Vjetroelektrane u Hrvatskoj

Brezovec, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:671455

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Stručni studij

Vjetroelektrane u Hrvatskoj

Završni rad

Mihael Brezovec

Osijek, 2021.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Osijek, 20.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Mihael Brezovec
Studij, smjer:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A 4427, 09.10.2017.
OIB Pristupnika:	00576961466
Mentor:	Zorislav Kraus, dipl. ing.
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	Zorislav Kraus, dipl. ing.
Član Povjerenstva 2:	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
Naslov završnog rada:	Vjetroelektrane u Hrvatskoj
Znanstvena grana završnog rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak završnog rada	Pregled razvoja vjetroenergije i puštanja u pogon vjetroelektrana u Hrvatskoj.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.09.2021.

Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	*Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.*
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 07.03.2022.

Ime i prezime studenta:	Mihael Brezovec
Studij:	Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	A 4427, 09.10.2017.
Turnitin podudaranje [%]:	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Vjetroelektrane u Hrvatskoj**

izrađen pod vodstvom mentora Zorislav Kraus, dipl. ing.

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD 1

1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA 1

2. VJETROELEKTRANE 2

2.1. PLUTAJUĆE VJETROELEKTRANE 2

2.2. PRIOBALNE VJETROELEKTRANE 3

3. VJETROGENERATOR 4

3.1. OSNOVNI DIJELOVI VJETROGENERATORA 5

3.2. PRINCIP RADA 7

3.3. SNAGA I UČINKOVITOST 9

4. ELEKTRIČNA ENERGIJA U HRVATSKOJ 12

4.1. VJETROELEKTRANE U HRVATSKOJ 17

4.2. VJETROELEKTRANA KORLAT 19

4.3. POTENCIJAL IZGRADNJE VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ 20

5. VJETROELEKTRANE U EUROPSKOJ UNIJI 23

6. PREDNOSTI I NEDOSTACI VJETROELEKTRANA 26

7. ZAKLJUČAK 28

LITERATURA 29

SAŽETAK 31

ABSTRACT 31

1. UVOD

Vjetar je prije svega čist, obnovljiv te lako dostupan i bogat izvor energije. Energija vjetra predstavlja transformirani oblik solarne energije. Različiti tlakovi zraka nastaju sunčevim neravnomjernim zagrijavanjem različitih dijelova Zemlje, dok zbog potrebe za izjednačavanjem tih tlakova zraka nastaje vjetar. Za mnoge ljude tehnologija iskorištavanja vjetra je moderan izum, no zapravo ima dugu povijest za koju neki povjesničari tvrde da je stara do 3000 godina. U prošlosti primarne uporabe energije vjetra uključivale su mljevenje žita, jedrenje, i pumpanje vode. Tek 1887. godine prof. James Blyth u Škotskoj sa Anderson's College-a dizajnira prvu vjetrenjaču za proizvodnju električne energije (tj. prvi vjetrogenerator). Od tada pa sve do 1970.-ih razvoj vjetrogeneratora i industrije vjetra bio je usporen zbog dostupnosti i niske cijene drugih izvora energije posebice ugljena i nafte. 1973. godine nastupa svjetska naftna kriza te kao posljedica toga u Kaliforniji dolazi do prvih međusobno povezanih vjetrogeneratora (vjetroelektrana) koji su bili srednjih snaga od 50 pa sve do 600 kW. Samim time nastaje moderna industrija vjetra kakvu poznajemo danas.

Godine 1988. u Hrvatskoj Končar postavlja prvi vjetrogenerator u Uljaniku te danas Hrvatska broji 24 vjetroelektrane s 325 vjetrogeneratora u radu koji godišnje isporučuju oko 1788 GWh električne energije.

U prvom dijelu rada objašnjeno je što su to vjetroelektrane, kakve vrste i izvedbe poznajemo. Navedeni su i detaljno opisani dijelovi vjetrogeneratora te koja im je funkcija, koji je princip rada vjetrogeneratora te o čemu sve ovisi stvarna snaga na rotoru.

U drugom dijelu rada opisuje se stanje na energetskom tržištu u hrvatskoj, koliko Hrvatska ima vjetroelektrana te koja je njihova snaga i koji je neiskorišteni vjetropotencijal. Nakon toga opisuje se tržište vjetroelektrana u Europskoj Uniji, njeni ciljevi smanjenja korištenja fosilnih goriva te kako je energija vjetra budućnost u EU. Na posljetku pregledane su prednosti i mane vjetroelektrana.

1.1. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Zadatak završnog rada je opisati vjetroelektrane i njihov princip rada. Drugi dio zadatka je opisati stanje vjetroelektrana u Hrvatskoj, koji je njihov potencijal, glavne ciljeve EU te samim time i Hrvatske.

2. VJETROELEKTRANE

Vjetroelektrana je postrojenje koje pretvara kinetičku energiju vjetra u električnu energiju.

Vjetropark je skup blisko smještenih vjetrogeneratora, vrlo često jednakog tipa, izloženih vjetru i priključenih preko jednog rasklopnog uređaja na elektroenergetski sustav.

Vjetroelektrane se dijele na plutajuće vjetroelektrane (floating offshore, deep water offshore), priobalne vjetroelektrane (Fixed-bottom offshore) i kopnene vjetroelektrane. Kopnene vjetroelektrane najčešći su tip vjetroelektrana te se grade na čvrstom tlu.

2.1. PLUTAJUĆE VJETROELEKTRANE

Plutajuće vjetroelektrana je vrsta vjetroelektrane koja je postavljena na plutajuću konstrukciju u dubokom moru gdje nemoguće postavljanje priobalne vjetroelektrane. Plutajuće vjetroelektrane su dosta složene te traže više početnih troškova, no pokazalo se da zbog njihovih mogućnosti pristupa snažnim vjetrovima na daljem moru imaju isplativost primjene. Za prijenos električne energije kod ovog tipa se koristi zajednički podvodni kabel.

Slika 1. Hywind plutajući vjetrogenerator u Sjevernom Moru, Norveška [1]

2.2. PRIOBALNE VJETROELEKTRANE

Priobalna vjetroelektrana je tip vjetroelektrane koja je građena na moru sa stabilnim temeljima većinom u priobalnom području na dubini do 60 metara te udaljenosti od obale do 50 kilometara. Također kod ovog tipa vjetroelektrana sama izgradnja je skuplja zbog toga što su im tornjevi viši (dio ispod vode), skuplje je održavanje te je potrebna zaštita od korozije, ali zbog puno većih brzina vjetra na moru nego na kopnu proizvodnja električne energije kod ovakvih vjetroelektrana puno je veća. Proizvedena električna energije do kopna se prenosi putem podmorskog kabla. Zbog velike iskoristive površine vjetroelektrane smještene na moru znaju imati i preko 100 vjetrogeneratora.

Slika 2. Priobalna vjetroelektrana Lillgrund, Švedska [2]

3. VJETROGENERATOR

Vjetrogenerator je rotacijski stroj koji kinetičku energiju vjetra transformira najprije u mehaničku, te onda, koristeći električne generatore, u električnu energiju.

Primarno se dijele ovisno o načinu na kojem je os vrtnje postavljena (osovina):

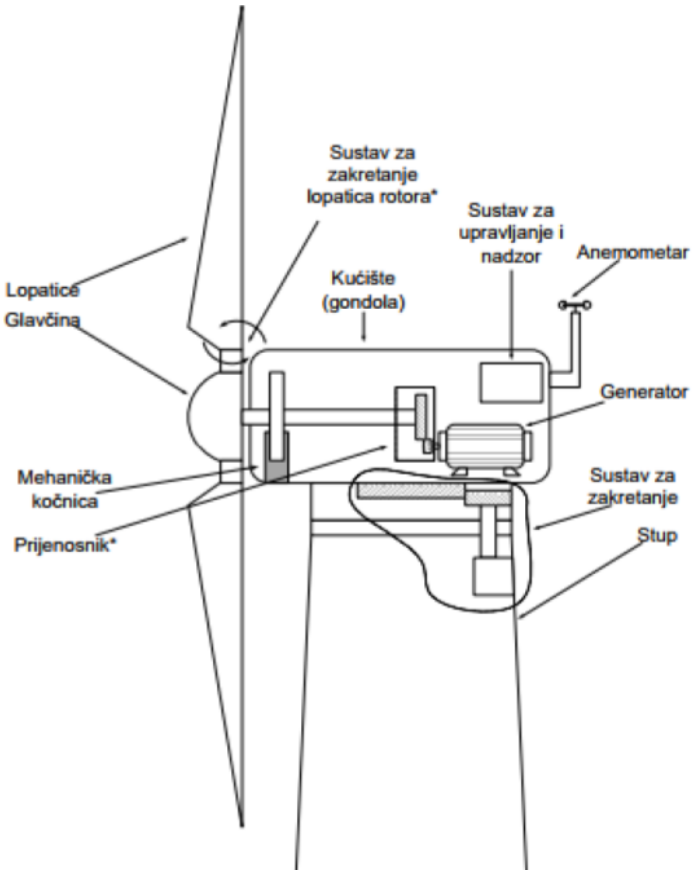
1. Vjetrogeneratori s vodoravnom osi vrtnje (Slika 3.)
2. Vjetrogeneratori s okomitom osi vrtnje (Slika 4.)

Slika 3. Vjetrogenerator s vodoravnom osi vrtnje [3]

Slika 4. Vjetrogenerator s okomitom osi vrtnje [2]

3.1. OSNOVNI DIJELOVI VJETROGENERATORA

Osnovni dijelovi vjetrogeneratora su lopatice, glavčina, mehanička kočnica, prijenosnik, sustav za zakretanje lopatica rotora, kućište (gondola), sustav za nadzor i upravljanje, anemometar, generator, zakretni sustav i stup.



Slika 5. Osnovni dijelovi vjetrogeneratora [4]

Lopatice – Oblikovane su kao avionska krila. Lopatice se pokreću aerodinamičkim uz visok stupanj pretvorbe energije vjetra (kinetičke) u mehaničku. Najpraktičnija i najisplativija konfiguracija je ona s 3 lopatice.

Gledajući na izvedbu postoje dvije vrste: -lopatice sa zakretnim vrhom

-lopatice sa zakretnim krilcima.

Mehanička kočnica–Najčešća izvedba sustava kočenja su disk kočnice, a nalaze se na brzookretnom vratilu generatora ili prije prijenosnika na sporookretnom vratilu kola. Razlikuju

se hidrauličko i elektromagnetsko djelovanje a uključuju se zbog ispada mreže (signalom generatora) ili signalom uređaja koji mjeri brzinu vrtnje generatora.

Prijenosnik – Funkcija prijenosnika je prilagođavanje nižih brzina vrtnje rotora vjetroturbine višim brzinama rotora električnog generatora. Snaga pretvorbe regulira se sustavom koji upravlja kut zakreta lopatica. Hlađenje se vrši zrakom, a podmazuje se sintetičkim uljem.

Sustav za zakretanje lopatica rotora – Sustav koji služi za zakretanje lopatica na rotoru. Promjenom kuta lopatica regulira se izlazna snaga vjetrogeneratora na način da se promjeni upadni kut vjetra lopatice rotora. Ovaj sustav također uz visoke brzine vjetra postavlja lopatice u položaj takav da je minimalna sila uzgona te pripomaže pri kočenju rotora.

Kućište – Glavna zadaća kućišta je da zaštiti generatorski sustav i njegove komponente od utjecaja okoline. Njegova zadaća je da zaštiti i okolinu od samog sustava odnosno buke koju sustav proizvodi

Sustav za upravljanje i nadzor – Sustav upravljan mikroprocesorima koji upravlja i nadzire radne procese i zaštitu te daje podatke o radu, mehaničkim i električnim stanjima, obavještava o kvaru i obrađuje podatke

Anemometar – Mjeri brzine vjetra te podatke o brzini šalje u sustav za upravljanje i nadzor.

Generator – Generator je električni stroj stvara električnu energiju iz mehaničke. Postoje asinkroni i sinkroni. Da bi cijeli sustav funkcionirao pravilno generator treba ispunjavati sljedeće zahtjeve:

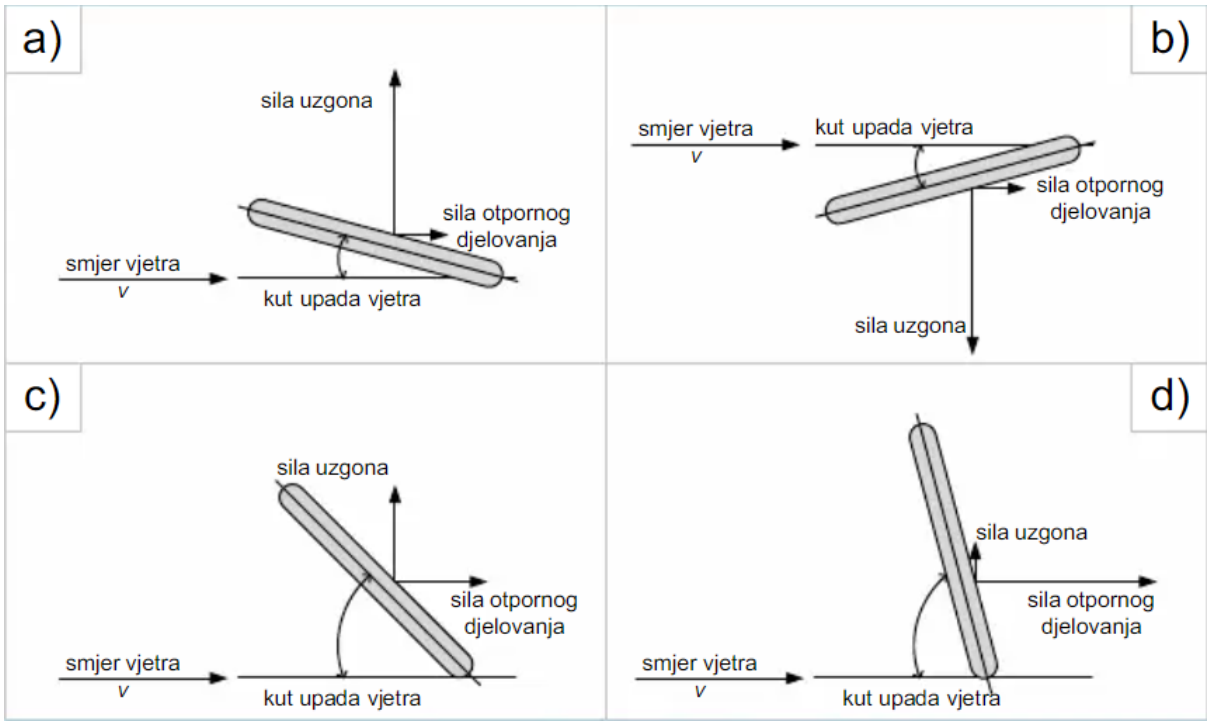
1. U širokom krugu opterećenja i velikim brzinama okretaja mora imati visok stupanj iskoristivosti
2. Rotor mora normalno raditi i pri velikim okretajima u slučaju da zaštitni sustavi zakažu/otkažu
3. Izdržljivost odnosno postojanost konstrukcija pri visokim dinamičkim opterećenjima u slučaju kratkih spojeva te pri uključivanju i isključivanju generatora
4. Pouzdanost uz što manje održavanje uzevši u obzir uvjete poput vlažnosti, slanosti, temperaturu i slično.

Sustav za zakretanje – Zakreće turbinsko generatorski sustav. Nalazi se ispod kućišta vjetroturbine. Zupčasti prsten koji je učvršćen na stup izravnava os vratila rotora u smjeru vratila. Zakretanje vrši motor.

Stup – Poznate izvedbe su cjevasti, rešetkasti, teleskopski, konusni, povezani ili učvršćeni. Najčešća izvedba je cjevasta, a prednost joj je visoka čvrstoća te veća otpornost na vibracije u odnosu na ostale. [4]

3.2. PRINCIP RADA

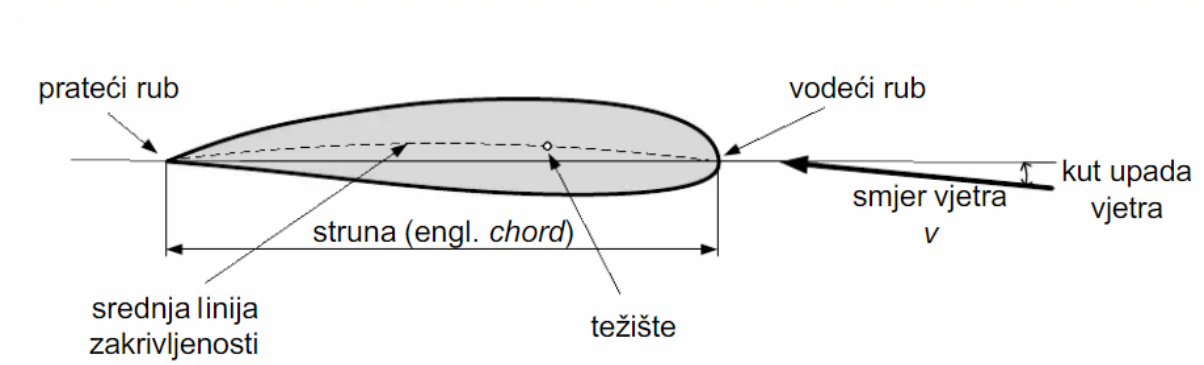
Sile koje djeluju na lopatice rotora su sile otpornog djelovanja i sile uzgona. Sila otpornog djelovanja djeluje u smjeru vjetra, a sila uzgona okomita je na nju. Sila uzgona veća je od sile otpornog djelovanja kada je upadni kut brzine vjetra što manji. Sila uzgona jednaka je nuli kada je upadni kut brzine vjetra 90˚, dok je sila otpornog djelovanja maksimalna. [4]



Slika 6. Odnos sile uzgona i sile otpornog djelovanja s obzirom na kut upada vjetra [4]

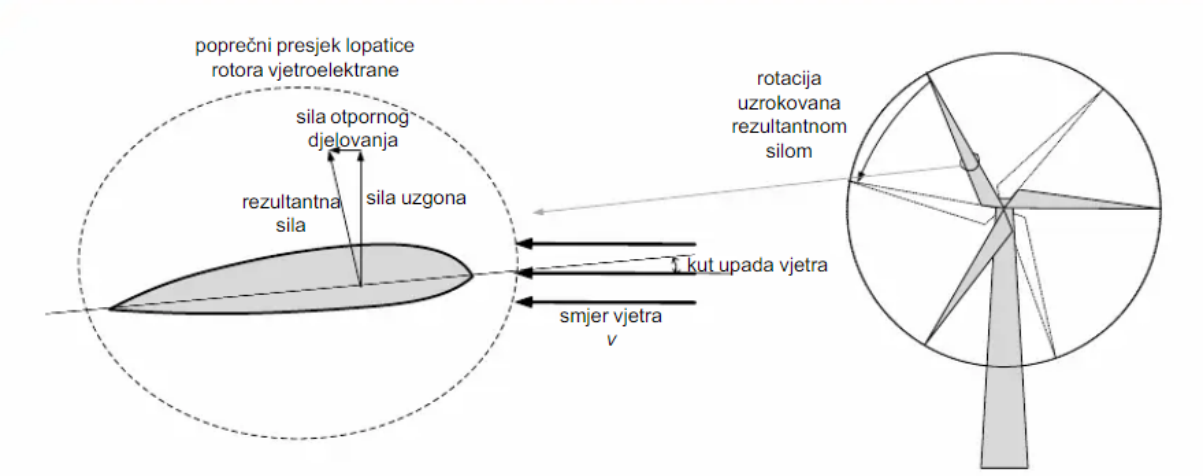
Lopatica mora ispunjavati sljedeće uvjete kako bi aerodinamički profil vjetroelektrane bio zadovoljavajući (uz sliku 7.):

- blaga i postepena zakrivljenost
- oštar i tanak prateći rub
- zaobljen vodeći rub
- omjer debljine lopatice i debljine strune mora biti što manji
- glatka površina
- omjer sile uzgona i otpornog djelovanja mora biti što veći.



Slika 7. Poprečni presjek tipične lopatice vjetroelektrane [4]

Regulacija snage vjetroelektrane i brzine vrtnje obavlja se reguliranjem upadnog kuta vjetra, tj. reguliranjem kuta lopatica rotora. Što je upadni kut veći, to je veća i sila otpornog djelovanja, dok se pri tome sila uzgona smanjuje. Rezultantna sila zaslužna je za gibanje lopatice te ona predstavlja vektorski zbroj sile otpornog djelovanja i sile uzgona, a djeluje u težištu lopatice rotora. O učinkovitosti vjetroturbine (koliko će se energije vjetra iskoristiti) ovisi omjer sile uzgona i sile otpornog djelovanja. [4]



Slika 8. Djelovanja sile uzgona i sile otpornog djelovanja na lopaticu vjetroelektrane [4]

3.3. SNAGA I UČINKOVITOST

Masa u pokretu nosi određenu količinu energije. Ta kinetička energija proporcionalna je produktu mase i kvadratu brzine vjetra te se može opisati sljedećim izrazom:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [J] \tag{3-1}$$

Gdje je:

E_k – kinetička energija [J]

m – masa zraka [kg]

v – brzina vjetra [m/s]

Ako masu predstavimo poput produkta volumena i gustoće,

$$m = \rho \cdot V [kg] \tag{3-2}$$

Gdje je:

ρ – gustoća zraka [kg/m^3]

V – volumen [m^3]

te ako se volumen raspiše u obliku produkta površine A i duljine l:

$$V = A \cdot l \quad [\mathrm{m}^3] \tag{3-3}$$

tada se za kinetičku energiju može raspisati sljedeći izraz:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot l \cdot v^2 \quad [\mathrm{J}] \tag{3-4}$$

Količina molekula zraka koje se gibaju kroz neku površinu A tijekom nekog vremena t, brzinom v predstavlja snagu vjetra:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \frac{dl}{dt} \tag{3-5}$$

Odnosno:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [\mathrm{W}] \tag{3-6}$$

Teoretska snaga vjetra dana je u prethodnom izrazu (3-6), no turbina ne može u potpunosti iskoristiti tu snagu vjetra. Kad struja vjetra prođe kroz turbinu, dio njene kinetičke energije prenosi se na rotor, a zrak koji izlazi iz turbine odnese ostatak. Stvarna snaga koji proizvodi rotor bi bila određena učinkovitošću s kojom se odvija ovaj prijenos energije s vjetra na rotor. Ta se učinkovitost naziva koeficijent snage (C_P). Stoga se koeficijent snage rotora može definirati kao omjer stvarne snage koju rotor razvija i teoretske snage dostupne u vjetru te iz toga slijedi:

$$C_P = \frac{2 \cdot P_t}{\rho \cdot A \cdot v^3} \tag{3-7}$$

Tada stvarnu snagu koju rotor razvija opisujemo sljedećim izrazom:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \ \ [\mathrm{W}] \tag{3-8}$$

Gdje je:

P_t – snaga rotora [W]

ρ – gustoća zraka [kg/m^3]

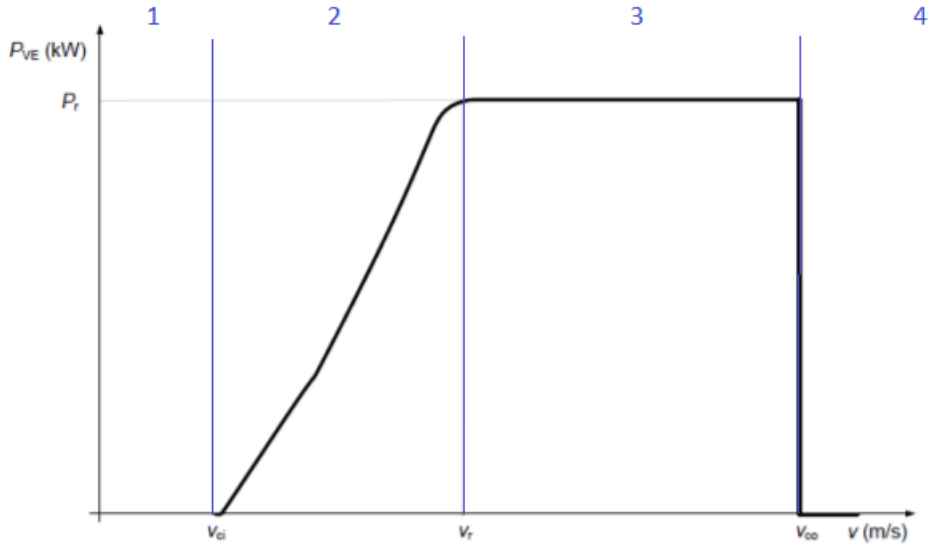
A – površina rotora [m^2]

v – brzina vjetra [m/s]

C_P – koeficijent snage

Promjenom brzine vjetra i promjenom koeficijenta snage mijenja se izlazna snaga vjetroelektrane. Ovisnost snage na rotoru i brzine vjetra prikazujemo krivuljom snage (slika 9.) Kako snaga na rotoru ovisi o površini rotora razvijaju se sve veće vjetroturbine, većih promjera rotora te samim time i većih snaga. (slika 10.)

[4] [14]

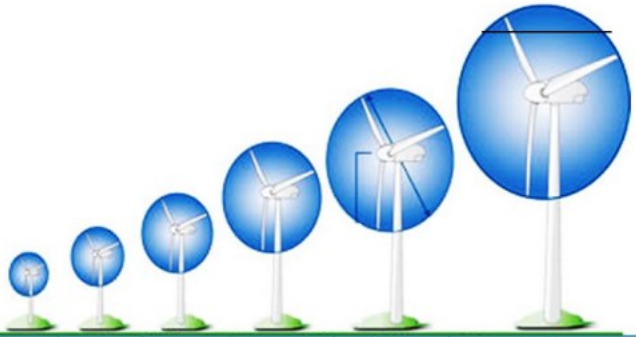


Slika 9. Krivulja snage vjetroelektrane [4]

Za idealnu krivulju snage razlikuje se 4 područja rada (slika 9.):

1. Vjetroturbina je zakočena zbog nedovoljne brzine vjetra
2. Radno područje u kojem se održava maksimalni stupanj iskorištenja
3. Radno područje u kojem se održava strategija konstantne (nazivne) snage
4. Vjetroturbina je zakočena zbog prevelike brzine vjetra

.

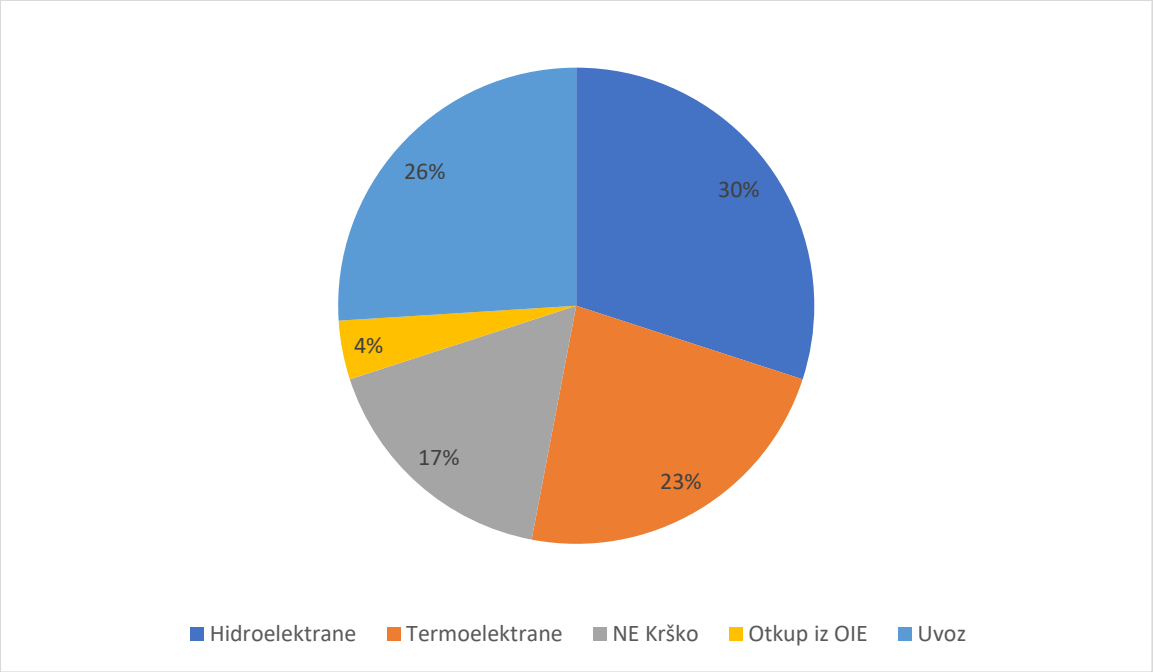


	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Snaga	30 kW	80 kW	250 kW	600 kW	1500 kW	5000 kW
Promjer rotora	15 m	20 m	30 m	46 m	70 m	100 m
Visina	30 m	40 m	50 m	80 m	100 m	120 m

Slika 10. Razvoj vjetroelektrana do 2005. godine [4]

4. ELEKTRIČNA ENERGIJA U HRVATSKOJ

Gledajući na proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj, proizvodnja se sastoji od proizvodnje u hidroelektranama, termoelektranama, pojedinim industrijskim termoelektranama te proizvodnje u vjetroelektranama i drugim elektranama na obnovljive izvore energije koje su u privatnom vlasništvu. Ukupna snaga elektrana kojom je Republika Hrvatska raspolagala krajem 2020. godine iznosila je 4661,8 MW. Od toga u termoelektranama 1552,6 MW, u hidroelektranama 2199,4 MW, u vjetroelektranama 801,3 MW i u solarnim elektranama 108,5 MW. Za potrebe EES-a Hrvatske koristi se i 348 MW iz nuklearne elektrane Krško. [5]

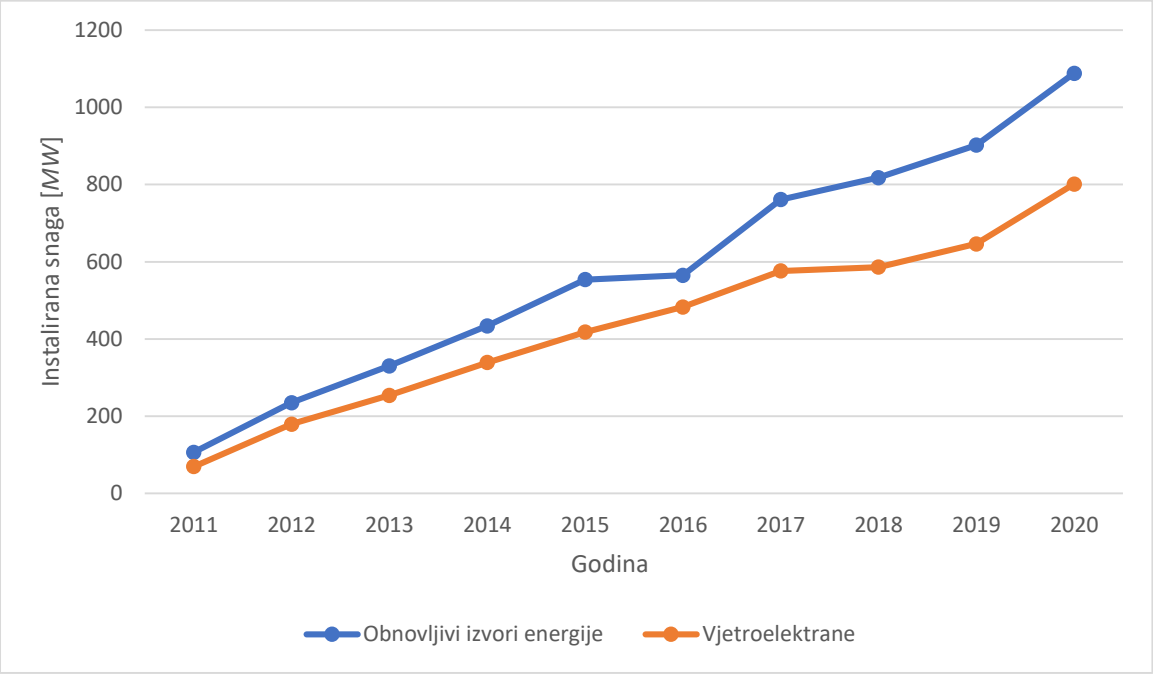


Slika 11. Struktura udjela pojedinih izvora električne energije [5]

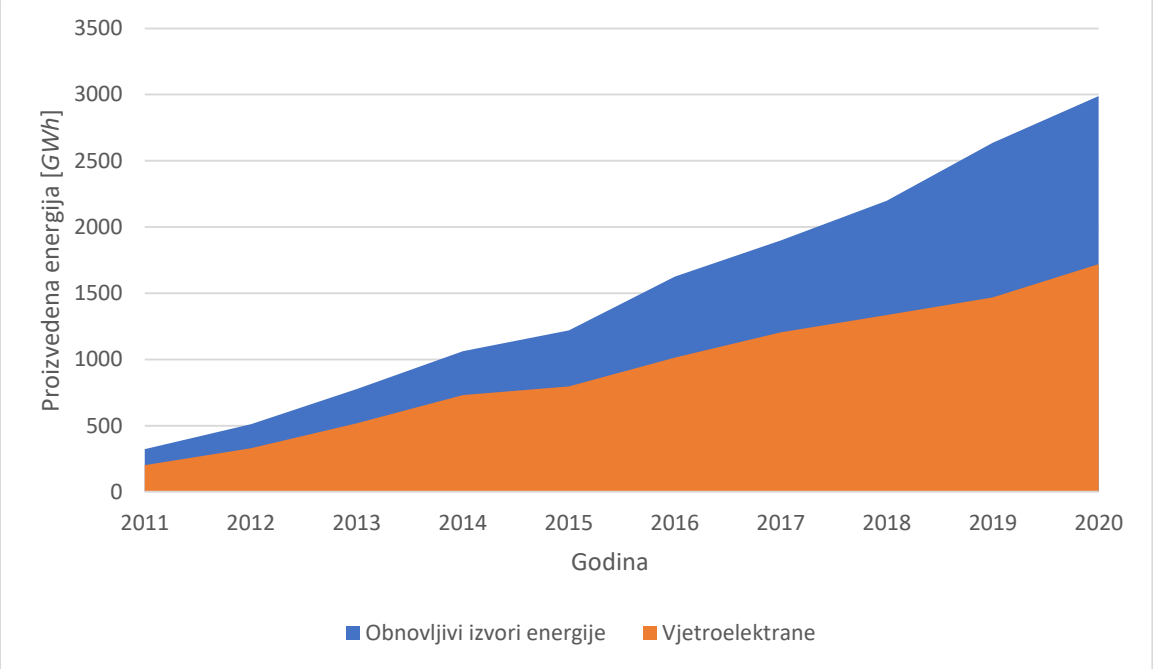
Očekuje se da će hrvatski kapaciteti obnovljivih izvora energije doseći 1900 MW do 2030. godine, u skladu s vladinom strategijom da se do iste godine udio „zelene“ energije podigne na 36,4 % ukupne potrošnje energije u zemlji. Vjetroelektrane u tom razdoblju, procjenjuje se, će zabilježiti najveći rast među obnovljivim izvorima energije, a očekuje se da će se kapaciteti vjetra povećati sa 801,3 MW 2020. godine na 1400 MW 2030. godine. [5]

Tablica 1. Instalirana snaga i proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije i vjetroelektrana [5]

Godina	Instalirana snaga		Proizvedena električna energija		Udio proizvedene el. energije iz VE u proizvodnje iz OIE (%)
	OIE (MW)	Vjetroelektrane (MW)	OIE (GWh)	Vjetroelektrane (GWh)	
2011.	106,47	69,75	322,24	201	62,38 %
2012.	235,04	179,6	510,75	328,74	64,45 %
2013.	330,36	254,3	775,9	517,3	66,67 %
2014.	434	339,3	1061,5	730	68,77 %
2015.	554	481	1219,6	796,3	65,29 %
2016.	565	483,1	1625,4	1014,2	62,39 %
2017.	761	576,1	1899,1	1204	63,39 %
2018.	818	586,3	2198,7	1335,4	60,73 %
2019.	901,8	646,3	2635,4	1467,3	55,67 %
2020.	1088,1	801,3	2990,1	1720,7	57,54 %



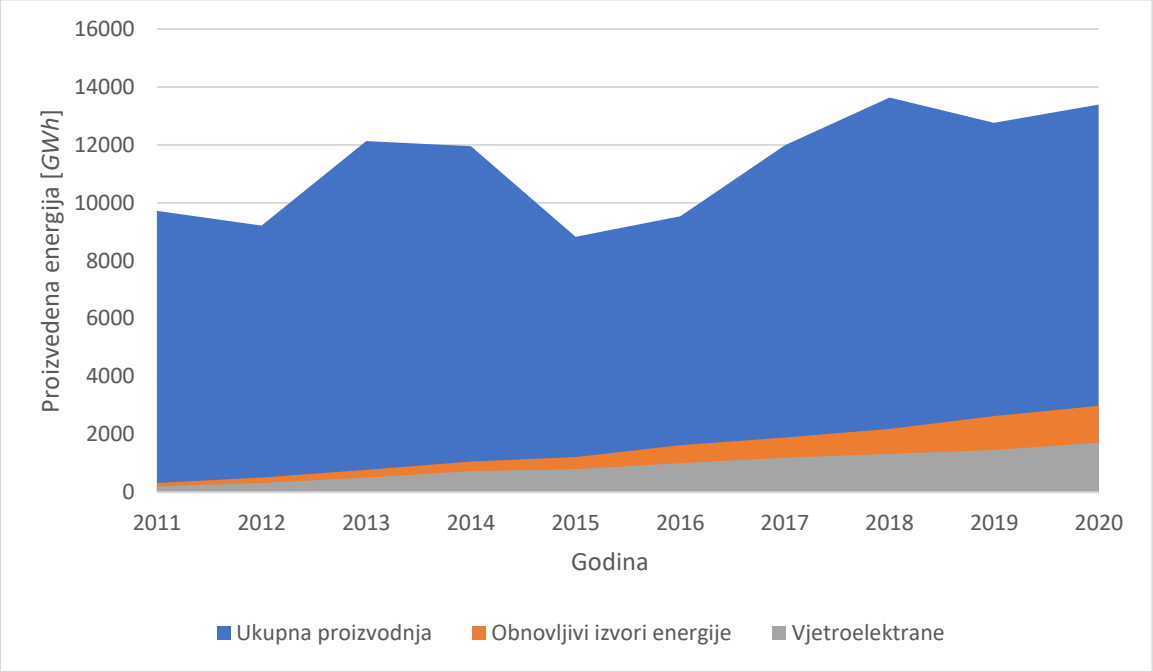
Slika 12. Grafički prikaz instalirane snage u posljednjih 10 godina



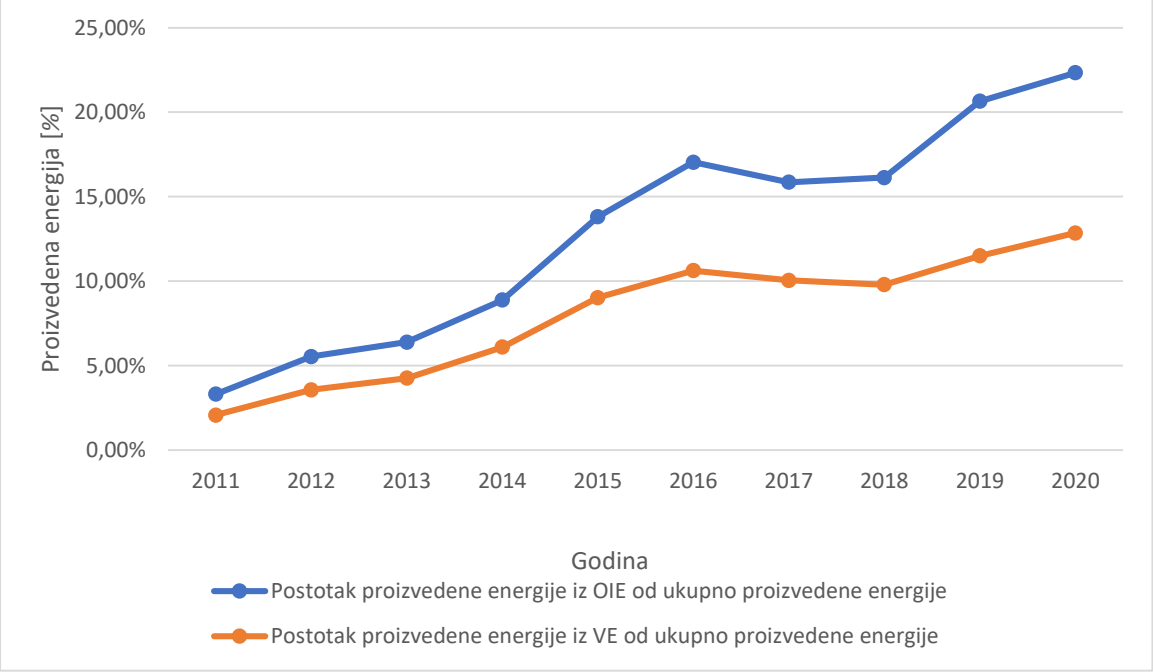
Slika 13. Grafički prikaz proizvodnje energije iz obnovljivih izvora energije i vjetroelektrana u posljednjih 10 godina

Tablica 2. Usporedba ukupne proizvodnje električne energije s proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije i vjetroelektrana [5]

Godina	OIE (GWh)	Vjetroelektrane (GWh)	Ukupna proizvodnja energije (GWh)	Udio proizvedene energije iz OIE u ukupnoj proizvodnji energije (%)	Udio proizvedene energije iz VE u ukupnoj proizvodnji energije (%)
2011.	322,24	201	9725	3,31 %	2,07 %
2012.	510,75	328,74	9209	5,54 %	3,57 %
2013.	775,9	517,3	12130	6,39 %	4,26 %
2014.	1061,5	730	11958,4	8,88 %	6,10 %
2015.	1219,6	796,3	8829	13,81 %	9,02 %
2016.	1625,4	1014,2	9536,2	17,04 %	10,63 %
2017.	1899,1	1204	11983,5	15,85 %	10,05 %
2018.	2198,7	1335,4	13631,7	16,13 %	9,79 %
2019.	2635,4	1467,3	12760,1	20,65 %	11,50 %
2020.	2990,1	1720,7	13385,3	22,33 %	12,85 %



Slika 14. Grafički prikaz proizvodnje energije iz obnovljivih izvora energije i vjetroelektrana u usporedbi s ukupnom proizvodnjom



Slika 15 Grafički prikaz rasta proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i vjetroelektrana

Tablica 3. Usporedba ukupne potrošnje električne energije s proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije i vjetroelektrana [5]

Proizvedena energija

Godina	OIE (GWh)	Vjetroelektrane (GWh)	Ukupna potrošnja energije (GWh)	Udio proizvedene energije iz OIE u ukupnoj potrošnji energije (%)	Udio proizvedene energije iz VE u ukupnoj potrošnji energije (%)
2011.	322,24	201	18527,6	1,74 %	1,08 %
2012.	510,75	328,74	18186,4	2,81 %	1,81 %
2013.	775,9	517,3	17921,5	4,33 %	2,88 %
2014.	1061,5	730	17506,7	6,06 %	4,17 %
2015.	1219,6	796,3	18190,4	6,71 %	4,38 %
2016.	1625,4	1014,2	18349,5	8,86 %	5,53 %
2017.	1899,1	1204	18937,2	10,03 %	6,38 %
2018.	2198,7	1335,4	19019,3	11,56 %	7,02 %
2019.	2635,4	1467,3	18893,3	13,95 %	7,77 %
2020.	2990,1	1720,7	18024,6	16,09 %	9,54 %

U 2011. godini proizvodnja električne energije u Hrvatskoj iz obnovljivih izvora energije iznosila je 322,24 GWh, od toga 201 GWh iz vjetroelektrana, što je činilo tek 3,31 % posto od ukupne proizvodnje, odnosno 2,07 % za vjetroelektrane. U narednih 10 godina ta proizvodnja se znatno povećala te danas iznosi 2990,1 GWh za sve obnovljive izvore što čini 22,33 % ukupne proizvodnje i 1720,7 GWh za vjetroelektrane ili 12,85 % ukupne proizvodnje. Hrvatska danas s obnovljivim izvorima energije pokriva tek 16,09 % ukupne potrošnje, a vjetroelektrane pokrivaju 9,54 % ukupne potrošnje električne energije. Instalirana snaga obnovljivih izvora energije skočila je sa 106,47 MW na 1088,1 MW te instalirana snaga vjetroelektrana sa 69,75 MW na 801,3 MW. [5]

4.1. VJETROELEKTRANE U HRVATSKOJ

U Hrvatskoj se danas nalazi 25 vjetroelektrana (rujan 2021.) koje su u normalnom pogonu te u elektroenergetski sustav Hrvatske isporučuju električnu energiju. Instalirana snaga svih vjetroelektrana iznosi: 801,3 MW. U pogonu su 325 vjetrogeneratora (tablica 1.). Razvoj započinje još 1988. godine u brodogradilištu Uljanik gdje je Končar postavio prvi vjetrogenerator. Vjetroelektrana Pometeno Brdo je projekt na kojemu su prvi put korišteni vjetrogeneratori koji su dizajnirani i proizvedeni u hrvatskoj koja od 01.01.2013. radi svojim punim kapacitetom s ukupno 16 instaliranih vjetrogeneratora te 17,5 MW snage. Godišnja procjena proizvodnje električne energije ove vjetroelektrane iznosi 30,1 GWh. [5] [6]

Slika 16. Izrada vjetrogeneratora hrvatske proizvodnje [6]

Tablica 4. Popis vjetroelektrana u pogonu [6]

VJETROELEKTRANE U POGONU			
VJETROELEKTRANA	**ODOBRENA SNAGA (MW)**	**SKLOPLJEN UOKM**	**PRIKLJUČAK NA MREŽU (kW)**
VE Ravne	5,95	Prosinac 2006.	10
VE Trlat-Krtolin	11,2	Prosinac 2007.	30
VE Orlice	9,6	Lipanj 2009.	30
VE Vrataruša	42	Srpanj 2009.	110
VE Crno Brdo	10	Ožujak 2011.	10
VE ZD 2	18	Studeni 2011.	110
VE ZD 3	18	Studeni 2011.	110
VE Pometeno Brdo	20	Studeni 2011.	110
VE Ponikve	34	Listopad 2012.	110
VE Jelinak	30	Prosinac 2012.	110
VE ST 1-2 Kamensko	20	Lipanj 2013.	110
VE ST 1-1 Voštane	20	Lipanj 2013.	110
VE ZD 4 faza I.	9,2	Srpanj 2013.	10
VE Velika Glava, Bubrig i Crni Vrh	43	Prosinac 2013.	110
VE Zelengrad – Obrovac	42	Ožujak 2014.	110
VE Ogorje	44	Srpanj 2015.	110
VE Rudine	35	Srpanj 2015.	110
VE Katuni	39	Studeni 2016.	110
VE Glunča	22	Listopad 2016.	110
VE ZD 6P + ZD6	54	Lipanj 2017.	110
VE Lukovac	48	Srpanj 2017.	110
VE Kom-Orjak-Greda	10	Studeni 2018.	35
VE Krš Pađene	142	Srpanj 2019.	220
VE Jasenice	10	Kolovoz 2019.	35
VE Korlat	58	Ožujak 2020.	110
Ukupno	**794,95**		

Tablica 5. Analiza tablice 4. [6]

Priključak na mrežu (kV)	Broj VE	Postotak od ukupnog broja VE (25)	Prosječna snaga VE (MW)
10	3	12 %	8,38
30	2	8 %	10,4
35	2	8 %	10
110	17	68 %	34,53
220	1	4 %	142

4.2. VJETROELEKTRANA KORLAT

Vjetroelektrana Korlat najnovija je hrvatska vjetroelektrana smještena u istoimenom mjestu u Zadarskoj županiji. Ukupna odobrena snaga priključenja ove vjetroelektrane iznosi 58 MW, a godišnje bi trebala proizvoditi oko 170 GWh, što je jednako potrebi 50.000 kućanstava. Elektrana sadrži 18 vjetrogeneratora, od kojih svaki ima instaliranu snagu 3,6 MW koje je njemačka tvrtka Nordex, dostavila i ugradila te ih pustila u pogon. Stupovi njenog vjetrogeneratora visine su 114 metara te im je promjer rotora 131 metar. Gradnja započinje u lipnju 2019. godine, a vjetroelektrana je puštena u pogon 28. travnja 2021. godine. Ukupna vrijednost ove investicije je 500 milijuna kuna. [7]

Slika 17. Vjetroelektrana Korlat [7]

4.3. POTENCIJAL IZGRADNJE VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ

Kod razvoja projekta vjetroelektrane najvažniji je cilj pronalazak prikladne lokacije te zbog toga potrebno je obratiti pažnju na sljedeće uvjete:

Dobar vjetropotencijal – Vjetropotencijal provjerava se inicijalno u atlasima vjetra ili podacima iz meteoroloških stanica u blizini lokacije. Ovaj način provjere služi samo za orijentaciju, a za pravilnu ocjenu neophodno je najmanje jednogodišnje mjerenje vjetropotencijala na lokaciji. Mjerenje vjetropotencijala se obavlja mjernim stupovima s anemometrima i smjerokazima na dvije različite visine.

Klimatski uvjeti na lokaciji – Važno je obratiti pozornost na visoke temperature, ekstremne vjetrove te padaline. Na niskim temperaturama dolazi do vrlo opasne pojave zaleđivanja lopatica, te može doći do oštećenja materijala i konstrukcije, a i do opasnosti za lokalno stanovništvo. Također kod ekstremnih vjetrova može doći do oštećenja i nepravilnog rada vjetrogeneratora zbog povećanog tereta na lopaticama i samoj strukturi.

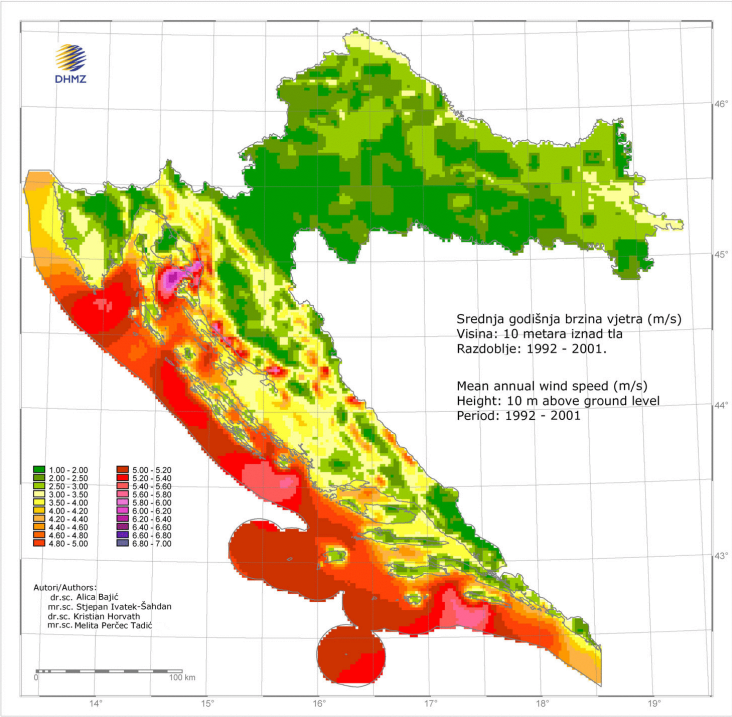
Konfiguracija i pokrov terena – Teren na kojem je izgradnja isplanirana bi trebao biti što jednostavniji radi turbulentnog strujanja vjetra i lakše montaže i transporta. Za lokacije sa slabijim vjetropotencijalom potrebno je birati dostupna mjesta koja ne treba krčiti ili ravnati dok za one s dobrim vjetropotencijalom i isplativosti mogu se koristiti i kompleksniji načini transporta i postavljanja.

Priključak na EES – Poželjno je da lokacija bude u blizini prijenosne ili distribucijske mreže, odnosno transformatorske stanice. Inicijativa priključenja vjetroelektrana na EES u Hrvatskoj u većini slučajeva je bila na ulagačima.

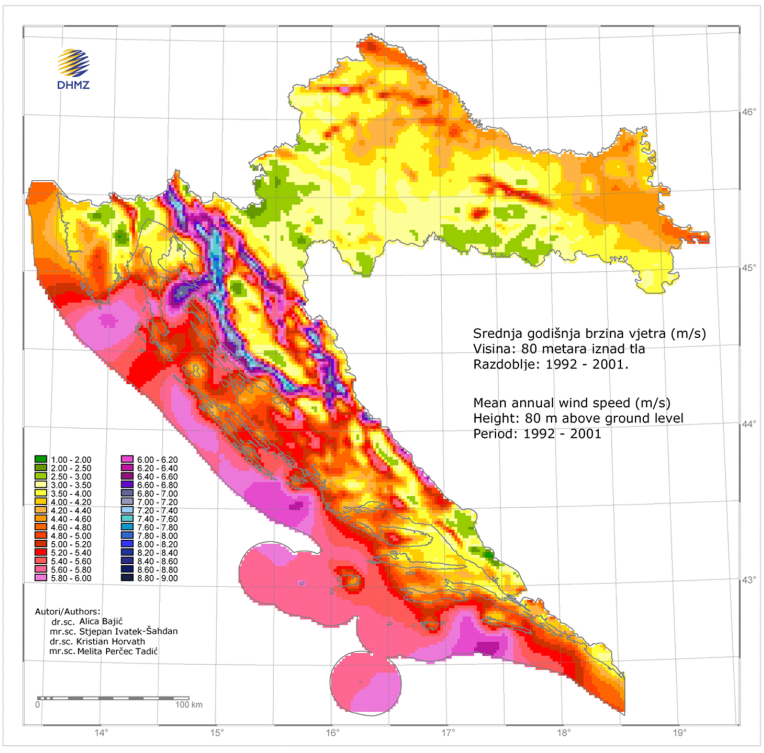
Namjena zemljišta i komunikacija s lokalnom zajednicom – Potrebno je istražiti namjenu zemljišta prije određivanja točne lokacije vjetroelektrane. U slučaju da je lokacija navedena kao zaštićeno područje, područje čija je namjena turizam, naselje ili slično, prenamjena prostora vjerojatno neće biti moguća.

Utjecaji na prirodu i okoliš – Uvijek je dobro dodatno provjeriti loše utjecaje na prirodu i okoliš. Npr. borave li na lokaciji neke od zaštićenih vrsta ptica, biljaka i slično. Još je potrebno voditi računa o blizini naselja (buka i zasjenjenje), blizini kulturnim dobrima, prometnicama, no prethodnim pregledom lokacije i savjetovanjem sa stručnjacima moguće je utvrditi je li lokacija u području gdje će gradnja imati znatan utjecaj na prirodu i okoliš. [11]

Atlas vjetra Hrvatske osnova je za procjenu energetskog potencijala vjetra u Hrvatskoj. Prikazane su karte srednje godišnje brzine vjetra (m/s) na visinama 10 m i 80 m iznad tla. [8]



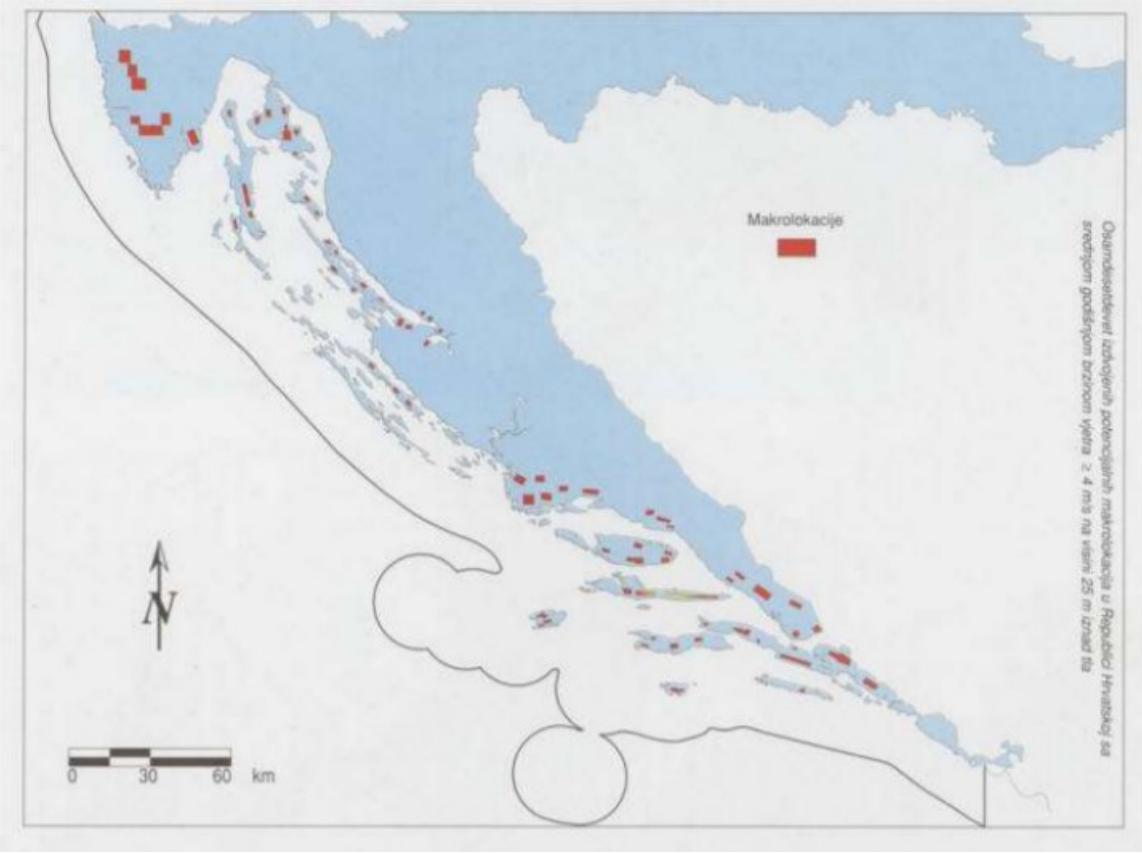
Slika 18. Srednja godišnja brzina vjetra na visini od 10 m iznad tla [8]



Slika 19. Srednja godišnja brzina vjetra na visini od 80 m iznad tla [8]

Istraživanja su pokazala da obalni prostor Hrvatske ima veliki vjetropotencijal s najviše potencijalnih lokacija u Dubrovačko-neretvanskoj, Splitsko – dalmatinskoj, Zadarskoj i Šibensko-kninskoj županiji

Za izgradnju vjetroelektrana, u Hrvatskoj, izdvojeno je 29 lokacija pogodnih za izgradnju. 19 lokacija nalazi se na otocima te poluotoku Pelješcu, a 10 u priobalnom području. Potencijalna godišnja proizvodnja električne energije na ovim označenim lokacijama (slika 20.) iznosila bi od 0,375 do 0,80 TWh na godinu. Također, na površini mora procijenjen je potencijal u rasponu od 350 do 500 GWh godišnje. Na svih 29 lokacija srednja godišnja brzina vjetra veća je od 5,5 m/s (područja kojima je srednja godišnja brzina vjetra manja od 5,5 m/s nisu prikladna i gospodarski opravdana za korištenje vjetra. [12] [13]

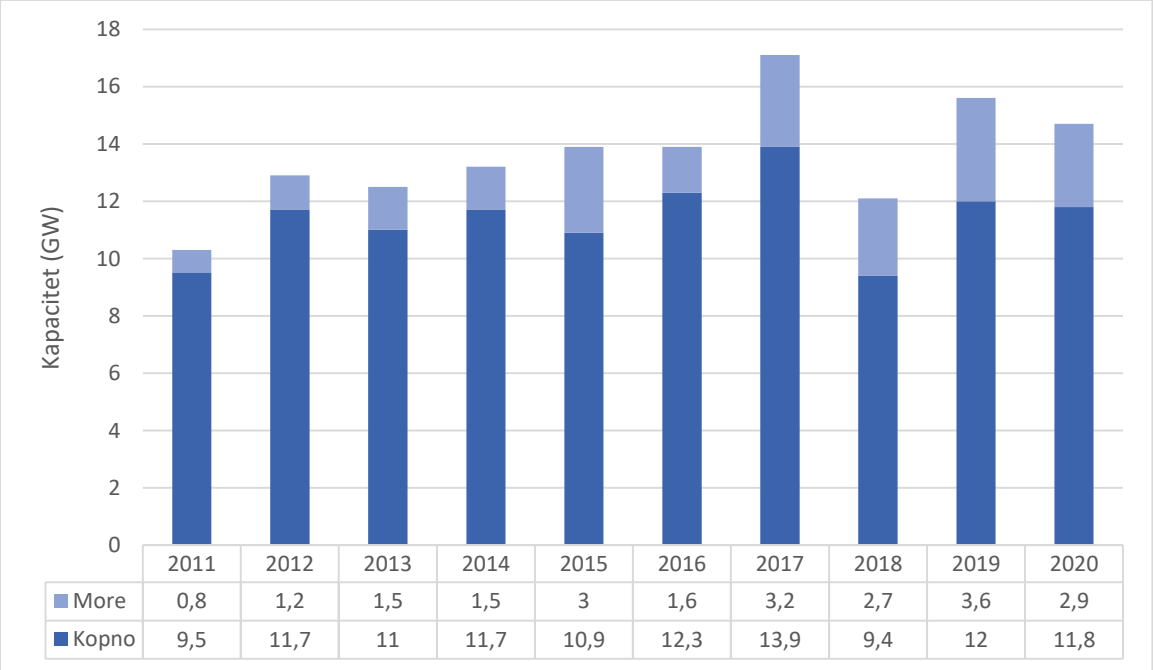


Slika 20. Potencijalne lokacije vjetroelektrana u Hrvatskoj [9]

5. VJETROELEKTRANE U EUROPSKOJ UNIJI

Europska Unija ima velike planove usko povezane uz izgradnju vjetroelektrana i korištenja energije vjetra. Do 2040. godine u planu su znatne promjene u elektroenergetskom sustavu Europe. Povećanjem nestašice fosilnih goriva i nesigurnosti opskrbom iz zemalja izvan EU te također zbog smanjenja emisije staklenih plinova, Europska Unija odlučila je maksimalno povećati investicije u izgradnju vjetroelektrana te trenutačno ima najveći kapacitet energije vjetra u svijetu – oko 70 % ukupnog broja kapaciteta energije vjetra.

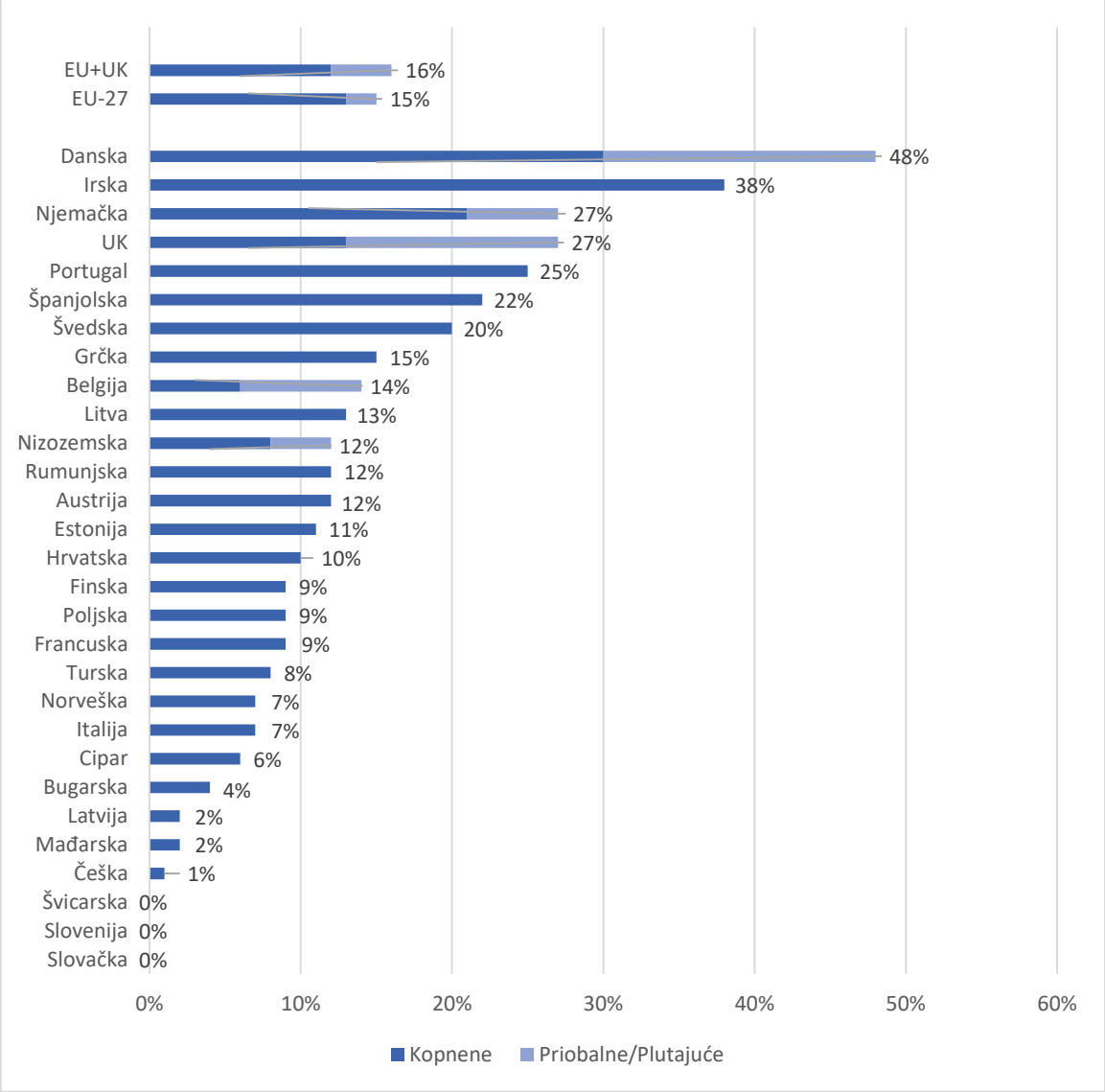
U 2020. godini ukupni instalirani kapacitet energije vjetra dosegao je 210 GW, što je ekvivalentno 15 % ukupne potražnje za električnom energijom. Do 2030. ta bi brojka mogla narasti i do 350 GW, opskrbljujući 24 % potražnje za električnom energijom. [16]



	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
More	0,8	1,2	1,5	1,5	3	1,6	3,2	2,7	3,6	2,9
Kopno	9,5	11,7	11	11,7	10,9	12,3	13,9	9,4	12	11,8

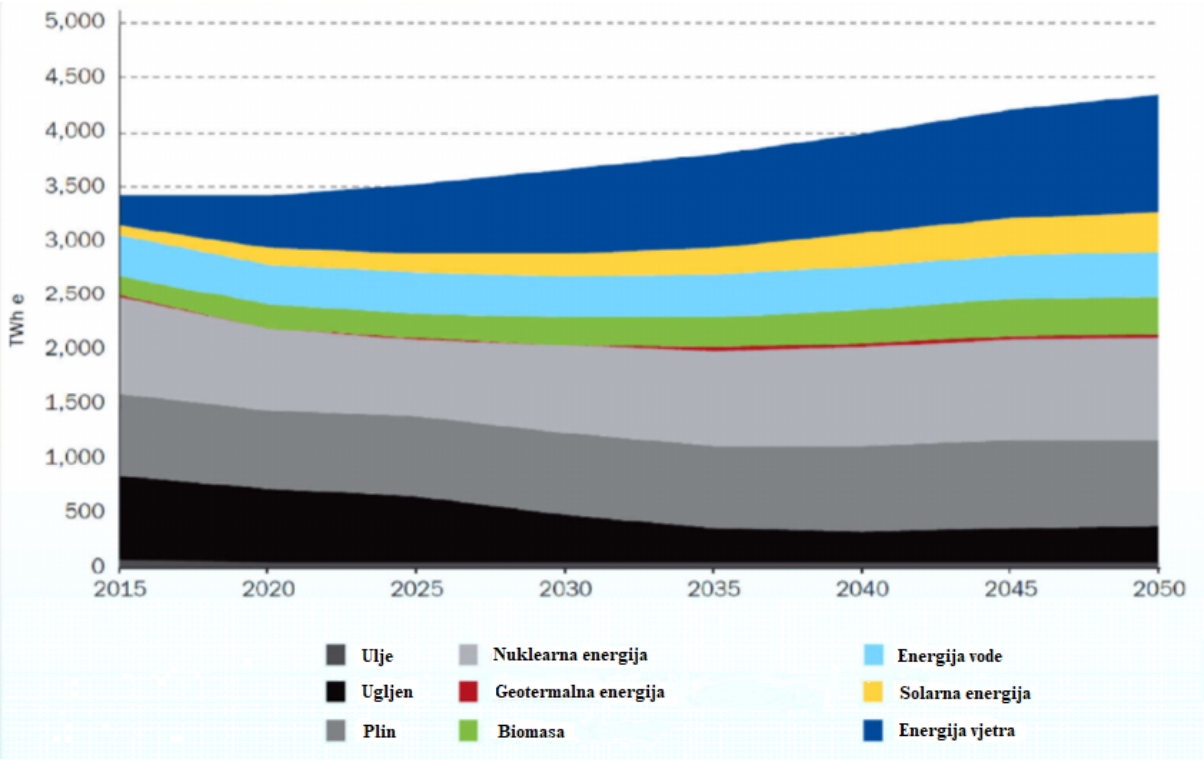
Slika 21. Godišnje instalirana snaga u Europi [10]

Njemačka je država s najviše instaliranih vjetroelektrana (62 GW), a zatim slijede Španjolska (27 GW), Velika Britanija (24 GW) i Francuska (17 GW). Također kao vodeća zemlja u svijetu u proizvodnji električne energije snagom vjetra ističe se Danska koja proizvodi čak 48 % svoje potražnje. Danas pola vjetrogeneratora proizvedenih u svijetu napravljeno je od strane danskih inženjera.



Slika 22. Poredak zemalja Europe u proizvodnji električne energije vjetroelektranama [10]

Europska Unija obvezala se postati prvi klimatski neutralan kontinent do 2050. [16] To zahtjeva transformaciju energetskog sustava koji uzrokuje više on 75 % emisija stakleničkih plinova. Energija vjetra idealno je postavljena kao tehnologija za ponovno pokretanje gospodarstva Europske Unije: skalabilna je, konkurentna po cijeni i bogata radnom snagom. Vjetar već čini 15 % europske električne energije, a Međunarodna Agencija za Energetiku (eng. International Energy Agency) očekuje da će vjetar postati prvi izvor proizvodnje energije do 2027. godine. [16] Istodobno, Europa može svoje klimatske ambicije učiniti jezgrom uspješne industrije strategije u sklopu plana oporavka EU on COVID-19 krize. 300 000 ljudi danas radi u industriji energije vjetra. Uz odgovarajuću politiku, razvoj tehnologija obnovljivih izvora energije može biti pokretač radnih mjesta i ekonomskog rasta. [16]



Slika 23. Trenutna prognoza i struktura proizvodnih kapaciteta električne energije u Europskoj Uniji [10]

6. PREDNOSTI I NEDOSTACI VJETROELEKTRANA

Prednosti:

Energija vjetra je čista i obnovljiva

- Za razliku od ugljena, prirodnog plina ili nafte, generiranje električne energije iz vjetra ne dovodi do emisije stakleničkih plinova. Iako postoje neki ekološki aspekti koji dolaze s izgradnjom velikih vjetroelektrana, nakon što krenu s radom, same vjetroturbine ne zahtijevaju sagorijevanje fosilnih goriva za rad.
- Osim toga, energija vjetra je potpuno obnovljiva i nikada neće nestati. Nasuprot tradicionalnim resursima fosilnih goriva koji se nadopunjuju vrlo sporo, vjetar se prirodno javlja u našoj atmosferi i ne moramo se brinuti oko problema s opskrbom u budućnosti

Energija vjetra ima niske operativne troškove

- Što se tiče početnih troškova, vjetroelektrane ili pojedinačne turbine mogu biti skupe za izgradnju. Međutim, nakon što su puštene u pogon, operativni troškovi su relativno niski; njihovo gorivo (vjetar) je besplatno, a turbine ne zahtijevaju previše održavanja tijekom svog vijeka trajanja.

Energija vjetra je prostorno učinkovita

- Vjetroelektrane zauzimaju puno manje površine u usporedbi s ostalim energetskim postrojenjima sličnog kapaciteta

Ostale pogodnosti: sigurnost opskrbe te diverzifikacija proizvodnje, domaća proizvodnja i smanjen uvoz električne energije, razvoj gospodarstva, napredak domaće industrije, stvaranje novih radnih mjesta i tehnološki razvitak.

Nedostatci:

Energija vjetra nije konstantna

- Učinkovitost vjetroelektrana u proizvodnji električne energije ovisi o vremenskim uvjetima pa može biti teško predvidjeti točno koliko će električne energije vjetroelektrana dati s vremenom. Ako su brzine vjetra u određenom danu preniske rotor turbine neće se vrtjeti.

Energija vjetra uzrokuje buku i vizualno zagađenje

- Jedan od najvećih nedostataka energije vjetra je buka i vizualno zagađenje. Vjetroturbine mogu biti bučne tijekom rada, što je posljedica i mehaničkog rada i vrtloga vjetra koji nastaje pri rotiranju lopatica. Nadalje, budući da vjetroturbine moraju biti izgrađene dovoljno visoko da uhvate dobru količinu vjetra, one često mogu prekinuti inače slikovite krajolike kao što su planinski lanci, jezera, oceani i slično.

Vjetroelektrane imaju negativan utjecaj na okolinu

- Lopatice vjetroelektrana su vrlo velike i rotiraju se vrlo velikom brzinom. Nažalost, njihove lopatice mogu ozlijediti i ubiti životinje koje ulijeću u njih poput ptica i šišmiša. Izgradnja vjetroelektrana također može poremetiti prirodna staništa lokalnih vrsta ako se ne provodi na adekvatan način. Međutim, ti se problemi mogu donekle riješiti tehnološkim napretkom i pravilnim smještanjem vjetroelektrana.

7. ZAKLJUČAK

Energija vjetra je čist i obnovljiv izvor energije te može pomoći u smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima i smanjenju emisije staklenički plinova. Ova energija je besplatna i nikad neće nestati te se gradnja vjetroelektrana pokazala jako profitabilna, gotovo bez rizika. Sve više zemalja, ponajviše u Europskoj Uniji, prate trend izgradnje vjetroelektrana te, iako je tehnologija energije vjetra već dosta napredovala, uz određena istraživanja i ulaganja može postati jedan od glavnih izvora električne energije. U Hrvatskoj, taj potencijal je dosta slabo iskorišten. S instaliranom snagom svih vjetroelektrana Hrvatska proizvede oko 1,78 TWh električne energije što je 13 % od ukupne proizvodnje koja iznosi 12,75 TWh. Također, kako Hrvatska uvozi 26 % električne energije, trebala bi bolje istražiti potencijal vjetra i ulagati u nove energetske projekte.

LITERATURA

[1]Plutajući vjetrogenerator u Sjevernom Moru: Professional Mariner

https://www.professionalmariner.com/us-to-explore-offshore-wind-potential-in-gulf-of-mexico/ (07.09.2021.)

[2] Priobalna vjetroelektrana Lillgrund , http://www.power-technology.com/projects/100mwlillgrund (07.09.2021.)

[3] SWT 3.0-101 An example of Systems Engineering – Andy Paliszewski, Siemens Energy Inc. Director Wind R&D Boulder, CO, https://www.nrel.gov/wind/assets/pdfs/se_workshop_paliszewski.pdf (07.09.2021.)

[4] Prezentacija, Pogonski strojevi i toplinske primjene obnovljivih izvora energije, Danijel Topić

[5] Energija u Hrvatskoj, Ministarstvo Gospodarstva i Održivog Razvoja

https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-energetiku-1999/energetska-politika-i-planiranje/energija-u-hrvatskoj/5330?fbclid=IwAR2Lkx66hvGPeqYOpndmvMn1dwXnvVrBXwOyF8baGRXX-YVIYiXqudYlJs4

(07.09.2021.)

[6]HOPS Vjetroelektrane

https://www.hops.hr/vjetroelektrane (07.09.2021.)

[7]Obnovljivi izvori energije, HEP

https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/vjetroelektrana-korlat/3468 (07.09.2021.)

[8]Atlas vjetra Hrvatske, Državni hidrometeorološki zavod

https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1_8 (09.09.2021.)

[9] Vjetroelektrane

http://ipaq.petagimnazija.hr/wp-content/uploads/2013/10/Obnovljivi_Vjetroelektrane_slozeno.pdf (10.09.2021.)

[10]Wind energy in Europe 2020 statistics and the outlook for 2021.-2025.

https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics/ (10.09.2021.)

[11] Razvoj projekata vjetroelektrana, Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave

http://www.obnovljivi.com/pdf/PDF_VJETROELEKTRANE_COM/3-19.pdf (10.09.2021.)

[12]Bajo, A., Ovanin, Z., Primorac, M. i Šimović, H. (2018). Hrvatsko tržište energije proizvedene iz vjetroelektrana

[13]Linta, S. (2015). *Vjetroelektrane u Hrvatskoj* (Specijalistički diplomski stručni). Preuzeto s https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:854820 (11.09.2021.)

[14] Prezentacija, Wind Energy

https://www.scribd.com/document/240361068/Wind-energy (11.09.2021.)

[15]Energija u Hrvatskoj, Ministarstvo Gospodarstva i Održivog Razvoja

https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Energija_u_Hrvatskoj/Energija_u_Hrvatskoj_2019-2.pdf (11.09.2021.)

[16]Wind energy, European Commision

https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/energy-research-and-innovation/wind-energy_en (12.09.2021.)

SAŽETAK

U ovom radu opisane su vjetroelektrane, njihove vrste i izvedbe. Nabrojani su i detaljno opisani glavni dijelovi vjetroelektrane, opisana je i njihova uloga. Uz sheme djelovanja sila na lopaticu rotora analiziran je princip rada vjetroelektrana i izvedena formula za snagu vjetra odnosno snagu na rotoru. Opisana je proizvodnja električne energije u Hrvatskoj i proizvodnja električne energije od vjetroelektrana, potencijal energije vjetra i na koji način se provodi odabir lokacija vjetroelektrana. Navedeni su glavni ciljevi Europske Unije s obzirom na obnovljive izvore energije te na kraju prednosti i mane vjetroelektrana.

Ključne riječi: Vjetroelektrane, energija, vjetar.

ABSTRACT

This paper describes wind power plants, their types and designs. The main parts of the power plants are listed and described in detail, and their role is described. In addition to the schemes of the action of forces on the rotor blade, the principle of operation of wind power plants was analyzed and the formula for wind power and power on the rotor was derived. The production of electricity in Croatia and the production of electricity from wind power plants, the potential of wind energy and how the selection of wind power plants locations is carried out are described. The main objectives of the European Union with regard to renewable energy sources and finally the advantages and disadvantages of wind power plants are stated.

Keywords: Wind power plants, energy, wind.