada se pomoću volumena i gustoće zraka može izračunati ukupna masa čestica koje dolaze na lopatice turbine, a pomoću mase i brzine dobije se kinetička energija (Slika 16) [18].



Slika 16. Zamišljeni cilindar koji opisuje vjetar na ulasku u turbinu [18].

Iz izraza za kinetičku energiju danog formulom 3, dalje se izvode izrazi za energiju i snagu vjetra:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \tag{3}$$

Masu zraka određuje gustoća, površina kroz koju struji, kao i brzina i vrijeme:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \tag{4}$$

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

Snaga vjetra je derivacija kinetičke energije po vremenu, $\frac{dE_k}{dt}$:

$$P_v = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3, \tag{6}$$

gdje je:

E_k – kinetička energija

m – masa

v – brzina

ρ – gustoća

V - volumen

A – površina

L - duljina

t – vrijeme

P_v – snaga

Pritom je važno primijetiti sljedeće važne činjenice:

- Snaga vjetra proporcionalna je gustoći zraka. Za standardne uvjete (morska razina, temperatura 15 ºC) gustoća zraka iznosi 1.225 kg/m³.
- Snaga vjetra proporcionalna je zamišljenoj površini koju opisuje rotor.
- Snaga vjetra proporcionalna je kubnoj potenciji brzine vjetra. Ako brzina vjetra poraste dva puta, snaga poraste osam puta [18].

Formule (5) i (6) daju maksimalnu teorijsku energiju odnosno snagu koja je sadržana u vjetru. Kad bi se zrak iza turbine zaustavio turbina bi preuzela svu tu energiju odnosno snagu. Ukupna kinetička energija zraka ne može se sva iskoristiti jer zrak mora dalje

strujati da bi načinio mjesta onome koji dolazi, energija se djelomično gubi na trenje, te turbina može iskoristiti samo jedan dio te energije koji je proporcionalan razlici kinetičkih energija zraka ispred i iza turbine [18].

Izraz za mehaničku snagu turbine je:

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

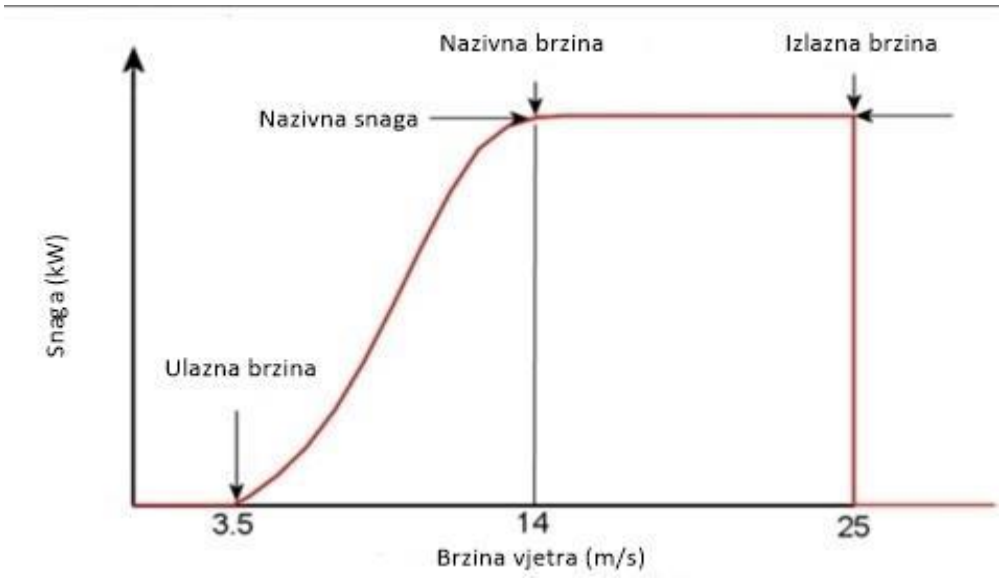
Gdje je:

$\dot{m}$ - maseni protok (kg/s), ovisi o prosjeku brzina,

v_1 - brzina vjetra na ulazu u turbinu,

v_2 - brzina na izlazu iz turbine [18].

Krivulja izlazne električne snage prikazuje ovisnost proizvedene električne snage o brzini vjetra. Uobičajeno je da vjetroagregati počinju raditi pri brzinama od 3-5 m/s, nazivna snaga im je na 12-15 m/s, a obustava rada nastupa pri brzini vjetra između 20 i 25 m/s zbog mogućnosti mehaničkih oštećenja (Slika 18) [19].



Slika 17. Ovisnost snage vjetroagregata o brzini vjetra [19].

4.1.1. Betzov zakon

Teoretski stupanj učinkovitosti pretvorbe energije vjetra pokazuje kolika je maksimalna energija koja se može postići vjetroturbinom u slobodnoj struji. Teorija koja definira maksimalni stupanj učinkovitosti vjetroturbine naziva se Betzov zakon prema Njemačkom fizičaru Albertu Betzu (1885.-1968.) [2].

Nažalost, dio ukupne kinetičke energije vjetra je neiskoristiv jer vjetar mora nastaviti strujanje kako bi omogućio dolazak vjetru iza sebe. Matematički se prikazuje stupnjem aerodinamične pretvorbe koji je jednak omjeru snage na vratilu vjetroagregata i raspoložive snage u slobodnoj struji vjetra [19]:

$$c_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot v^3} \tag{8}$$

gdje je:

- c_p - stupanj aerodinamične pretvorbe (≈ 0,45 za moderne vjetroturbine, a na nekim vjetroturbinama ide sve do 0,5),
- P_t - transformirana snaga,
- P_v - snaga vjetra.

Najveći mogući stupanj aerodinamične pretvorbe je tzv. Betzova granica i ona iznosi 0,593. Nijedan trenutno dostupan moderni vjetroagregat ne može imati učinkovitost veću od [19]:

$$P_{t,max} = 0{,}593 \cdot \frac{\rho\cdot v^3}{2} \ . \tag{9}$$

Zbog dodatnih gubitaka pri pretvorbi energije do dobivanja električne energije proizlazi da se manje od pola kinetičke energije vjetra može iskoristiti kao korisna električna energija [19].

Sve gore spomenute formule za izračun treba uzimati s rezervom jer su one izvedene na temelju teoretskih podataka i nisu uzeti u obzir svi meteorološki uvjeti [19]. Snaga vjetrenjače može se izračunati pomoću izraza, gdje je raspoloživa snaga vjetrenjače proporcionalna trećoj potenciji brzine vjetra i drugoj potenciji promjera kola vjetrenjače [20]:

$$N = \frac{d^2 \cdot w^3}{k} \; [kW] \tag{10}$$

gdje je:

N – snaga vjetrenjače [kW],

d – promjer rotorskog kola [m],

w – brzina vjetra [m/s],

k – koeficijent snage (sastoji se od dva parcijalna koeficijenta koji uzimaju u obzir termodinamičke i hidrodinamičke uvjete) [20].

4.2. Konstrukcijski oblici vjetroturbina

Vjetroturbine (VT) mogu se podijeliti prema osi vrtnje. Uobičajene vjetroturbine imaju horizontalno postavljenu os vrtnje i zbog toga se nazivaju „Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje“ ili VSHO (eng. HAWT - Horizontal-axis wind turbines). Manje poznate vjetroturbine imaju vertikalnu os vrtnje i nazivaju se „Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje“ ili VSVO (eng. VAWT - Vertical-axis wind turbines) [2].

4.2.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO

Turbine sa horizontalnom osi vrtnje su one čija je os vrtnje paralelna sa smjerom struje vjetra i tlom. Većina komercijalnih turbina je ovoga tipa.

Rotor ovih turbina postavljen je horizontalno na vrhu stupa. Lopatice koje zahvaćaju vjetar moraju biti usmjerene u njega. Generator ovih turbina obično se postavlja na vrh stupa u trup zajedno s multiplikatorom ako je on potreban (ovisno o tipu električnog generatora). Multiplikatorom povećava se brzina vrtnje ukoliko je brzina vrtnje lopatica premala za proizvodnju električne energije [2].

Visina stupa vjetroturbine iznosi oko 1,5 do 2 promjera lopatica zbog toga da bi turbina mogla hvatati vjetrove veće brzine na većim visinama. Ove vjetroturbine moraju imati mogućnost zakretanja trupa zbog zahvaćanja vjetra iz različitih smjerova pa tako manje izvedbe imaju jednostavna krilca koja usmjeravaju vjetroturbinu u pravom smjeru dok veće imaju servo motor povezan s senzorom [2].

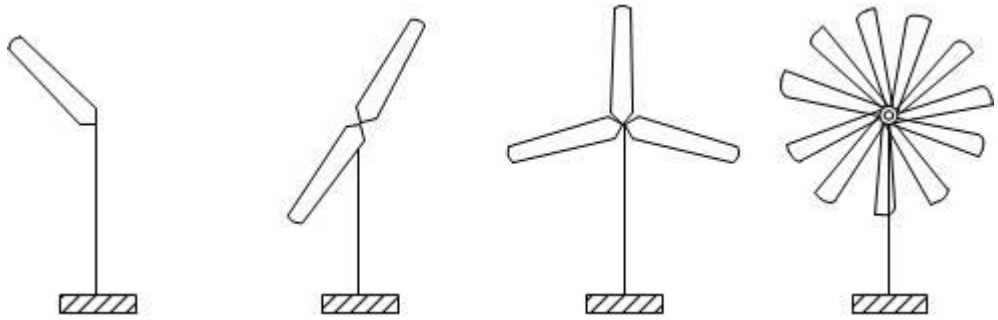
VSHO turbine se mogu podijeliti na one koje su usmjerene prema vjetru i na one koje gledaju od vjetra (Slika 18 a i b). Velika većina gleda prema vjetru, jer na taj način izbjegava utjecaj turbulencija koje nastaju iza turbine. Osnovna prednost VSHO turbina koje gledaju obrnuto od smjera strujanja vjetra je ta što se u njih ne moraju ugrađivati mehanizmi za zakretanje turbine, ali nisu toliko pouzdane i trajne kao "obične" VSHO turbine [2].



Slika 18. a) Izvedba sa stupom iza lopatica i b) izvedba sa stupom ispred lopatica [22].

4.2.1.1. Broj lopatica

Broj lopatica kod horizontalnih izvedbi vjetroturbina uvelike utječe na njihove karakteristike. Na slici 19. prikazano je nekoliko izvedbi s različitim brojem lopatica. Kao najučinkovitija pokazala se izvedba s tri lopatice, klasični Danski koncept te se ona najčešće i koristi. Odnosno, neparni broj lopatica u odnosu na parni pokazao se kao bolje rješenje zbog uravnoteženosti konstrukcije [2].



Slika 19. Izvedbe prema broju lopatica [21].

Vjetroturbinama s dvije lopatice potrebna je veća brzina vrtnje kako bi se razvila jednaka količina energije kao kod izvedbe s tri lopatice. Zbog povećanja brzine vrtnje povećava se i buka pa je ovakva izvedba manje popularna. Postoje i vjetroagregati s jednom lopaticom, ali takva se izvedba nije pokazala kao dobra zbog dodatnog povećanja brzine, a time i buke, za jednaku količinu energije [21].

Rotori s većim brojem lopatica najčešće se koriste na farmama za pogon pumpi na vodu, a zbog male brzine vrtnje imaju i malu učinkovitost. Primjeri takvih rotora su američke (Slika 20) s velikim brojem lopatica ili danske vjetrenjače (Slika 21) s četiri velike lopatice. Zbog male učinkovitosti i brzine vrtnje vrlo rijetko se upotrebljavaju kao vjetroagregati [21].



Slika 20. Američka vjetroturbina [22].



Slika 21. Danska vjetrenjača [23].

4.2.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje ili VSVO

Glavna značajka ovakve izvedbe je vertikalno postavljena os vrtnje. Budući da je rotor postavljen vertikalno nema potrebe za njegovim usmjeravanjem prema vjetru jer iz kojeg god smjera vjetar puše, vjetroagregat je jednako učinkovit. To je posebno korisno na lokacijama gdje je smjer puhanja vjetra promjenjiv [21].

VSVO nemaju potrebe za visokim stupom te se postavljaju bliže tlu zbog čega im je jednostavnije održavanje. Također, generator i ostala oprema mogu biti smješteni u podnožju čime je toranj manje opterećen. Negativna strana nižeg postavljanja je ta da su brzine vjetra na nižoj visini manje, a javljaju se i turbulencije pogotovo ako u okolici vjetroagregata postoje drugi objekti. Turbulencije uzrokuju niz problema kao što su pojava vibracija i brže trošenje ležajeva [21].

VSVO možemo podijeliti na Darrieusove i Savoniusove. Nijedna od njih danas nije u široj komercijalnoj upotrebi, a zadnje vrijeme sve češće se javljaju i novi koncepti vertikalnih vjetroturbina [21].

4.2.2.1. Darrieusova vjetroturbina

Osnovna izvedba ove vjetroturbine pojavila se 1927. godine. Francuski inženjer zrakoplovstva Georges Jean Marie Darrieus patentirao je vertikalnu vjetroturbinu (Slika 22) prema kojoj su kasnije nastale druge izvedbe [2].



Slika 22. Darrieusova vjetroturbina [24].

Oko rotirajućega vratila raspoređene su lopatice aerodinamičnog profila. Ovakva izvedba jednako je učinkovita, neovisno o smjeru vjetra, u odnosu na konvencionalne vjetroturbine. Brzina vrtnje ove izvedbe je uglavnom puno veća od brzine vjetra. Ovakvoj izvedbi vjetroturbine potrebna je pomoć pri pokretanju jer moraju postići određenu brzinu vrtnje prije nego što se počnu same vrtjeti. Pri malim brzinama Darrieusova turbina ima vrlo mali moment pa se vrlo lako zaustavlja zbog trenja u sustavu [2].

Osim vertikalnih izvedbi postoje i horizontalne izvedbe Darrieusove vjetroturbine (Slika 23) što uvelike olakšava i proširuje njihov spektar primjene. Prednost je u tome što su ležajevi bolje smješteni na konstrukciji i time su manje aksijalno opterećeni. Ovakvom izvedbom konstrukcija se smješta na određenu visinu na kojoj hvata jednoliko raspoređenu brzinu vjetra pa je time izbjegnut problem malih brzina na dijelu turbine koji se nalazi pri tlu. Negativan aspekt ove izvedbe jest nemogućnost hvatanja vjetra iz svih smjerova (kao i kod VSHO) pa se spektar njihove primjene smanjuje [2].



Slika 23. Horizontalna izvedba Darrieusove vjetroturbine [25].

4.2.2.2. Savoniusova vjetroturbina

Savoniusovu turbinu razvio je finski inženjer S. J. Savonius 1922. godine. Postoji mnogo raznih izvedbi ove vrste turbine, a u najjednostavnijoj se izvedbi sastoji od dvije polovice bubnja ili čašica učvršćenih u suprotnim smjerovima na središnju osovinu. Gledajući presjek odozgo, turbina ima oblik slova „S“ [21].

Moderne Savoniusove turbine razvile su se u naprednije izvedbe kod kojih su spiralno zakrenute lopatice po duljini. Kod takvih turbina dijelom se iskorištava i uzgon čime se povećala učinkovitost te smanjile vibracije [21].



Slika 24. Savoniusova vjetroturbina [26].

Ova vrsta turbine se koristi kada je cijena i pouzdanost bitnija od učinkovitosti kao što je to slučaj kod instrumenata za mjerenje brzine vjetra (anemometri), a koriste se i za pogon pumpi za vodu ili manjih generatora [21].

4.2.3. Male vjetroturbine

Granica nazivne snage ispod koje se vjetrojedinice mogu smatrati malima ne može se točno odrediti [7]. Postoje osnovne podjele sustava u kojem rade manje vjetroturbine [27]:

1. Prema načinu rada:
    - samostalni rad
    - kombinacija s drugim izvorima energije
2. Prema sustavima u kojem rade:
    - samostalna mreža
    - kombinacija s drugim pretvaračima energije (hibridni sustavi)
    - priključak na javnu elektromrežu
3. Prema namjeni:
    - proizvodnja električne energije za opće potrebe
    - crpljenje vode
    - opskrba električnom energijom navigacijskih, telekomunikacijskih i signalnih uređaja
    - ostale namjene kao što je desalinizacija morske vode [27].

Tablica 6. Prijedlog kategorizacije vjetroturbina [27].

Kategorija	**Snaga (kW)**	**Interval srednje brzine (m/s)**	**Izbor lokacije**
Mikro	< 1	< 5	Opažanje
Mini	1 - 10	5 - 6	Proračun
Male	10 - 100	6 - 7	Studija
Srednje	100 - 1000	7 - 8	Studija/mjerenje
Velike	>1000	>8	Studija/mjerenje

U tablici (6) dat je prijedlog kategorizacije vjetroturbina gdje interval srednje brzine predstavlja iznose srednje godišnje brzine na osi vjetroturbine ispod kojeg nije preporučljivo ugraditi vjetroturbine određene kategorije. Stupac izbora lokacije daje preporuku na postupak proračuna prilikom izbora. Za izbor lokacije za smještaj mikro vjetroturbine nije potrebno obavljati proračune potencijala vjetra, već je potrebno pribaviti mišljenje stručnjaka (meteorologa) te imati podatke opažanja u blizini mjesta njihovog postavljanja (Beaufortova ljestvica, ruža vjetrova). Za izbor lokacije mini vjetroturina potrebno je napraviti proračun potencijala vjetra. U slučaju malih vjetroturbina, potrebno je obaviti studiju, a kod srednjih i većih vjetroturbina potrebno je pored studije obaviti i najmanje jednogodišnja mjerenja potencijala vjetra na mikrolokaciji [27].



Slika 25. Upotreba malih vjetroturbina za opskrbu električnom energijom kuće [27].

Kod malih vjetroagregata koriste se uglavnom rotori s više lopatica za pumpanje vode i zalijevanje. Rotori s više lopatica imaju manju aerodinamičku učinkovitost, ali zbog veće površine lopatica pogodni su za manje brzine vjetra, odnosno omogućuju veći zaokretni moment za pokretanje vjetragregata (slika 26) [2].



Slika 26. Upotreba malih vjetroturbina za crpljenje vode [28].

Ove vjetroturbine su samokretne, sporohodne, izdržljive i jednostavne za izradbu i održavanje, a zbog toga i jeftinije, ali uz relativno niži koeficijent iskorištenja energije vjetra [7].

„Na svjetskom tržištu se može primijetiti značajno povećana ponuda malih vjetroagregata upravo namijenjenih urbanim i naseljenim sredinama. Takvi vjetroagregati se koriste za postavljanje na kuće, na stupove javne rasvjete, u dvorišta, a kombinaciju svega toga je moguće vidjeti u nekim novim naseljima koja teže energetskoj neovisnosti od elektroenergetske mreže“ [29].

I dok se veliki vjetroagregati koriste gotovo isključivo u svrhu gradnje većih ili manjih vjetroelektrana čija je prvenstvena namjena prodaja električne energije krajnjem kupcu, uz određene iznimke od pravila, mali vjetroagregati imaju i mogu imati puno veću slobodu i način primjene [29].

Prednosti ugradnje malih vjetroagregata u urbanim i naseljenim sredinama su brojne. Potrošnja na mjestu proizvodnje, lagana instalacija, privatne investicije, manje opterećenje elektroenergetske mreže i relativno mala ukupna ulaganja su oni detalji koje mali vjetroagregati dijele s krovnim fotonaponskim instalacijama (slika 27). Prednost im je također i veća mogućnost instalirane snage po jedinici površine, posebno u slučaju vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje. Isto tako postoje mjesta gdje se zbog omjera sunčanih dana i količine vjetra daleko više isplati koristiti energiju vjetra, nego Sunca.

Na mjestima gdje ima puno i jednog i drugog izvora energije, solarna energija se može koristiti za grijanje/hlađenje prostora pomoću daleko jeftinijih instalacija sa solarnim kolektorima topline, a električna energija se istovremeno može proizvoditi iz malih vjetroagregata na površini krova ili u dvorištu [30].



Slika 27. Hibridni sustav [31].

5. Potencijal energije vjetra u Sjeverozapadnoj Hrvatskoj

„Mjerenja smjera i brzine vjetra na području Hrvatske provode se najvećim dijelom u okviru rada mreže postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Na tim postajama su anemometri postavljani poštujući, u maksimalno mogućoj mjeri, preporuke Svjetske meteorološke organizacije (WMO, 2008). Preporuka je WMO-a da se uređaji za mjerenje brzine i smjera vjetra postavljaju na 10 m visine iznad otvorenog prostora. Pod otvorenim prostorom podrazumijeva se područje u kojem razmak između instrumenta za mjerenje smjera i brzine vjetra i okolnih prepreka iznosi najmanje deseterostruko više od visine tih prepreka. Međutim, područje bez prepreka vrlo je rijetko na raspolaganju za postavljanje anemometarskog stupa. Stoga se često moraju iskoristiti lokacije postaja za koje se može dobiti lokacijska dozvola i na kojima je moguće angažirati pouzdanog motritelja, pri čemu se nastoji što više zadovoljiti zahtjeve WMO-a“ [32].

Jedan dio mjernih sustava za mjerenje brzine i smjera vjetra vlasništvo su ustanova izvan meteorološke službe koje su imale ili imaju hitne (povremene ili stalne) i posebne potrebe za mjerenim podacima brzine i smjera vjetra. Takve postaje čine investitorsku mrežu postaja, a njihovo opsluživanje, od uspostave mjerenja do verifikacije podataka, obavlja DHMZ [32].

Prema Bajiću i drugima (2016) literatura (33), da bi se pravilno ocijenilo djelovanje vjetra na konstrukcije nužno je da podaci mjerenja brzine i smjera vjetra koji se primjenjuje pritom zadovoljavaju sljedeće uvjete [33]:

- da su izmjereni instrumentima koji zadovoljavaju propise Svjetske meteorološke organizacije i Državnog hidrometeorološkog zavoda, te kao rezultat daju 10-minutne prosječene vrijednosti brzine vjetra,
- da je niz izmjerenih podataka na svakoj od lokacija potpun, homogen i dug najmanje 10 godina,
- da je prostorna raspodjela lokacija mjerenja takva da omogućava uvid u sve raznolikosti strujnog režima nekog područja [33].

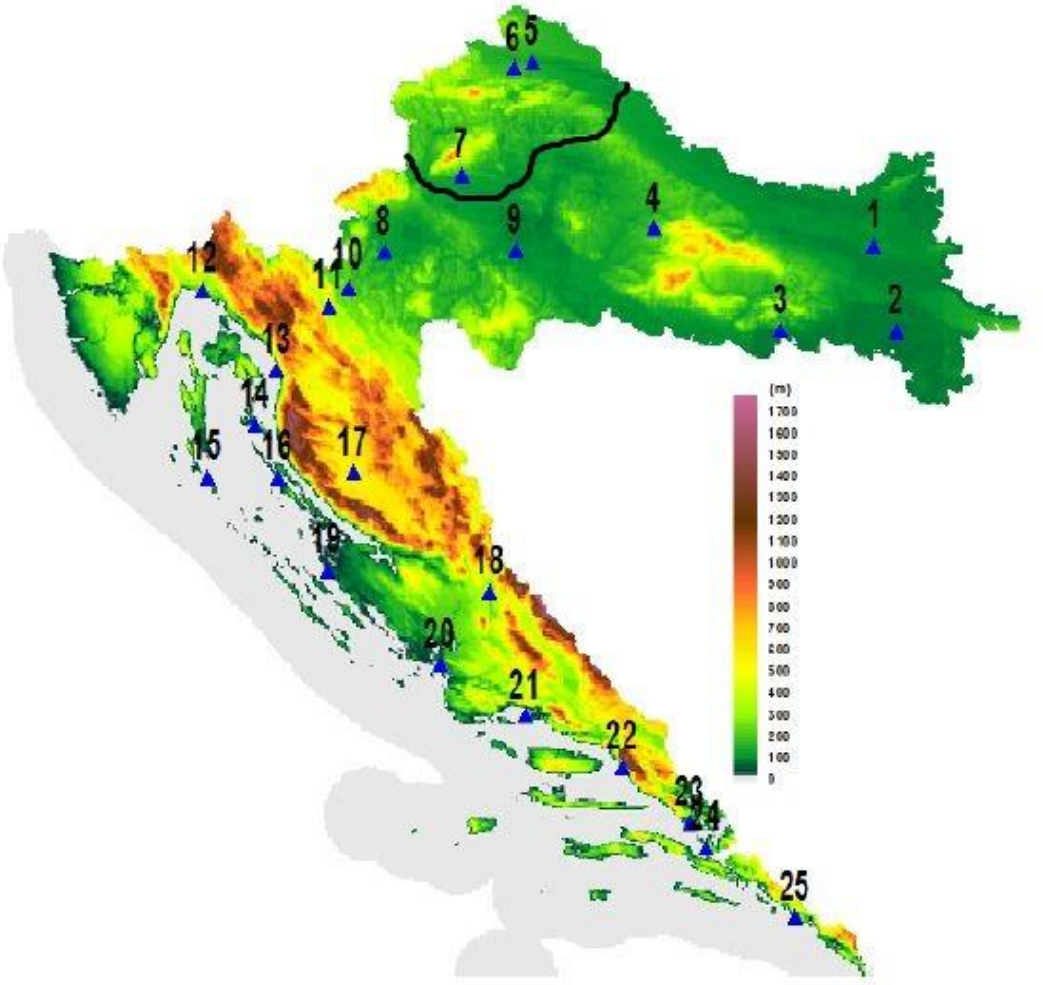
Položaj Hrvatske u blizini alpskog masiva na sjeverozapadu, Dinarida duž jadranske obale i Panonske nizine u sjeveroistočnom dijelu zemlje uzrok je vrlo složenom strujnom režimu. Specifične značajke strujnog režima u pojedinim dijelovima Hrvatske čine potrebu za poznavanjem vremenske i prostorne promjenjivosti brzine i smjera vjetra još značajnijom [33].

Početkom devedesetih godina u osnovnu se mrežu meteoroloških postaja uključuju postupno i anemografi s mogućnošću sekundnog uzorkovanja. Posebno je na tzv. "investitorskim" postajama uspostavljano mjerenje smjera i brzine vjetra koje omogućava dobivanje srednjih brzina i u intervalima manjim od jednog sata. U skladu s postojećim euronormama upravo su ti podaci nužni za proračun referentne brzine vjetra kao podloge za proračun opterećenja konstrukcija vjetrom [33].

Zbog jake ovisnosti prinosa energije (a samim time i ekonomske isplativosti) o brzini vjetra, potrebna su točna mjerenja vjetra na samoj lokaciji. Brzina vjetra je osnovni parametar od kojega se kreće pri projektiranju svih vjetroagregata koji će se nalaziti na određenoj lokaciji, njihovog broja i prostornog razmještaja. Brzina vjetra također služi kao polazna točka za sve proračune o ekonomskoj isplativosti i proizvodnji energije. Za određenu lokaciju bitno je poznavati i smjerove iz kojih puše vjetar (ruža vjetrova), da bi se odredio optimalan raspored vjetroagregata kako bi maksimalno iskoristili vjetar iz svih smjerova. Druga najvažnija karakteristika vjetra, osim srednje brzine, je i raspodjela brzine vjetra. Weibullova krivulja je alat koji nam služi za realističnu raspodjelu brzine vjetra, odnosno daje vjerojatnost pojave neke brzine vjetra tijekom nekog vremenskog perioda [19].

Ostali bitniji podatci o vjetru su dugoročna gustoća zraka i intenzitet turbulencije vjetra. Sami po sebi ne utječu na proizvodnju energije iz vjetra, ali utječu pri određivanju opterećenja na lopatice rotora i na očekivani vijek trajanja samog vjetroagregata [19].

Za daljnju obradu odabrani su podaci s 3 lokacije, Varaždin, Čakovec i Zagreb-Maksimir, na području sjeverozapadne Hrvatske (Slika 28). Postaje imaju zajedničko razdoblje dugo najmanje 5 godina. Odabrano razdoblje 2005-2009. koje je zajedničko svim postajama omogućuje usporedbu rezultata.



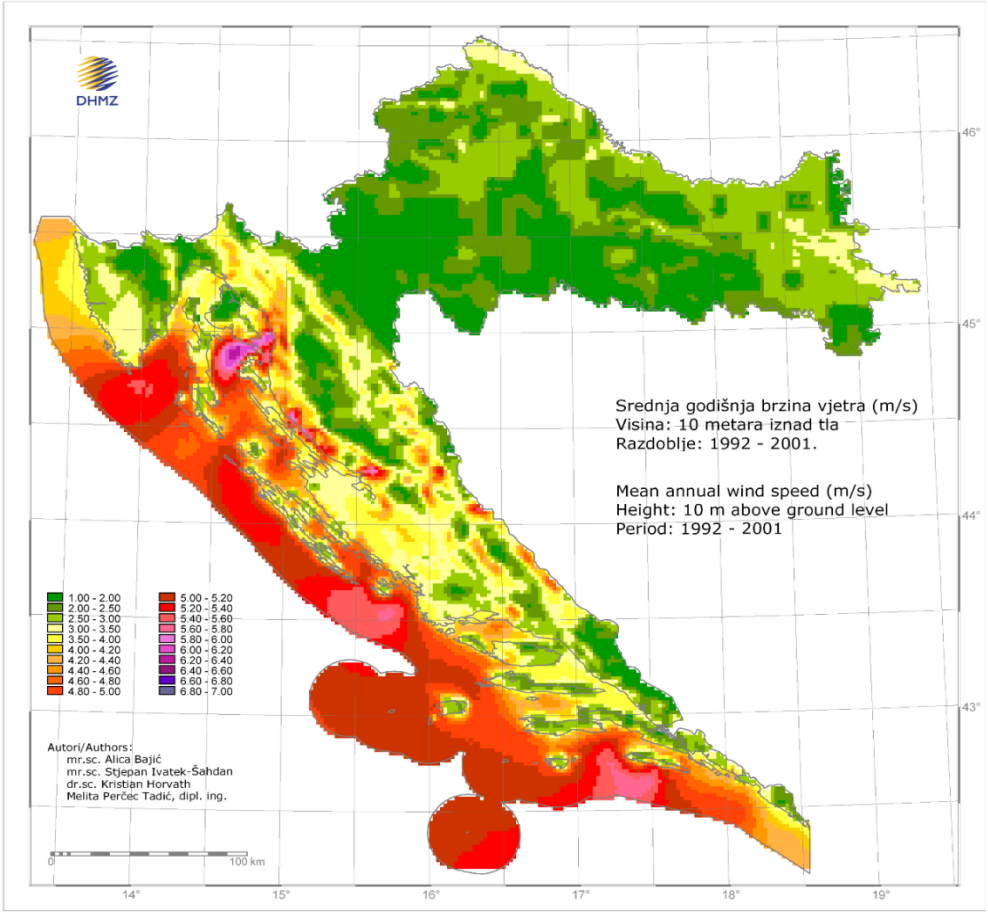
Slika 28. Zemljopisni položaj meteoroloških postaja Varaždin (600 m), Čakovec (500 m) i Zagreb-Maksimir (700 m). Boja označava visinu terena [32].

Tablica (7) prikazuje srednje godišnje brzine vjetra (m/s) za 3 postaje koje se nalaze u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Može se zaključiti da se prosječna srednja godišnja brzina vjetra kreće oko 2 m/s, što je vrlo malo. Naime, vjetroagregat se pokreće kada brzina vjetra poraste iznad 3 m/s. Zbog toga je potencijal energije vjetra u SZ Hrvatskoj vrlo mali, ali da bi se mogla donijeti bolja procjena, potrebno je provesti detaljna istraživanja. Također, srednju godišnju brzinu vjetra 10 m i 80 m iznad tla, može se očitati iz *Atlasa vjetra Hrvatske* za razdoblje od 1992. do 2001. godine (Slika 29 i 30). Prema *Atlasu vjetra Hrvatske* brzine vjetra 10 m iznad tla kreću se oko 2 m/s, a 80 m iznad tla oko 4 m/s i to je relativno slabi potencijal energije vjetra. Treba uzeti u obzir da se najveće brzine vjetra pojavljuju u proljeće i na jesen. Prema tome, moguće je

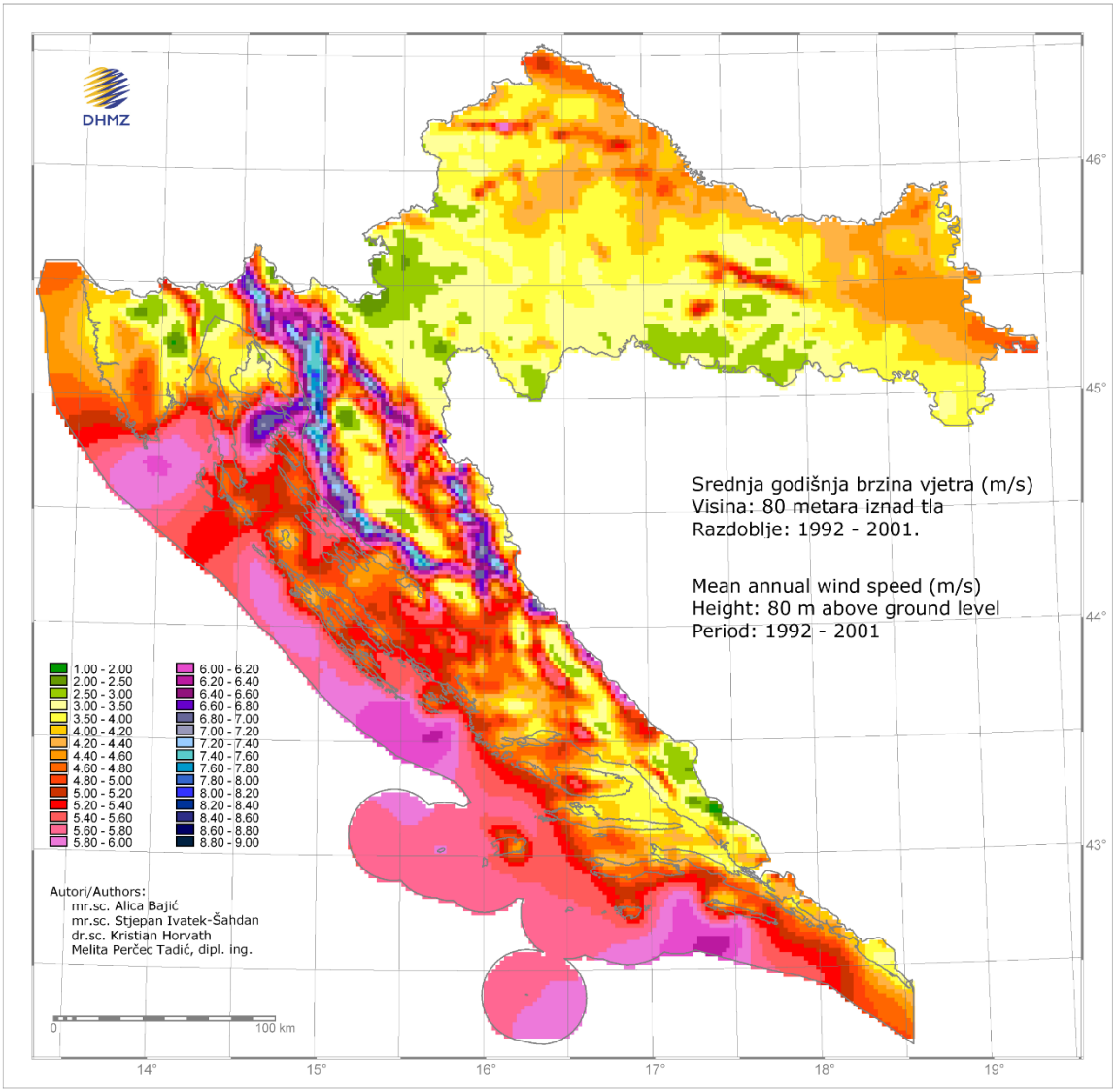
korištenje manjih vjetroagregata koji koriste uglavnom rotor s više lopatica jer su pogodni za manje brzine vjetra, odnosno omogućuju veći zaokretni moment za pokretanje vjetragregata.

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti srednje brzine vjetra (m/s) u razdoblju 2005. – 2009. godine [32].

		Od 2005. do 2009. godine
Postaja	Visina anemometra (m)	Srednje brzine vjetra w_{sr} (m/s)
Čakovec	14	2,39
Varaždin	10	2,04
Zagreb-Maksimir	10	1,19



Slika 29. Srednje godišnje brzine vjetra 10 m iznad tla za razdoblje od 1992. do 2001. godine [34].



Slika 30. Srednje godišnje brzine vjetra 80 m iznad tla za razdoblje od 1992. do 2001. godine [34].

5.1. Primjer izračuna potencijala vjetra na području Čakovca, Varaždina i Zagreba

Zbog neujednačenosti vjetra, vjetrenjače se projektiraju na osnovi srednje brzine vjetra. Kao numerički primjer uzeto je područje Čakovca, Varaždina i Zagreba i prikazan je proračun snage vjetra na temelju izmjerenih srednjih brzina vjetra (m/s) za razdoblje od 2005. godine do 2009. godine (Tablica 7).

Kao što je već navedeno u poglavlju 4.1. energija vjetra može se izračunati pomoću izraza, gdje je raspoloživa *snaga vjetrenjače* proporcionalna trećoj potenciji brzine vjetra i drugoj potenciji promjera kola vjetrenjače:

$$N = \frac{d^2 \cdot w^3}{k} \; [kW] \tag{10}$$

gdje je:

N – snaga vjetrenjače [kW],

d – promjer rotorskog kola [m],

w – brzina vjetra [m/s],

k – koeficijent snage.

Odatle slijedi da se pri istom promjeru kola vjetrenjače, a pri dvostrukoj brzini vjetra, postiže po kubnom zakonu osam puta veća snaga.

Koeficijent snage (k) vjetrenjače sastoji se od dva parcijalna koeficijenta koji uzimaju u obzir termodinamičke i hidrodinamičke uvjete [20]:

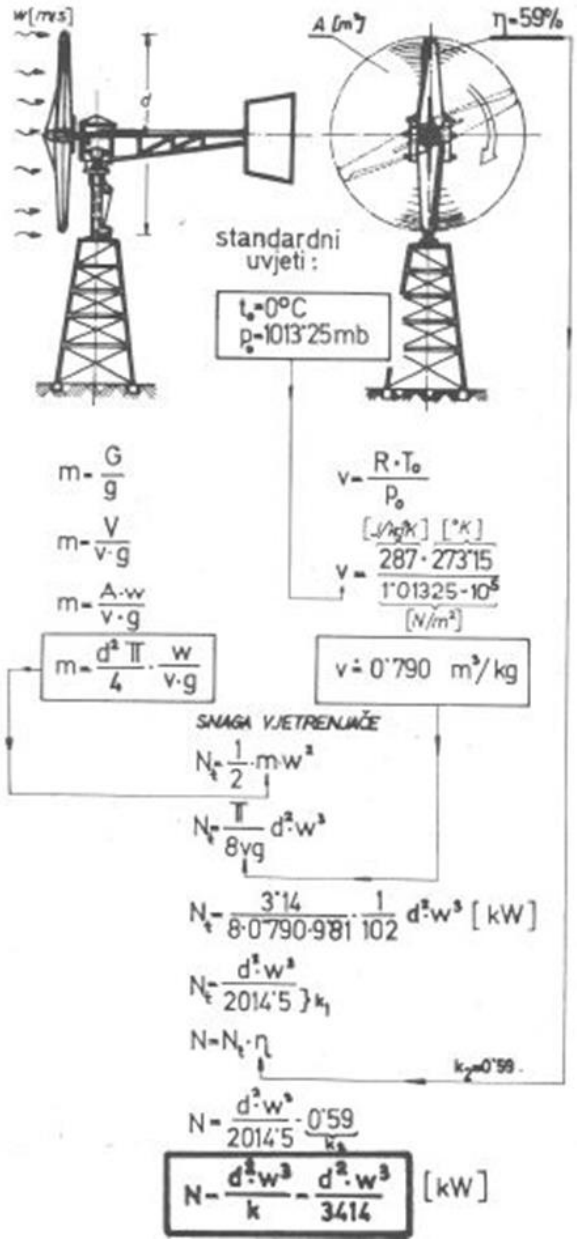
$$k = k_1 \, x \, k_2 \tag{11}$$

gdje je:

$k_1 = f\,(p_0, t_0)$ – termodinamički koeficijent ovisan o stanju okolne atmosfere,

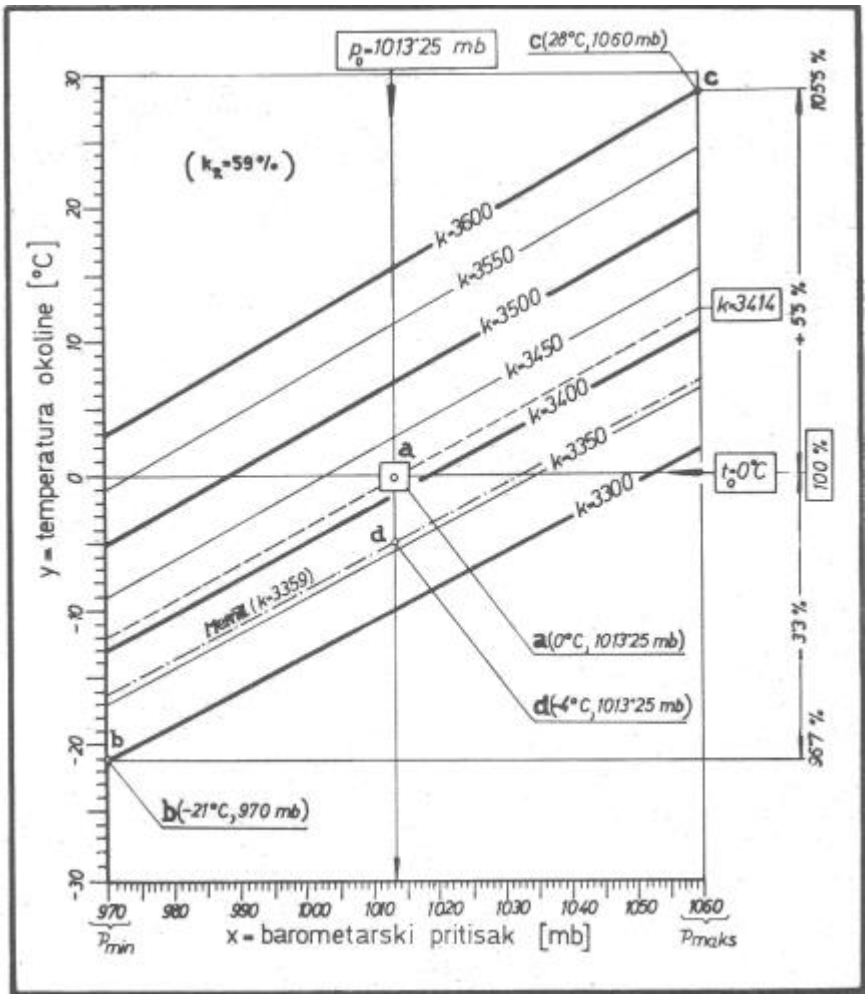
$k_2 = f\,(\eta)$ – hidrodinamički koeficijent ovisan o stupnju djelovanja vjetrenjače čija je teoretska maksimalna vrijednost 59% [20].

Za proračun snage vjetrenjače korišten je *koeficijent snage k* koji pri standardnim uvjetima (temperatura = 0, tlak zraka = 1013,25 mb) iznosi 3414. Iznos koeficijenta snage preuzet je iz literature [20] *Raspoloživi vjetreni potencijal na području Zagreba* (Slika 31).



Slika 31. Izvod koeficijenta snage (k) [20].

Pregled i područje koeficijenta snage (k) u ovisnosti o temperaturi i tlaku zraka u našim klimatskim uvjetima prikazan je na slici 32 [20].



Slika 32. Ovisnost koeficijenta (k) o tlaku i temperaturi [20].

Zbog jednostavne komparacije:

- promjer kola vjetrenjače (d) iznosi jedan metar,
- meteorološki uvjeti uzeti su prema literaturi [20] gdje je temperatura 0, a tlak zraka 1013,25 mb iako se prema radu mogu uzeti i neki drugačiji uvjeti.

Satna snaga vjetra za arbitrarno odabrane lokacije bit će:

- Za područje Čakovec srednja brzina vjetra iznosi *2,39 m/s* iz čega slijedi da je satna snaga vjetra:

$$N_{\check{C}akovec} = \frac{d^2 \; x \; w_{sr}^3}{3414},$$

$$N_{\check{C}akovec} = \frac{1^2 \; x \; 2{,}39^3}{3414},$$

$$N_{\check{C}akovec} = 0{,}0040 \; [kW]. \qquad (12)$$

- Za područje Varaždin srednja brzina vjetra iznosi *2,04 m/s* iz čega slijedi da je satna snaga vjetra:

$$N_{Varaždin} = \frac{1^2 \; x \; 2{,}04^3}{3414},$$

$$N_{Varaždin} = 0{,}0025 \; [kW]. \tag{13}$$

- Za područje Zagreb srednja brzina vjetra iznosi *1,19 m/s* iz čega slijedi da je satna snaga vjetra:

$$N_{Zagreb} = \frac{1^2 \; x \; 1{,}19^3}{3414},$$

$$N_{Zagreb} = 0{,}0005 \; [kW]. \tag{14}$$

Proračun energije vjetra obavljen je metodom aritmetičke srednje vrijednosti brzine te se dobiva energija kako slijedi:

$$E_{sr} = 24 \; x \; N_{sr},$$

$$E_{sr} = 24 \; x \; \frac{d^2 \; x \; w_{sr}^3}{3414},$$

$$E_{sr} = \frac{24}{3414} \; x \; d^2 \; x \left[\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} w_i \right]^3 \; [kWh], \tag{15}$$

$$E_{sr} = \frac{d^2}{142} \; x \; w_{sr}^3,$$

gdje je:

E_{sr} – energija u jednom danu (kWh),

N_{sr} - satna snaga na osnovi srednje brzine (kW),

w_{sr} – srednja brzina vjetra za period od 24 sata (m/s),

w_i – izmjerena satna brzina vjetra (m/s),

d – promjer rotorskog kola (m),

24 – vremensko razdoblje od jednog dana [20].

Energija vjetra u jednom danu za područje:

- Čakovec:

$$E_{sr} = \frac{1}{142}\ x\ 2{,}39^3,$$

$$E_{sr} = 0{,}0961\ [\text{kWh}].$$

- Varaždin:

$$E_{sr} = \frac{1}{142}\ x\ 2{,}04^3,$$

$$E_{sr} = 0{,}0598\ [\text{kWh}].$$

- Zagreb:

$$E_{sr} = \frac{1}{142}\ x\ 1{,}19^3,$$

$$E_{sr} = 0{,}0119\ [\text{kWh}].$$

Godišnja ostvarena energija metodom srednje vrijednosti brzine vjetra uz promjer kola od samo jedan metra za područje:

- Čakovec:

$$E_{god} = 0{,}0961\ \left[\frac{kWh}{dan}\right]\ x\ 365\ \left[\frac{dana}{god.}\right],$$

$$E_{god} \approx 35\ \left[{kWh}/{god.}\right].$$

- Varaždin:

$$E_{god} = 0{,}0598\ \left[\frac{kWh}{dan}\right]\ x\ 365\ \left[\frac{dana}{god.}\right],$$

$$E_{god} \approx 22\ \left[{kWh}/{god.}\right].$$

- Zagreb:

$$E_{god} = 0{,}0119\ \left[\frac{kWh}{dan}\right]\ x\ 365\ \left[\frac{dana}{god.}\right],$$

$$E_{god} \approx\ 4\left[kWh/_{god.}\right].$$

Ovu energiju bi sukladno literaturi [20] trebalo uvećati za 40% pa bi energija vjetra za Čakovec, Varaždin i Zagreb bila:

$$E_{\check{C}akovec} = 49\ \left[kWh/_{god.}\right],$$

$$E_{Varaždin} \approx 31\ \left[kWh/_{god.}\right],$$

$$E_{Zagreb}\ \approx 6\ \left[kWh/_{god.}\right].$$

Odnosno, moglo bi se objasniti da je to energija od:

$$E_{\check{C}akovec} = 49\ \left[kWh/_{m^2}, god.\right],$$

$$E_{Varaždin} \approx 31\ \left[kWh/_{m^2}, god.\right],$$

$$E_{Zagreb}\ \approx 6\ \left[kWh/_{m^2}, god.\right],$$

budući da je promjer kola jedan metar.

S obzirom da se dosadašnji proračun energije odnosi na promjer vjetrenog kola od 1 m i ako bi se uzeo stvarni promjer kola od 50 m, onda je njegova površina rotacije:

$$A = \frac{d^2\ x\ \pi}{4}, \tag{16}$$

$$A = \frac{50^2\ x\ \pi}{4},$$

$$A = 1962{,}5\ [m^2].$$

Ako se sada energija vjetra za Čakovec, Varaždin i Zagreb izračuna za stvarni promjer kola od 50 m dobiva se energija od:

$$E_{Čakovec} = 49 \left[{kWh}/{m^2, god.} \right] \; x \; 1962{,}5 \; [m^2],$$

$$E_{Čakovec} = 96\,162{,}5 \left[{kWh}/{god.} \; po \; jednom \; vjetrenom \; kolu \right],$$

$$E_{Varaždin} = 60\,837{,}5 \left[{kWh}/{god.} \; po \; jednom \; vjetrenom \; kolu \right],$$

$$E_{Zagreb} = 11\,775 \left[{kWh}/{god.} \; po \; jednom \; vjetrenom \; kolu \right].$$

Budući da se vjetroturbina ne postavlja na lokacije s tako malim brzinama ovo je samo ilustracija metodološkog postupka. Naime, mogla bi se odabrati sporohodna vjetroturbina, kako je već ranije prikazano, pa bi i takve lokacije bile energetski pokrivene brzinom vjetra, ali uz znatno manje ekonomske (profitabilne) efekte.

6. Ekološke karakteristike i doprinos zaštiti okoliša

Pri proizvodnji električne energije u termoenergetskim objektima korištenjem fosilnih goriva dolazi do emisije polutanata nastalih u procesu spaljivanja, dok proizvodnja električne energije u vjetroenergetskim postrojenjima nije popraćena ovom štetnom pojavom za ljude i okoliš [7].

Količina polutanta ovisi o vrsti goriva i tipu termoenergetskog postrojenja. Za ugljen te su količine znatno veće nego za prirodni plin, a mijenjaju se ovisno o izvedbi i starosti samog postrojenja. Osim onečišćenje zraka, kao negativna posljedica izgaranja, javlja se potrošnja vode tj. zagrijavanje vode u rashladnom djelu termopostrojenja [7].

6.1. Aspekti buke

Postoje aerodinamička i mehanička buka. Pri radu vjetroturbina nastaju šumovi uslijed opstrujavanja zraka oko lopatica i stupa (aerodinamička buka) te šumovi pri gibanju zupčanika (mehanička buka) [7].

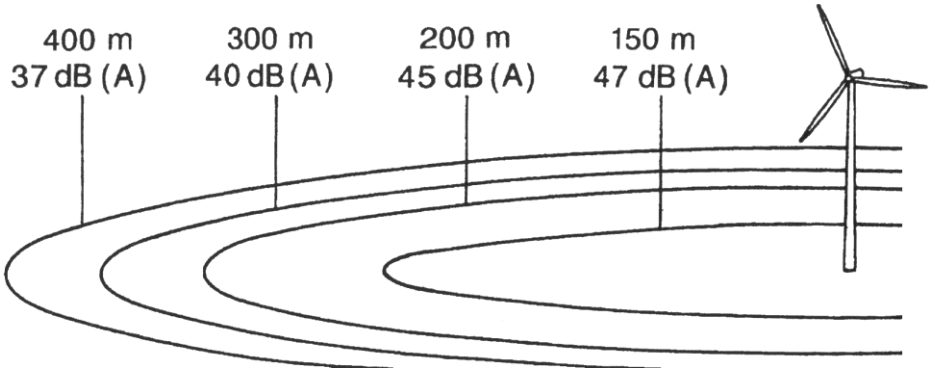
Jakost šuma koji nastaje pri radu vjetroturbina ovisi o:

- izvedbi i veličini vjetroagregata,
- brzini vjetra,
- udaljenosti od vjetroagregata,
- šumova u prostoru (pozadinski šumovi) [7].

Smanjenje buke prioritetna je zadaća velikog dijela istraživačkih timova proizvođača vjetroturbina. Najveće tvrtke postigle su i najbolje rezultate, tako da ističu nisku razinu buke koju proizvode njihovi vjetroagregati. Tome naročito pridonose posebno oblikovane lopatice te vjetroagrregati izvedeni bez zupčastog multiplikatora. Ova značajka u radu vjetroturbine posebno je važna za jedinicu ili manji broj vjetroturbinskih jedinica koji rade u blizini naselja. Relativnim umanjenjem buke iz

vjetroturbina može se smatrati i prirodni šum koji se čuje pri većim brzinama vjetra, a koji je razmjerno veći od buke vjetroturbine [7].

Udaljenošću od vjetroturbina intenzitet buke opada kao što je prikazano na slici 33 [35].



Slika 33. Intenzitet buke vjetroturbine na raznim udaljenostima od stupa vjetroturbine [35].

Prema danskim propisima, minimalna udaljenost pojedinačne turbine od najbliže stambene kuće mora biti 200 m, što odgovara nivou buke od 45 dB, dok je za vjetroelektrane ta udaljenost 500 m [7].

Pažljivim odabirom lokacije, smještaja vjetroturbina na lokacije dovoljno udaljene od naselja i drugih objekata, moguće je izbjeći posljedice uslijed buke [7].

6.2. Elektromagnetske smetnje

Vjetroturbina može prouzročiti smetnje kod prijama radio i mikro valova koji se koriste za prijenos radio-televizijskih, komunikacijskih i navigacijski signala. Zbog refleksije elektromagnetskih signala na lopaticama vjetroturbine može doći do neželjene pojave interferencije, pri čemu je efekt izraženiji za metal koji jako reflektira elektromagnetske valove, nego za staklo-plastiku i drvo [7].

Pri odabiru lokacije rada vjetropostrojenja potrebno je izbjegavati linije prijenosa između odašiljača i prijemnika, odnosno, potrebno je vjetropostrojenja smještati na propisane udaljenosti od pojedinih objekta [7].

6.3. Vizualna degradacija prostora

Vizualni utjecaj vjetroenergetskog postrojenja na okolinu ovisi o percepciji promatrača i krajoliku u kojem je smješteno postrojenje te vizualnim značajkama postrojenja (broju, veličini i rasporedu vjetroagregata, boji, izvedbi stupa i sl.). Specifično vjetroenergetsko postrojenje (određenog broja i veličine vjetroturbina) vizualno će utjecati više ili manje na okolinu ovisno upravo o obilježjima okoline unutar koje je smješteno. Vjetroturbine, ovisno o nazivnoj snazi, imaju visinu stupa od 30 do 65 m te su stoga vidljive u širem području. Ovisno o vrsti, veličini, boji te broju i raspredu vjetroagregata kao i otvorenosti prostora, biti će više ili manje uočljive [7].

Lokalno stanovništvo tj. javno mišljenje znatno utječe na prihvaćanje odnosno odbijanje vjetroenergetskog postrojenja. Stoga pri izgradnji pristupnog puta i putova između vjetroelektrana treba voditi račune pri odabiru mjesta rada postrojenja, kao i pri odabiru veličine jedinica te boje lopatica i stupa [7].

6.4. Efekt erozije tla

Prilikom građevinskih radova pri izgradnji vjetroelektrana dolazi do erozije tla. Zbog toga je potrebno prilikom izgradnje pristupnog puta i putova između vjetroagregatskih jedinica voditi račune o ovom efektu i svesti ga na najmanju moguću mjeru [7].

6.5. Rizici za ptičje vrste

Utjecaj vjetropostrojenja na životinjski svijet jako je malen, možda je tek nešto veći tijekom same izgradnje elektrane, dok se pri njezinom radu može govoriti tek o utjecaju na ptice [7].

Utjecaj na ptice može se razmatrati kroz direktni utjecaj kao što je rizik od sudara te indirektni utjecaj što obuhvaća vizualno i zvučno ometanje ptica. Što se tiče ptica selica, one uglavnom lete na visinama višim od visine turbine, ali se preporuča isključenje

lokacija koje se nalaze na migracijskim putevima ptica. Također, preporuča se i isključenje lokacija koje su poznate kao stanište većeg broja ptica. Istraživanja su pokazala da je utjecaj vjetroelektrana i dalekovoda jednak na ptičje vrste [7].

6.6. Prenamjena zemljišta

Pri izboru potencijalne lokacije za rad vjetroelektrana isključuju se područja koja su najmenjena izgradnji stambenih i gospodarskih objekata, odnosno područja šredviđena za gradove i naselja te područja za izgradnju turističkih objekata i za djelatnosti koje nije moguće nesmetano obavljati u neposrednoj blizini vjetroelektrana [7].

Vjetroelektrane obično su smještene na neobradivim površinama tj. površnima koje su neprikladne za druge djelatnosti ili na livadama, pašnjacima i poljoprivrednom zemljištu. Također, one zauzimaju znatno manje površine u odnosu na druga energetska postrojenja istog kapaciteta (Tablica 8) [7].

Tablica 8. Prosječna površina potrebna za proizvodnju 1 GWh električne energije kod različitih tipova elektrana [7].

Tip elektrane	*Površina potrebna za proizvodnju 1 GWh električne energije [m^2]*
Vjetroelektrana	1 335
Termoelektrana	3 642
Solarna termoelektrana	3 561
Fotonaponska elektrana	3 273

6.7. Nastali otpad

Tijekom građenja vjetroelektrana nastaje neopasni i opasni otpad od ostataka građevnog materijala i ambalaže, te komunalni otpad kao posljedica rada i boravka osoba na gradilištu. Odlaganjem otpada na lokaciji zahvata može doći do nepovoljnih utjecaja na tlo, vode i okoliš u cjelini. Za sve vrste otpada koje će nastajati tijekom korištenja treba osigurati postupanje sukladno *Zakonu o otpadu* i na temelju njega usvojenim *Pravilnikom o vrstama otpada* i *Pravilniku o gospodarenju otpadom* [16].

Što se tiče raspremanja vjetroelektrane, ono uključuje [7]:

- rastavljanje i otpremanje vjetroturbinskih generatora,
- uklanjanje temelja i pomoćnih objekata,
- uređenje zemljišta.

Generatori koji se više ne upotrebljavaju rastavljaju se na osnovne dijelove i otpremaju na odgovarajuće lokacije. Pojedine dijelove moguće je ponovno upotrijebiti, odnosno reciklirati određene materijale. Kao otpadni materijal javlja se i ulje za podmazivanje i ulje iz hidrauličkih sustava koje je potrebno skupiti te se može iskoristiti kao gorivo u termoenergetskim postrojenjima. Uređenje zemljišta, nakon uklanjanja svih vjetroelektrana, može se postići sadnjom prikladnog raslinja [7].

7. Zaključak

Cilj ovoga rada bio je analizirati potencijal energije vjetra na području sjeverozapadne Hrvatske. Za procjenu snage vjetra korišteni su mjereni podaci meteoroloških postaja na tri arbitrarno odabranim lokacijama, Čakovec, Varaždin i Zagreb. Postaje imaju zajedničko razdoblje pet godina od 2005. do 2009. godine. Srednja brzina vjetra, 10 m iznad tla, za područje Čakovec iznosi 2,39 m/s, Varaždin 2,04 m/s i Zagreb 1,19 m/s. Korištenjem tih podataka obavljen je proračun energetskog potencijala, metodom srednje vrijednosti brzine vjetra uz promjer kola od jedan metra, za sve tri lokacije. Prema tome, godišnja ostvarena energija, uvećana za 40 %, za područje Čakovec iznosi 49 kWh/god., Varaždin 31 kWh/god. i Zagreb 6 kWh/god. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da je za područje sjeverozapadne Hrvatske potencijal energije vjetra relativno slabi. Također, zbog relativno malih brzina vjetra postoji mogućnost korištenja sporohodne vjetroturbine, ali uz znatno manje ekonomske efekte.

Brzina vjetra je osnovni parametar od kojega se kreće pri projektiranju svih vjetroagregata koji će se nalaziti na lokaciji, njihovog broja i prostornog razmještaja. Da bi mogli donijeti bolju procjenu bitno je poznavati smjerove iz kojih puše vjetar (ruža vjetrova) te raspodjelu brzine vjetra. Ostali bitniji podatci o vjetru su dugoročna gustoća zraka na lokaciji i intenzitet turbulencije vjetra na lokaciji koji utječu na određivanje opterećenja na lopatice rotora i na očekivani vijek trajanja samog vjetroagregata.

Popis literature

1. Jerkić E. *Energija vjetra – povijest*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/povijest. Datum pristupa: 15.05.2016.
2. Vinković I. *Diplomski rad*. Dostupno na: http://www.cadlab.fsb.hr/download/studentski_projekti/1247138215-diplomskiradingevinkovic.pdf. Datum pristupa: 15.05.2016.
3. Jerkić E. *Energija vjetra u energetici*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/energija-vjetra-u-energetici. Datum pristupa: 15.05.2016.
4. Sawyer S, Rave K, Birol F. *Global wind report 2015*. Dostupno na: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf. Datum pristupa: 15.05.2016.
5. Corbetta G, Mbistrova A, Ho A, Pineda I, Ruby K. *Wind in power, 2015 European statistics*. Dostupno na: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf. Datum pristupa: 16.05.2016.
6. Jerkić L. *Popis trenutačno najvećih vjetroelektrana u Europi*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/aktualno/1481-popis-trenutacno-najvecih-vjetroelektrana-u-europi. Datum pristupa: 16.05.2016.
7. Horvath L, Pilić-Rabadan Lj, Milas Z, Klarin B, Sansević-Novaković M, Majstrović M, Bajić A, Vujčič R, Krneta M, Petrinović M, Jurišić N, Hrastnik B, Pešut D, Stančić L. *Enwind program korištenja energije vjetra*. Zagreb: Energetski institut „Hrvoje Požar“; travanj 1998. str. 41-42.
8. Jerkić E. *Vjetroelektrane u Hrvatskoj 2014*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/aktualno/1729-vjetroelektrane-u-hrvatskoj-2014. Datum pristupa: 18.05.2016.
9. Mesić M. *Godišnji izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj*. Dostupno na: https://www.hops.hr/wps/wcm/connect/72c7189f-f39e-491f-988c-ac0bc34dd4e6/HOPS+-+Godi%C5%A1nji+izvje%C5%A1taj+o+proizvodnji+VE+u+HR+za+2015.pdf?MOD=AJPERES. Datum pristupa: 18.05.2016.

10. Jerkić L. *EWEA-in pogled na Hrvatsko tržište vjetroelektrana*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/hrvatska-i-regija/1564-ewea-in-pogled-na-hrvatsko-trziste-vjetroelektrana. Datum pristupa: 18.05.2016.
11. Lozić S. *Vjetar*. Dostupno na: http://www.unizd.hr/Portals/6/nastavnici/Sanja%20Lozic/Klima%204.pdf. Datum pristupa: 20.05.2016.
12. Lozo M. *Maturalni rad iz geografije – Vjetrovi*. Dostupno na: http://atlas.geog.pmf.unizg.hr/e_skola/geo/maturalni/vjetrovi/vjetrovi.html. Datum pristupa: 20.05.2016.
13. Dostupno na: http://conversus.hr/?page_id=103. Datum pristupa: 20.05.2016.
14. *Beaufortova ljestvica vjetra*. Dostupno na: http://www.wsurf.net/vrijeme-beaufort.php. Datum pristupa: 20.05.2016.
15. *Energija vjetra*. Dostupno na: http://www.eko.zagreb.hr/default.aspx?id=84. Datum pristupa: 20.05.2016.
16. Tomašković L. *Utjecaj vjetroelektrana na okoliš*. Dostupno na: https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A123/datastream/PDF/view. Datum pristupa: 21.05.2016.
17. *Obnovljivi izvori energije / Energija vjetra*. Dostupno na: http://www.tehno-dom.hr/obnovljivi-izvori-energije/vjetar. Datum pristupa: 21.05.2016.
18. Vukić P. *Obrada i analiza mjerenih podataka za vjetar u urbanoj sredini*. Dostupno na: http://www.ieee.hr/_download/repository/DR10PeroVukic.pdf. Datum pristupa: 21.05.2016.
19. Jerkić L. *Moderni vjetroagregati i pretvorba energije*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/moderni-vjetroagregati-i-pretvorba-energije?showall=1. Datum pristupa: 25.05.2016.
20. Golub M. *Raspoloživi vjetreni potencijal na području Zagreba*. Dostupno na: http://rudar.rgn.hr/~mgolub/radovi4web/ad-4/golub.pdf. Datum pristupa: 25.05.2016.
21. Mađar E. *Izvedba vjetroagregata s vetikalnom osi vtnje*. Dostupno na: http://old.riteh.hr/nast/obrane/strucni_el/Radovi_072015/0069056983108_Madjar%20_Edi.pdf. Datum pristupa: 10.06.2016.
22. Dostupno na: https://fr.fotolia.com/tag/"moulin%20à%20eau". Datum pristupa: 10.06.2016.

23. Dostupno na: http://arhiva.dalje.com/hr-hrvatska/ugovor-o-vjetrenjaama-vrijedan-20-milijuna-kuna/240773. Datum pristupa: 10.06.2016.
24. Dostupno na: http://www.lerntippsammlung.de/Windenergie-_-2-.-Version.html. Datum pristupa: 10.06.2016.
25. Dostupno na: http://n3eme5gr1.unblog.fr. Datum pristupa: 10.06.2016.
26. Dostupno na: http://www.odec.ca/projects/2010/kirbxe2/index.htm. Datum pristupa: 10.06.2016.
27. Klarin B. *Mogućnosti primjene manjih vjetroturbina u proizvodnji enegije na Hvatskoj obali i otocima*. Dostupno na: http://marjan.fesb.hr/~bklarin/Rad001/Mogucnosti_primjene_manjih_vjetroturbina_CLANAK.html. Datum pristupa: 13.06.2016.
28. *Vjetar kao izvor energije*. Dostupno na: http://www.ipa-res.hr/Default.aspx?sid=286. Datum pristupa: 13.06.2016.
29. Jerkić E. *Mali vjetroagregati – razvoj i mogućnosti*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-za-pocetnike/759-mali-vjetroagregati-razvoj-i-mogucnosti. Datum pristupa: 13.06.2016.
30. Jerkić E. *Mali vjetroagregati – pednosti i zašto ih nema više*. Dostupno na: http://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-za-pocetnike/749-mali-vjetroagregati-prednosti-i-zasto-ih-nema-vise. Datum pristupa: 13.06.2016.
31. Chaturvedi K. Dostupno na: http://www.ecoideaz.com/expert-corner/solar-wind-hybrid-power-units-villages. Datum pristupa: 13.06.2016.
32. Bajić A. *Postorna raspodjela očekivanih makskimalnih bzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet. 2011. Dostupno na: http://www.gfv.unizg.hr/modules/m_gfv/datoteke/Upute%20za%20pisanje%20diplomskog%20rada.pdf. Datum pistupa: 28.06.2016.
33. Bajić A, Peroš B, Vučetić V, Žibrat Z. *Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hvatske norme*. Dostupno na: http://hrcak.srce.hr/file/18613. Datum pistupa: 28.06.2016.
34. *Atlas vjetra Hrvatske*. Dostupno na: http://mars.dhz.hr/web/index.htm. Datum pistupa: 28.06.2016.

35. Klarin B. *Utjecaj na okoliš vjetroturbine kao izvora zvuka*. Dostupno na: http://marjan.fesb.hr/~bklarin/Rad003/Utjecaj_na_okolis_vjetroturbine_CLANAK.html. Datum pristupa: 30.06.2016.

Popis slika

Slika 1. Godišnja instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu od 2000. do 2015. Godine (GW) [4]. 5
Slika 2. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu od 2000. do 2015. godine [4]. 5
Slika 3. Instalirana snaga vjetroelektrana po državama EU u 2015. god [5]. 6
Slika 4. Udio pojedinog izvora energije u instaliranoj snazi u 2000. godini [5]. 7
Slika 5. Udio pojedinog izvora energije u instaliranoj snazi u 2015. godini [5]. 7
Slika 6. Investicije u energiju vjetra za 2015. godine, uključujući i investicije u opremu [5]. 8
Slika 7. Kumulativne instalacije energije vjetra u EU (GW) [5]. 8
Slika 8. Vremenska dinamika izgradnje u Hrvatskoj [9]. 11
Slika 9. Dinamika rasta proizvodnje električne energije u vjetroelektranama do 2020. godine [9]. 12
Slika 10. Smjer prizemnog vjetra na sjevernoj polutci pri pravocrtnim izobarama nakon uspostave ravnoteže među silama Gr, Co i Tr [11]. 13
Slika 11. Posljedica djelovanja Coriolisove sile [11].. 14
Slika 12. Smjer atmosferskih čestica na sjevernoj i južnoj hemisferi djelovanjem Coriolisove sile [12] 14
Slika 13. Anemometar [13]. 15
Slika 14. Promjena brzine vjetra s visinom [2]. 19
Slika 15. Dijelovi vjetroturbine [17]. 20
Slika 16. Zamišljeni cilindar koji opisuje vjetar na ulasku u turbinu [18] 21
Slika 17. Ovisnost snage vjetroagregata o brzini vjetra [19]. 23
Slika 18. a) Izvedba sa stupom iza lopatica i b) izvedba sa stupom ispred lopatica [22]. 26
Slika 19. Izvedbe prema broju lopatica [21]. 27
Slika 20. Američka vjetroturbina [22]. 27
Slika 21. Danska vjetrenjača [23]. 28
Slika 22. Darrieusova vjetroturbina [24]. 29
Slika 23. Horizontalna izvedba Darrieusove vjetroturbine [25]. 30
Slika 24. Savoniusova vjetroturbina [26]. 30

Slika 25. Upotreba malih vjetroturbina za opskrbu električnom energijom kuće [27]... 32
Slika 26. Upotreba malih vjetroturbina za crpljenje vode [28]..... 33
Slika 27. Hibridni sustav [31]. 34
Slika 28. Zemljopisni položaj meteoroloških postaja Varaždin (600 m), Čakovec (500 m) i Zagreb-Maksimir (700 m). Boja označava visinu terena [32]. 37
Slika 29. Srednje godišnje brzine vjetra 10 m iznad tla za razdoblje od 1992. do 2001. godine [34]. 38
Slika 30. Srednje godišnje brzine vjetra 80 m iznad tla za razdoblje od 1992. do 2001. godine [34]. 39
Slika 31. Izvod koeficijenta snage (k) [20]. 41
Slika 32. Ovisnost koeficijenta (k) o tlaku i temperaturi [20]. 42
Slika 33. Intenzitet buke vjetroturbine na raznim udaljenostima od stupa vjetroturbine [35]. 48

Popis tablica

Tablica 1. Instalirana snaga po vodećim državama u svijetu tokom 2015. godine, te ukupna instalirana snaga u MW (1. dio) [4]. 3
Tablica 2. Instalirana snaga po vodećim državama u svijetu tokom 2015. godine, te ukupna instalirana snaga u MW (2. dio) [4]. 4
Tablica 3. Popis najvećih vjetroelektrana u Europi (izgrađenih, u gradnji ili odobrenih) [6]. 9
Tablica 4. Dinamika rasta instaliranih kapaciteta i proizvodnje električne energije iz vjetroparkova do 2020. godine (s pogledom do 2030. godine) [9]..... 11
Tablica 5. Beaufortova skala [14]. 17
Tablica 6. Prijedlog kategorizacije vjetroturbina [27]. 31
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti srednje brzine vjetra (m/s) u razdoblju 2005. – 2009. godine [32]. 38
Tablica 8. Prosječna površina potrebna za proizvodnju 1 GWh električne energije kod različitih tipova elektrana [7]. 50