

# Razvoj off-shore energije vjetra na sjevernom Jadranu i njegova pozicija na tržištu električne energije

---

**Pavić, Anamaria**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:454393>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**RAZVOJ OFF-SHORE ENERGIJE VJETRA NA JADRANU I  
NJEGOVA POZICIJA NA TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Rijeka, svibanj 2023.

Anamaria Pavić

0069067200

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**RAZVOJ OFF-SHORE ENERGIJE VJETRA NA JADRANU I  
NJEGOVA POZICIJA NA TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Mentor: prof. dr. sc. Afredo Višković

Rijeka, svibanj 2023.

Anamaria Pavić

0069067200

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 10. listopada 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Tržište električne energije**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Anamaria Pavić (0069067200)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Razvoj off-shore energije vjetra na sjevernom Jadranu i njegova pozicija na tržištu električne energije / The development of off-shore wind energy on the North Adriatic and its position on the electricity market**

### Opis zadatka:

Pregled stanja europskog tržišta vjetroenergetike na moru. Analiza vjetra (općenito o vjetru i uvjeti za izbor lokacije s obzirom na vjetar) na Jadranskom moru. Analizirati tehnološke komponente vjetro opreme na svjetske industrije (dizajn vjetroturbine, topologija kolektorskog sustava). Elaborirati mogućnosti spoja na EES Hrvatske i eventualno Italije. Opisati tržišne mogućnosti uključujući i proizvodnju vodika i upotrebu baterijskog sustava kao dodatnog vektora "zelene energije". Izračun primjera tehno-ekonomske analize vjetro-parka na sjevernom Jadranu.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Pavić*

Zadatak uručen pristupniku: 10. listopada 2022.

Mentor:

*Alfredo Višković*  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Alfredo Višković

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

*Dubravko Franković*  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA

Ja, Anamaria Pavić ovom izjavom potvrđujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom "Razvoj off-shore energije vjetra na Jadranu i njegova pozicija na tržištu električne energije" izradila samostalno sukladno "Uputama za pisanje završnog/diplomskog rada" koje su date na internet stranicama Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, koristeći se navedenom literaturom uz vodstvo mentora prof. dr. sc. Alfredo Višković.

Anamaria Pavić

---

Rijeka, svibanj 2023.

## ZAHVALA

Hvala roditeljima i sestri  
na podršci, razumijevanju, ohrabrenju i strpljenju tijekom studiranja.

Hvala svim dragim ljudima koji su mi bili na raspolaganju za razgovore, savjete i kritike  
tijekom ovog perioda života.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VJETROENERGETIKA .....	3
2.1. Trenutno stanje energije vjetra u Europi .....	3
2.2. Odobalni vjetar u Europi .....	4
2.3. Energija vjetra u Republici Hrvatskoj .....	6
2.4. Potencijal odobalnog vjetra u Republici Hrvatskoj.....	9
3. SVOJSTVA VJETRA.....	12
3.1. Snaga vjetra .....	13
3.2. Snaga idealne turbine.....	14
3.2.1. Betzov zakon .....	15
3.3. Aerodinamika .....	17
3.3.1. Aeroprofil .....	17
3.2.2. Aerodinamičke sile na lopaticu .....	18
3.3. Promjena brzine vjetra s visinom .....	20
3.4. Radna područja vjetroagregata .....	20
4. ODOBALNA VJETROELEKTRANA .....	23
4.1. Anatomija vjetroturbine.....	23
4.1.1. Prijenosni sustav .....	24
4.1.2 Generator .....	25
4.1.3. Energetska elektronika sustava.....	26
4.1.4. Sustav kontrole i upravljanja .....	27
4.1.5. Temelji.....	28
4.2. Električna konfiguracija odobalnih vjetroelektrana .....	29
4.2.1 Kolektorski sustav .....	30
4.2.1.1. Radijalni dizajn .....	30
4.2.1.2. Prstenasti dizajn.....	31
4.2.1.3. Dizajn zvijezde.....	32
4.2.1.4. Novije tehnologije.....	33
4.2.2. Kablovi .....	34
4.2.2.1. AC kabeli.....	35
4.2.2.2. HVDC kabeli.....	35
4.2.3. Povezivanje s obalom .....	36
4.2.3.1. HVAC Visokonaponska istosmjerna struja.....	37
4.2.3.2. HVDC LCC.....	38

4.2.3.3.	Usporedba HVAC i HVDC LCC .....	39
4.2.3.4.	VSC HVDC.....	39
5.	SLUČAJ ISTARSKE ŽUPANIJE .....	41
5.1.	Proizvodnja eksploatacijskih polja Sjeverni Jadranu .....	43
5.2.	Mogućnosti prenamjene plinske infrastrukture .....	43
5.3.	Prenamjena cjevovoda plinske infrastrukture za transport vodika.....	44
5.4.	Power to Gas.....	45
5.5.	Cilj istraživanja.....	46
6.	SMJEŠTAJ I KOMPONENTE VJETROELEKTRANE .....	48
6.1.	Prostorni raspored vjetroelektrana.....	48
6.2.	Plutajući sustav vjetroturbine FOWT .....	49
6.2.1.	Vjetroturbina IEA RWT 10 MW .....	50
6.3.	Proizvodnja vodika unutar turbine .....	50
6.3.1.	Elektroliza.....	51
6.3.2.	Destilacijska stanica .....	52
6.3.3.	Kompresorska stanica.....	53
7.	ANALIZA SLUČAJA .....	54
7.1.	Analiza potencijala vjetroparka A .....	54
7.1.1.	Analiza brzine vjetra .....	54
7.1.2.	Analiza proizvodnje električne energije .....	55
7.1.3.	Ekonomska analiza vjetroparka A .....	57
7.2.	Analiza potencijala Vjetroparka B .....	61
7.2.1.	Analiza brzine vjetra .....	61
7.2.2.	Analiza proizvodnje i skladištenja vodika .....	61
7.2.3.	Prednosti proizvodnje vodika unutar turbine.....	64
7.3.	Analiza dobivenih podataka .....	65
8.	ZAKLJUČAK.....	66
9.	LITERATURA .....	67
10.	SAŽETAK.....	71



# 1. UVOD

U srpnju 2013. Hrvatska je ušla u Europsku uniju (EU). Tijekom uzlaznog procesa hrvatska Vlada snažno se posvetila intenzivnom razvoju sektora obnovljivih izvora energije. Kako bi se ispunio cilj Europske unije smanjenja emisija stakleničkih plinova od 80% do 2050. u odnosu na emitirane količine iz 1990. godine, Hrvatska bi trebala početi razmišljati o usmjeravanju proizvodnje električne energije kako bi se iskoristio potencijal OIE na moru. Povećanje potražnje za električnom energijom, obnovljivi izvori na moru nameću se kao dio rješenja. Korištenje obnovljivih izvora pridonosi dekarbonizaciji hrvatskog energetskeg sektora i pridonosi održivom gospodarskom razvoju.

Kao izvor energije vjetar je neiscrpan, besplatan i ne zagađuje okoliš. Prema definiciji, vjetar je atmosferski zrak u kretanju. Snaga vjetra je količina energije vjetra koja teče kroz područja interesa u jedinici vremena. No, sva snaga ne može biti ekstrahirana iz vjetra. Maksimalni teoretski prag snage vjetra je 59,3 % ukupne snage poznat kao Betzov limit. Promjena brzine vjetra mijenja se s visinom te je važan faktor u procjeni proizvodnje energije vjetroagregata.

Vjetroelektrane pretvaraju energiju vjetra u električnu energiju, smanjujući potrebu za fosilnim gorivima i smanjujući emisije stakleničkih plinova. Vjetro turbine razlikuju se u veličini, obliku i izlaznoj snazi. Osnovno dijelovi turbine su rotor, gondola, toranj i temelji. Energiju koju proizvodi vjetro park skuplja se unutar turbina različitog dizajna te se transportira do točke spajanja na obali interkonekcijskim prijenosnim sustavom. Prijenosni sustav može biti s visokonaponska izmjenična strujom (HVAC) ili visokonaponskom istosmjernom strujom (HVDC).

Analiza slučaja je predstavljen za problem Istarske županije. Istarska županija ima veliki problem nedostatka energije u ljetnom periodu zbog prevelikog konzuma uslijed turističke sezone. Predviđaju se potrebe za električnom snagom od 500 MW.

Padom proizvodnje plina na plinskim poljima u Jadranu i približavanju kraja njihovog radnog vijeka razmišlja se o mogućnostima njihove prenamjene. Razvojem novih tehnologija i unaprjeđenjem postojećih za nastavak korištenja platformi pronalaze se nova, inovativna rješenja kojih su još uvijek u fazi istraživanja. Jedno od rješenja je povezivanje postojećih tehnologija obnovljivih izvora energije, kao što su odobalni vjetroagregati, s mogućnošću prenamjene platformi. Međutim, neka ograničenja koja dolaze u sklopu proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana su neredovito i nejednoliko puhanje vjetra te poteškoće sa skladištenjem/transportom energije. Ogromna ulaganja u odobalnu energiju vjetra stvaraju

značajne izazove o tome kako će se ta električna energija integrirati u postojeće energetske sustave. U tom kontekstu, zeleni vodik proizveden procesom elektrolize odobalnim postrojenjem pojavljuje se kao dodatni vektor za uklanjanje prepreka sa svojom fleksibilnošću pretvorbe i skladištenja. Model koji je predložen za rješenje je integrirani dizajn odobalnog vjetroparka s proizvodnjom električne energije plutajućim vjetroturbinama i vodikove infrastrukture.

Sinergija prenamjene postojećih odobalnih postrojenja i vjetroturbin predstavlja dio rješenja za problem nedostatka električne energije Istarske županije.

## 2. VJETROENERGETIKA

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, snažan razvoj tehnologija obnovljivih izvora energije motiviran je globalnim iscrpljivanjem rezervi fosilnih goriva. Općenito, energetske resursi smatraju se obnovljivim ako se ne može iscrpiti te njegovim korištenjem ne dolazi do zagađenja okoliša. Trenutno, najčešće korišteni obnovljivi izvori energije su vjetar, sunce i voda. Energija vjetra se pretvara u električnu energiju pomoću vjetroturbina, budući da turbina transformira kinetičku energiju vjetra u rotacijsko gibanje lopatice rotora. Budućnost obnovljivih izvora, posebno upotrebom vjetra, u Hrvatskoj kao i u svijetu, zajamčena je potrebom država za održivim razvojem, zaštitom okoliša i energetske učinkovitošću.

U današnje vrijeme zbog ograničenih mogućnosti izgradnje vjetroelektrana na kopnu, problemi s bukom, vizualno zagađenje, mali broj dostupnih lokacija sa željenim svojstvima vjetra, različite komercijalne poteškoće vezane uz iznajmljivanje zemljišta ili kupnju i ishođenje potrebnih zakonskih dozvola, intenzivirao je razvoj odobalnih postrojenja.

Vjetroelektrane na moru obično imaju veću dostupnu površinu od vjetroelektrana na kopnu. Najveća na svijetu vjetroelektrana na moru sastoji se od 165 vjetroturbina ukupne snage 1,3 GW (Orsted, 2022.).

Nedostaci odobalnih vjetroelektrana su vezani uz veće kapitalne troškove zbog većih troškova instalacije (instalacija podvodnih kabela, podstrukture, trafostanice na moru itd.), koji zahtijevaju uključivanje nekoliko plovila na moru. Rad i održavanje na moru može biti vremenski zahtjevno, a teški uvjeti na moru mogu rezultirati visokim troškovima održavanja. [1]

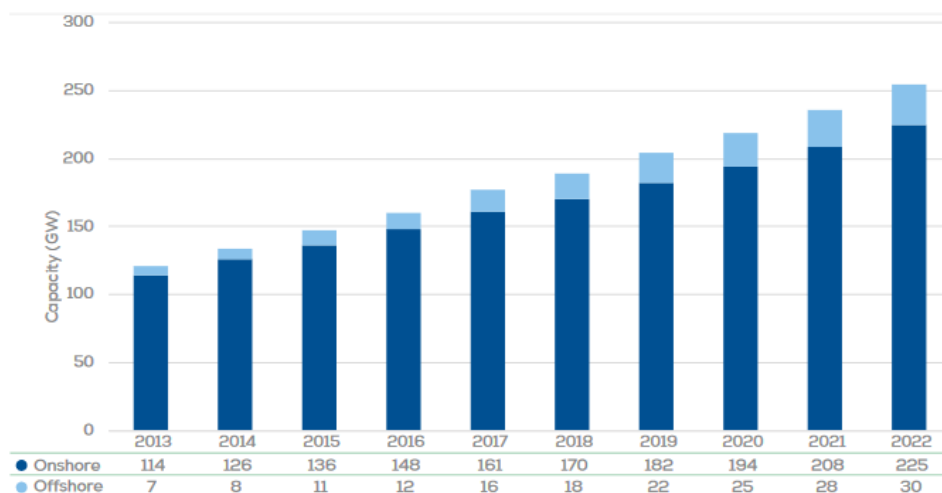
S druge strane, vjetroelektrane na moru imaju veći faktor iskorištenosti od onih na kopnu zbog boljih uvjeta vjetra na moru, ali i zato što su vjetroelektrane na moru veće i više od kopnenih. Faktori iskorištenosti u Europi povećali su se s 39% u 2010. na 48% u 2021. [1]

Sektor odobalne energije nedvojbeno ima veliki potencijal davanja važnog doprinosa opskrbi obnovljivom energijom, a postotak električne energije koji bi se mogao proizvesti iz vjetroelektrana na moru (OWF), u cijelom svijetu, procjenjuje se na oko 7% do 2050.

### 2.1. Trenutno stanje energije vjetra u Europi

Europa s početkom 2023. godine ima 255 GW instaliranih kapaciteta vjetroelektrana: 225 GW na kopnu i 30 GW na moru, kao što je prikazano na slici 1.1. [3]

Najveći udio instalirane snage energije vjetra u Europi u 2022. godini ima Njemačka s preko 66 GW instaliranog kapaciteta. Slijede ju Španjolska (30 GW), UK (29 GW), Francuska (21 GW), Švedska (15 GW) i Turska (12 GW). Ovih šest zemalja predstavljaju dvije trećine ukupnog instaliranog kapaciteta u Europi.



*Slika 1.1. Instalirani kapacitet vjetroelektrana u Europi za razdoblje 2013.-2022. godine [3]*

Proizvodnja energije vjetra u Europi je u stalnom porastu s 370 TWh u 2018. na 489 TWh u 2022. U istom razdoblju potražnja za električnom energijom je pala s 2.960 TWh u 2018. na 2.830 TWh u 2022.

Energija vjetra zadovoljila je 17% potražnje u EU i UK-u 2022. U EU-u, udio potražnje za energijom vjetra iznosio je 16% u 2022. Općenito, faktor kapaciteta vjetroturbine s vremenom se povećava kako se tehnologija turbina poboljšava, a mnoge zemlje bilježe porast faktora kapaciteta za cijelu flotu tijekom godine jer postavljaju modernije turbine.

Prosječna nazivna snaga turbina instaliranih na kopnu u 2022. iznosio je 4,1 MW. Osim novih i snažnijih turbina, u 2022. predstavljene su turbine s relativno većim promjerom rotora i manje snage. Osmišljeni su za mjesta koja karakteriziraju niže brzine vjetra. Prosječne snage novo naručenih turbine u protekloj godini iznosile su rekordnih 5,1 MW. Njihovom instalacijom na terenu u predstojećem razdoblju dovodi do daljnjeg povećanja prosjeka nazivna snaga instaliranih kopnenih vjetroturbina.

## 2.2. Odobalni vjetar u Europi

Energija vjetra na moru predstavlja važan čimbenik prelaska iz starih (fosilnih) izvora energije u obnovljive. Prelazak se odvija zbog borbe s klimatskim promjenama i kako bi se smanjila emisija

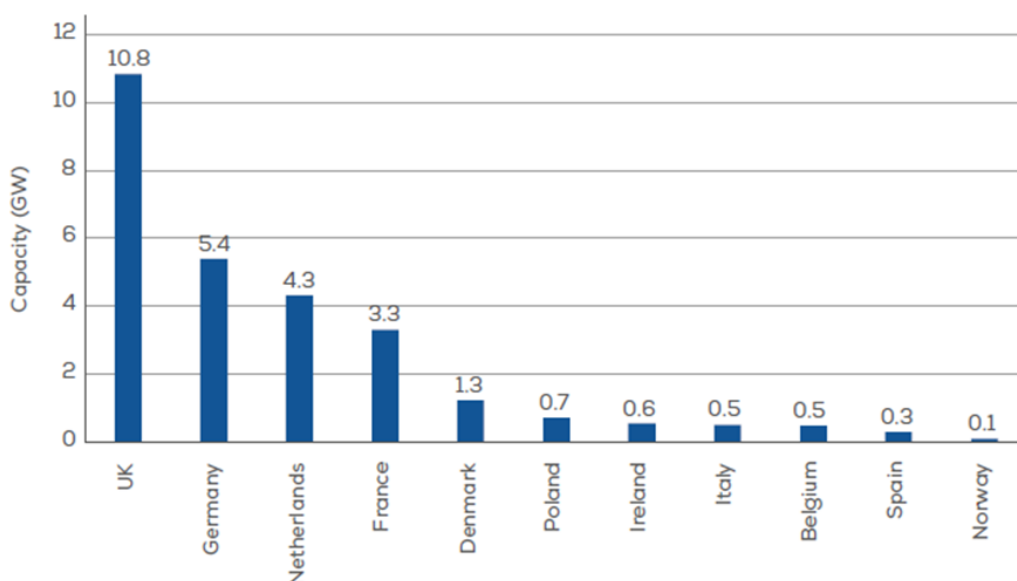
CO<sub>2</sub>. Ova vrsta energije prepoznata je kao ključni element u postizanju smanjenja emisije stakleničkih plinova. Instalirana „Offshore“ energija vjetra ili energija vjetra na moru raste gotovo 20% godišnje na svjetskoj razini.

Dugoročna klimatska strategija Europske unije ističe ovu vrstu kao vodeću tehnologiju za proizvodnju energije do 2050. godine. Predviđa se da će do tada biti instaliranog kapaciteta od 450 GW. [5]

Europska komisija je objavila strategiju za ostvarivanje ambicioznih ciljeva Europske unije za obnovljive izvore mora i klimatske promjene. Plan je objavljen studenom 2020., njime predlaže povećanje kapaciteta proizvodnje električne energije putem vjetroparkova zemalja Europske unije bez Ujedinjenog kraljevstva. Pretpostavlja se povećanje kapaciteta u dvije epohe kako bi se postigao cilj klimatske neutralnosti. Prva epoha donosi povećanje s 12 GW na 60 GW do 2030. godine. Druga epoha predviđa rast do 300 GW u 2050. godini. [5]

Nakon razdoblja kontinuiranog rasta između 2014. i 2020 kada su instalirane snage turbine više nego udvostručene, prosječna snaga vjetroturbina na moru ostala je stabilan na oko 8 MW. Narudžbe offshore turbina u 2022. također su dosegle rekord visoka, u prosjeku 12,2 MW. S novim, snažnijim turbinama uskoro će ući na tržište, prosječno instaliran pučinski vjetar očekuje se povećanje snage turbina od 2023. [3]

Od 2021. Europa ima kapacitete plutajućih vjetroelektrana od 113 MW. Najveća vjetroelektrana je Kincardine u Ujedinjenom Kraljevstvu s kapacitetom od 50 MW. Portugal, Norveška, Španjolska i Francuska također imaju plutajuće kapacitete (WindEurope, 2022.)



*Slika 2.2. Nove instalacije vjetroelektrana po državama u periodu 2022-2026 [5]*

Na slici 2.2. prikazan je scenarij realnih očekivanja u periodu od 2022. do 2026. Prema scenariju Europa će instalirati ukupno 27,9 GW kapaciteta energije vjetra s mora, s prosječnih 5,6 GW po godini. „Offshore“ vjetroelektrane činit će 24% ukupnog tržišta u petogodišnjem razdoblju.

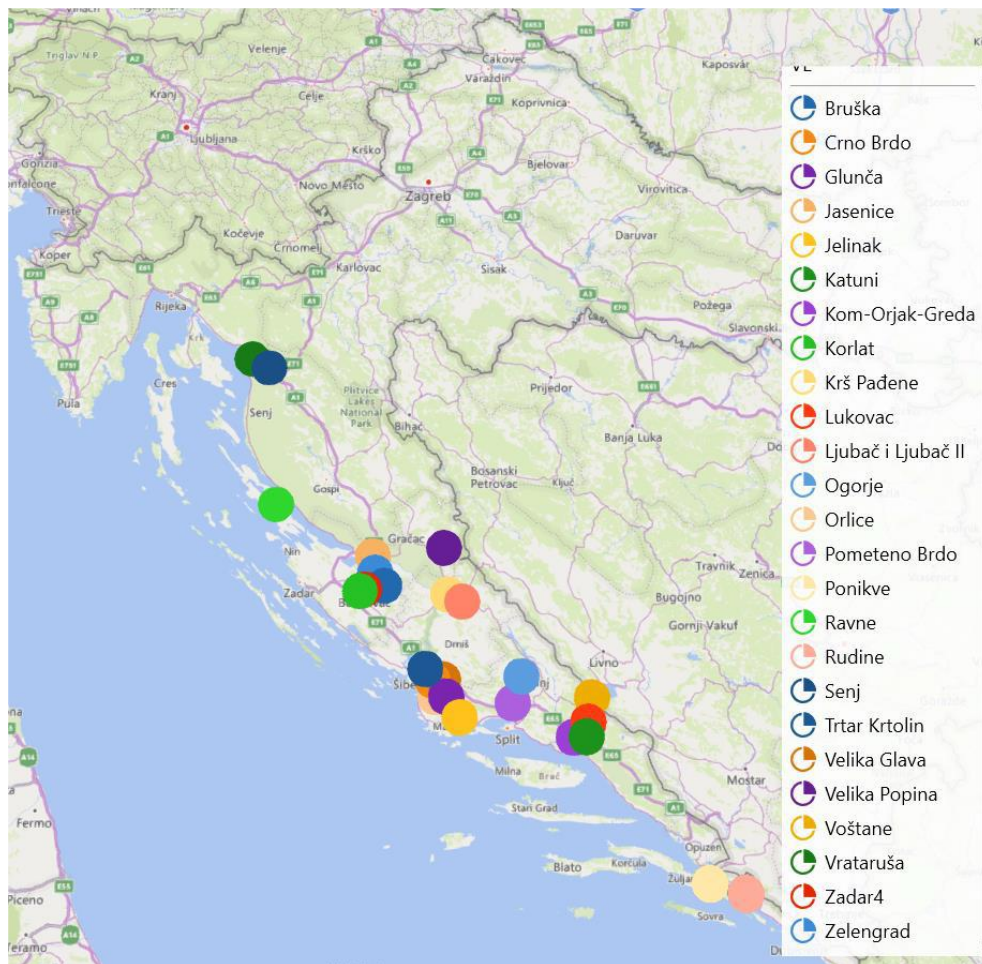
Većina „offshore“ instalacija bit će izgrađena u vodama Ujedinjenog Kraljevstva (39%). Još osam zemalja također će izgraditi značajne offshore instalacije, kao što su Njemačka (5,4 GW), Nizozemska (4,3 GW), Francuska (3,3 GW), Danska (1,3 GW), Poljska (0,7 GW), Irska (0,6 GW), Italija (0,5 GW) i Belgiji (0,5 GW). Također, Španjolska i Norveška rade na projektima novih instalacija.

Očekuje se da će 2026. biti prekretnica za „offshore“ tržište u Europi. Ne samo da će Ujedinjeno Kraljevstvo povećati stopu ugradnje, već će i nova tržišta koja do sada nisu bila u igri poput Poljske i Irske početi doprinositi. Od njih se očekuje da će u nadolazećim godinama imati visoke stope ugradnje uz već etablirana tržišta. [5]

### 2.3. Energija vjetra u Republici Hrvatskoj

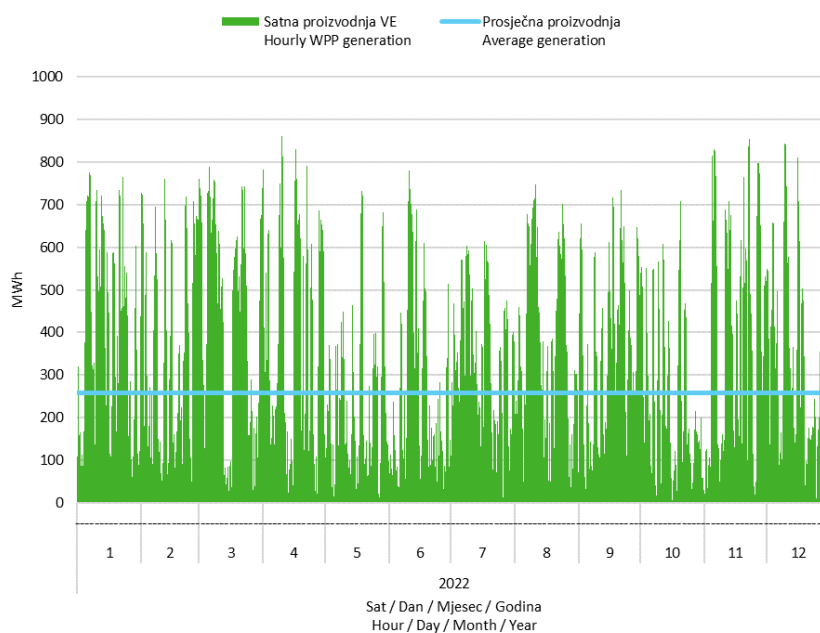
Situacija u Hrvatskoj je sljedeća: energija vjetra u potpunosti je koncentrirana na kopnu s 25 vjetroelektrana, s ukupno instalirane snage od 834.16 MW zaključno sa siječnjem 2023. godine. Trenutno je pri kraju izgradnje, odnosno probnom pogonu, jedna nova vjetroelektrana od 156 MW instalirane snage. Puštanjem u pogon nove elektrane Hrvatska će se približiti 1 GW ukupno instalirane snage [22]. Vjetroelektrane koncentrirane su većinom u Dalmaciji. Najviše vjetroelektrana smješteno je na lokacijama u Šibensko-kninskoj županiji (9), Zadarskoj županiji (7), Splitsko-dalmatinskoj županiji (6), Dubrovačko-neretvanskoj županiji (2) i Ličko-senjskoj županiji (1+1 u pokusnom radu). Na slici 2.3. prikazan je prostorni raspored vjetroelektrana.

Posebnost VE u Hrvatskoj je njihova mala geografska raspršenost, 81% ukupno instalirane snage VE smješteno na području sličnog vjetroklimatskog režima. Ovakav raspored utječe na vođenje elektroenergetskog sustava u cjelini i na promjenjivost ukupne proizvodnje VE iz razloga što promijenom brzine i smjera vjetra sve slično reagiraju. [22]



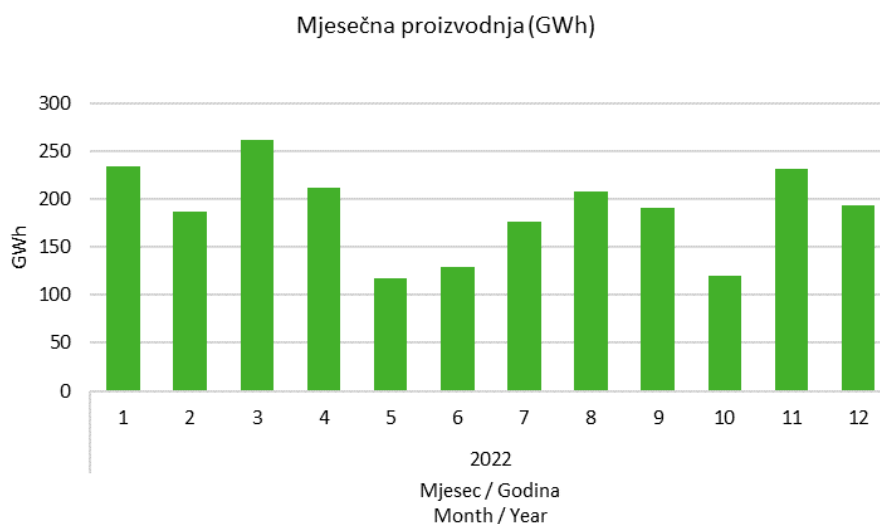
*Slika 2.3. Prostorni raspored vjetroelektrana RH [22]*

Na slici 2.4. prikazana je ukupna satna proizvodnja električne struje svih VE u Hrvatskoj za 2022. godinu, koja je iznosila 2263,1 GWh. Najveća ostvarena satna proizvodnja iznosila 860,65 MWh u travnju, a najmanja 0 MWh ostvarena u srpnju. Prosječna satna proizvodnja svih VE u 2022. godini iznosila je 258,37 MWh.



**Slika 2.4.** Satna proizvodnja svih VE u Hrvatskoj za 2022 [22]

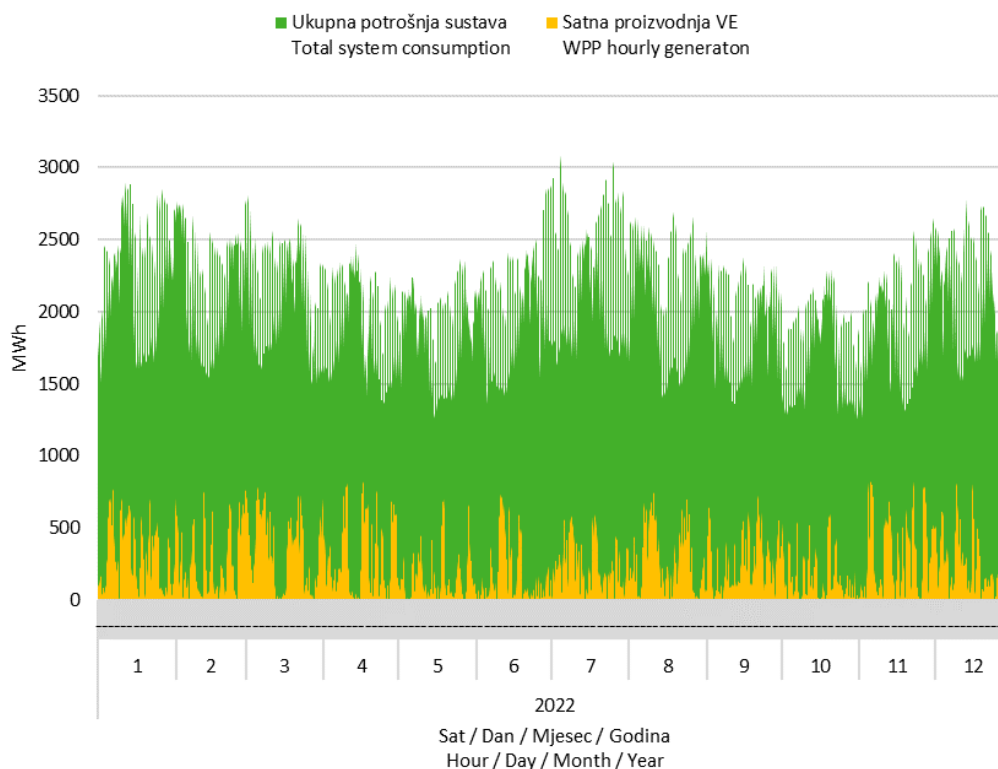
Na slici 2.5. prikazana je ukupna mjesečna proizvodnja svih VE i u 2022. godini. Najmanji udio proizvodnje dogodio se u ljetnim mjesecima, posebno u svibnju kada je ostvarena minimalna proizvodnja od 117,64 GWh. U ožujku je zabilježena najveća proizvodnje te je iznosila 262,23 GWh.



**Slika 2.5.** Mjesečna proizvodnja svih VE [22]

U posljednje vrijeme VE imaju sve veću ulogu u pokrivanju opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske. Prikazana je usporedba satnog dijagrama opterećenja sustava i proizvodnje VE na slici 2.6. Najveći udio proizvodnje VE u pokrivanju opterećenja sustava iznosio je 61,4%.





**Slika 2.6.** Usporedba satnog dijagrama opterećenja sustava i proizvodnje VE [22]

S obzirom na to da u vrijeme pisanja rada nije izašao Godišnji energetske pregled za 2022. godinu od Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja, poslužit ću se pregledom iz 2021. godine za sljedeći podatak. Ukupna proizvedena električna energija za 2021. godinu iznosila je 15210,4 GWh, koja uključuje kapacitete hidro, termo, vjetro i solarnih elektrana. Udio vjetro s proizvodnjom 2061,8 GWh činio je 13,55 % ukupne proizvedene električne energije u 2021. godini [15].

#### 2.4. Potencijal odobalnog vjetro u Republici Hrvatskoj

Sektor odobalne energije nedvojbeno igra važnu ulogu sa svojim doprinosom u opskrbi čistom obnovljivom energijom. Odobalni „Offshore“ sektor ili inženjerstvo mora uključuje znanje o: konstrukciji temelja, cjevovodima, odobalnim platformama, podvodnim kabelima, resursima morskih obnovljivih izvora, kao i znanje o ekstrakciji derivata iz podmorskog dna, itd.

U teritorijalnim vodama Hrvatske već imamo dugogodišnje iskustvo u sektoru inženjerstva mora, za područje ekstrakcije derivata iz podmorskog dna. Istraživanja u tome području su započela prije 50 godina s eksploatacijskim poljem Ivana. Danas se proizvodnja plina i nafte izvodi iz tri

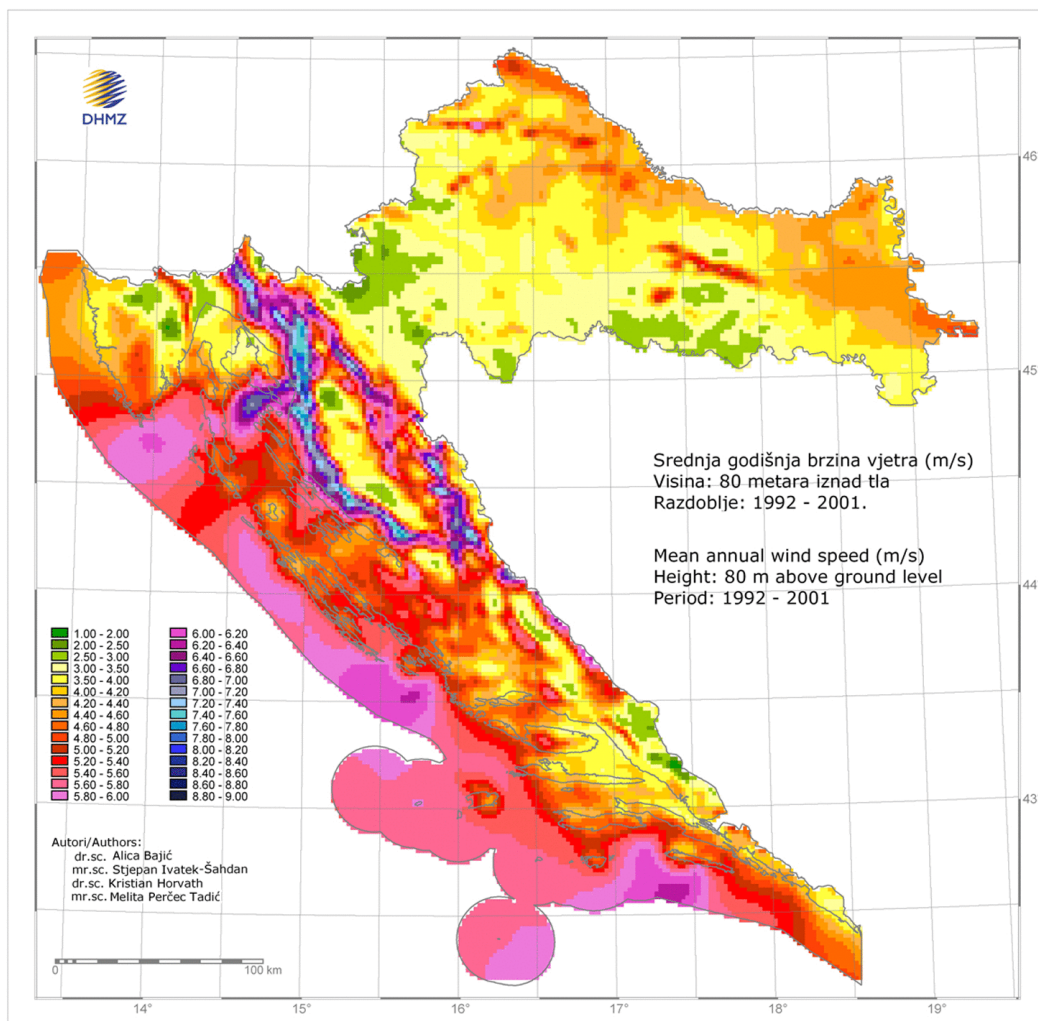
eksploatacijska polja koja čine 19 proizvodnih platformi. Usvojena znanja tijekom dugogodišnjeg iskustva s odobalnim naftnim platformama trebali bi preusmjeriti, skupa s znanjem kopnene vjetroenergetike, u proizvodnju čiste energije odobalnim vjetroelektranama. Sve u svrhu smanjenja ugljičnog otiska.

Korištenje energije vjetra na moru postaje sve važnija zbog održivog razvoja diljem svijeta. U Hrvatskoj, kao i u drugim mediteranskim zemljama, energija vjetra proizvodi se samo iz kopnenih postrojenja. Iako, u posljednjih nekoliko godina interes za korištenje resursa vjetroelektrana na moru sve brže raste. Napredak se može vidjeti na primjeru Grčke i Italije, koje su slične Hrvatskoj po karakteristikama odobalnog vjetra i terena. Italija se može pohvaliti s prvom odobalnom vjetroelektranom na Mediteranu. Vjetroelektrana Bealeolico sastoji se od 10 turbina ukupne snage 30 MW [20]. Talijanska vlada uzela je u obzir izgradnju odobalnog energetskeg središta „AGNES“, na sjevernom dijelu Jadranskog mora u blizini grada Ravene, uključujući dvije vjetrofarme snage 200 i 400 MW [21]. Grčka vlada odobrila je zakone vezane uz odobalni vjetar te najavila projekt plutajuće vjetroelektrane od 2 GW do 2030. godine [19].

Teoretski potencijal odobalnog vjetra u Jadranskom moru procjenjuje se na približno 150 TWh električne energije, što daje veliki potencijal za razvoj odobalnih vjetroelektrana. Hrvatski teritorijalni dio Jadranskog mora iznosi  $61,067 \text{ km}^2$ . [24]

Atlas vjetra Hrvatske je osnova za procjenu energetskeg potencijala vjetra. Procjenu hrvatskog vjetroenergetskeg potencijala izradio je Državni hidrometeorološki zavod pomoću računalnog sustava ALADIN za kratkoročnu prognozu vremena. Dostupni podaci uključuju prosječnu brzinu vjetra i gustoću snage na visinama od 10 i 80 m iznad razine tla u promatranom vremenskom okviru od jedne godine. Površina uzorka je kvadratna mreža od  $2 \times 2 \text{ km}$  [25]. Dostupni podatci odnose se na 10-godišnju brzinu vjetra za period od 1992. godine do 2001. godine koji su vidljivi na Slici 2 [26].

Procjene koje su uzete u obzir trebaju se uzeti sa zadržkom iz razloga što su potrebna dodatna istraživanja i validacije [24]. Informacije o novijim istraživanjima procjena vjetra nisam pronašla.



**Slika 2.7.** Srednja godišnja brzina vjetra na visini 80 m iznad tla za razdoblje 1992.-2001. [26]

Budući da energetska potencijal vjetroelektrana obično se određuje na temelju srednjeg vjetrovrijednosti brzine na visini središta vjetroagregata, rezultati koji su zabilježeni korisni su i mogu nam dati uvid u moguće lokacije za odobalne vjetroelektrane.

Potencijalne lokacije za vjetroelektrane, s obzirom na srednje godišnje vrijednosti vjetra, nalaze se u priobalnim područjima gradova Pule i Šibenika te otoka Mljeta i Malog Lošinja. Prosječna brzina iznosi 6,5 m/s za lokacije. Postojeći podatci uzimaju se kao preliminarna aproksimacija, budući da brzine vjetra nisu direktno izmjerene na otvorenom moru i nisu uzete različite karakteristike vjetra u obzir. [24]

### 3. SVOJSTVA VJETRA

Vjetar je atmosferski zrak u kretanju.

Ovisno o brzini kretanja zraka vjetar se može činiti laganim i neopipljivim, tihim i nevidljivim oku. S druge strane može biti jaka i razorna sila, glasan i vidljiv kao rezultat krhotina koje nosi sa sobom.

Sunce je izvor energije za stvaranje vjetra. Elektromagnetsko zračenje Sunca kontinuirano zagrijava Zemljine površine te veći dio energije odlazi nazad u svemir, a manji dio se pretvara u toplinsku energiju. Procijenjeno je da samo 1-2% sunčevog zračenja bude pretvoreno u vjetar [37]. Elektromagnetsko zračenje je jače u području oko ekvatora-tropskim krajevima i slabi s udaljavanjem prema polovima. [39]

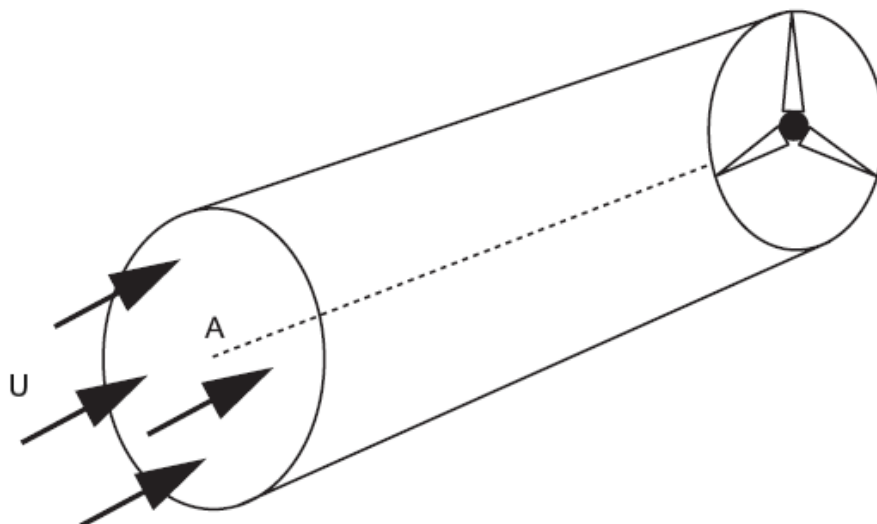
Zemljina površina ne zagrijava se jednolikom brzinom zbog geografskog oblika planeta poput različite apsorpcije sunčeve svjetlosti od strane tla, stijena, vode i vegetacije[38]. Zemljinom rotacijom i neravnomjernim zagrijavanjem dolazi do gibanja zraka. Ovo neravnomjerno zagrijavanje se konvektivnim procesima pretvara u gibanje zraka, što je prilagođen rotacijom Zemlje. Konvektivni procesi ili toplinsko strujanje su poremećaj hidrostatske ravnoteže pri čemu su inače ustajale zračne mase kreću kao reakcija na sile izazvane promjenama gustoće zraka i uzgona zbog temperaturnih razlika[40].

Kada Sunce obasjava ekvator, zrak u blizini Zemlje postaje topliji; stoga mu pada gustoća. Zrak niske gustoće stvara područje niskog tlaka okolo ekvatoru i diže se okomito prema višim nadmorskim visinama[37]. Za razliku od ekvatora, u polarnim područjima postoji obrnuto stanje i zrak se kreće prema dolje. U ovom području, hladni i time teži zrak čini područje visokog tlaka. Zrak se potiskuje s visokog na područja niskog tlaka. [40]

Karakteristike vjetra poput brzine i smjera, nisu jednake te se mijenjaju s vremenom i prostorom. Brzina vjetra je najmanja oko ekvatora te se povećava odmicanjem od njega. Najveće brzine dostižu se u području između  $30^\circ$  i  $60^\circ$  geografske paralele zbog mehanizma cirkulacije zraka [40]. Naznačeno područje nalazi se na sjevernoj polutki i pokriva područje Europe, SAD i veći dio Azije. Južna polutka ima veće brzine vjetra, u odnosu na sjevernoj polutki, zbog manjeg udjela kopna. Smanjenim udjelom kopna recipročno se smanjuju prepreke za strujanje zraka te dolazi do povećanja slobodnog kretanja zraka i većih brzina vjetra. Proizlazi da su brzine vjetra veće na otvorenom moru nego na kopnu. Nadalje, brzina se mijenja s godišnjim dobima. Sjeverna polutka bilježi veće brzine zimi, a ljeti manje.

Prije analize bilo koje vjetroturbinе, mora se razumjeti odnos između brzine i gustoće vjetra i njegove snage. Zadržana snaga vjetra nije 100%. Baš kao i toplinski strojevi čija je učinkovitost ograničena na Carnot ciklusom, udio snage koji se može uhvatiti ima granicu koja se naziva Betzovo ograničenje [37].

### 3.1. Snaga vjetra



*Slika 3.1. Strujanje vjetra kroz cilindar površine A [38]*

Snaga vjetra je količina energije vjetra koja teče kroz područja interesa u jedinici vremena. Drugim riječima, energija vjetra je strujanje vjetra energije kroz promatrano područje. Energija sadržana u brzini vjetra je kinetička energija ( $E_k$ ) mase zraka ( $m$ ) koja se kreće određenom brzinom ( $U$ ) [40]:

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times U^2 \quad (3.1)$$

Masa ( $m$ ) koja prolazi kroz cilindar poznate veličine tijekom jedinice vremena ( $dt$ ) dana je množenjem gustoće zraka ( $\rho$ ) s volumetrijskim protokom ( $Q$ ) [40]:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \times Q = \rho \times A \times U \quad (3.2)$$

Snaga vjetra je brzina protoka kinetičke energije. Derivacijom količine kinetičke energije koja teče u jedinici vremena kroz određeno područje jednaka je sadržaju kinetičke energije cilindra prikazanog na slici 3 [39].

$$P = \frac{dE_{kin}}{dt} = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times U^2 \quad (3.3)$$

Zamjenom masenog protoka (3.2) s masom zraka (3.1), konačni rezultat jednadžbe za snagu vjetra glasi:

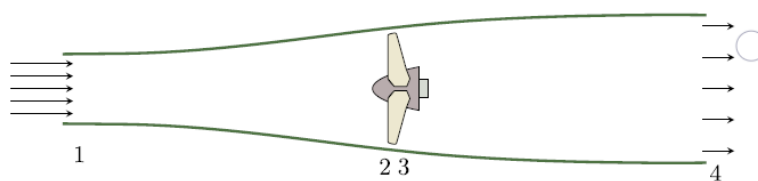
$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times U^3 \quad (3.4)$$

Jednadžba (3.4) prikazuje da je snaga vjetra proporcionalna gustoći i kubiku brzine vjetra, odnosno to znači da udvostručenjem brzine vjetra rezultira osmerostrukim povećanjem njegove snage. Zato što vjetar ima velike brzine snage i energije dolazi do velikih šteta razaranja. Pri takvim uvjetima vjetroturbine imaju sredstva kontrole te neće izvlačiti svu raspoloživu energiju zbog mogućnosti uništenja[37].

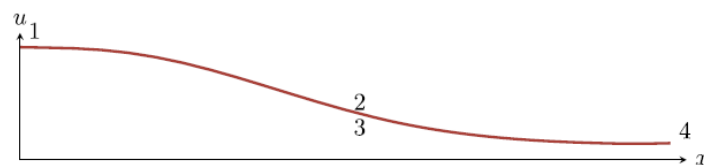
### 3.2. Snaga idealne turbine

U prethodnom odjeljku zaključeno je da je snaga vjetra proporcionalna trećoj potenciji njegove brzine. Dok u ovome poglavlju pitam se koliko energije vjetroturbina može izvući iz vjetra, odnosno kolika je učinkovitost vjetroturbine.

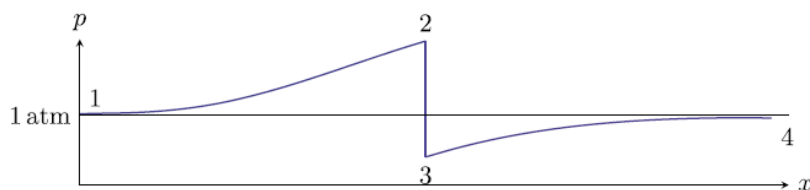
Prva pretvorba koja se događa u vjetroturbini je pretvorba aerodinamičke energije u mehaničku energiju [36].



*Slika 3.2. a) Idealna vjetroturbina [37]*



*Slika 3.2. b) Idealna vjetroturbina-promjena brzine [37]*



*Slika 3.2. c) Idealna vjetroturbina-promjena tlaka [37]*

Na slici 3.2. a) prikazana je idealna turbina Bernoullijevom cijevi, uz pomoć koje se dobije maksimalna iskoristivost vjetra. Nadalje, na slici su označene varijacije tlaka ( $p$ ) i brzine ( $u$ ) od površinskih presjeka  $A_1$  do  $A_4$ . Presjek  $A_1$  prostorno je udaljena od turbine, nalazi se u području standardnog atmosferskog tlaka te ima brzinu  $u_1$ . Približavanjem turbini brzina vjetra se smanjuje, a prema Bernoullijevoj jednadžbi njegov tlak raste. Od presjeka  $A_2$  do  $A_3$  nema promijene brzine zato što se površina presjeka ne mijenja. U tome području energija vjetra pada jer dio svoje energije predaje turbini. Slika 3.2. c) prikazuje nagli pad tlaka uslijed predaje energije turbini. U  $A_4$  tlak ponovno doseže standardni atmosferski tlak zato što se udaljava od turbine, a brzina opada jer je dio energije utrošen na vrtnju rotora, kao što je prikazano na slici 3.2. b). [37]

U stvarnom slučaju viskoznost i brzina uzimaju se u obzir. Viskoznost stvara vrtlog iza vjetroturbine, a brzina neposredno iza turbine iznenada opada. Ali u idealnom strujanju odsutno je trenje, vrtlog i ostali drugi mehanizmi rasipanja energije [36]. Dakle, ukupna energija vjetra u presjeku  $A_1$  mora biti očuvana. S obzirom na prethodnu konstataciju, snaga vjetra u presjeku  $A_1$  ( $P_{V1}$ ) jednaka je zbroju snage turbine  $P_T$  i snage vjetra u presjeku  $A_4$  ( $P_{V4}$ ) prikazana je jednadžbom (3.5) :

$$P_T = P_{V1} - P_{V4} \quad (3.5)$$

Uvrštavajući u jednadžbu izraz (3.4), dobije se:

$$P_T = \frac{1}{2}\rho(A_1U_1^3 - A_4U_4^3) \quad (3.6)$$

Pretpostavlja se da je  $\rho$  konstantan. Jednadžba (3.6) koristi se za izračun snage turbine ako imamo sve informacije o vjetru, odnosno ako imamo  $A_1$ ,  $A_4$ ,  $u_1$  i  $u_4$ . [37]

### 3.2.1. Betzov zakon

U prethodnom odjeljku 3.2. razmotren je ukupni sadržaj energije vjetra u idealnom strujanju. No, svu dostupnu snagu nije moguće iskoristiti što je dokazano Betzovim zakonom.

Betzov zakon matematički prikazuje stupanj aerodinamičke pretvorbe koji je jednak omjeru snage na izlazu iz vjetroturbine ( $P_T$ ) i raspoložive snage u slobodnom strujanju vjetra ( $P_{VJETAR}$ ). Snaga na izlazu vjetroturbine je snaga uklonjena iz vjetra, ekstrahirana snaga, te odgovara učinkovitosti rotora turbine. Spomenuti omjer naziva se koeficijentom snage ( $C_P$ )

$$C_P = \frac{P_T}{P_{VJETAR}} \quad (3.7)$$

Općenito, snaga na izlazu iz turbine dana je izrazom (3.8) te je ona uvijek manja od  $P_{VJETAR}$ .

$$P_T = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times U^3 \times C_P \quad (3.8)$$

Prema [10] prosječna brzina vjetra kroz rotor vjetroturbine je omjer između brzine vjetra ispred turbine  $u_1$  i brzina vjetra iza turbine  $u_2$ . Stoga je maseni protok

$$m = \frac{dm}{dt} = \rho \times A \times \frac{dx}{dt} = \rho \times A \times \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (3.9)$$

Uzeta snaga iz vjetra uz pomoć rotora turbine

$$P_T = \frac{1}{2} \times m \times (U_1^2 - U_2^2) \quad (3.10)$$

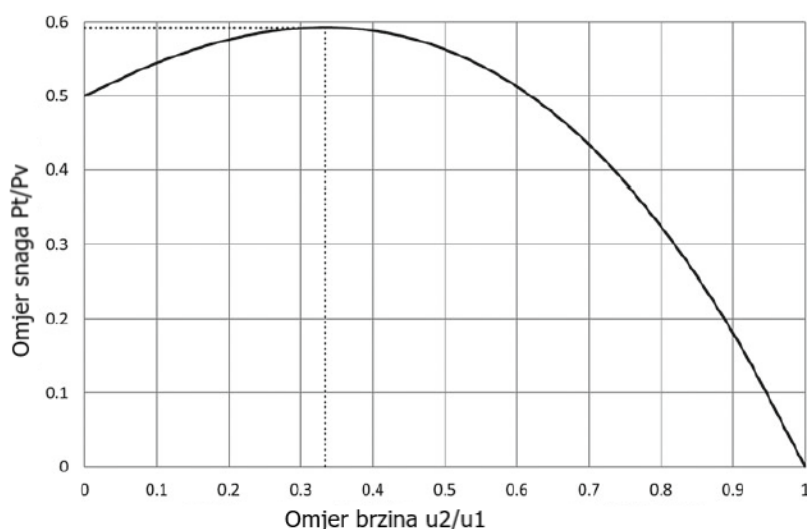
Uvrštavanjem izraza (3.9) u jednadžbu (3.10) dobije se izraz:

$$P_T = \frac{1}{4} \times \rho \times A \times (U_1 + U_2)^2 \times (U_1 - U_2) \quad (3.11)$$

Uvrštavajući jednadžbe (3.11) i (3.4) u omjer snaga, dobije se:

$$\frac{P_T}{P_{VJETAR}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{U_2}{U_1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

Omjeri snaga i brzina jednadžbe (3.12) prikazani su na slici 3.3. Moguće je provjeriti da se maksimum javlja u točki (1/3; 16/27). Proizlazi da je maksimalna teoretska snaga koja se može ekstrahirati iz vjetra je 59,3% (16/27) ukupne snage [10]. Maksimalni teoretski prag snage vjetra poznat je kao Betzova granica koju je osmislio 1919. godine njemački fizičar Albert Betz (37). Razlog zašto veća učinkovitost nije moguća je zbog fluidne mehaničke prirode energije vjetra, ovisne o kontinuiranom protoku zraka u kretanju [39]. Trenutno moderne vjetroturbine mogu izvući oko 40% raspoložive energije, što je više od 80% teorijskog maksimuma [10].



**Slika 3.3.** Ekstrahirana snaga/raspoloživa snaga u odnosu na brzinu vjetra nakon turbine/brzinu vjetra prije turbine; istaknuta točka je Betzova granica [10]



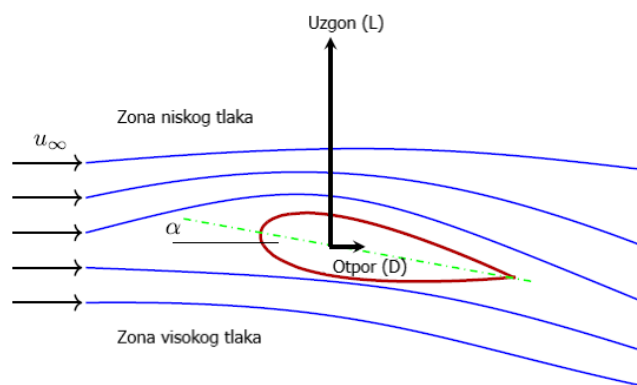
### 3.3. Aerodinamika

U prošlim odjeljcima objašnjene su informacije o vjetru, a u ovome će se dati uvid kako vjetroturbina hvata snagu vjetra. Općenito, postoje dva pristupa prikupljanju energije vjetra-aerodinamičkim načelom uzgona i otpora. Turbine koriste otpor ili uzgon za pretvaranje kinetičke energije vjetra u rotacijski mehanički rad. [37]

#### 3.3.1. Aeroprofil

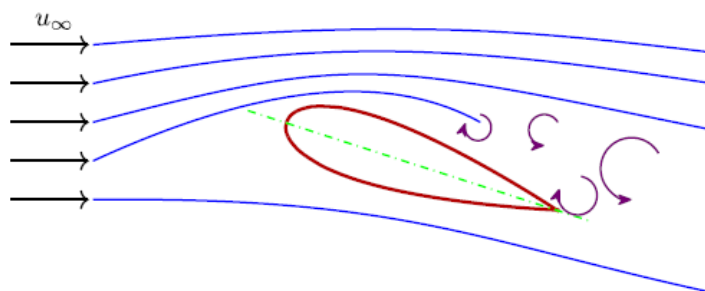
Aeroprofil je presjek krila (aviona) ili lopatice, dvodimenzionalnog oblika. Kada se aeroprofil nalazi u strujanju vjetra, vjetar ga okružuje s gornjeg i s donjeg ruba. Kut  $\alpha$  naziva se napadni kut i nalazi se između tangente aeroprofila i brzine slobodnog strujanja vjetra.

Pri nagnutom aeroprofilu, kao što je prikazano na slici 3.4, polje strujanja na gornjem i donjem rubu postaje različito. Zrak se giba brže na gornjem rubu nego na donjem rubu jer u isto vrijeme prelazi duži put. Prema Bernoullijevom zakonu, tlak zraka je niži na gornjem rubu, a viši na donjem rubu. Rezultat je normala, okomita na smjer vjetra, koja se naziva uzgon.



*Slika 3.4. Kut napada aeroprofila [37]*

Povećanjem uzgona povećava se napadni kut, a prekoračenjem određene vrijednosti kuta dolazi do odvajanja strujanja u gornjem dijelu krila i stvaranja vrtloga. Kao što je prikazano na slici 3.5. strujnice stvaraju vrtloge preko gornjeg ruba, što rezultira zonom visokog tlaka na gornjoj strani.

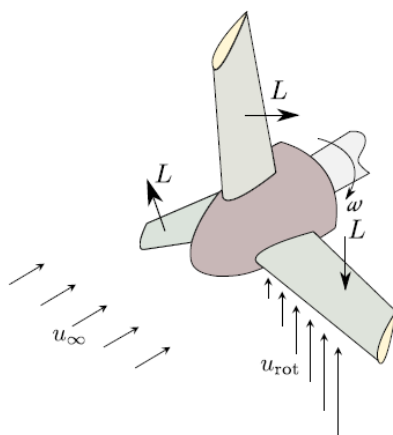


*Slika 3.5. Stvaranje vrtloga uzrokovano prekoračenjem napadnog kuta [37]*

Posljedica ne mogućnosti povećanja uzgona, povećanjem napadnog kuta, je pojava znana kao zastoj aeroprofila.

### 3.2.2. Aerodinamičke sile na lopaticu

Vjetroturbina ima nekoliko lopatica pričvršćeno na središte uz pomoć kojih se rotira osovina. Uzgon je gotovo okomito na svaku lopaticu kao što je prikazano na slici 3.6.



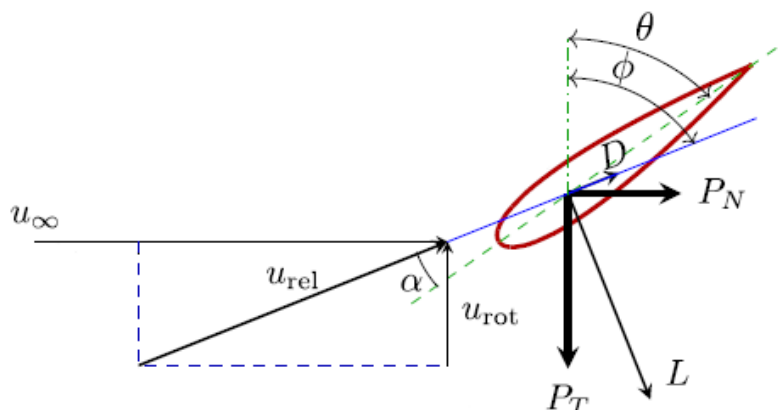
*Slika 3.6. Sila uzgona na lopatice vjetroturbine [37]*

Neto brzina vjetra koja doseže svaku sekciju lopatica nije ujednačena iz razloga što rotacija lopatica proizvodi strujanje vjetra u istoj ravnini rotacije lopatica, ali u suprotnom smjeru. Kao što se vidi na slika 8, postoje dvije različite vektorske komponente tj. brzina vjetra u dalekom polju ( $u_{\infty}$ ) i rotacijska brzina izazvana rotacijom lopatica ( $u_{rot}$ ). Zato je konačna neto brzina koja doseže lopatice je vektor zbroja proizvedenog rotacijskog vjetra i vjetra dalekog polja.

Kao što je vidljivo sa slike 8 neto brzina vjetra nije ravnomjerna duž lopatice zato što se brzina lopatice ( $u_{rot}$ ) linearno povećava od korijena prema vrhu. Rotacijska brzina ( $u_{rot}$ ) prikazana je strelicama u suprotnom smjeru od rotacije lopatice ( $L$ ).

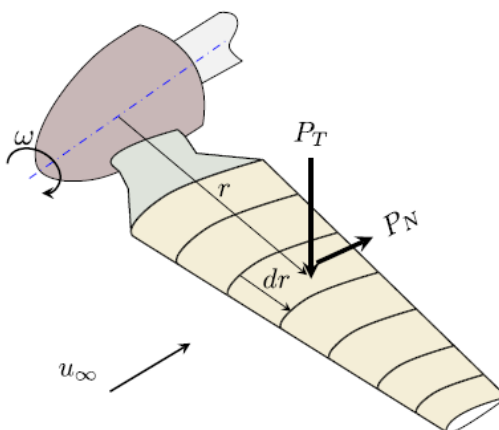
Slika 3.7. prikazuje oštricu koja se kreće prema dolje, uzgona ( $L$ ) usmjerenog prema tlu. Relativna brzina ( $u_{rel}$ ) dobiva se vektorskim zbrajanjem brzine dalekog polja ( $u_{\infty}$ ) i rotacijske brzine ( $u_{rot}$ ). Prema definiciji, uzgon je uvijek okomit na brzinu dalekog polja. Prethodna konstatacija vrijedi za ravninu, dok za rotirajuću lopaticu brzina dalekog polja mora se zamijeniti relativnom brzinom zato što je relativna brzina stvarna brzina koja prolazi preko lopatice. Kao što je prikazano na slici Y uzgon  $L$  okomit je na ( $u_{rel}$ ), dok je otpor ( $D$ ) u istom smjeru kao ( $u_{rel}$ ). Konačno se može reći da uzgon i otpor doprinose rotaciji jer oba imaju komponente na rotacijskoj površini. Dok

komponenta za podizanje pokušava rotirati lopaticu u svom pravilnom smjeru, komponenta otpora pokušava se oduprijeti i smanjuje učinak uzgona.



**Slika 3.7.** Prikaz aeroprofil koji se kreće prema dolje [37]

Napadni kut ( $\alpha$ ) definiran je kao kut između relativne brzine i lokalne tetive aeroprofila. Lokalni kut nagiba ( $\theta$ ) definiran je kao kut lokalne tetive i ravnine rotacije. Kut ( $\phi$ ) je ulazni kut te je definiran kao  $\phi = \alpha + \theta$ .



**Slika 3.8.** Shematski prikaz momenta elementa lopatice [37]

Slika 3.8. prikazuje da uzgon i otpor doprinose tangencijalnim i normalnim silama. Tangencijalna sila ( $P_T$ ) je u ravnini rotora i uzrokuje rotaciju lopatice. Važno je naglasiti, da bi se dobila korisna izlazna snaga, mora se proizvesti sila u tangencijalnom smjeru: sile  $L$  i  $D$  moraju se razdvojiti u tangencijalnom smjeru kako bi se dobila sila ( $P_T$ ) koja pridonosi zakretnom momentu i rotaciji lopatica. Normalna sila ( $P_N$ ) je u smjeru brzine vjetra u dalekom polju i nepovoljna je sila koja uzrokuje savijanje vjetroturbine.[10]

Geometrijski odnosi daju:

$$P_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (3.13)$$

$$P_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (3.14)$$

Povećanjem brzine vjetra napadni kut također raste. Sila uzgona raste proporcionalno s napadnim kutom do određenog kuta gdje uzgon doseže najveću vrijednost. Pri dostizanju maksimalnog kuta, uzgon se počinje smanjivati i kaže se da se oštrica zaustavlja. Suprotno smanjenju uzgona otpor se dramatično povećava. Sila kočenja također raste s napadnim kutom. [10]

### 3.3. Promjena brzine vjetra s visinom

Promjena brzine vjetra s visinom (horizontalno kretanje vjetra) važan je faktor u procjeni proizvodnje energije vjetroagregata. Promjena brzine vjetra s visinom izmjerena je za različite atmosferske uvjete. Opće metode procjene brzine vjetra na većim visinama iz poznatih brzina vjetra na nižim visinama su zakon potencije, logaritam s hrapavošću površine i logaritam s hrapavošću površine koja ima nultu brzinu vjetra na razini tla. Zakon potencije je:

$$v = v_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (3.15)$$

Gdje je  $v_0$  izmjerena brzina vjetra,  $H_0$  je visina na kojoj je izmjerena brzina  $v_0$  i  $H$  je željena visina na kojoj želimo saznati brzinu. EkspONENT promjene vjetra  $\alpha$  je oko 1/7 (0,14) za stabilnu atmosferu (pad temperature s visinom); međutim, varira ovisno o terenu i atmosferskim uvjetima. Svjetska standardna visina je 10 m za meteorološka mjerenja vremena. Međutim, korištenje podataka od 10 m i eksponenta smicanja vjetra od 0,14 za procjenu potencijala snage vjetra za 50 m za mnoge lokacije znatno će podcijeniti potencijal snage vjetroelektrana. Druga formula za procjenu brzine vjetra s visinom je:

$$v = v_0 \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (3.16)$$

gdje je  $z_0$  parametar hrapavosti. Jednadžba (3.16) dopušta nultu brzinu vjetra na površini. Parametar hrapavosti zadan je zablčnim vrijednostima. On iznosi 0,0001 m za mirno otvoreno morem za nemirno more 0,001. [38]

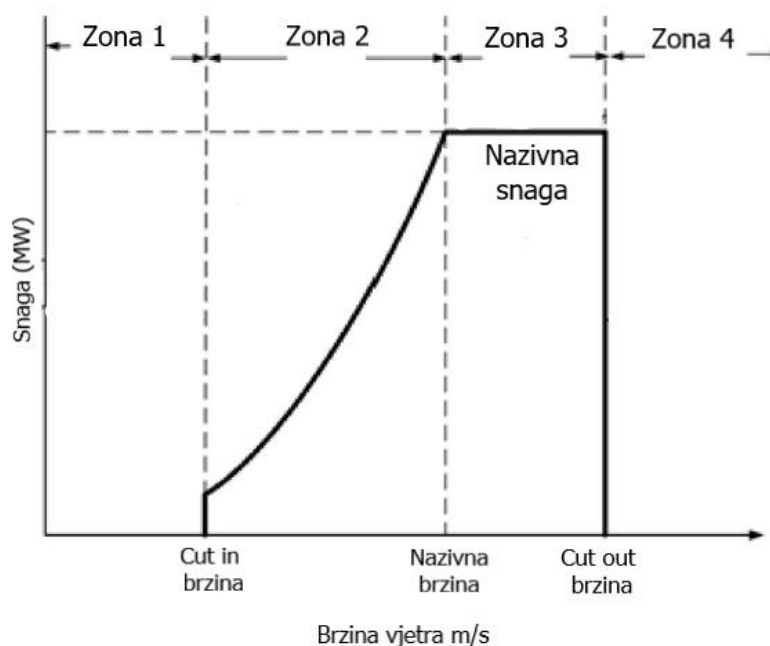
### 3.4. Radna područja vjetroagregata

Izlazna snaga WTG-a (eng. *Wind Turbine Generator*) ovisi o ulaznoj brzini vjetra prema krivulji snage. Slika 3.9 prikazuje tipičnu krivulju snage. Vjetrogeneratori dizajnirani se da daju maksimalnu snagu za određenu brzinu vjetra. Maksimalna snaga poznata je kao nazivna snaga, a odgovarajuća brzina vjetra je kao nazivna brzina vjetra. Općenito, ne postoji ustaljena nazivna

brzina vjetra nego se mijenja ovisno o modelu vjetrogeneratora. Uobičajene nazivne brzine su vrijednosti između 12 i 16 m/s. [10]

Analiza tipične krivulje snage prikazanu je na slici 3.9., proizlazi da:

- U zoni 1 nema proizvodnje električne energije zato što za brzine vjetra niže od određene vrijednosti, cut-in brzine vjetra, vjetrogenerator je isključen. S financijskog stajališta nije ekonomično izvlačiti snagu iz malih vrijednosti vjetra. Obično je granična brzina vjetra između 3 i 5 m/s. Za prikazani slučaj ona iznosi 3 m/s. [41]
- U zoni 2 ili radnoj zoni vjetrogenerator je reguliran za hvatanje maksimalna snaga vjetra odnosno maksimiziranje proizvodnje električne energije. U ovoj zoni, vrijednost vjetra se kreću od cut-in brzine do nazivne brzine vjetra, a izlaz se mijenja približno s kubom brzine vjetra. Vrijednosti brzina za ovaj slučaj su 3 m/s – 15 m/s. [41]
- Zona 3 ili regija punog opterećenja. U ovom području brzina vjetra je između nazivne i brzine isključenja. Za razliku od regije 2 gdje je maksimalna proizvodnja snage cilj upravljanja, željeni cilj kontrole u regiji 3 je ograničiti proizvodnju energije. Sustavom upravljanja se postiže ograničenje proizvodnje. Vrijednosti brzina za ovu zonu kreću se od 15 m/s do 25 m/s . [41]
- Zona 4 predstavlja isključivanje vjetrogeneratora kako bi se izbjegli katastrofalni kvarovi zbog velikih brzina vjetra koji mogu mehanički oštetiti turbinu, stoga nema proizvodnje energije i vjetrogenerator je izvan pogona. Granične brzine vjetra (cut-off brzina) za isključenje obično je između 25 i 30 m/s. [10]



*Slika 3.9. Radna područja vjetroatagregata*

Krivulje snage dostupne su na internetskim stranicama proizvođača.

Krivulja snage može se opisati analitički jednačicom. Kao što se vidi na slici 3.9., problematična zona modeliranja je zona u kojoj se izlazna snaga mijenja približno s kubom brzine vjetra. Preostale radne zone jednostavno je modelirati.

Pri modeliranju krivulje snage koristi se sigmoidna funkcija za opisivanje. Stoga se model krivulje snage može opisati pomoću:

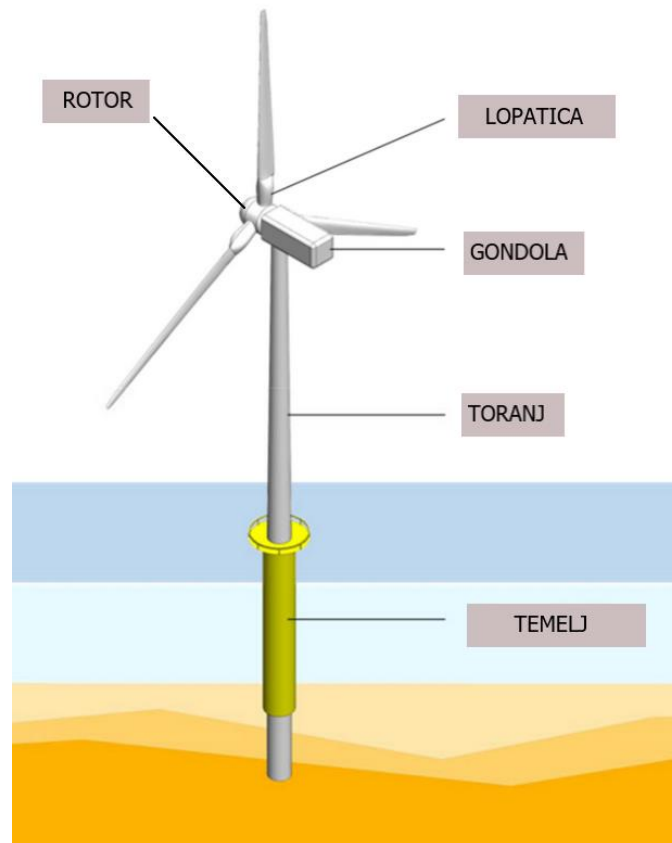
$$P_e = \begin{cases} P_e = 0, & u < u_0 \\ \frac{P_N}{1 + \exp\left(-\frac{u - c_1}{c_2}\right)}, & u \leq u < u_N \\ P_e = P_N, & u_N \leq u \leq u_{MAX} \\ P_e = 0, & u > u_{MAX} \end{cases} \quad (3.17)$$

$P_e$  je električna izlazna snaga vjetroturbine,  $P_N$  je nazivna snaga,  $u_0$ ,  $u_N$  i  $u_{MAX}$  su ulazna, nazivna i granična brzina vjetra.  $c_1$  i  $c_2$  su konstante prilagodbe koje se podešavaju iz eksperimentalne krivulje snage koju dostavlja proizvođač. [10]

## 4. ODOBALNA VJETROELEKTRANA

### 4.1. Anatomija vjetroturbine

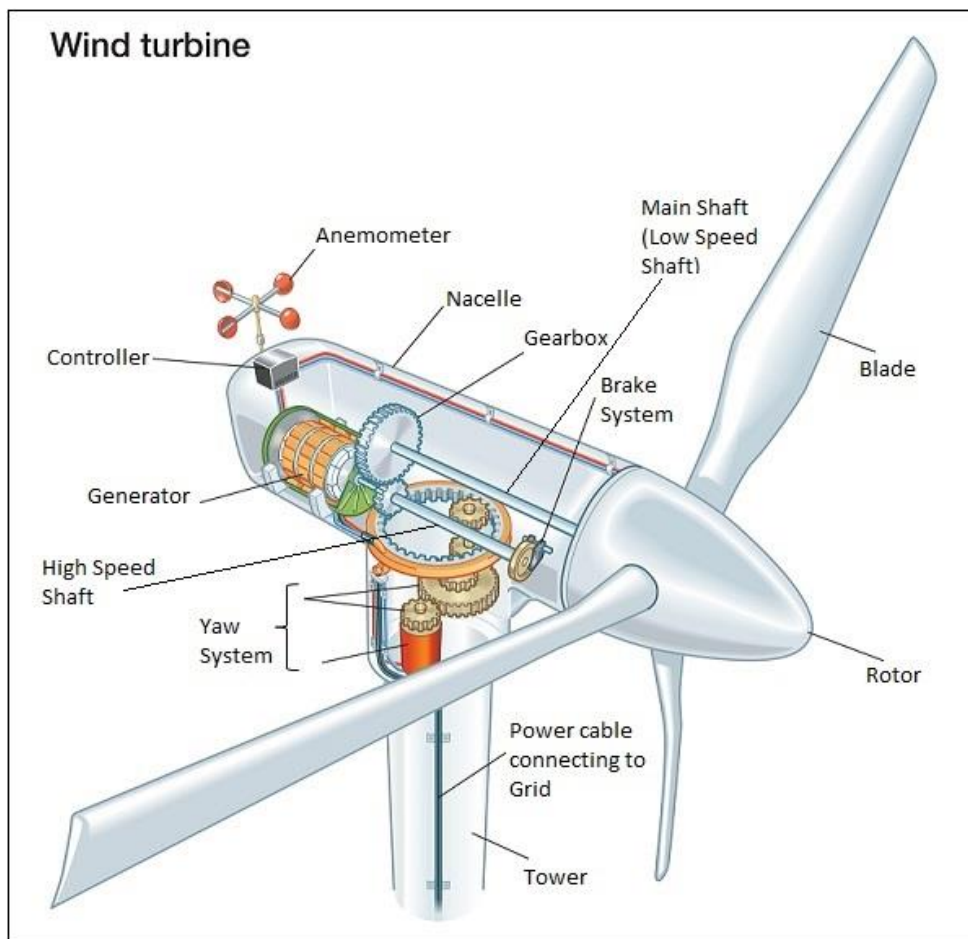
Vjetroturbine razlikuju se u veličini, obliku i izlaznoj snazi. Trenutno, najučestalija konfiguracija vjetroturbine sadrži rotor s 3 lopatice pričvršćenim na horizontalni generator. Osnovni dijelovi turbine su : rotor, gondola, toranj i temelji. [40]



*Slika 4.1. Izgled vjetroturbine [9]*

Rotor vjetroturbine hvata snagu vjetra i pretvara je u kinetičku mehaničku snagu. Sastoji se od lopatica koje su pričvršćene mehaničkim zglobovima na središnji čvor gondole. Utvrđeno je da tri lopatice maksimiziraju učinkovitost[40]. Lopatice su fleksibilne i izrađene od polimera ojačanih vlaknima (eng. FRP- Fibre Reinforced Polymers), kao što su staklo i plastika ojačani karbonskim vlaknima (eng. GFRP- glass fibre reinforced plastics i CFRP-carbon fibre-reinforced plastics). [10]

Gondola sadrži nekoliko komponenti koje svojom funkcijom doprinose procesu pretvorbe energije vjetra u električnu energiju. Glavne komponente unutar gondole prikazane su na slici 4.2.



*Slika 4.2. Prikaz sastavnica gondole [28]*

Energija uhvaćena na lopaticama prenosi se na glavno, sporohodno vratilo (eng. *low-speed shaft*), kao rotacijsko gibanje. Brzohodno vratilo (eng. *high-speed shaft*) je spojena na mjenjač (eng. *gearbox*) koji će malu brzinu vrtnje lopatica pretvoriti u veću brzinu. Mjenjač je dalje spojen na generator. Glavno vratilo (osovina), kočnica (eng. *break*), mijenjač i generator nalaze se unutar gondole. Gondola se može okretati vodoravno, kroz sustav zakretanja (eng. *yaw motor*), kako bi se rotor poravnao sa smjerom vjetra za optimalnu izvedbu snage. Sve te komponente podupire toranj[40]. Trenutačno se većina vjetroturbina oslanja na stožaste čelične tornjeve.[10]

Temelji učvršćuju toranj i komponente za morsko dno. Dostupne su različite tehnologije temelja, no o njima će biti riječ u jednom od sljedećih odjeljaka.

#### 4.1.1. Prijenosni sustav

Kinetička mehanička snaga iz aerodinamičkog rotora prenosi se na generator kroz prijenosni sustav (eng. *Transmission System*), koji se obično sastoji od osovine rotora, mehaničke kočnice(a) i mjenjača.



Mehaničke kočnice obično se koriste kao rezervni sustav za aerodinamički kočioni sustav vjetroturbine i/ili kao parkirna kočnica kada je turbina zaustavljena. Aerodinamički kočni sustav obično se sastoji od okretanja lopatice od vjetra, točnije za 90 stupnjeva oko uzdužne osi lopatice. Glavna svrha mjenjača je da djeluje kao pojačivač brzine vrtnje; mjenjač vjetroturbine pretvara polaganu rotaciju visokog zakretnog momenta aerodinamičkog rotora u puno bržu rotaciju osovine generatora. Ovisno o geometrijskom dizajnu, mjenjači se obično dijele u dvije klase - zupčasti i spiralni prijenosnik te planetni zupčani prijenosnik. Budući da je kutija mjenjača konstantno izložena velikim i promjenjivim okretnim momentima zbog povećane veličine vjetroturbina i varijabilnosti brzine vjetra, mjenjačka kutija je najslabija karika u vjetroturbinama, a mnoge od njih otkazuju za manje od 2 godine rada. Kao rezultat toga, u nekim od novijih tehnologija vjetroturbina, mjenjač je uklonjen, projektiranjem generatora, s multipolarnom strukturom kako bi se brzina rotora prilagodila brzini generatora.

#### 4.1.2 Generator

Skorijim razvojem energetske elektronike omogućeno je povezivanje generatora s promjenjivom brzinom na mrežu konstantne frekvencije. Potreba za generatorima promjenjive brzine opravdana je značajnim povećanjem učinkovitosti pretvorbe raspoložive snage vjetra u izlaznu električnu energiju. U modernim generatorima vjetroturbina (WTG) koriste se dvije vrste električnih generatora promjenjive brzine: indukcijski generator s dvostrukim napajanjem (eng. *DFIG-Double-Fed Induction Generator*) i sinkroni generator s izravnim pogonom (eng. *DDSG Direct-Driven DC-Link Synchronous Generator*).

- a) DFIG je klasični indukcijski generator čiji je rotor spojen na mrežu preko AC/DC/AC pretvarača energetske elektronike. Ovaj sklop omogućuje odstupanje brzine u širokom rasponu, čime se povećava učinkovitost pretvorbe. Električna energija može se dovoditi u mrežu i u statoru i u rotoru kada je brzina veća od sinkrone brzine. Kada je brzina ispod sinkrone brzine, rad kao generator je još uvijek moguć (ovo nije moguće u konvencionalnim indukcijskim generatorima), pod uvjetom da se mala količina energije isporučuje rotoru kroz dvosmjerne pretvarače. Postoji mjenjač za prilagodbu brzine turbine i generatora, zbog čega je veličina generatora vrlo kompaktna. Pretvarači energetske elektronike nalaze se samo u rotoru, tako da su dimenzionirani na djelić nazivne snage stroja.
- b) Princip rada i konstrukcija DDSG potpuno su drugačiji. U ovom slučaju imamo sinkroni generator (alternator) koji se vrti promjenjivom brzinom. To je moguće jer je alternator odvojen od mreže gdje je spojen. Priključak na mrežu ostvaruje se preko punog AC/DC/AC pretvarača kojim se sva pretvorena električna energija prenosi u mrežu. U ovom sklopu

nema mjenjača, lopatice rotora se okreću istom brzinom kao i generator. To je moguće jer je alternator napravljen s velikim brojem polova, zbog čega generator izgleda jako velik. Istosmjerna pobuda alternatora u početku je bila osigurana zasebnim sustavom pobude, ali u novije vrijeme proizvođači predlažu konfiguracije sa samopobudnom trajnom magnetskom pobudom.

#### 4.1.3. Energetska elektronika sustava

Generator pretvara mehaničku snagu u električnu energiju, koja se dovodi u električnu mrežu preko elektroničkog sučelja za napajanje. Budući da je postavljeno između generatora vjetroturbine i električne mreže, energetska elektronička sučelja trebala bi zadovoljiti zahtjeve i generatora i mreže. Na strani generatora, ovo sučelje osigurava da se brzina rotacije turbine kontinuirano prilagođava kako bi se izvukla maksimalna snaga iz vjetra. Na strani mreže, elektroničko sučelje snage mora biti u skladu s mrežnim čimbenicima bez obzira na brzinu vjetra. Pri tome se misli na sposobnost upravljanja aktivnom i jalovom snagom, frekvencijom i naponom.

Energetska elektronika pridonosi značajna poboljšanja performansi za vjetroturbine. Omogućuje smanjenje mehaničkog naprezanja/opterećenja i povećava prinos energije te omogućuje vjetroturbinama da se ponašaju kao aktivne upravljive komponente u elektroenergetskom sustavu i podupiru mrežu slično kao konvencionalne elektrane. Danas komponente mogu podnijeti veće vrijednosti struje i napona. Gubici snage se smanjuju i uređaji postaju pouzdaniji.

Najčešće korištena energetska elektronička sučelja u vjetroturbinama su:

- a) Soft starter koristi se u SCIG (eng. *Squirrel Cage Induction Generator*) generatorima za smanjenje udarne struje tijekom spajanja vjetroturbina na mrežu, čime se ograničavaju smetnje u mreži. Bez soft startera udarna struja može biti do sedam do osam puta veća od nazivne struje, što može uzrokovati ozbiljne poremećaje napona u mreži
- b) Kondenzatorska baterija je električna komponenta koja opskrbljuje jalovu snagu asinkronim generatorima vjetroturbina. Tipično, kondenzatorske baterije s mehaničkim prebacivanjem najlakši su i najekonomičniji način da se smanji jalova snaga koju asinkroni generatori crpe iz mreže. Generatori vjetroturbina mogu imati dinamičku kompenzaciju punog opterećenja, gdje se određeni broj kondenzatora stalno spaja ili isključuje, ovisno o prosječnoj potrebi jalove snage generatora tijekom unaprijed definiranog vremenskog razdoblja.
- c) Frekvencijski pretvarač je uređaj koji olakšava međusobno povezivanje dva električna sustava s neovisnim frekvencijama. Omogućuje prilagodbu i kontrolu frekvencije napona generatora. Tradicionalni pretvarač frekvencije s podesivom brzinom, sastoji se od:

- AC/DC jedinica za pretvorbu (ispravljač) pretvara AC u DC, dok energija teče u DC sustav;
- Kondenzatora (skladištenje energije);
- Inverter pretvara DC u AC, dok energija teče u AC sustav.

#### 4.1.4. Sustav kontrole i upravljanja

Vjetroturbina je obično opremljena kontrolnim sustavom koji je neophodan kako bi se osigurao pravilan rad vjetroturbine u svim radnim uvjetima.

Kontrolni sustav je namijenjen za kontrolu i održavanje vjetroturbine unutar normalnog radnog raspona pasivnim ili aktivnim sredstvima. Pasivne kontrole koriste vlastite senzore i provode se korištenjem prirodnih sila, npr. zastoj rotora, kada brzina vjetra prijeđe određenu kritičnu razinu.

Aktivne kontrole koriste električna, mehanička, hidraulička ili pneumatska sredstva i zahtijevaju da sonde prepoznaju varijable koje će odrediti potrebnu radnju upravljanja. Tipične varijable koje se prate u sustavu upravljanja su brzina vjetra, brzina rotora, aktivna i jalova snaga, napon i frekvencija točke spajanja vjetroturbine. Osim toga, upravljački sustav mora moći zaustaviti vjetroturbinu, ako je potrebno. Svrha aktivnog upravljanja vjetroturbinama je maksimiziranje proizvodnje energije

Sve vjetroturbine dizajnirane su s nekom vrstom kontrole snage. Trenutno se koriste tri opcije za kontrolu izlazne snage: kontrola zastoja, kontrola nagiba i aktivna kontrola zastoja

- a) *Stall control* (pasivna kontrola) je najjednostavniji način kontrole snage. Ovdje su lopatice čvrsto pričvršćene za glavu rotora, a udarni kut vjetra krila je fiksiran. Dizajn aerodinamike rotora uzrokuje "automatsko" zaustavljanje rotora (tako da gubi učinkovitost) kada brzina vjetra prijeđe određenu razinu, tj. nazivnu vrijednost.
- b) *Pitch control* (aktivna kontrola) znači da se lopatice zakreću ovisno od ili prema vjetru jer izlazna snaga postane previsoka odnosno premala. Za razliku od kontrole zastoja, kontrola nagiba zahtijeva promjenu geometrije rotora i stoga je skuplja zbog mehanizma za nagib i regulatora.
- c) *Active stall control* (aktivno pasivna kontrola) predstavlja aktivnu kontrolu nagibom lopatica u suprotnom smjeru nego što to čini vjetroturbina kontrolirana nagibom. Ovaj pokret povećava napadni kut lopatica rotora kako bi lopatice otišle u dublji zastoj i veći napadni kut.

Glavne razlike između ovih opcija tiču se načina na koji je aerodinamička učinkovitost rotora ograničena tijekom brzine vjetra iznad nazivne kako bi se spriječilo preopterećenje.

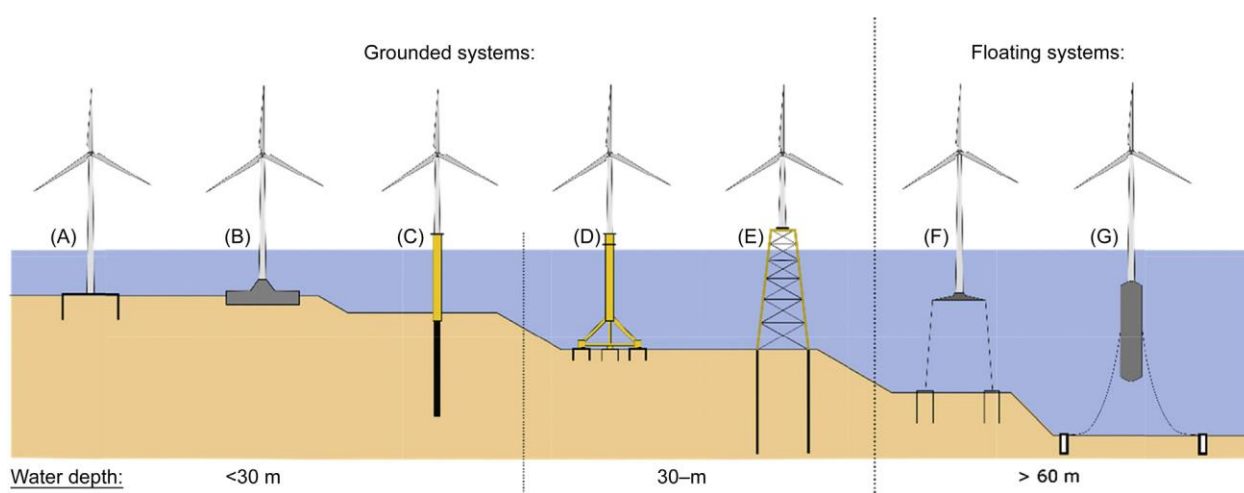
Vjetroturbine se također mogu klasificirati prema njihovoj sposobnosti upravljanja brzinom:

- a) *Vjetroturbine fiksne brzine* (eng. Fixed-speed wind turbines) više se ne koriste, bile su korištene 1990-ih. Karakteristično za ove vjetroturbine je da su opremljene SCIG-om spojenim izravno na mrežu, soft starterom i kondenzatorskom baterijom za smanjenje potrošnje jalove energije. Vjetroturbine s fiksnom brzinom imaju prednosti jednostavne, robusne i pouzdane, dobro dokazane i niske cijene električnih dijelova. Njegovi izravni nedostaci su velika mehanička opterećenja, nekontrolirana potrošnja jalove energije i ograničena kontrola kvalitete električne energije.
- b) *Vjetroturbine promjenjive brzine* (eng. Variable-speed wind turbines ) postale su osnovni tip za upravljanje brzinom vjetroturbinama tijekom proteklog desetljeća. Rad s promjenjivom brzinom može se postići samo odvajanjem frekvencije električne mreže i mehaničke frekvencije rotora putem elektroničkog sučelja snage. Karakteristično za ove vjetroturbine je da su dizajnirane za postizanje maksimalne aerodinamičke učinkovitosti u širokom rasponu brzina vjetra. Unutar rada s promjenjivom brzinom moguće je kontinuirano prilagođavati (ubrzavati ili usporavati) brzinu vrtnje vjetroagregata brzini vjetra, na način da turbina kontinuirano radi na najvišoj razini aerodinamičke učinkovitosti. Prednosti vjetroturbina s promjenjivom brzinom su povećani godišnji zahvat energije (ovo je oko 5% više od tehnologije s fiksnom brzinom) i to što se aktivna i jalova snaga mogu lako kontrolirati. Također imaju manji poboljšanu kvalitetu električne energije, mogućnost upravljanja i "prilagođenost mreži", što je glavna briga za integraciju velikih vjetroelektrana u mrežu. Nedostaci su dodatni gubici zbog energetske elektronike koji povećavaju broj komponenti i čine upravljački sustav složenijim. Osim toga, imaju i povećanu cijenu zbog energetske elektronike, koja je oko 7% cijele vjetroturbine.

#### 4.1.5. Temelji

Temelji predstavljaju najvažnije razmatranje konstruiranja i često određuju financijsku održivost projekta. Temelji obično koštaju 25%-34% cijelog projekta i postoje pokušaji da se troškovi smanje. Prilikom odabira i projektiranja temelja za određeno mjesto moraju se uzeti u obzir različiti čimbenici. Oni uključuju: jednostavnost ugradnje u većini vremenskih uvjeta, različite uvjete morskog dna, aspekte ugradnje uključujući potrebna plovila i opremu te lokalne propise koji se odnose na okoliš (buka). Slika 4.1. prikazuje shematski dijagram vjetroturbine oslonjene na stup velikog promjera duboko umetnut u zemlju, poznat kao monopil. Ovo je do sada najčešće korišteni temelj u industriji vjetroelektrana na moru zbog svoje jednostavnosti.

Slika 4.3. prikazuje različite vrste temelja koji se danas obično koriste za različite dubine vode. Monopil, gravitacijski temelji i usisni kesoni trenutno se koriste ili se razmatraju za dubine vode od oko 30 m. Za dubinu vode između 30 i 60 m koriste se ili planiraju obloge ili okvirne strukture morskog dna poduprte na pilote ili kesone. Plutajući sustav se razmatra za dublje vode, obično više od 60 m. Međutim, odabir temelja ovisi o morskom dnu, uvjetima na gradilištu, karakteristikama turbine i opterećenja, ekonomičnosti, a ne uvijek o dubini vode. Potkonstrukcija se može klasificirati u dvije vrste. Prva vrsta su uzemljeni sustav gdje je struktura usidrena na morsko dno. Druga vrsta je plutajući sustav kod kojeg je platforma pluta te je usidrena za morsko dno sustavom za privez.



*Slika 4.3. Vrste temelje vjetroturbine s obzirom na dubinu*

## 4.2. Električna konfiguracija odobalnih vjetroelektrana

Vjetroelektrane na moru sastoje se od nizova međusobno povezanih turbina. Energija koju proizvodi vjetropark skuplja se unutar niza turbina i transportira do točke spajanja na obali gdje se električna energija predaje u integriranu javnu mrežu.

Uzimajući u obzir jače i stabilnije vjetrove, proizvodnja električne energije iz odobalnih elektrani postaje posljednjih godina progresivno zanimljiva s obzirom na to da je došlo do značajnih smanjena investicijskih troškova. Ovo poglavlje, uz dobru podlogu prethodnog poglavlja, bavit će se električnim sustavom koji omogućuje prikupljanje električne energije i dostavljanje iste na obalu. Naime, pažnja će biti usmjerena na kolektorski sustav. Kolektorski sustav prikuplja električnu energiju koju proizvodi pojedina vjetroturbina i isporučuje energiju do podstanice na moru ( interkonekcijski prijenosni sustav). Podstanica je povezana na kopnu s kopnom trafostanicom.

Najčešće korištene topologije kolektorskog sustava mogu biti jednostavnog radijalnog dizajna do složenijeg zvjezdolikog oblika. Štoviše, inovativni dizajni koji su nedavno istraženi također su analiziran. [10]

Ovisno o snazi koja se prenosi i udaljenosti do obale, dostupne su dvije opcije za interkonekcijski prijenosni sustav: visokonaponska izmjenična struja (HVAC) i visokonaponska istosmjerna struja (HVDC).

#### 4.2.1 Kolektorski sustav

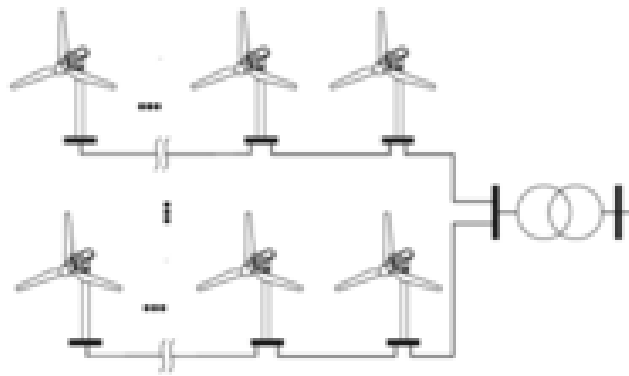
Svrha kolektorskog sustava je povezivanje svih vjetroelektrana, prikupljanje energije koje su proizvele pojedine vjetroturbine i isporuka u podstanicu na moru. Sastoji se od niza podmorski vodiča koji su zakopani, obično 1-2 m u oceanskom dnu [10].

Postoje četiri različita moguća dizajna povezivanja. Odluka o tome koji od njih će se koristiti ovisi od dva razloga. Prvi razlog ukazuje na veličina vjetroparka, a drugi se odnosi na željenu razinu pouzdanosti. U prošlim godina, većina vjetroparkova bila je manjih veličina i kao produkt su imali jednostavnije kolektorske sustave, recipročno tome faktor pouzdanosti bio je nizak. Međutim, danas odobalne vjetroelektrane postaju sve veće i veće te moraju imati veliku pouzdanost i sposobnost rada što više turbina tijekom kvara. Budući da moguća količina energija izgubljena tijekom kvara može biti iznimno velika te može prevladati početne troškove koji daju ekonomičnost vjetroelektrani [11]. Odobalnim vjetroelektranama potreban je duži vremenski period za popravak nego kopnenima. Procijenjeno vrijeme popravka kvara kabele iznosi između 720 h (tijekom ljeti) i 2160 h (zimi) [10].

Postoje četiri osnovna dizajni sustava: radijalni dizajn, prstenasti, zvjezdasti i razgranati. Dodatno, postoje dva inovativna dizajna koji mogu su ekonomično privlačni i pružaju povećanu pouzdanost: jednostrani-povratni te dvostrani poluprsten.

##### 4.2.1.1. Radijalni dizajn

Najčešći i najjednostavniji raspored je onaj u kojem je nekoliko vjetroturbina spojeno na jedan dovod kabela u nizu. Maksimalan broj vjetroturbina koje mogu biti povezane na dovodni kabel ovisi o kapacitetu kabela i nazivnoj snazi generatora. Radijalni raspored je jeftin, učestal i jednostavan za upravljanje, ali mu je nedostatak pouzdanost. To je zbog činjenice da ako dođe do kvara na kabele (ili razvodnom uređaju) koji povezuje prvu turbinu i čvorište dovoda, sve snage koje se generiraju od nizvodnih vjetroturbina u ostatku niza bit će izgubljene [10]. Na slici 4.4. vidljiv je raspored vjetroturbina u radijalnom rasporedu:



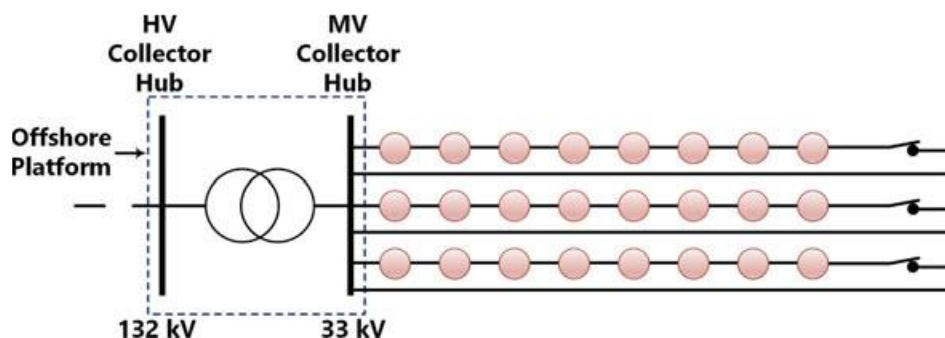
**Slika 4.4.** Radijalni dizajn povezivanja vjetroturbina

#### 4.2.1.2. Prstenasti dizajn

Dizajn prstena (*eng. Ring Design*) je drugi dizajn sustava za prikupljanje električne energije. Dizajn prstena ima visoku pouzdanost, ali je puno skuplji u usporedbi s radijalnim. Ovisno o tome kako je prsten oblikovan, dizajn prstena podijeljen je u dvije kategorije:

##### 1. Dizajn jednostranog prstena (*eng. Single-Sided Ring Design*)

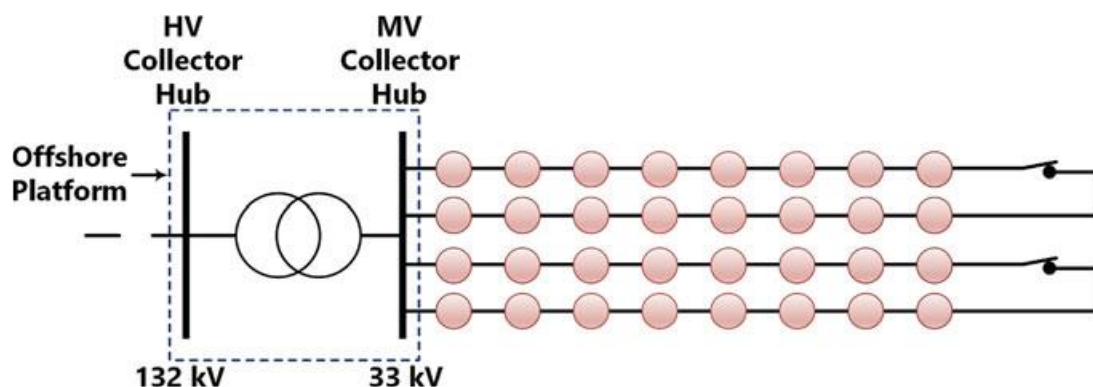
Dizajn jednostranog prstena ima veću pouzdanosti prijenosa energije od radijalnog dizajna. Pouzdanost je ostvarena povezivanjem posljednje vjetroturbine u nizu s kablom drugog niza vjetroturbina, kao što je vidljivo sa Slike 4.5. Izvedba ovog tipa zahtijeva dodatni redundantni kabel dimenzioniran da može izdržati protok snage cijelog niza u slučaju kvara jedne od turbina. Ovo rješenje omogućuje neometan rad vjetroturbina u slučaju kvara jedne od njih. Dodatna sigurnost u obliku kabela dolazi uz povećanje cijene zbog duljine kabela i zahtjeva kabela za veću ocjenu kabela kroz strujni krug.



**Slika 4.5.** Dizajn jednostranog prstena povezivanja vjetroturbina

##### 2. Dizajn dvostranog prstena (*eng. Double-Sided Ring Design*)

Dizajn dvostranog prstena nudi istu pouzdanost kao u dizajnu jednostranog prstena, ali uz smanjenu cijenu. Karakterističnost ovog dizajna je spoj zadnje vjetroturbine niza s zadnjom vjetroturbinom drugog niza, kao što je vidljivo iz Slike 4.6.

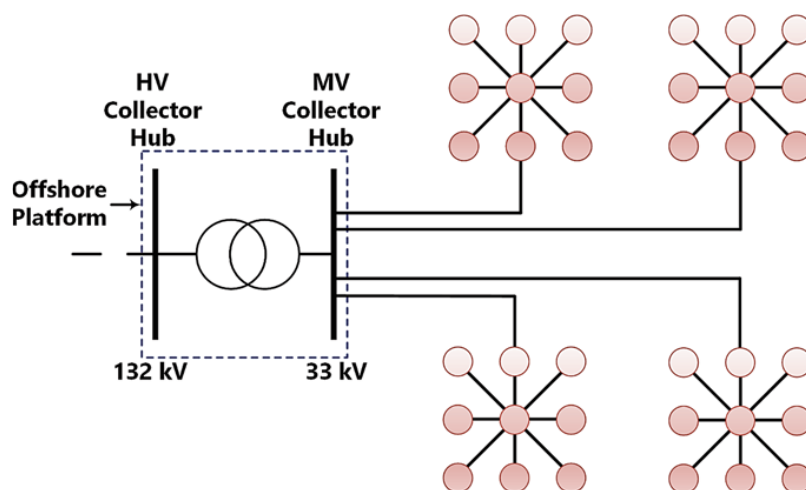


*Slika 4.6. Dizajn dvostranog prstena povezivanja vjetroturbina*

U usporedbi s prethodnim jednostranim dizajnom prstena, dolazi do smanjenja duljine kabela, uz zadržavanje iste razine redundancije. S druge strane, loša strana ovog dizajna je što veza između prve turbine niza i kolektorskog središta je potrebna za izdržavanje dvostruko veće snage izlaza od ostalih vjetroturbina koje su u nizu. [10]

#### 4.2.1.3. Dizajn zvijezde

Dizajn zvijezde (*eng. Star Design*) karakterizira povezanost pojedine vjetroturbine sa zasebnim kablom te jedne središnje turbine sa kolektorskim središtem. Prednost ovog dizajna je u tome što se povećava pouzdanost rada sustava, budući da se pri kvaru kabela gubi samo jedna vjetroturbina. Kabel od središnje turbine do čvorišta treba nositi svu snagu od svih drugih turbina u niz. S druge strane, potrebni su duži dijagonalni kabele i složeniji raspored sklopnih uređaja potreban za vjetroturbinu u središtu zvijezde [11]. Na Slici 4.7. prikazana je izvedma zvijezdolikog rasporeda:



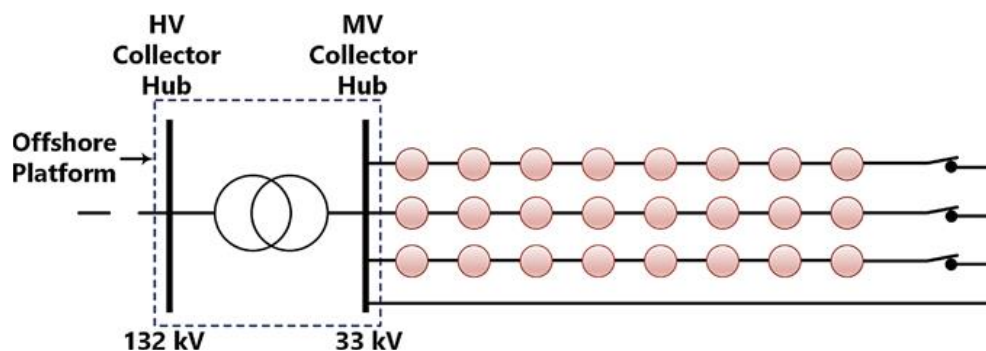
*Slika 4.7. Dizajn zvijezde povezivanja vjetroturbina*



#### 4.2.1.4. Novije tehnologije

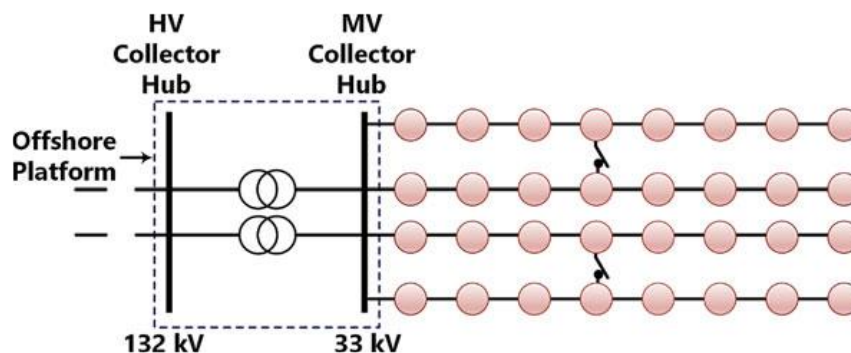
Nove vrste dizajna se razmatraju kako bi se smanjio ukupni trošak prstenastog dizajna zajedno s dobrim performansama u stabilnom stanju. Noviteti su izvedeni iz jednostranog i dvostranog prstenastog dizajna.

1. **Dizajn povratne veze** (eng. *Single Return Design*) sastoji se od povezivanja svih zadnjih u nizu vjetroturbina s jednim kabelom koji je povezan s glavnim čvorištem kao što je vidljivo iz slike 4.8. Povratni (redundantni krug) dimenzioniran je da može izdržati teret izlazna snage jednog niza vjetroturbina, ali ne podnosi kvar dva niza vjetroturbina u isto vrijeme. Trošak ovoga rasporeda je značajno niži u odnosu na dizajn jednostranog prstena te je u rangu troška radijalnog dizajna.



Slika 4.8. Dizajn povratne veze

2. **Dizajn dvostrani poluprsten** (eng. *Double-Sided Half Ring Design*) je varijacija dvostranog prstena. Redundancija je spoj između srednje turbine jednog niza i srednje turbine drugog. Kod ovakvog rasporeda, polovica vjetroturbina u nizu je odspojena u slučaju kvara umjesto cijelog niza. Daljinski upravljana sklopka sadržana je u pojedinom nizu. Na ovaj način moguće je daljinski izolirati pola vjetroturbina u vrijeme kvara. Dizajn dvostranog poluprstena je modificirani radijalni dizajn, te je značajno manje košta od dizajna dvostranog prstena.



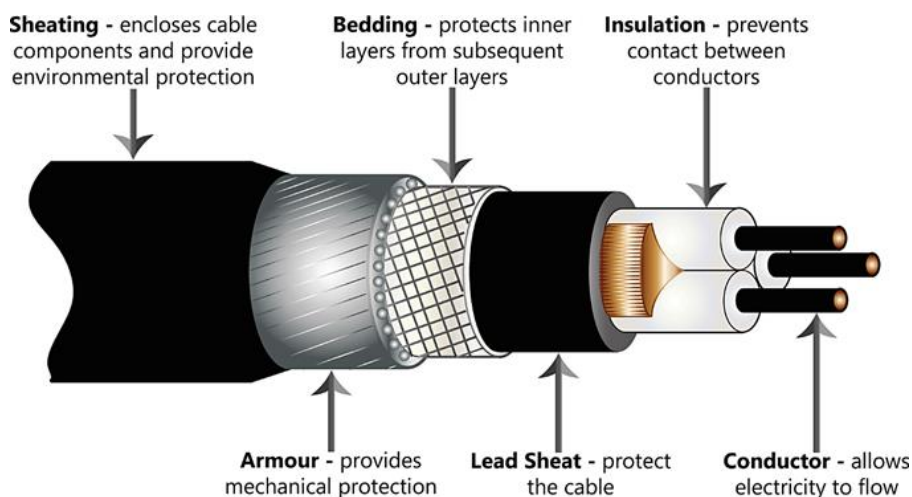
Slika 4.9. Dizajn dvostrani poluprsten

## 4.2.2. Kablovi

Podmorski kabel sastoji se od nekoliko slojeva kao što je vidljivo sa Slike 4.10. Kabel se sastoji od jezgre vodiča, izolacije, štita, vodivi omotača, oklopa, optičkih vlakna i zaštitnog omotača.

Vodička jezgra prenosi snagu koju proizvode turbine i sastoji se od žice s navojem spojene u kružni dio. Izolacija sprječava širenje električne struje i izolira jezgru vodiča. Štit služi za ravnanje električnog polja. Vodljivi omotač je izrađen od metalnih materijala te je spojen na zemlju. Dodatno služi kao prepreka za vodu. Oklop osigurava mehaničku čvrstoću kabela i zaštitu od korozije. Optička vlakna koristi se za komuniciranje i nadziranje kabela. Zadnji sloj je omotač koji služi kao vanjski zaštitni sloj [10].

Kada se električna energija prenosi preko kabela, ograničavajući faktor za maksimalnu prenosivost snage je toplina proizvedena u kabeu. Proizvedena toplina ovisi o značajkama kabela. [11]



*Slika 4.10. Presjek podmorskog kabela [10]*

Općenito, kablovi mogu se klasificirati u jednožilni i trožilni kablovi.

Trožilni kabel sastoji se od tri izolirane jezgre spojene zajedno jedan kablom. Jezgra je obično sačinjena od bakra ili ponekad od aluminija. Aluminij se koristi kada je potrebno smanjenje troškova ili težine kabela, ali na račun male snage. Upotreba trožilnog kabela je najkorištenija konfiguracija za spoj vjetroparkova. Jednožilni kablom ima samo jednu jezgru te je on slabije korištena konfiguracija. Upotrebom jednožilnog kabela za trofazni sustav potrebno su tri kablova u ravnoj formaciji. Trožilni kablovi su znatno jeftiniji za ugradnju u usporedbi s pojedinačnim kablom, budući da se kablom polaže samo jednom. Nedostatak trožilnog je činjenica da se pri kvaru zamijeniti u potpunosti kablom novim, dok kod tri jednožilna kabela uklanja se samo onaj kod koga je kvar.[12]

#### 4.2.2.1. AC kabeli

Najveća električna razlika između podzemnih kabela i nadzemnih vodova je veliki kapacitet prvih. Povećanjem većih udaljenosti, povećava se jalova snaga te se smanjuje njegova sposobnost prijenosa aktivne snage. [10]

Uzimajući u obzir vrstu izolacije, dostupne su tri opcije [10]:

- Opcija niskotlačnog punjena uljem (*eng. LPOF-Low Pressure Oil Filled*) ili punjenja tekućinom niskog tlaka (*eng. LPFF-Low Pressure Fluid Filled*), gdje izolaciju čini visokotlačno ulje
- Opcija umreženog polietilena (*eng. XLPE-Cross linked Polyethylene*), gdje je izolacija sastavljena od čvrstog dielektrika;
- Opcija gumene mješavine etil propilena (*eng. EPR-Ethylene Propylene Rubber*), koji imaju istu izradu kao XLPE kabeli.

LPOF kabeli imaju nekoliko nedostataka: opasnost od curenja tekućine; maksimalni prijenos udaljenost do 50 km zbog poteškoća u održavanju tlaka ulja; potreba za dodatnom zaštitom pri ukopavanju; i visoku cijenu pomoćne opreme.

S druge strane, XLPE je najisplativije rješenje zato što može dosegnuti veće udaljenosti, ali i zato što zbog svojih konstitucijskih karakteristika jeftiniji je od LPOF kabela. Konstrukcijske karakteristike odnose se na bolju sposobnost savijanja, manja težina.

EPR kabeli imaju iste karakteristike kao XLPE kabeli, ali iznad određene razine napona, imaju veći kapacitet, što dovodi do većih gubitaka [10].

#### 4.2.2.2. HVDC kabeli

Elementi koji čine DC kabel isti su kao i kod AC kabela. Glavne dostupne tehnologije HVDC kabela razlikuju se u korištenju električne izolacije. Trenutno u Europi se sve više koriste podmorski i podzemni kabeli za odobalne HVDC mreže. Prednosti DC kabela su [12]:

- Duljine DC kabela nisu ograničene strujama punjenja i nije potrebna reaktivna kompenzacija kao u slučaju prijenosa AC strujom sustava.
- DC kabeli su ekonomičniji u usporedbi s odgovarajućim AC kabelima, koji imaju istu nazivnu snagu, zbog uštede na izolaciji i vodiču.
- HVDC kabeli posebno su praktični za podvodni prijenos velikih snaga na velikim udaljenostima

Postoje tri glavne vrste kabela koji se koriste za HVDC veze: impregnirani masom (MI), punjeni tekućinom (OF) i ekstrudirani (XLPE). Od njih je MI i XLPE su najčešće korištene vrste.

a) MI vrsta kabela (*eng. MI Mass-Impregnated*)

Ova vrsta kabela ima papirnatu izolaciju namočenu smolom i uljem visoke viskoznosti, a nema sustava cirkulacije ulja. MI kabel ima neke specifične nedostatke: nisku radna temperature smanjuje kapacitet snage, kabel je skuplji i teži u usporedbi s XLPE kabelom. Kabel je također vrlo težak instalirati zbog postupka spajanja. Noviji razvoj ove vrste kabela uključuje korištenje papirnog polipropilenskog laminata (*eng. PPL Paper Polypropylene Laminate*). [12]

Trenutno se najviše koristi MI tip kabela za LCC HVDC prijenos što će biti opisano u Poglavlju 4.2.3.2.

b) XLPE vrsta kabla

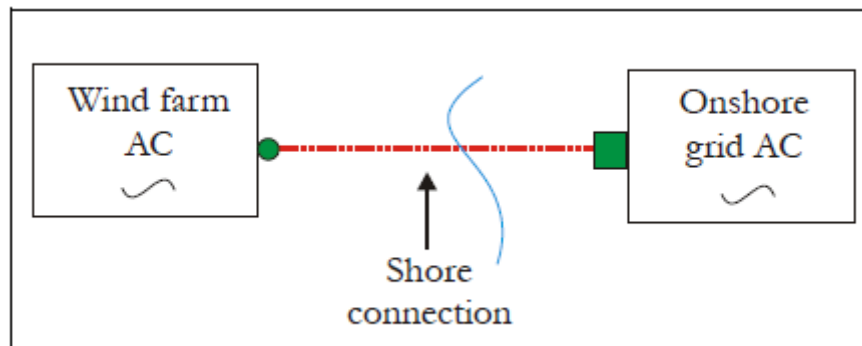
U XLPE kabelima, izolacijski materijal je izrađen od čvrstog dielektrika, također poznatog kao ekstrudirani dielektrik. To je relativno nova tehnologija, razvijena da prevlada neka od ograničenja prethodno navedenih tehnologija [10]. Nazivna struja kabela ograničena je toplinskim gubicima u kabelu, koji su funkcija otpora kabela i toplinskog provođenja topline od vodiča u okolinu. Dopusnjeni napon određen je mogućnostima izolacijskog materijala [12].

XLPE kabeli imaju prednosti u odnosu na MI kabela. Oni dodatno mogu nositi nazivnu struju s temperatura kabela od 90 °C. Imaju povećanu sposobnost savijanja, veću mehaničku otpornost i manju težinu. Također, XLPE kabeli lakši su za rukovanje tijekom postupka instalacije. [10]

Ovaj vrsta kabela nije prikladna za LCC HVDC zato što prostorni naboji u izolaciji može oštetiti kabel pri promjeni smjera struje. XLPE DC kabeli uglavnom se koristi za VSC HVDC prijenos (opisan je kasnije u poglavlju 4.2.3.4.) zato što nemaju promjene polariteta napona tijekom rada [12].

### 4.2.3. Povezivanje s obalom

Jedna od važnijih značajki pri projektiranju vjetroparkova je povezivanje s električnom mrežom na kopnu. Električna energija proizvedena u odobalnim vjetroelektranama mora se prenjeti do lokalne mreže na kopnu kao što je prikazano na slici 4.11. Jedina mogućnost prijenosa električne energije trenutno je korištenjem kablova. Uobičajen način za prijenos električne energije je podmorskim energetskim kabelima [11].



*Slika 4.11. Shematski prikaz spoja vjetroparka s obalom [11]*

Vjetroelektrane i kopnena mreža koriste izmjeničnu struju (*eng. AC- Alternating Current*) za proizvodnju kao i prijenos. Visokonaponska izmjenična struja (*eng. HVAC- High-Voltage Alternate Current*) dokazala se kao pouzdan način prijenosa zato što se prijenos vrši na visokom naponu kako bi se smanjili gubici. Međutim, HVAC ima nekoliko ograničenja u vezi snaga i udaljenosti koju se mogu prenijeti. Gubici rastu s naponom, i duljinom kabela. Na duljinama većim od 100-150 km, ovisno o tipu kabela, izmjenični prijenos ne postoji. [10]

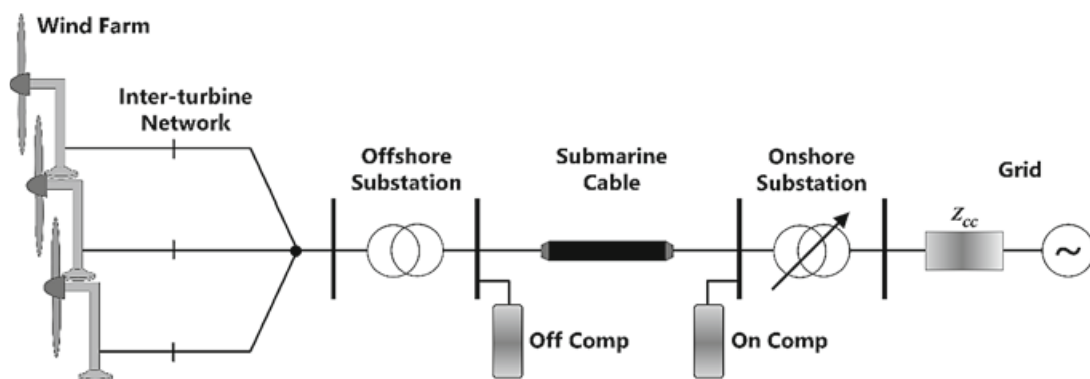
Problemi prijenosa HVAC-om može se prevladati Visokonaponskom istosmjernom strujom (*eng. HVDC- High-Voltage Direct Current*) u slučaju kada je potrebno prenositi velike količine energije na velikoj udaljenosti ili ako je AC mreža koja se povezuje s vjetroelektranom slaba. U tim slučajevima odobalna trafostanica prije prijenosa prikupljene energije pretvara je u istosmjernu. Na kopnenoj trafostanici pretvorba je obrnuta te se energija isporučuje u zadanoj izmjeničnoj struji.

U prijenosnom DC sustavu nema jalove snage te se sva snaga koristi za prijenos. Gubici u kabelu iznad određene udaljenosti manji su kod istosmjerne struje. Nedostatak prijenosa HVDCom je taj što je skuplji od AC/DC/AC pretvorbe. [10]

#### 4.2.3.1. HVAC Visokonaponska istosmjerna struja

Spajanje vjetroelektrane na mrežu AC kabelom je najjednostavnije tehničko rješenje zato što je energija proizvedena vjetroelektranom i kopnena prijenosna mreža su izmjenični.

Na slici 4.12. može se vidjeti shema povezivanja odobalnog vjetroparka i kopnene mreže HVAC sustavom. Prijenosni sustav prikazan je s nekoliko glavnih komponenata: AC kolektorski sustav unutar vjetroparka, odobalna trafostanica, kabel koji dolazi u izvedbi trožilnog XLPE HVAC prijenosnog kabela te trafostanice na obali. [11]



*Slika 4.12. Shema spoja vjetroelektrane i kopna HVAC sustavom [10]*

Glavni problem ovog prijenosnog sustava odnosi se na vezu vjetroparkova s AC podmorskim kabelima zbog činjenice da kabeli generiraju značajne količine reaktivne snage. Spomenuta reaktivna snaga proizvedena je velikim shunt kapacitetom kabela. U AC sustavu, kabel mora nositi obje struje opterećenja i jalovu struju. Jalova struja dobivena je kapacitivnošću kabela, što smanjuje nazivnu efektivnu aktivnu snagu kabela. Drugim riječima, jalova struja zauzima "prostor" koji ne može biti ispunjen aktivnom strujom.

Maksimalne udaljenosti za AC podmorski kabelski sustav varira prema nazivnom naponu i maksimalnoj prenesenoj snazi, koja se smanjuje s duljinom kabela.

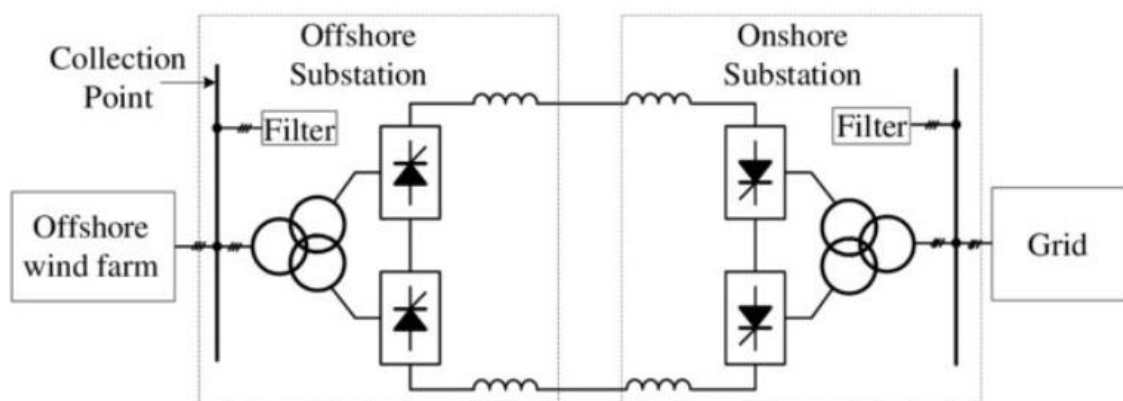
Rješenje za velike količine reaktivne snage u kabelu je kompenzacija jalove snage, čime će se smanjiti dodatni gubici i povećati maksimalne udaljenosti prijenosa. Kompenzacija se obično izvodi fiksnim ili elektronički upravljanim shunt reaktorima[10]. Shunt reaktori u osnovi imaju za cilj nadoknaditi višak proizvodnje jalove energije tako da se spriječi neprihvatljiv porast napona i gubitak snage.

Primjer HVAC prijenosnog sustava možemo vidjeti u Horns Rev vjetroparku od 160 MW. Vjetropark smješten je 14-20 km od danske obale u Sjevernom moru. Vjetropark povezan je s obalom na 150 kV te za prijenos snage koristi se 150 kV podmorski kabel. U slučaju ovoga vjetroparka potrebna je dodatna transformatorska platforma 34-150kV zato što su vjetroturbine na naponu od 34 kV. [12]

#### 4.2.3.2. HVDC LCC

Trenutačni trendovi u instaliranim odobalnim vjetroelektranama ukazuju na velike snage stotina MW i velike udaljenosti od obale. Ovi zahtjevi za prijenos nisu izvedivi korištenjem AC kabelskim prijenosom, s obzirom na njihova ograničenja. Povezivanje odobalne vjetroelektrane putem DC veze počinje se razmatrati s obzirom na iskustvo u prijenosu velike količine snage na duge udaljenosti kroz dobro poznate HVDC veze. Prva korištena tehnologija odnosi se na izravno

povezivanje s postojećim kopnenim HVDC objektima zvanim „linijski komutirani pretvarač“ (eng. *HVDC LCC -Line Commutated Converter*) korištenjem tiristora u pretvaračima.



**Slika 4.13.** Osnovna konfiguracija vjetroelektrane koja koristi HVDC-LCC tehnologiju [14]

LCC pretvarači struje (na kopnu i na moru) su najvažniji elementi u sustavu, jer izvode AC/DC pretvorbu na moru i DC/AC konverzija na kopnu. LCC pretvarači temelje se na tiristorskim ventilima koji mogu podnijeti 8 kV, kao i do 4 kA istosmjerne struje. U LCC pretvaraču, struja uvijek zaostaje za naponom zbog kontrolnog kuta tiristora; stoga ti pretvarači troše jalovu snagu. Za ispravljanje kuta napona razmatraju se opcije uporabe kondenzatorske baterije ili STATCOM uređaja [10].

Nedostaci LCC HVDC su: zahtijeva jake AC sustave, dodatnu opremu za realizaciju "crnog" starta, generira harmonijska izobličenja i zahtijeva velike AC i DC harmonijske filtere. [12]

#### 4.2.3.3. Usporedba HVAC i HVDC LCC

Prednosti HVDC LCC u odnosu na HVAC su [10]:

- Asinkrona veza, budući da krajnje frekvencije slanja i primanja mogu razlikovati se,
- Veće udaljenost prijenosa pomoću DC struje zato što nije ograničena reaktivnom strujom kabela,
- Mali gubici snage kabela,
- Veća sposobnost prijenosa energije po kabele,
- Protok snage je u potpunosti kontroliran,
- HVDC ne prenosi struju kratkog spoja.

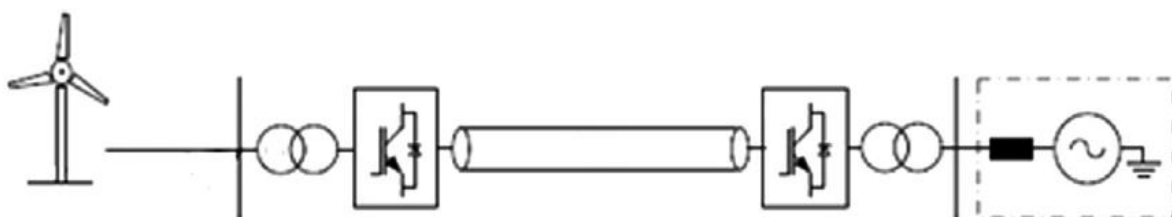
#### 4.2.3.4. VSC HVDC

VSC-HVDC je nova tehnologija prijenosa, osmišljen krajem devedesetih godina prošlog stoljeća.

Nedavni razvoj energetskih elektroničkih uređaja doveo je do porasta samokomutiranih uređaja pretvarača izvora napona (*eng. VSC- voltage source converters*) u primjenama elektroenergetskog sustava. Ovo se uglavnom pripisuje razvoju bipolarnog tranzistora s izoliranim vratima (*eng. IGBT- insulated gate bipolar transistor*). Uporabom samokomutacijskog poluvodičkog uređaja (IGBT) smanjen je rizik od kvara komutacije na minimum zato što oni ne zahtijevaju veliki AC napon za komutaciju [12].

Puna upravljivost i simetrija, uključivanja i isključivanja iz rada, omogućuje uređaju mnogo bržu regulaciju protoka energije nego njegovim prethodnicima. Ova tehnologija ima sposobnost prigušenja i generiranja aktivne i jalove snage neovisno jedna o drugoj. Potpuna i neovisna regulacija djelatne i jalove snage, osigurana je korištenjem pretvarača s modulom širine impulsa (*eng. PWM-Pulse Width Modulation*). Ovakav pristup eliminira zahtjev za skupim kompenzatorima jalove snage koji se intenzivno koriste unutar LCC-HVDC tehnologije [12].

U usporedbi s tradicionalnim LCC-HVDC sustavom, VSC-HVDC sustav je znatno manji. To je zbog kompenzatora jalove snage i AC filtera koji su potrebni u slučaju LCC koji su volumno veći u usporedbi s VSC rješenjem. Dodatna značajka VSC-a je mogućnost pružanja podrške za "blackstart". To jest, vraćanje snage bez pomoći vanjski izvor napajanja.



*Slika 4.14. VSC HVDC prijenosni sustav [12]*

Tipični sustav prijenosa VSC HVDC prikazan je na slici 4.14. Sastoji se od odobalne stanice koju čini AC pretvarača i transformatora, DC kablova i prekidača, DC pretvarača i transformata u obalnoj stanici [12].

Postoje neka ograničenja za korištenje VSC tehnologije. Glavno ograničenje je znatno manje iskustva s VSC prijenosom, u usporedbi s LCC opcijom. Također, VSC prijenos ima veću snagu sustava gubitke, u usporedbi s LCC sustavom. Tipično, gubitak snage pri punom opterećenju za pretvarač je oko 4–6% za VSC i 2–3% za LCC prijenos. Ovo je zbog iznosa brzine prebacivanja IGBT-a. IGBT ventili su puno više skuplji od tiristora koji se koriste u LCC tehnologiji [10].



## 5. SLUČAJ ISTARSKJE ŽUPANIJE

Istarska županija je najzapadnija županija Republike Hrvatske te ujedno i najveći jadranski poluotok. Poluotok Istra proteže se površinom od 2 820 km<sup>2</sup>, omeđen je morem dužinom obalnog pojasa od ukupno 445 km i planinom Učkom s istočne strane. Osim što ima dugi obalni pojas, unutrašnjost poluotoka je prekrivena sa šumom površinom od 35%. Zbog navedenih karakterističnih geografskih odlika i sredozemne klime, Istarska županija je glavna turistička destinacija u Hrvatskoj tijekom cijele godine-kako za strane tako i za domaće turiste. Prema [43] podacima za 2022. godinu broj dolazaka iznosio je 4 709 074, dok je u mjesecima vrha turističke sezone, srpnju i kolovozu, ukupno bilo više od dva milijuna dolazaka. Broj stalno naseljenih stanovnika, prema podacima iz 2021., iznosi 195 794. S ovolikim velikim brojem turističkih dolazaka i domaćim stanovništvom Istra se počinje susretati s velikim problemom prijenosa energije.

Problemi u postojećoj istarskoj mreži dolaze do izražaja u ljetnim periodima kada se pojavljuje niski napon u južnom i zapadnom dijelu županije. Pojava niskog napona javlja se uslijed preopterećenosti mreže zbog velikog konzuma energije. Posebno je izražen nepovoljni trend kada termoelektrana Plomin 2 nije u pogonu. Uslijed udara munja na području Učke dolazi do čestog ispadanjem dalekovoda 2x220 kV Melina-Pehlin-Plomin. Pogon TE Plomin 2 do 2030. godine prestaje s radom, a moguće je i ranije zbog upitne isplativosti. Plomin 1 prestao je s radom 2017. godine. Izlazom iz rada Plomina 2 problem se još više povećava zbog smanjenja prinosa energije ukupnoj mreži uz predviđena povećanja ukupnog konzuma. Predviđeno povećanje konzuma Istre do 2025. godine iznosi 450-500 MW.[36]

Dodatni čimbenici koji utječu na ispad iz mreže je prijenos velike snage relativno slabom 110 kV mrežom. U periodima ljetnog maksimalnog konzuma (više od 300 MW) dolazi do visokih opterećenja 110 kV vodova. Takva zagušenja u mreži dovode do mogućih ispada mreže, kao što je čest slučaj s vodom 110 kV Pazin-Poreč.[36]

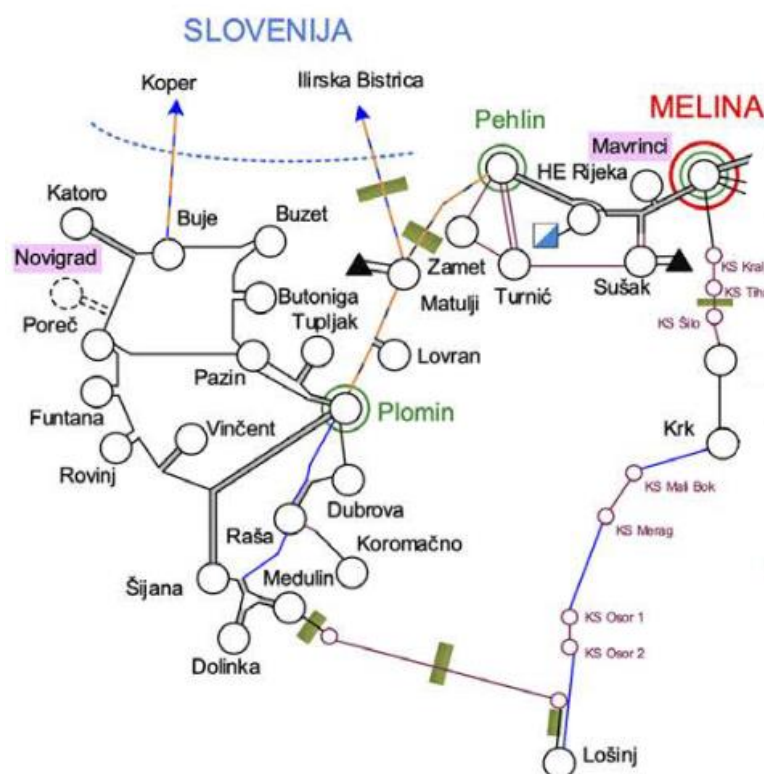
Prema [43] „Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2022-2031“, kratkoročni plan do kraja 2024. godine je:

- Ublažavanje problema preniskih napona koji javljaju u scenarijima visokog ljetnog konzuma koji uzrokuje pad napona na potezu 110 kV voda Poreč-Funtana-Rovinj-Vincent-Šijana- Dolinka-Medulín-Raša, planira se ugradnja dvije kondenzatorske baterije snage po 30 MVar u TS Poreč i TS Šijana. Kondenzatorske baterije se ugrađuju kako bi se iznosi napona zadržali unutar granica definiranim mrežnim pravilima prijenosnog sustava.

Također, vod Rovinj zamijenit će se HTLS (Visokotemperaturni niskoprovjesni) tipom vodiča što će omogućiti prijenosnu moć iznad 160 MVA na tome potezu.

- Vodič dalekovoda 110 kV Buje – Koper zamijenit će se novim HTLS vodičem zbog neophodnog povećanja prijenosne moći
- Radi osiguranja razine sigurnosti istarske prijenosne mreže u slučaju neraspoloživosti TE Plomin 2, planirana je zamjena vodiča DV 110 kV poteza Matulji-Lovran-Plomin (planirani završetak 2022. godine).
- Dalekovod 2x220 kV Plomin-Pehlin-Melina izuzetno je važan za napajanje područja Istre, posebice u situaciji Plomin nije u proizvodnji. Stoga se u razmatranom razdoblju planira ugradnja štapnih odvodnika prenapona uzduž voda, kako bi se u najvećoj mogućoj mjeri izbjegao istovremeni ispad dvostrukog voda uslijed udara munje u stup i/ili zaštitno uže. Iz razloga što vod prolazi dionicom kroz izrazito grmljavinski aktivno područje.

Dugoročni plan, prema [44], za razdoblje od 2025-2023 odnosi se na planiranje i početak izgradnje TS 220/110 kV Vodnjan krajem razmatranog razdoblja. Veličina izgradnje transformacije iznosi 220/110 kV od 2x150 MVA, te uz podizanje pogona dalekovoda 2x110(220) kV Plomin – Vodnjan na 220 kV.



Slika 5.1. Prikaz mreža 110 kV za područje Istre do kraja 2031. godine [44]

Mogući načini rješavanja problema, osim planova HOPSa, je jačanje energetske neovisnosti Istre izgradnjom elektrana OIE-sunčanih i vjetroelektrana. Osim izgradnji elektrani potrebno je uzeti u obzir čimbenike koji mogu pružiti fleksibilnost mreži pri višku ili manjku električne energije, kao što su spremnici električne energije.

Istarska županija do danas nema niti jednu elektranu koja je iz kategorije obnovljivih izvora.

### 5.1. Proizvodnja eksploatacijskih polja Sjeverni Jadranu

Eksploatacijsko polje Sjeverni Jadran nalazi se unutar teritorijalnih voda Republike Hrvatske i obuhvaća 1756 km<sup>2</sup>. Eksploatacija prirodnog plina na sjevernom Jadranu počela je 1998. godine. Postoje 3 istražna polja, Izabela, Sjeverni Jadran i Marica, unutar kojih se nalazi ukupno 18 proizvodnih platformi i jedna kompresorska platforma. Sjeverni Jadran najveće je istraživački blok s ukupno 14 proizvodnih platformi

Jedina kompresorska platforma Ivana K nalazi se u bloku Sjevernom Jadranu i udaljena je 46 km od Pule. Plinovodom je povezana s plinskim terminalom Pula te s talijanskom kompresorskom platformom Garibaldi K. Stoga, preko talijanske platforme Garibaldi K povezano je plinovodom polje Sjeverni Jadran s Italijom.

Odobalna postrojenja u eksploatacijskim poljima hrvatskog Jadrana starosti su između 5 i 20 godina. Prema tipu konstrukcije dijele se na monopode (postolje na jednoj nozi), tripode (postolje na tri noge) i platforme a 4 noge. [4]

Prema [2] u poljima proizvedeno je preko  $15,5 \times 10^9$  m<sup>3</sup> plina, ali proizvodnja iz rezervi su u padu. Vrhunac proizvodnje ostvaren je 2010. godine s proizvodnjom od  $1,3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, a je u 2016. godini proizvodnja iznosila  $0,53 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. Uočljiv je velike pada proizvodnje za raspon od 6 godina. Maksimum dokazanih rezervi (1P) od  $12,58 \times 10^9$  m<sup>3</sup> postignut je 2007. godine, nakon čega su rezerve u oštrom padu.

S pretpostavkom da se neće provoditi nove radnje s ciljem povećanja proizvodnje iz postojećih polja, slijedi nastavak pada proizvodnje i očekivan kraj financijski opravdane proizvodnje.

### 5.2. Mogućnosti prenamjene plinske infrastrukture

Eksploatacija na poljima Sjevernog Jadrana približava se roku trajanja, a početak razgradnje infrastrukture je neizbježno. Neaktivne infrastrukture koje više ne služe svrsi proizvodnje moraju biti uklonjene. Trend dekomisiji zahvaća platforme svih proizvodnih polja u svijetu. Kao primjer, Sjeverno more provodi dekomisiju u skladu s odredbama „Konvencije za zaštitu morskog okoliša sjeveroistočnog Atlantika“ [2]. Jadransko more nije trenutno zahvaćena konvencijom, ali očekuje

se da će se razgradnja vršiti u skladu s njom. Iz razloga što Konvencija je podržana od strane Europske zajednice.

Dekomisija je energetske intenzivan proces tijekom kojeg dolazi do značajnih emisija stakleničkih plinova, stvaraju se količine otpada koji se ne mogu reciklirati. Uzimajući u obzir dodatna onečišćenje okoliša i visoku razgradnju troškova, svijetu se nameće prenamjena postojećih platformi kao idealno rješenje. Davanje drugog života platformama u području energetike razmatrano je uz sljedeće tehnologije [45]:

- a) **Proizvodnja električne energije** odnosi se na prenamjenu postojećih postrojenja u vjetropark ili izgradnja vjetroparka u blizini s namjerom povezivanja na postojeći transformator starog postrojenja. Prijenos energije do kopna vrši se HVDC kablovima
- b) **Proizvodnja vodika** procesom elektrolize, korištenjem električne energije koju proizvodi vjetropark
- c) **Proizvodnja električne energije i vodika** odnosi se na spoj proizvodnju električne energije i vodika vjetroparkom. Višak električne energije proizveden vjetroparkom može biti kemijskom konverzijom u kompresijskim postrojenjima, koji su na obali ili na odobalnim platformama, pretvoren u vodik. Vodik kasnije može biti skladišten u bivšim ležištima ili skladištima na kopnu.
- d) **Skladištenje plina u starim plinskim ležištima** odnosi se na iskorištenje postojećih ležišta u sezonska plinska skladišta. Većina potrebne infrastrukture već postoji što značajno smanjuje financijska ulaganja.
- e) **Umjetni morski greben** prenamjenjuje stare naftne i plinske platforme u umjetne morske grebene koji nastavljaju osiguravati stanište morskoj flori i fauni na otvorenom moru.

### 5.3. Prenamjena cjevovoda plinske infrastrukture za transport vodika

Unatoč potencijalu vodika da drastično smanji emisije ugljika, jedno od glavnih uskih grla kada je riječ o zamjeni prirodnog plina je stvaranje i razvoj nove transportne infrastrukture. Međutim, prednost prijenosa energije u obliku vodika putem cjevovoda naspram električnih kabela je ta da postoji mogućnost ponovne upotrebe postojeće plinske infrastrukture i stoga dodatnog smanjenja ukupnih troškova transporta energije.

Postupak prenamjene uglavnom se svodi na eliminaciju neželjenih komponenti i stvaranje sigurnijeg okruženja provođenjem pročišćavanja dušikom, temeljitim pregledom cjevovoda radi potencijalnih lomova i zamjenom postojećih ventila koji su bili u uporabi dulje vrijeme. Osim toga, cjevovodi prirodnog plina koji su prenamijenjeni za transport vodika općenito moraju raditi pri smanjenom tlaku, iako se to može spriječiti ugradnjom unutarnjeg sloja premaza. [16]

Općenito, dvije ključne značajke koje prenamjenu cjevovoda za prirodni plin u vodik čine atraktivnim rješenjem su niski troškovi pretvorbe, kao i relativno jednostavan tehnološki proces pretvorbe. Prema studiji European Hydrogen Backbone, očekuje se da će više od 60% namjenske vodikove mreže u Europi do 2040. godine biti sastavljeno od naknadno opremljenih cjevovoda za prirodni plin.

Što se tiče cjevovoda, nema mnogo radnji potrebnih da bi se prenamjena dovršila. Potrebno je opsežno praćenje cjevovoda kako bi se identificiralo i lociralo curenje vodika. U slučaju da nema curenja, nije potrebno ništa poduzimati. Ako se lociraju curenja, što je moguće jer je molekula  $H_2$  mnogo manja od molekule metana ( $CH_4$ ), potrebno je intervenirati i zamijeniti neispravni dio cjevovoda. Osim navedenih radnji, potrebno je izvršiti i čišćenje cjevovoda od prirodnog plina, kako bi se vodik mogao transportirati. Stoga bi prema operaterima transporta prirodnog plina, CAPEX prenamjene cjevovoda mogao iznositi manje od 10% CAPEX-a razvoja novog cjevovoda, budući da gotovo da nisu uključene nikakve skupe aktivnosti. [17]

#### 5.4. Power to Gas

Koncept Power-to-Gas (drugi izrazi koji se koriste: P2G, PtG) koristi obnovljivu ili višak električne energije za proizvodnju vodika (Power-to-Hydrogen) elektrolizom vode. Glavna svrha je dugoročno pohraniti energiju pretvarajući je u druge nositelje energije koji se lako pohranjuju, a u isto vrijeme smanjiti opterećenje električne mreže kontroliranim radom (fleksibilna potražnja). [35]

Nekoliko koncepata za elektrolitičku proizvodnju vodika danas je već komercijalno dostupno. Jedna od mogućnosti je elektroliza alkalne vode. Budući da PEM (eng. *polimerna elektrolitska membrana*) elektroliza ima bolje ponašanje pri djelomičnom opterećenju, ova vrsta elektrolize postala je prvi izbor za PtG. Jedan važan cilj PtG-a je integracija fluktuirajuće proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije u regionalne ili nacionalne energetske sustave. Stoga je glavni izazov za elektrolizu unutar PtG isprekidan/dinamički rad. Sva tri razmatrana elektrolizatora, PEM, alkalna elektroliza i SOEC (eng. *Solid oxide electrolyzer cell*), mogu podnijeti promjene opterećenja.

U trenutnim energetske scenarijima, mogućnosti skladištenja, kao što je PtG, predmet su analize. Gotovo svi scenariji s fokusom na skladištenje energije pretpostavljaju budući trend prema povećanju skladišnog kapaciteta u kombinaciji s više OiE u proizvodnji električne energije. [35]

## 5.5. Cilj istraživanja

Kako je već rečeno, Istra ima veliki problem s manjkom snage u ljetnim mjesecima kada dolazi do opterećenja mreže i ispada mreže. Trenutni konzum ljeti je 300 MV, a u narednim godinama očekuje se povećanje do 500 MV. Sanacija problema preopterećenja mreže do 2030. trebala bi biti provedena, prema HOPSovom planu [44].

Drugi problem Istarske županije koji se nameće, uslijed zatvorene TE Plomin 1 i predviđenog gašenjem TE Plomin 2 do 2030. godine, je energetska ovisnost o drugim županijama i kvaliteti prijenosne mreže. Zatvaranjem termoelektrane Plomin Istra ostat će bez i jedne elektrane na svome području. Jedan od ključnih elemenata koji se trebaju uzeti u obzir je ne mogućnost priključka novih snaga većih od 300 MV zbog ne mogućnosti prihvata trenutne mreže.

U isto vrijeme, područje Istre nalazi se na geografskom području koji ima značajan potencijal za ostvarivanje energetske neovisnosti. Iz razloga što je smještena u području s vrlo kvalitetnim odobalnim vjetrom, dobrom povezanosti sa susjednim zemljama i plinskim postrojenjem koji je pri kraju radnoga vijeka.

Samo po sebi se nameće za istraživanje ovoga rada prenamjena plinskih postrojenja u moderni vjetroпарк. Odobalni snage vjetra veće su od onih na kopnu stoga vjetroelektrane proizvede veće količine električne energije. Povezivanje modernih vjetroelektrana i neaktivnih plinskih postrojenja u energetska hub može riješiti problem nedostatak energije i disbalansa energetskog sustava. Energetsko čvorište (EH-Energy hub) definira se kao mjesto gdje se odvija proizvodnja, pretvorba, skladištenje i potrošnja različitih nositelja energije.

Energetski hub sastojat će se od parka A i B koji će vjetroturbinama proizvoditi električnu energiju. Dio električne energije će se prenositi na kopno, a dio energije preusmjeravat će se za proizvodnju vodika. Vodik će se proizvoditi procesom kemijske konverzije (P2G) te prenositi do kopna postojećom prenamijenjenom plinskom mrežom gdje će se dalje skladištiti ili po potrebi ponovno pretvarati u električnu energiju.

Preusmjeravanjem aktivnosti proizvodnje energije s kopna na obalu dobiva se čisto okoliš, slobodne površine koje su namijenjene za smještaj infrastrukture elektrana, smanjenje rizika po zdravlje okoline i vizualnu zagađenost.

Zbog trenutnih trendova na globalnom energetskom tržištu i dugoročne vizije održivosti, odobalne energija goruća tema u svijetu. Odstranjivanje plinske infrastrukture u našim teritorijalnim vodama predstavlja značajan tehnički i financijski problem. S prenamjenom postojeće može se postići

pozitivan utjecaj na gospodarstvo, energetska sigurnost i smanjenje ugljične intenzivnosti energetskeg sektora.

Ovakvim pristupom proizvodnje zelene energije rješava se problem kapaciteta iz obnovljivih izvora i uvelike pridonosi energetskej tranziciji Republike Hrvatske. Slijedom toga, ovo istraživanje ima za cilj ispitati geografsku, tehničku i ekonomsku izvedivost prenamjene plinskih postrojenja u energetske hub za proizvodnju energije koja je neophodna Istri.

Doprinos rada ogleda se u pregledu tehnoloških mogućnosti iskorištavanja postojeće plinske infrastrukture. nakon prestanka proizvodnje ugljikovodika. Nove tehničke mogućnosti temelj su za inteligentnu primjenu razvoja plave energije.

## 6. SMJEŠTAJ I KOMPONENTE VJETROELEKTRANE

### 6.1. Prostorni raspored vjetroelektrana

Vjetroelektrana nalazit će se na području eksploatacijskog polja Sjeverni Jadran. Elektrana će biti podijeljena na dva dijela-park A i B.

#### a) Vjetropark A

Vjetropark A imat će tipičan sustav komponenti vjetroelektrane. Turbine u vjetroelektrani povezane su međuturbinskim kabelima (sustav za prikupljanje električne energije) i spojene su na podstanicu (transformatorska stanica) na moru. S kopnom će biti povezana izvoznim kabelom, koji će biti spojen s kopnom kod grada Pule. Vjetropark sastojat će se od 30 turbina povezanih u radijalni dizajn, koji je dodatno objašnjen u poglavlju 4.2.

Lokacija parka bit će u plinskom polju Annamaria A. Podatci za obradu vjetra, morski aspekti i nautika područja uzeti su u obzir za koordinate plinske platforme Anamaria A (44°12'53.6"N 13°13'27.1"E ). Udaljenost od grada Pule procjenjuje se na 62 km.

Vjetropark sastojat će se od 30 turbina povezanih u radijalni dizajn. Vjetroturbine raspoređene su unutar 5 redova sa 7 turbina po stupcu. Turbine pojedinih stupaca međusobno su povezana kablom, a svaka prva iz reda povezuje se s transformatorskom stanicom. Prijenosi kablovi do obale bit će HVAC, koji su više objašnjeni u poglavlju 4.2.2.2.

Vjetroturbine oslanjat će se na plutajuće temelje. Plutajuća potporna konstrukcija odabrana za studiju slučaja je polu-uronjive (semi-submersible) konstrukcije. Iz razloga zato što postoji opsežna baza znanja o konstrukciji takvih platformi.

#### b) Vjetropark B

Vjetropark B zamišljen je kao prenamijenjena postojećeg plinskog postrojenja koje se nalaze na Sjevernom Jadranu odnosno postavljanje vjetroturbina na već postojeće platforme. Lokacija vjetroparka poklapa se s plinskim platformama. U obzir se uzimaju platforme plinskih polja Ivana A, Annamaria A i polja Marica. Broj novopostavljenih turbina je 18.

Platforme će biti prenamijenjene u hibridnu vjetroelektranu. Hibridnom vjetroelektranom smatra se spoj vjetroturbine i pretvorbe vodika putem elektrolize. Pojedina vjetroturbina sadrži unutar svoje konstrukcije jedinicu za proizvodnju vodika (eng. *HPU Hydrogen Production Unit*). Proizvedeni vodik transportirat će se do obale postojećim prenamijenjenim plinovodom.



Za slučaj većih proizvedenih količina vodika u nekom danom trenutku, a da elektroenergetskom sustavu Hrvatske nije potrebno, moguća je razmjena s Italijom s već postojećim transportnim cjevovodima.

## 6.2. Plutajući sustav vjetroturbine

Velika većina operativnih odobalnih vjetroturbina montirana je na potkonstrukcije fiksirane na dnu, kao što su monopil, plašt, tronožac i potkonstrukcije gravitacijske baze, koje su postavljene u plitkim do srednjim dubinama mora do 50 m. Plutajuće vjetroturbine potencijalno bi mogle biti rješenje jer nude nove temelje potporne strukture koji se mogu koristiti u dubokim vodama većim od 60 metara dubine. Posljednjih godina predložene su i istražene različite vrste plutajućih vjetroturbina na moru s različitim potpornim platformama, konfiguracijama za sidrenje i privez. Projekti su imali koristi od koncepta plutajuće potporne strukture koji se koristi u industriji nafte i plina na moru [34]. Vjetroturbina postavljena na plutajući temelj dio je FOWT (eng. *Floating Offshore Wind Turbine*) ideje koja omogućuje proizvodnju energije u dubokim vodama gdje vjetroturbine pričvršćene na dno nisu ekonomski isplative.

U ovome radu odabran je poluuronjivi koncept vjetroturbine iz razloga što su dubine na odabranom području, kod platforme Annamaria A 45-60 m. Poluuronjivi koncept izvorno je razvijen za korištenje u naftnoj i plinskoj industriji na moru gdje je bila potrebna velika paluba za bušenje. Polu-uronjivi FOWT-ovi obično se sastoje od više vertikalnih stupova spojenih poprečnim nosačima ili pontonima. Nagibne ploče ili rubovi obično su pričvršćeni na dno stupova kako bi se povećala dodana masa i prigušenje. Međutim, moguća je dodatna sila uzgona na pločama za podizanje ili rubovima pojavljuju se zbog vrtložnog prosipanja. [34]

Zahvaljujući malom gazu, razmještaj poluuronjivih FOWT-ova može se izvesti u regijama s dubinom vode u rasponu od 40 m do 60 m. One se sastavljaju na suhim dokovima, gdje se platforme zatim vuku u more pomoću standardnih brodova tegljača čime se ostvaruju značajne logističke i financijske uštede.

Ograničena osjetljivost na dubinu vode, integracija uz obalu, veliki nosivost i mogućnost premještanja platforme nakon napuštanja polja samo su neke od prednosti poluuronjivih platformi. Nadalje, posebno sustava za rad i održavanje su relativno lakši. Balast unutar komore pruža bolju stabilnost u teškim okruženjima, iako dobivanje aktivnog balasta u sustavu može proizvesti dodatne potrebe za održavanjem.

Plutajući sustav vjetroelektrana sastoji se od dva dijela. Generator električne energije vjetroturbine na moru i njegova plutajuća potporna struktura. Korisnost plutajućeg vjetra na moru prikazana je u projektima Hywind i Windfloat.

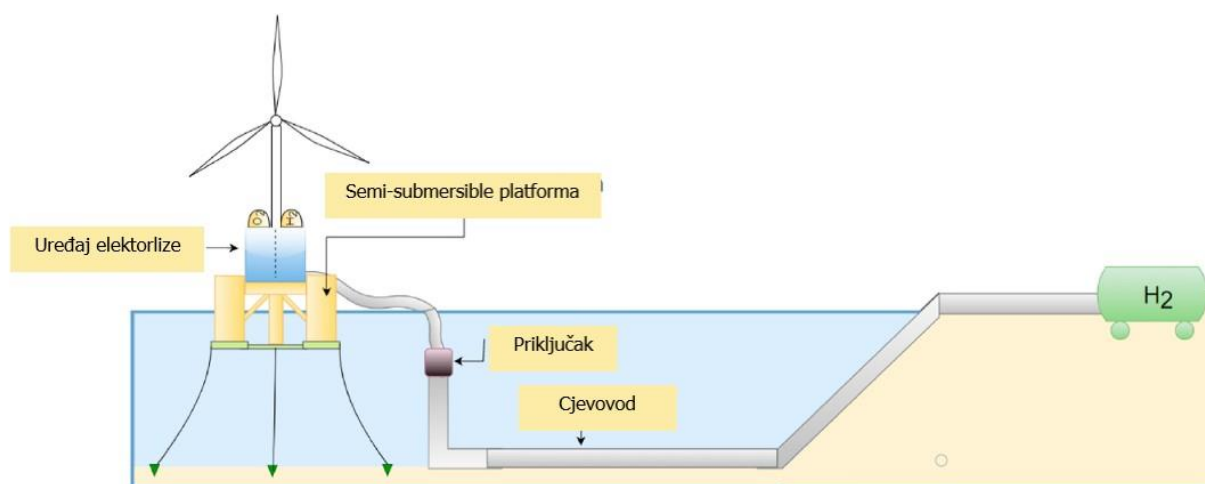
### 6.2.1. Vjetroturbina IEA RWT 10 MW

Odabrana turbina je dio istraživanja „IEA Wind Task 37 Integrated RD&D“ čija je temeljna aktivnost razvoj istraživačkih turbina (eng. *RWT Research Wind Turbine*) koji implementiraju trenutnu potrebu tehnologiju vjetroturbina.

Vjetroturbina koji je razmatrana u ovom radu je IEA Wind 10 MW referentna turbina (RWT), koju su razvili NREL i DTU [42]. Odabrana turbina dizajnirana je po uzoru na turbinu DTU 10-MW RWT, Danskog tehničkog sveučilišta (DTU) iz 2013. godine. Turbina nije dizajnirana da predstavlja najnovije dostignuće niti da uključuje inovativne tehnologije, već je trebala biti osnova za usporedbu novih tehnologija. [42] Ukupne karakteristike obalne turbine dizajnirane za „IEA Wind Task 37“ temeljene su na povratnim informacijama dobivenim od mnogih korisnika DTU 10-MW RWT, kao i anketama koje je provela projektna skupina IEA Task 37.

To je vjetroturbina s izravnim pogonom (direct driven generator) s promjerom rotora od 198 m, visinom glave rotora na 110 m i brzinama vjetra pri uključivanju i isključivanju od 4 m/s, odnosno 25 m/s. Nazivna brzina vjetra turbine je 11 m/s. Odabir ove turbine vođen je činjenicom da je to napredni dizajn za potrebne promatranog područja. Međutim, sugerira se da je njegov dizajn potrebno dodatno optimizirati u slučaju korištenja u plutajućim aplikacijama na moru. Više informacija o turbini možete pronaći u njenom tehničkom izvješću [42]

### 6.3. Proizvodnja vodika unutar turbine



*Slika 6.1. Koncept proizvodnja vodika unutar turbine [27]*

Proizvodnja zelenog vodika postići će se elektrolizom na moru (izravno spajanje vjetroturbina na moru i sustava elektrolize), budući da je to ekonomski i povoljnije u usporedbi s prijenosom električne energije na obalu i tamošnjom proizvodnjom vodika [33]

Centralizirana elektroliza podrazumijeva izgradnju postrojenja za elektrolizu na odobalnoj platformi ili energetsom otoku (umjetni otok, posebno razvijen za prilagodbu procesu elektrolize) i njegovo povezivanje s vjetroturbinama pomoću električnih kabela. S druge strane, integrirani (ili decentralizirani) podrazumijeva da je jedinica za elektrolizu ugrađena u vjetroturbinu i nalazi se na tornju, temeljima ili gondoli vjetroturbine.[33]

Elektroliza u turbini je isplativija opcija u usporedbi s centraliziranom elektrolizom zbog manje koraka potrebni u procesu. U našem slučaju, postojeći cjevovodi unutar polja koji povezuju turbine jeftiniji su od novih električnih kabela za istu svrhu. Broj potrebnih komponenti je smanjen, što rezultira manjim kapitalnim izdacima. Također, postojeće plinske platforme koje će se koristiti za temelje vjetroturbine i elektrolize dodatno smanjuju troškove ulaganja. [33]

Potonje također ukazuje na to da integrirana elektroliza smanjuje potrebni ukupni ugljični otisak koji bi bio potreban za centralizirano rješenje, poput platformi ili eneretskog otoka.

Glavni nedostatak odabira elektrolize unutar turbine je taj što je tehnologija još uvijek u istraživanju u odnosu na centralizirane. Međutim, očekuje se da će prve upotrebe biti spreman za provedbu do 2030. godine, što bi bilo vrijeme kada bi Hrvatska mogla razmatrati opciju odobalnih postrojenja. Na temelju ove analize zaključuje se da je elektroliza unutar turbine najprikladnije rješenje za proizvodnju vodika u moru.

U sljedećim potpoglavljima opisat će se sastavnice za proizvodnju vodika.

### 6.3.1. Elektroliza

Elektroliza je elektrokemijski proces koji razdvaja molekule na jednostavnije komponente djelovanjem električne struje. Molekula vode ( $H_2O$ ) razlaže se na komponente vodika ( $H_2$ ) i kisika ( $O_2$ ). Osnovni princip elektrolize vode prilično je jednostavan. Izvodi se korištenjem komercijalno dostupnog uređaja koji se zove elektrolizer. Elektrolizer se napaja obnovljivom strujom ili električnom energijom preko dvije elektrode, katoda i anoda, koje su u kontaktu s elektrolitom odnosno radnim medijem. Voda je radni medij „zelene elektrolize“.

Elektroliza je najvažnija komponenta jedinice za proizvodnju vodika. Elektrolizer pridonosi velikom dijelu troškova jedinice za proizvodnju vodika. Cilj elektrolizera je maksimizirati proizvodnju vodika iz raspoložive energije. Trenutno postoje tri metode elektrolize, metoda alkalne elektrolize (AEL), elektroliza krutog oksida (SOE) i na kraju metoda polimerne elektrolitičke membrane (PEM) za proizvodnju vodika.

Što se tiče sustava elektrolize za proizvodnju vodika, dvije tehnologije se uglavnom koriste u komercijalnim projektima zbog svoje zrelosti: alkalne i protonske izmjenjivačke membrane (PEM) elektrolizeri [8]. Trenutno su alkalni elektrolizatori zreliji i jeftiniji od PEM elektrolizera, imaju niži CAPEX [6]. Osim niže cijene, alkalni elektrolizatori također imaju veću učinkovitost i duži životni vijek u usporedbi s PEM-om. S druge strane, PEM elektrolizeri imaju prednost manjeg prostornog zauzimanja u usporedbi s alkalnim, kao i bržeg odgovora na oscilacije uzrokovane proizvodnjom obnovljive energije.

Međutim, za pretpostavku in turbine elektrolize, odgovor na oscilacije ne predstavlja problem, zbog inercije mase rotora. Također, smještajni kapacitet elektrolizera ne utječe na odabir tehnologije, zbog odgovarajućeg prostora unutar tornja vjetroturbine. Promjer tornja vjetroturbine od 10 MW je oko 10 m, što je dovoljno za smještaj jedinice elektrolizera unutar turbine (Gaertner et al., 2020.). Stoga se za ovu primjenu predlaže tehnologija alkalnog elektrolizera, koja je zbog svojih gore navedenih prednosti troškovno učinkovito i zrelosti tehnologije.

### 6.3.2. Destilacijska stanica

Voda koja ulazi u elektrolizer za elektrolizu mora biti demineralizirana. Opskrbna voda za sustav elektrolizatora mora biti one kvalitete vode iz slavine. U odobalnom okruženju za postizanje razine čistoće prije unosa u elektrolizer potrebno je instalirati sustav za desalinizaciju. Postoje dvije razvijene metode desalinizacije u obliku toplinske desalinizacije i desalinizacije reverznom osmozom.

S pojavom uređaja za povrat energije, reverzna osmoza slane vode (eng. *SWRO Sea Water Reverse Osmosis*) postala je konkurentna u odnosu na toplinsku desalinizaciju. Reverzna osmoza je kompaktno rješenje koje pokreće isključivo električna energija i dovoljno dobro radi kada je integrirana s PEM elektrolizerim. Proces SWRO započinje s filtracijom ulazne vode kako bi se uklonile sve velike čestice, nakon čega se morska voda na visokim razinama krutine (eng. *TDS Total Dissolved Solids*) propušta kroz polupropusnu membranu pomoću visokotlačne pumpe. U ovoj točki uređaj za povrat energije (eng. *ERD- energy recovery device*) preuzima tlak pohranjen u koncentratu i ta se energija tlaka koristi za potiskivanje morske vode kroz membranu zajedno s visokotlačnom pumpom, što dovodi do poboljšanja energetske učinkovitosti uređaja

Potrošnja energije po metru kubnom proizvedene vode je oko 2-4 kWh. Ova potrošnja energije varira sa zahtjevom za čistom vodom za elektrolizator u određenom trenutku. Membrana s jednim prolazom dovoljna je za stvaranje kvalitete vode iz slavine koja je potrebna za unos u sustav elektrolizatora.

Iz ekološke perspektive važno je osigurati da se proizvedena slana voda obradi prije ispuštanja, no ispuštanje slane vode u decentraliziranom sustavu ne predstavlja problem. Stoga je manja vjerojatnost nanošenja štete okolišu u globalu.

### 6.3.3. Kompresorska stanica

Uloga kompresora je podizanje razine tlaka vodika u odnosu na postojeće razine izlaznog tlaka iz elektrolizatora. Opseg kompresije ovisi o vrsti vjetroelektrane i zahtjevima sustava. Na primjer, potreba za kompresijom u konfiguraciji cjevovoda ovisi o dopuštenim tlakovima u cjevovodu i potrebnim masama protoka koje je potrebno održavati. Za udaljenosti veće od 100 km potrebne su kompresijske stanice za podizanje tlaka kako bi se održao maseni protok.

Najčešći tip kompresora koji se danas koristi su mehanički kompresori. Princip rada mehaničkih kompresora je pretvaranje mehaničke energije izravno u energiju plina. Postoje različiti tipovi mehaničkih kompresora, no posebno za kompresiju vodika najčešće se koriste dinamički kompresori ili kompresori s pozitivnim pomakom.

Plinske platforme koje se promatraju za prenamjenu međusobno su povezane cjevovodima do kompresijske stanice Ivana K. Od Ivana K već postoji glavni plinski vod do kopna koji nije duži od 100 km. Ali za mogućnost potrebe za kompresijskom stanicom spomenuta platforma bi mogla biti prenamijenjena u kompresijsku stanicu.

## 7. ANALIZA SLUČAJA

Ovo poglavlje prikazuje rezultate analiza za oba slučaja. Odobalna vjetroelektrana A bit će prikazana s analizom brzine vjetra i proizvodnje električne energije. Hibridna odobalna vjetroelektrana B bit će prikazana s analizom brzine vjetra, proizvodnje električne energije snagom vjetra, proizvodnje vodika elektrolizom.

Navedene analize su provedene kako bi se dobio pregled energetskeg potencijala odabranih područja. Rezultati su prikazani u dvije rezolucije: mjesečnoj i godišnjoj, kako bi sezonski i godišnji proizvodni karakter bio što vjernije prikazan.

### 7.1. Analiza potencijala vjetroparka A

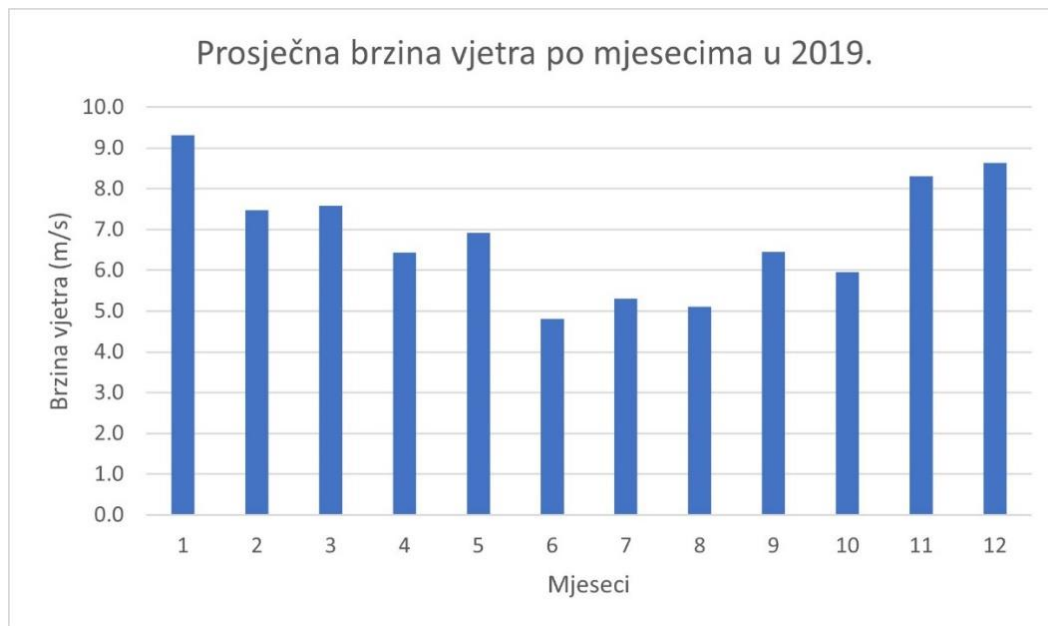
#### 7.1.1. Analiza brzine vjetra

Uobičajena praksa kod mjerenja vjetra na lokacijama buduće vjetroelektrane je mjerenje podataka na najmanje tri različite visine, od koji bi jedna trebala biti 2/3 predviđene visine rotora vjetroatregata. Najniža visina na koju se postavljaju anemometri je 40 metara, dok se na 10 metara postavljaju samo uređaji za mjerenje temperature, tlaka i vlažnosti zraka. [10]

Pri izradi ove analize vremenski podatci su preuzeti s NSRDB: National Solar Radiation Database. NSRDB je zbirka satnih i polusatnih vrijednosti tri najčešća mjerenja sunčevog zračenja i meteoroloških podataka. Tri mjerenja sunčevog zračenja su globalno horizontalno, izravno normalno i difuzno horizontalno zračenje. Trenutačni NSRDB modeliran je pomoću višekanalnih mjerenja geostacionarnih satelita. Za točan prikaz regionalne klime sunčevog zračenja korišten je dovoljan broj lokacija te vremenskih i prostornih mjerila. [13]

Brzine vjetra zabilježene na visini od 10 m skalirane se na visinu rotora vjetroturbine 110 m, pomoću formule za skaliranje opisane u odjeljku 3.3. u programu Excel. Osim podataka o brzini vjetra uzete su u obzir vrijednosti tlaka, smjera vjetra i temperature. Podatci korišteni u analizi su iz 2019. godine.

Podatci s lokacije platforma Annamaria A (44°12'53.6"N 13°13'27.1"E) promatrani su za ovaj slučaj. Iznosi srednjih mjesečnih brzina vjetra na lokaciji, korigiranih u odnosu na visinu rotora, prikazani su na slici 7.1:



*Slika 7.1. Iznosi prosječnih mjesečnih brzina vjetra na lokaciji*

Najniža prosječna vrijednost brzine vjetra od 4,8 m/s zabilježena je u lipnju, dok je najviša vrijednost iznosila 9,3 m/s u siječnju 2019. godine. Prosječna brzina tijekom cijele godine iznosi 6,6 m/s.

Najveća potrošnja električne energije ne poklapa sa sezonskim potrebama Istre. Na godišnjoj bazi najveće potrebe su u ljetnim mjesecima. Rezultati analize vjetra ukazuju da će na sjevernom Jadranu elektrana proizvoditi najviše električne energije u zimskim mjesecima, kada su potrebe manje u odnosu na ljetni period.

Prosječna brzina vjetra na lokaciji za visine glave rotora povoljna je za izgradnju elektrane zbog toga što prelazi prag od 6 m/s. Vrijednosti srednjih brzina nekoga područja ispod 6 m/s nisu najsigurnija opcija za investiciju. [40]

### 7.1.2. Analiza proizvodnje električne energije

Nakon obrade podataka o vjetru, u programu SAM (System Advisor Model) odabrana je vjetroturbina te je izrađeno predviđanje proizvodnje električne energije za lokaciju posebno elektrane. Prikazat će prosječna godišnja i mjesečna pretpostavljena proizvodnja za razdoblje od 1.siječnja do 31.prosinca 2019 godine.

SAM je tehno-ekonomski računalni model dizajniran da olakša donošenje odluka ljudima uključenim u industriju obnovljive energije. Nacionalni laboratorij za obnovljivu energiju (NREL) Ministarstva energetike SAD-a razvio je softwear. Pri modeliranju projekta obnovljive energije u SAM-u, odabire se model izvedbe i financijski model koji će predstavljati projekt. Dodjeljivanje vrijednosti ulaznih varijabli ovisi o korisniku i njegovim istraživanjima: informacije o lokaciji

projekta, vrsti opreme u sustavu, troškovima instaliranja i rada sustav, te financijske i poticajne pretpostavke, na čijem temelju program obrađuje podatke i daje konačne rezultate.

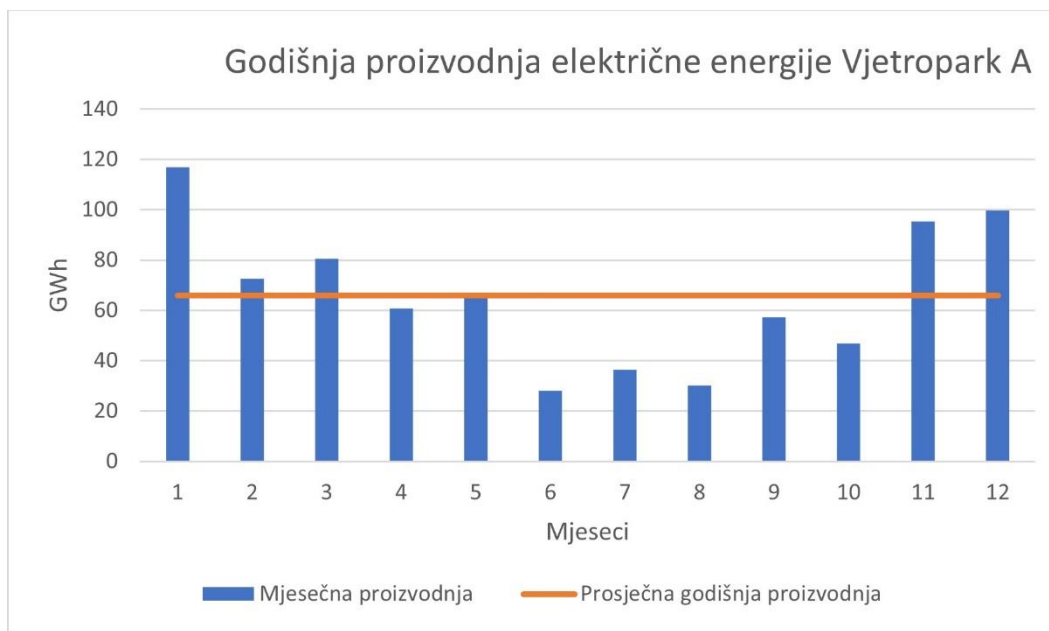
Obzirom da brzine vjetra na lokaciji su u rangu nižih vrijednosti za rad vjetroturbine potrebno je odabrati turbinu koja će biti pogodna za tu lokaciju. Tip vjetroturbine odabire se iz kataloga proizvođača. Vjetroturbina koju će se koristiti je istraživačka turbina od 10 MW, detaljnije opisana u poglavlju 6.2.1.

Obilježja „IEA Offshore RWT 10 MW“ vjetroturbine:

- a) Snaga 10 MW
- b) Visina gondole 110 m
- c) Promjer rotora 198 m
- d) Raspon rada turbine od 4 m/s do 25 m/s
- e) Koeficijent snage ( $C_p$ ) je 0,49

Farma A sastoji se od 30 vjetroturbina instalirane ukupne snage 300 MW, raspodijeljene pojedinačne snage od 10 MW. Godišnja proizvodnja Vjetroparka A na odabranoj lokaciji iznosi 789.785 GWh, što je približno 0,789 TWh

Prosječna mjesečna proizvodnja el. energije i srednja vrijednost na godišnjoj bazi prikazane su na slici 7.2.



**Slika 7.2.** Prosječna mjesečna proizvodnja el. energije Vjetroparka A



U prosječnom mjesecu vjetroelektrana snage 300 MW proizvede 65.815 GWh električne energije. Najmanja proizvodnja dogodila se je u lipnju u iznosu od 27.975 GWh, a najveća proizvodnja u mjesecu siječnju iznosila je 116.830 GWh.

**Tablica 7.1** Mjesečna proizvodnja energije iz odobalne vjetroelektrane A za 2019. godinu

Godišnja proizvodnja električne energije Vjetroparka A	
Mjesec	GWh
Siječanj	116.830
Veljača	72.688
Ožujak	80.409
Travanj	60.659
Svibanj	65.552
Lipanj	27.975
Srpanj	36.461
Kolovoz	30.086
Rujan	57.385
Listopad	46.734
Studeni	95.210
Prosinac	99.797
Ukupno	789.785

Velike razlike u maksimalnoj i minimalnoj proizvedenoj količini el. energije na mjesečnoj bazi uzrokovane su sezonskim vjetrovima. Zbog nedovoljne količina proizvedene električne energije u ljetnim mjesecima Istri će i dalje biti potrebna energija iz elektroenergetske mreže. S druge strane, viškovi proizvede električne energije u zimskom periodu mogu se ukomponirati u elektroenergetski sustav Hrvatske.

### 7.1.3. Ekonomska analiza vjetroparka A

U Republici Hrvatskoj do danas nije izgrađena niti jedna odobalna vjetroelektrana, stoga je teško precizno izraditi ekonomsku analizu. Odabrana vjetroelektrana s turbina smještenim na plutajućim temeljima je relativno mlada tehnologija. Plutajuće vjetroelektrane još uvijek su u fazama razvoja i u samim počecima komercijalnih uporaba. Europa zaključno s početkom 2023. godine ima četiri mala vjetroparka s ukupno instaliranih 176 MW. Predviđeno je da će do 2030. godine broj se povećati na 3-4 GW instalirane snage[18]. Za plutajuću vjetroturbinu te instalacija i montaža zauzimaju oko 22,1% odnosno 11,1% ukupnih troškova, pri čemu su temelji i potkonstrukcija najskuplje komponente s 36,2%. [34]

Smatrajući da potencijalna vjetroelektrana neće biti u planu izgradnje Republike Hrvatske sljedećih 10 godina, potrebne ekonomske podatke za izračun ovoga rada uzela sam iz predviđenih analiza za 2035. godinu kada bi se troškovi trebali smanjiti. Izračun je napravljen u skladu NRElovim izvješćem „ Sustavni okvir za projekciju budućih troškova energije vjetra na moru“ [23].

U izvješću autori predstavljaju model prognoziranja smanjenja troškova energije vjetroelektrana na moru (FORCE- Forecasting Offshore Wind Reductions in Cost of Energy), koji koristi za procjenu smanjenja troškova tehnologija vjetroelektrana s fiksnim dnom i plutajućih vjetroelektrana na moru do 2035. Model FORCE temelji se na empirijski izvedenoj stopi učenja za kapitalne izdatke projekta u kombinaciji s pretpostavkama o očekivanoj globalnoj implementaciji. Korišteni podatci temelje se na povijesnim podacima o troškovima projekta.

Predviđanja za plutajuće vjetroelektrane ostvaruju cjenovni pad u odnosu na projekte demonstracijskih razmjera. Prosječni kapitalni troškovi iz 2021. godine iznose 9.924 USD/kW. Predviđa se da će do 2035. godine prosječni kapitalni troškovi komercijalnih izvedbi biti 3.263 USD/kW, što je smanjene za 67% od trenutanih cijena. Smanjenje troškova od dvije trećine do 2035. potaknuto je predviđanjem rasta instaliranih kapaciteta, s manje od 100 MW u 2021. na više od 31 000 MW do 2035. [23]

Smanjenja operativnih troškova (OPEX) i povećanje učinkovitosti očekuju se zbog vjerojatnosti povećanja efikasnosti vjetroturbina, poboljšanja opskrbnih lanca i inovacija tehnologije, materijala. Cijene operativnog održavanja nisu unificirane zato što osciliraju s obzirom na područje izgradnje elektrane kao što su: udaljenost od obale, veličina valova, brzine vjetra, itd. Predviđa se da će prosječna vrijednost troškova održavanja iznositi 67,8 USD/kW na godišnjoj razini.

Konačno, prosječni LCOE plutajućeg vjetra kretat će se od 207,0 USD/MWh 2021. do 63,9 USD/MWh 2035. S obzirom, da prosječne vrijednosti LCOEa variraju u odnosu na tržište Europe i Sjeverne Amerike podatke treba uzeti s oprezom. Područje Europe ima razvijeniji monopol vjetroelektrana na moru, a samim tim i manje vrijednosti LCOEa. Prema [23], LCOE za europsko tržište kretat će se od 51,4 \$/MWh-73,0 \$/MWh, središnje vrijednosti 59,7 \$/MWh.

Općenito, LCOE (eng. levelized cost of energy) ili nivelirani troškovi energije je prihvaćeni model izračuna cijene proizvodnje električne energije određenom tehnologijom i energentom. Riječ je o metodologiji izračuna troška proizvedenog megavatsata energije u jedinici novca za cjelokupni životni vijek vjetroelektrane. LCOE sadrži troškove:

- Kapitalni trošak izgradnje vjetroelektrane (eng. CAPEX),
- Toškovi pogona i održavanja vjetroelektrane (eng. OPEX),
- Toškove financiranja,
- Pretpostavljeni koeficijent korištenja vjetroelektrane koji odgovara omjeru očekivanog
- Broj sati rada elektrane u godini

Izradu ekonomske analize za vjetropark A utemeljeni su samo na kapitalnim i operativnim troškovima elektrane. Iz razloga što je ekonomska analiza samo uvid u isplativost promatranog slučaja, a ne glavni cilj ovoga rada.

Kapitalni troškovi glavni su rashodi u procesu izgradnje elektrane u odnosu na instaliranu snagu postrojenja. U kapitalne troškove uključena je cijena inženjeringa, nabave i izgradnje. Također su uključeni i troškovi spajanja postrojenja s infrastrukturom.

Operativni trošak pogona i održavanje je tekući trošak za vođenje sustava elektrane.

Vrijednosti troškova preuzeti su iz [23] te preračunati iz dolara u eure.

**Tablica 7.2. Ekonomska analiza vjetroparka A**

Vjetroturbina	IEA RWT 10 MW
Snaga odobalne vjetroelektrane	300 MW
Pretpostavljena godišnja proizvodnja	789 785 MWh
Radni vijek elektrane	25 godina
CAPEX	871.2 mil EUR
OPEX	18.102 mil EUR godišnje
Kupoprodajna cijena	70 EUR/MWh
Povrat ulaganja	24 godine

U tablici 7.2. prikaza je ekonomska analiza vjetroparka A ukupne snage 300 MW. Kapitalni troškovi elektrane su preuzeti iznose 871,2 milijuna €, operativni troškovi godišnje iznose 18,102 milijuna €. Godišnja proizvodnja električne energije je 789 785 MWh. Predviđeni radni vijek elektrane je 25 godina, iako postoji mogućnost produženja radnoga vijeka za još koju godinu ako elektrana bude u dobro stanju.

Proizvedenu električnu energiju potrebno je prodavati po minimalnoj cijeni od 70 €/MWh da bi investicija bila isplaćena. S prodajom proizvedene električne energije po navedenoj cijeni investicija će se isplatiti za 24 godine.

Prosječna mjesečna cijena električne energije iz 2022. godine za „Dan unaprijed“ preuzeta sa [30] za Hrvatsko tržište iznosila je 271.68 €/MWh, dok je za 2021. godinu iznosila 106.52 €/MWh. Prikazane cijene potječu iz ENTSO. Visoka cijena električne energije u 2022. godini uzrokovana je iznimno nestabilnim stanjem u svijetu uslijed trenutnog rata u Ukrajini i globalne ekonomske krize uzrokovane pandemijom COVIDA. Posljedice trenutnog rata utječu uvelike na cijene energenata zbog zaustavljene dopreme prirodnog plina iz Rusije. Kada bi se ovakav trend cijena zadržao tijekom cijelog radnog vijeka elektrane, ona bi isplatila puno prije nego 24 godine. Iako, ne realno je za očekivati da će se ovako visoke cijene zadržati na tržištu duži niz godina.

**Tablica 7.3. Ekonomska analiza isplativosti vjetroparka A**

GODINE	CAPEX (mil EUR/MW)	OPEX (mil EUR/MW)	Proizvodnja električne energije (MWh)	PRIHOD (mil EUR)
1	871.2	18.10	789785	55.284
2	0	18.10	789785	55.284
3	0	18.10	789785	55.284
4	0	18.10	789785	55.284
5	0	18.10	789785	55.284
6	0	18.10	789785	55.284
7	0	18.10	789785	55.284
8	0	18.10	789785	55.284
9	0	18.10	789785	55.284
10	0	18.10	789785	55.284
11	0	18.10	789785	55.284
12	0	18.10	789785	55.284
13	0	18.10	789785	55.284
14	0	18.10	789785	55.284
15	0	18.10	789785	55.284
16	0	18.10	789785	55.284
17	0	18.10	789785	55.284
18	0	18.10	789785	55.284
19	0	18.10	789785	55.284
20	0	18.10	789785	55.284
21	0	18.10	789785	55.284
22	0	18.10	789785	55.284
23	0	18.10	789785	55.284
24	0	18.10	789785	55.284
25	0	18.10	789785	55.284
	871.2	452.55	19744625	1382.1
Ukupno ulaganje		1323.75 mil EUR		
Ukupna prihod od prodaje		1382.1 mil EUR		
Povrat investicije		24 godine		

U tablici 7.3. prikazana je ekonomska analiza isplativosti vjetroparka B. Isplativost elektrane dogodit će se tek u posljednjoj godini rada.

## 7.2. Analiza potencijala Vjetroparka B

### 7.2.1. Analiza brzine vjetra

Vjetropark B nalazi se na području postojećih plinskih polja sjeverni Jadran i Marica. Udaljenost između platformi Annamaria A i Ivana A je 25 km, a udaljenost između platforme Marica i Annamaria A je 60 km [32]. Stoga, brzine vjetra bit će promatrane s obzirom na blizinu s pojedinom plinskom platformom. Pri analizi brzine vjetra vjetroparka B uzete su u obzir tri lokacije te su platforme grupirane u tri skupine:

- a) Skupinu Ivana A sačinjavaju 9 platformi smještenih u blizini platforme Ivana A, a to su: sve platforme plinskog polja Ivana, platforme Vesna i Ana
- b) Skupinu Annamaria A sačinjava 7 platformi smješteni u blizini platforme Annamaria A, a to su: sve platforme plinskog polja Ida, sve platforme plinskog polja Ika, platforma Irina
- c) Skupinu Marica sačinjavaju dvije plinske platforme Marica i Katarina koje su u eksploatacijskom polju Marica

**Tablica 7.4.** Prikaz srednjih brzina vjetra za mjerna područja

	Polje Ivana A	Polje Annamaria A	Polje Marica
Srednja brzina vjetra (m/s)	6.593	6.612	6.955

Razlike u brzinama vjetra su minimalne. Najveća prosječna brzina vjetra na lokaciji je u blizini platforme Marica s prosječnom brzinom od 7 m/s, dok podjednaku vrijednost prosječne godišnje brzine vjetra imaju područja preostale dvije lokacije s 6,6 m/s. Za područje Annamaria A, prikazan je raspored mjesečnih vrijednosti brzina vjetra na grafu 6. S obzirom na to da su vrijednosti brzina gotovo jednake za preostale dvije lokacije, neću posebno prikazati njihove grafove.

Odabrane lokacije zadovoljavaju uvijete brzine vjetra za postavljanje vjetroturbina.

### 7.2.2. Analiza proizvodnje i skladištenja vodika

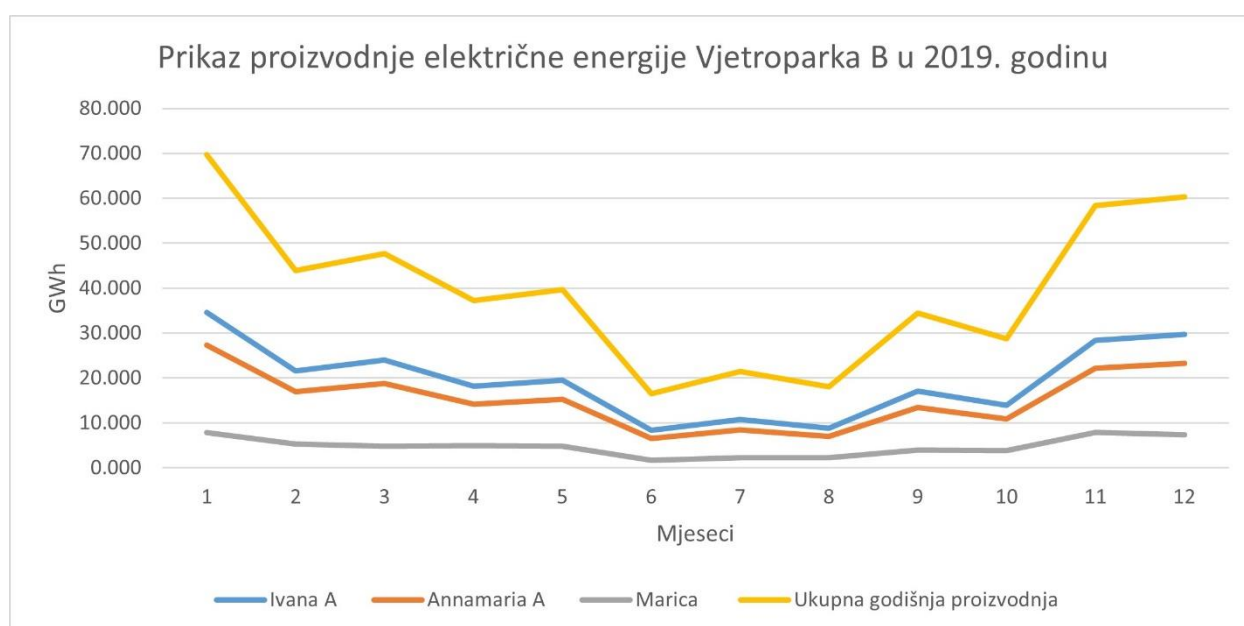
Platforme Ivana A, Annamaria A i Katarina locirane na sjevernoj, južnoj i središnjoj poziciji svih postojećih proizvodnih postrojenja na Jadranu. Podjelom prema smještaju dobiju se tri skupine s različitim vrijednostima vjetra izrađene su analize i mogućnosti proizvodnje električne.

Ukupno je uzeto u obzir 18 platformi za prenamjenu u vjetroturbinu. Ukupna instalirana snaga iznosit će 180 MW, što je prikazano u tablici:

**Tablica 7.5. Prikaz Farme B kroz brojke**

	Broj platformi	Snaga [MW]	Visina gondole [m]	Srednja brzina vjetra [m/s]	Proizvedena energija [GWh]	Faktor kapaciteta [%]
Polje Ivana A	9	90	110	6.593	234.92	29.79%
Polje Annamaria A	7	70	110	6.612	184.28	30.57%
Polje Marica	2	20	110	6.955	57.145	32.61%
Ukupno	18	180		6.720	476.34	30.99%

U tablici 7.5. prikazana je ukupna godišnja proizvodnja električne energije koja bi bila ostvarena prenamjenom 18 postojećih platformi na Jadranu u odobalnu vjetroelektranu. Godišnja pretpostavljena proizvedena električna energija iznosila bi 476,34 GWh. Faktor kapaciteta za sva tri polja iznosi oko 30% što znači da je odabir lokacija povoljan za vjetroelektranu.



**Slika 7.3. Prikaz proizvodnje električne energije iz prenamijenjenih platformi na Jadranu za 2019. godinu**

Najmanja proizvodnja događa se u ljetnim mjesecima, u lipnju zabilježen je najmanji iznos od 16.555 GWh. Najveća proizvodnja energija dogodila se je u siječnju s 69.709 GWh. Pojedine mjesečne proizvodnje prikazane su tablici 7.6.:

**Tablica 7.6.** Mjesečna proizvodnja energije iz odobalne vjetroelektrane B za 2019. godinu

Godišnja proizvodnja električne energije Vjetroparka B	
Mjesec	GWh
Siječanj	69.709
Veljača	43.873
Ožujak	47.647
Travanj	37.280
Svibanj	39.685
Lipanj	16.555
Srpanj	21.490
Kolovoz	18.109
Rujan	34.471
Listopad	28.734
Studen	58.420
Prosinac	60.368
Ukupno	476.341

Vjetroelektrane vjetroparka B unutar pojedine vjetroturbine sadrže jedinicu elektrolize za pretvorbu električne energije u vodik. Proces proizvodnje vodika elektrolizom vode predstavlja jedno od mogućih rješenja problema vezanih za skladištenje električne energije. Vjetropark B zamišljen je s ciljem pretvorbe sve dobivene električnu energiju u vodik u svrhu skladištenja vodika.

U savjetovanju s mentorom dobila sam uvid o količinama proizvodnog vodika iz obnovljivih izvora energije. Prema trenutnim mogućnostima tehnologije, na godišnjoj razini, elektrana od 60 MW s otprilike 2000 h sata rada proizvede 25 000 t zelenog vodika. Što bi za slučaj vjetroparka B snage 180 MW značilo da je godišnja proizvodnja vodika 75 000 t zelenog vodika. [7]

Vodik proizvedene tokom godine skladištio bi se, te upotrebljavao u mjesecima kada je potreba za električnom energijom veća. Područje promatranih platformi praktični su za skladištenje vodika zbog činjenice što se nalaze na plinskim poljima koji su pri kraju rada. Kada dođe kraj proizvodnje prirodnog plina stvorit će se mogućnost skladištenja proizvedenog vodika u geološkim ležištima u kojima se prije nalazio plin. Druge mogućnost skladištenja vezani su za kopno. Transportirani vodik u plinovitom stanju na kopnu može se skladištiti geološkim skladištima poput napuštenih rudnika i solnih špilja. Nadalje, jedan od načina skladištenja je u spremnicima za tekući vodik. Konačno, vodik se može skladištiti u baterijama.

U slučaju viškova proizvedenog vodika, on se može distribuirati na tržište Italije putem već postojeće plinske infrastrukture.

### 7.2.3. Prednosti proizvodnje vodika unutar turbine

Primjer prenamjene odobalnog naftnog ili plinskog postrojenja u vjetroelektranu ne postoji nigdje u svijetu, što samo po sebi nameće niz nepoznanica. Dodatno, unatoč rastućem interesu za proizvodnju vodika, literatura koja se odnosi na elektrolizu na moru koja koristi električnu energiju proizvedenu iz energije vjetra na moru je vrlo ograničena. Uslijed nedovoljno informacija o ekonomskim čimbenicima novih tehnologija, u ovom poglavlju ću se dotaći prednosti izrade istih.

Prema studiji North sea energy pretpostavlja se da će sva energija uhvaćena vjetroturbinom biti na mjestu pretvorena unutar turbine procesom elektrolize, tako da se vodik može transportirati do kompresijske platforme kako bi se transportirao dalje na obalu nakon kompresije. Prednost postupka elektrolize u turbini u odnosu na elektrolizu na kopnu je gubitak AC/DC pretvorbe što pridonosi novčanim benefitima. Još jedna ušteda koja proizlazi iz postavljanja elektrolizera u vjetroturbinu odnosi se na razliku između troškova transporta vodika do obale. S obzirom na razlike u cijeni između transporta vodika i energije na velike udaljenosti, važno je napomenuti da ne samo da prosječni transport cjevovodom zahtijeva mnogo manje CAPEX i OPEX od usporedivog transporta energije kablovima, već i da su gubici energije u transportu vodika zanemarivi ako u usporedbi s prosječnim gubicima prijenosa električne mreže (AC/DC, pretvorba napona i toplinski gubici). Očito, razlika u cijeni između električne i prijenosa energije cjevovodima postaje još veća ako se mogu koristiti postojeći cjevovodi. Također, korist od postojećih plinska mreža za transport energije pučinskog vjetra do njenog odredišta ne bi bila samo ta da je transport plinova po jedinici energije znatno jeftiniji od transporta energije na istu udaljenost, već i da se plinovi mogu mnogo lakše i jeftinije skladištiti u velikim količinama nego energija. Pretvorba u turbinama u konačnici dovodi do veće proizvodnje vodika jednostavno zato što su spriječeni gubici snage transporta i pretvorbe, a time i manja proizvodnja vodika. Tehnologija elektrolize u prosjeku ima gubitke energije u pretvorbi u reda veličine 25%, što je relativno mala brojka u usporedbi s raznim drugim tehnologijama pretvorbe. [31]

Osim tehnologije odobalne elektrolize i korištenja postojećih plinskih infrastruktura na cjenovni benefit još utječe dekomisioniranje, odnosno novčana vrijednost odgode dekomisije (razgradnje) platforme. Dekomisije postojećih plinskih platformi predstavljaju veliki trošak (u milijunima) kao i veliki ugljični otisak, dok prenamjenom istih može se financijski profitirati te smanjiti zagađenje.

Trenutna istraživanja odobalne elektrolize prikazuju različite iznose troška proizvodnje zelenog vodika. Prema istraživanju [29] izvršena je analiza troškova za proizvodnju vodika na odobalnoj platformi u Norveškoj, putem elektrolize koju pokreće vjetroelektrana od 100 MW, što je rezultiralo troškom proizvodnje od 5,2 €/kg. Dok prema istraživanju [31], izračunati troškovi



vodik su u rasponu od 2,50–3,50 €/kg za postojeće platforme i plinske mreže te potpunu pretvorbu 100% snage vjetroelektrane na moru. Predviđa se, da će s komercijalizacijom ovakvih projekata smanjiti iznos troškova do 1-1,5 €/kg.

### 7.3. Analiza dobivenih podataka

Za analize slučaja Istarske županije dobiveni su okvirni podatci. Istra ima problem s preopterećenjem mreže u ljetnim periodima zbog prevelikog konzuma električne energije. U predstojećim godinama potražnja će sezati do vrijednosti od 500 MW. Analiza je napravljena u skladu ograničenja prijenosne mreže koja ne može izdržati veća opterećenja od 300 MW snage.

Vjetropark A sastoji se od ukupno 300 MW instalirane snage koja će na godišnjoj razini proizvoditi 789.785 GWh. Proizvodnja električne energije pokazuje sezonski karakter. U ljetnim periodima proizvedene su najmanje količine električne energije uslijed slabije snage i raspoloživosti vjetra, dok u zimskim mjesecima bilježe se značajnije količine. Sezonski karakter vjetra i potrebe Istre u ljetnim mjesecima ne poklapaju se. Što znači da su potrebni dodatni izvori energije kako bi se pokrile potrebe. Kao dodatni vektor za pokrivanja potrebe uzeta je u obzir proizvodnja zelenog vodika iz vjetroparka B. Proizvedeni vodik potrebno je skladištiti te po potrebi sustava pretvarati u električnu energiju. Za slučaj zimskog perioda i značajnijih proizvodnja električne energija ona je povoljna za elektroenergetski sustav hrvatske iz razloga što može pokrivati potrebe sustava.

Ekonomskom analizom vjetroparka A utvrđena je isplativost elektrane u zadnjoj godini predviđenog radnog vijeka, uz uvjet da je minimalna otkupna cijena 70 \$/MWh. Dok za vjetropark B nije izvedena detaljna financijska analiza iz razloga što su tehnologije vezane uz vjetropark još u fazama istraživanja.

Zaključno, proizvodnja električne energije iz OIE mora značajna je na razini potreba elektroenergetskog sustava na razini cijele godine, dok je za potrebe Istre u ljetnim mjesecima ne povoljna. Rješenje problema Istre za potrebnom električnom energijom u ljetnim mjesecima moglo bi biti u postavljanju solarne elektrane. Solarna elektrana mogla bi nadopunjavati potrebu za energijom kada nema vjetra za proizvodnju, dok bi vjetroelektrana nadopunjavala potrebu za električnom energijom kada nema dovoljno sunca.

Općenito, vjetroelektrana na godišnjoj razini pruža efikasno rješenje za potrebe elektroenergetskog sustava Hrvatske.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena je energija vjetra kroz svojstva vjetra, anatomiju vjetroturbine i njene implementacije u vjetroelektranu za analizu slučaja. Također predstavljena je mogućnost proizvodnje zelenog vodika elektrolizom kao dodatni vektor mogućnosti iskorištenja energije vjetra.

Analizirana je mogućnost prenamjene odobalnih plinske infrastrukture na poljima sjevernog Jadrana, u svrhu implementacije hibridnih vjetroelektrana. Implementacija hibridnog sustava proizlazi iz potrebe analiziranog slučaja Istarske županije. Istarska županija ima problem preopterećenja mreže uslijed velikog konzuma energije u ljetnim periodima zbog turističke sezone. Kao rješenje za slučaj analizirana je hibridna vjetroelektrane.

Vjetroelektrana predstavljena je kroz vjetropark A i B. Vjetropark A sastoji se od 30 plutajućih vjetroelektrana snage 300 MW i povezan je novom s obalom električnom mrežom. Vjetroparka B, snage 18 MW, zamišljen je kao prenamjena plinske infrastrukture u vjetroturbine s elektrolizom za proizvodnju zelenog vodika koji se prenosi postojećim plinovodom do obale. Na temelju obrađenih podataka dobile su se vrijednosti mjesečne proizvodnje električne energije. Dobiveni podatci ukazuju da analizirane vjetroelektrane ne mogu pokriti potrebe potražnje Istre u ljetnim mjesecima. Proizvedene količine energije u van sezonskim mjesecima mogu se implementirati u elektroenergetski sustav Hrvatske i tako zadovoljiti potrebu za električnom energijom proizvedenom iz OIE.

## 9. LITERATURA

- [1] OIE Hrvatska.: „Akcijski plan za obnovljive izvore energije na moru u Hrvatskoj“, s interneta, <https://oie.hr/studije/> , 10. svibnja 2023.
- [2] Karasalihović Sedlara,D.; Vulina, D.; Krajačićb, G.; Jukića, L.:“ Offshore gas production infrastructure reutilisation for blue energy production“, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.052>
- [3] Wind Europe.: „Wind energy in Europe 2022: Statistics and the outlook for 2023-2027“, 2022, s interneta, <https://windeurope.org> , 10. svibnja 2023.
- [4] Zelenko, I.: „Analiza uklanjanja odobalnih postrojenja na Jadranu u odnosu na prenamjenu u odobalnu vjetroelektranu“, diplomski rad, 2020.
- [5] Wind Europe.: „Wind energy in Europe- 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026“, 2022, s Interneta, <https://windeurope.org/> , 10. svibnja 2023.
- [6] International Renewable Energy Agency.: „Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition“, 2018, s Interneta, [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications) ,10. ožujak 2023.
- [7] Savjetovanje s mentorom prof. dr. sc Alfredo Višković
- [8] Vidas, L.; Castro, R.: „Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State of the Art Review with Focus on Green-Electrolysis“, 2021, <https://doi.org/10.3390/app112311363>
- [9] Slika preuzeta s Interneta, <https://www.nyserda.ny.gov/All-Programs/Offshore-Wind/About-OffshoreWind/Offshore-Wind-101> , 8. ožujak 2023.
- [10] Castro, I.: „Electricity Production from Renewables“, Springer, 2022
- [11] Schachner, J.: „Power connections for offshore wind farms“, diplomski rad, University of Leoben, Austria, 2004
- [12] Korompili, A.; Wu, Q.; Zhao, H.: „Review of VSC HVDC connection for offshore wind power integration“, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.064>
- [13] National Solar Radiation Database: <https://nsrdb.nrel.gov/> , s Interneta, 02. svibnja 2023.
- [14] Xu, D.; Zargari, Navid R.: „Overview of offshore wind farm configurations“, 2017, s Interneta, [https://www.researchgate.net/publication/320951822\\_Overview\\_of\\_offshore\\_wind\\_farm\\_configurations](https://www.researchgate.net/publication/320951822_Overview_of_offshore_wind_farm_configurations) , 14. veljače 2023.

- [15] Energetski institut Hrvoje Požar; „Energija u hrvatskoj-godišnji energetski pregled 2021“,2022, s Interneta, <https://eihp.hr> , 01. svibanj 2023.
- [16] EHB: „European Hydrogen Backbone“, 2020, s Interneta, <https://gasforclimate2050.eu/> , 10. svibnja 2023.
- [17] ] EHB: „European Hydrogen Backbone“, 2022, s Interneta, <https://gasforclimate2050.eu/> , 10. svibnja 2023.
- [18] <https://windeurope.org/newsroom/news/floating-wind-is-making-great-strides/> , s Interneta, 15. ožujak. 2023
- [19] <https://windeurope.org/newsroom/news/first-greek-offshore-wind-law-seeks-2-gw-by-2030/> , s Interneta, 15. ožujak. 2023
- [20] <https://eniscuola.eni.com/en-IT/news/2022/the-first-turbine-of-italys-first-offshore-wind-farm-beleolico-has-been-installed.html> , s Interneta, 15. ožujak. 2023
- [21] <https://www.offshorewind.biz/2022/11/08/rosetti-marino-to-design-agnes-romagna-wind-turbines/> , s Interneta, 15. ožujak. 2023
- [22] HOPS: „Godišnji izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj“, 2022, s Interneta, <https://www.hops.hr> , 25. ožujak 2023.
- [23] Shields, M.; Beiter, P.; Nunemaker, J.: „A Systematic Framework for Projecting the Future Cost of Offshore Wind Energy“, 2022
- [24] Hadzic, N.; Kozmar, H.; Tomić, M.: „Offshore renewable energy in the Adriatic Sea with respect to the Croatian 2020 energy strategy“ 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.196>
- [25] Horvath, K.; Bajić, A.; Ivantek-Šahdan, S.: „Dynamical Downscaling of Wind Speed in Complex Terrain Prone To Bora-Type Flows“, JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY, 2011
- [26] Atlas vjetra, s Interneta, [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_hrvatska&param=k1\\_8](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1_8) , 10. ožujak. 2023
- [27] Omar, S.; Singlitico, A.; Proskovics, R.; McDonagh, S.; Desmond, C.; Murphy, J.: „Dedicated large-scale floating offshore wind to hydrogen: Assessing design variables in proposed typologies“,2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112310>

- [28] Sika preuzeta: <https://blogs.infosys.com/infosys-cobalt/digital-supply-chain/understanding-power-generation-from-wind-turbines-through-its-components-part-2-of-6.html> , s Interneta, 01. svibnja. 2023.
- [29] Meier, K.: “Hydrogen production with sea water electrolysis using Norwegian offshore wind energy potentials techno-economic assessment for an offshore-based hydrogen production approach with state-of-the-art technology “, 2014, <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0104-6>
- [30] Cjene električne energije dan unaprijed: <https://ember-climate.org/data-catalogue/european-wholesale-electricity-price-data/> , s Interneta, 08. svibanj 2023.
- [31] Jepma, C.; Kok, J.; Renz, M.; van Schot, M.; Wouters, K.: „North Sea Energy D 3 . 6 Towards sustainable energy production on the North Sea-Green hydrogen production and CO 2 storage : onshore or offshore ?“, As part of Topsector Energy : TKI Offshore Wind & TKI New Gas, (2018).
- [32] Nafta i plin: “ Nova tvrtka INA Jadran nastavlja aktivnosti eksploatacije plina na sjevernom Jadranu“, s Interneta, <https://hrcak.srce.hr/file/313950> , 15. travanj 2023.
- [33] Groenemans, H.; Saur, G.; Mittelsteadt, C.: „Techno-economic analysis of offshore wind PEM water electrolysis for H2 production“, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100828>
- [34] Barooni, M.; Ashuri, T.; Velioglu Sogut, D.;Wood, S.; Ghaderpour Taleghani, S.: “Floating OffshoreWind Turbines: Current Status and Future Prospects“, Energies 2023, 16, 2. <https://doi.org/10.3390/en16010002>
- [35] Wulf,C.; Linssen, J.; Zapp, P.: „Power-to-Gas—Concepts, Demonstration, and Prospects“ , 2018, Institute of Energy and Climate Research, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00009-9>
- [36] Materijali mentora
- [37] Torabi , F.: „Fundamentals of Wind Farm Aerodynamic Layout Design“, 2022, knjiga, <https://doi.org/10.1016/C2019-0-05110-2>
- [38] Nelson, V.; Starcher, K.: „Wind Energy Renewable Energy and the Environment- 3 th edition“, knjiga, 2018
- [39] Letcher, T.: „Wind Energy Engineering - A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines“, knjiga, 2017
- [40] Nikitas, G.; Bhattacharya, S.; Vimalan, N.: „Wind power: A sustainable way to climate change“, 2019, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00010-7>

- [41] Apata,O; Oyedokun, D.T.O. : „An overview of control techniques for wind turbine systems“, 2020, University of Cape Town, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00566>
- [42] International Energy Agency: „Wind Task 37 on Systems Engineering in Wind Energy WP2.1 Reference Wind Turbines“, s Interneta, <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73492.pdf> , 01. svibnja 2023.
- [43] <https://www.istra.hr/hr/business-information/istra-u-medijima/statistika/arhiva-2022> ,s Interneta, 02. svibanj 2023.
- [44] HOPS: „DESETOGODIŠNJI PLAN RAZVOJA PRIJENOSNE MREŽE 2022.-2031. S DETALJNOM RAZRADOM ZA POČETNO TROGODIŠNJE I JEDNOGODIŠNJE RAZDOBLJE“ , s Interneta, <https://www.hops.hr/ostale-publikacije> , 11. svibanj 2023.
- [45] Jepma, C.: „On the economics of offshore energy conversion: smart combinations“, 2017, Energy Delta Institute (EDI), s Interneta, <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5d0/263/410/5d026341016a2991247120.pdf> , 11. svibanj 2023.

## 10. SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada opisana je energija vjetra i konfiguracija odobalne vjetroelektrane. Dan je pregled stanja tržišta energije vjetra u Europe i Hrvatskoj. Objašnjena je pozadina mogućnosti pretvorbe energije vjetra kroz snagu i ograničenje vjetra te promjenom brzine vjetra s visinom. Odobalna vjetroelektrana opisana je kroz prikaz komponenta jedne vjetroturbine i njene električne konfiguracije povezivanja s obalom. U glavnom dijelu rada analiziran je slučaj problema nedostatka energije Istarske županije za vrijeme ljetnog perioda. Analiziran je koncept prenamjene postojeće plinske infrastrukture eksploatacijskog polja Sjeverni Jadran u sustav proizvodnje zelenog vodika uz pomoć elektrolize unutar vjetroturbine, kao dodatni vektor obnovljive energije. Modelirana je nova vjetroelektrana s plutajućim temeljima. Predstavljen je slučaj kroz tehnički potencijal hibridnog sustava analizom brzine vjetra, proizvodnje električne energije i vodika. Napravljen je ekonomski uvid u isplativosti ulaganja za predstavljeni slučaj. Rezultati analize su prikazani dijagramima i tablično.

Ključne riječi: vjetar, odobalna vjetroelektrana, prenamjena plinskih postrojenja, hibridni energetska sustav, obnovljivi izvori energije

## **ABSTRACT**

In the introductory part of the paper, wind energy and the configuration of the offshore wind farm are described. An overview of the state of the wind energy market in Europe and Croatia was given. The background of the possibility of converting wind energy through wind power, limitations due to Betz limit and the change of wind speed with height is explained. The offshore wind power plant is described through the presentation of the components of one wind turbine and its electrical configuration of connection to the coast. In the main part of the paper, the case of the problem of lack of energy in the Istrian County during the summer period is analyzed. The concept of repurposing the existing gas infrastructure of the North Adriatic exploitation field in the green hydroge production system with the help of electrolysis inside the wind turbine, as an additional vector of renewable energy, was analyzed. A new wind farm with floating foundations was modeled. The case is presented through the technical potential of the hybrid system by analyzing wind speed, electricity production and conductors. An economic insight into the profitability of the investment for the presented case was made. The results of the analysis are presented in diagrams and tables

Key words: wind, offshore wind farm, conversion of gas plants, hybrid energy system, renewable energy