Pregled trenutnog stanja i tehno-ekonomska analiza implementacije vjetroelektrana na moru

Lovrić, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:624653

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mateo Lovrić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Mateo Lovrić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Nevenu Duiću na ukazanom povjerenju i mogućnosti izrade završnog rada u njegovom mentorstvu te se isto tako zahvaljujem asistentu Antunu Pfeiferu, mag. ing. na pruženoj pomoći i korisnim savjetima tijekom pisanja rada. Zahvaljujem i projektu BLUE DEAL- Blue Energy Deployment Alliance financiranom kroz transnacionalni program europske suradnje za mediteransko područje, Interreg MED, na ustupljenim materijalima i podacima

Posebno bi se zahvalio svojoj obitelji, majci Ljubici, bratu Miroslavu te sestri Maji i njenom mužu Vladimiru na svim oblicima podrške koje su dolazile s njihove strane. Najveća zahvala pripada mojoj zaručnici Ivani koja me je tjerala naprijed kad god bih posustao. Hvala i svim mojim prijateljima koji su ovaj period moga života dodatno uljepšali, a posebno mom budućem kumu Bruni.

Ovaj rad posvećujem svom pokojnom ocu Ivici koji će mi u životu uvijek biti najveća inspiracija i koji me je naučio cijeniti prave životne vrijednosti te me uvijek poticao na rad na sebi i mom obrazovanju.

Mateo Lovrić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Mateo Lovrić Mat. br.: 0035200260

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Pregled trenutnog stanja i tehno-ekonomska analiza implementacije vjetroelektrana na moru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Overview of the current state and techno-economic analysis of offshore wind power plants implementation**

Opis zadatka:

Vjetroelektrane na moru postaju sve značajnija tehnologija za proizvodnju energije u Europi, ali i u svijetu. Cijena ove tehnologije pada, u skladu s cijenama drugih varijabilnih izvora energije te je za očekivati da će se ovaj trend nastaviti. Iskorištavanje energije vjetra na Sjevernom moru predstavlja priliku da Europska unija poveća udio proizvodnje iz obnovljivih izvora energije uz istodobno podupiranje gospodarskog rasta i stvaranje održivih radnih mjesta. Slične prilike potrebno je uočiti i na drugim geografskim područjima, uz prethodnu analizu potencijala vjetra. Razne komponente takvih postrojenja pružaju mogućnost lokalnoj industriji da ponudi svoje usluge u složenim projektima novih vjetroelektrana i specijalizira se za proizvodnju novih proizvoda, koji će biti konkurentni na svjetskom tržištu. Stoga je zadatak ovog rada analizirati trenutno stanje tehnologija u iskorištavanju energije vjetra na moru i provesti tehno-ekonomsku analizu sličnog projekta na Jadranskom moru, uzevši u obzir koje komponente ovakvo postrojenje ima i kakav je njihov utjecaj na troškove izvedbe cijelog projekta.
U sklopu ovoga rada će se:

1. Napraviti detaljan pregled korištenja vjetroelektrana na moru u Europskoj uniji i svijetu;
2. Opisati postupak procjene tehničkog potencijala energije vjetra za odabranu lokaciju;
3. Opisati komponente postrojenja vjetroelektrane na moru do priključka na mrežu i njihov utjecaj na ekonomsku isplativost projekta;
4. Napraviti tehno-ekonomsku analizu potencijalne vjetroelektrane na moru u Jadranskom moru.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Sadržaj

Sadržaj I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

SAŽETAK VI

SUMMARY VII

1.Uvod 1

1.1 Energija vjetra na moru danas 2

1.2 Tržište 3

2. Analiza vjetra-izbor lokacije 5

2.1 Metoda 5

2.2 Analiza potencijala vjetra 6

2.3 Kriteriji za izbor lokacije vjetroelektrane na moru 6

2.3.1 Teritorijalne vode 6

2.3.2 Vojna područja 6

2.3.3 Civilno zrakoplovstvo 7

2.3.4 Brodske rute 7

2.3.5 Cjevovodi i podzemni kabeli 7

2.3.6 Društvene prepreke 7

2.3.7 Zabrinutost za okoliš 8

2.3.8 Dubina mora 8

2.4 Analiza smještaja 8

3. Dijelovi vjetroelektrane na moru 9

3.1 Temelji vjetroelektrane na moru 11

3.1.1 Jednostupni temelji 12

3.1.2 Temelji s gravitacijskom betonskom bazom 13

3.1.3 Tronožni temelji 14

3.1.4 Rešetkasti temelji 15

3.1.5 Uvijeni temelji 16

3.1.6 Temelji s usisnom kantom 16
3.1.7 Plutajući temelji 17
3.2 Sklop toranj-gondola-lopatice 18
3.2.1 Toranj 19
3.2.2 Gondola 20
4.Utjecaj dijelova vjetroelektrane na moru na ukupnu cijenu investicije 21
4.1 Metoda proračuna 21
4.2 Istraživanje 22
4.2.1 Temelji 22
4.2.2 Turbina i električne instalacije 25
5.Tehno-ekonomska analiza potencijalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu 28
5.1 Vestas V164-8.0 29
5.2 Vestas V112 Offshore 29
5.3 Usporedba dviju promatranih turbina i investicijski troškovi potencijalne vjetroelektrane na moru 29
5.4 Analiza isplativosti vjetroelektrane na moru u sjevernom Jadranu 30
5.4.1 Ulazni podaci 31
5.4.2 Analiza osjetljivosti 35
ZAKLJUČAK 37
LITERATURA 38

POPIS SLIKA

Slika 1. Godišnji dodatak kapaciteta po regijama u razdoblju 2010-2018 2
Slika 2. Instalirani kapacitet i udio u opskrbi po državama 3
Slika 3. Tablica vodećih igrača na tržištu vjetroelektrana na moru, 2019. 3
Slika 4. Proizvođači vjetroturbina 4
Slika 5. Shema analize kvalitete vjetra 5
Slika 6. Rastav strukture vjetroelektrane na moru 10
Slika 7. Glavni dijelovi vjetroelektrane na moru 10
Slika 8. Ovisnost tipa temelja o dubini mora 12
Slika 9. Primjer jednostupnih temelja 13
Slika 10. Primjer temelja s gravitacijskom betonskom bazom 14
Slika 11. Primjer tronožnih temelja 14
Slika 12. Primjer rešetkastih temelja 15
Slika 13. Primjer uvijenih temelja 16
Slika 14. Primjer temelja s usisnom kantom 17
Slika 15. Primjeri plutajućih temelja 18
Slika 16.. Dijelovi sklopa toranj-gondola-lopatice 18
Slika 17. Trokut stabilnosti 19
Slika 18. Shematski prikaz metode proračuna investicijskih troškova 21
Slika 19. Investicijski troškovi kod jednostupnih temelja u ovisnosti o dubini vode 22
Slika 20. Grafički prikaz trenda opadanja cijene investicija vjetroelektrana na moru 23
Slika 21.Ovisnost investicijskih troškova o udaljenosti od obale kod temelja s gravitacijskom betonskom bazom i tronožnih temelja 23
Slika 22. Usporedba investicijskih troškova u ovisnosti o dubini vode za rešetkaste i plutajuće temelje 24
Slika 23. Ovisnost investicijskih troškova o dubini vode i raspon dubina na kojima se koriste različite vrste temelja vjetroelektrana na moru 24
Slika 24. Brzina vjetra na mjernoj točki u sjevernom Jadranu 28
Slika 25. Raspodjela troškova kod izgradnje vjetroelektrane na moru 28

Slika 26. Graf krivulja snage dviju uspoređivanih turbina 29
Slika 27. Graf satne proizvodnje dviju promatranih turbina u 2016. godini 30
Slika 28. Satna cijena el. energije 32
Slika 29. Ovisnost IRR-a o promjeni prihoda od el. energije 35
Slika 30. Ovisnost IRR-a o promjeni cijene investicije 36
Slika 31. Ovisnost IRR-a o vijeku trajanja postrojenja 36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Proizvođači temelja vjetroelektrana na moru 22
Tablica 2. Podatci za ukupne investicijske troškove za turbinu iz različitih izvora 25
Tablica 3. Investicijski troškovi za električne kablove 26
Tablica 4. Cijene dodatne električne opreme kod vjetroelektrana na moru 26
Tablica 5. Podaci o postrojenju 31
Tablica 6. Podaci o troškovima i prihodima 31
Tablica 7. Ekonomski podaci 32
Tablica 8. Financijski tok novca 33
Tablica 9. Ekonomski tok novca 34

SAŽETAK

Tehnologije vezane za vjetroelektrane na moru relativno su nova pojava na energetskom tržištu. Unutar ovog rada opisan je cjelokupan proces od odabira lokacija za potencijalnu vjetroelektranu na moru pa sve do procjene isplativosti takvoga projekta. U prvom dijelu ovoga rada opisano je trenutno stanje na tržištu ovih tehnologija, zatim je opisana metoda odabira lokacije vjetroelektrane na moru u kojoj su navedeni svi kriteriji koje vjetroelektrana na moru mora zadovoljiti. U trećem dijelu rada napravljena je podjela strukture vjetroelektrane na moru te su svi pojedini dijelovi detaljno opisani. Četvrti dio bavio se utjecajem gore nabrojanih dijelova vjetroelektrane na njezinu cijenu. U petom dijelu napravljena je tehno-ekonomska analiza potencijalne vjetroelektrane na moru u sjevernom Jadranu. Ovim radom prikazani su trendovi pada cijena ovih tehnologija te prikazane mogućnosti njihovog napretka.

Ključne riječi: Vjetroelektrana na moru, odabir lokacije, struktura, cijena, tehno-ekonomska analiza

SUMMARY

Technologies connected with offshore wind farms are relatively new on the energy market. In this thesis, the whole process from site choosing for the potential offshore wind farm to the cost-effectiveness of that kind of project has been described. In the first part of this thesis, the actual condition of the market for this kind of technology has been described, and in the second part, the whole process of location selection is described with all the conditions that need to be fulfilled. In the third part, the whole structure was decomposed and all components were described. The fourth part deals with the affection of the mentioned components of the structure to the cost of the offshore wind farm. In the last part techno-economic analysis is made for a potential wind farm in the north Adriatic. This thesis show trend for cost reduction for this kind of technology and also possibilities for developing it.

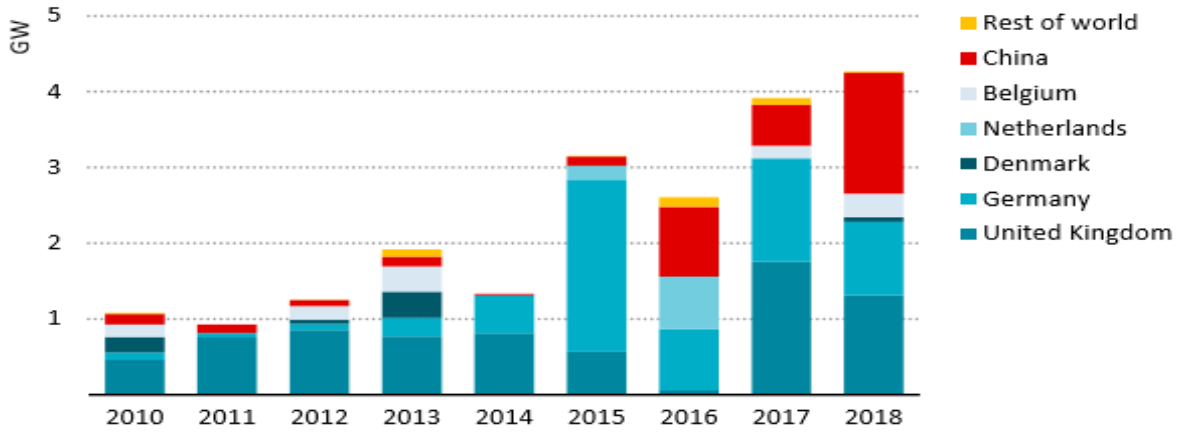
Key words: Offshore wind farm, location selection, structure, costs, techno-economic analysis

1.Uvod

Kako se izazovi pronalaska održive energije povećavaju, od velike važnosti postaje proširenje raspona dostupnih i pristupačnih (cijenom) niskougljičnih tehnologija. S početcima u Europi, vjetroelektrane na moru su najbolji primjer brzo sazrijevajuće tehnologije koja je spremna napraviti veliku razliku u budućem energetskom sustavu. Vjetroelektrane na moru su postrojenja za proizvodnju, prvenstveno, električne energije a koja se nalaze na morskim površinama. Najčešće se nalaze na dubinama manjim od 60 m i udaljene su manje od 60 km od obale. Danas vjetroelektrane na moru napajaju samo 0,3% svjetskih potreba za električnom energijom, međutim njihov potencijal je gotovo bezgraničan [1]. Kapacitet ovako proizvedene energije danas u svijetu je 23 GW od čega je 80 % u Europi [1]. Na globalnoj razini tržište vjetroelektrana na moru raste godišnje blizu 30 % u periodu 2010. do 2018. zahvaljujući brzim tehnološkim poboljšanjima [1]. U sljedećih 5 godina predviđen je završetak 150 novih projekata. U Europi primat u ovim tehnološkim ulaganjima imaju Ujedinjeno Kraljevstvo, Njemačka i Danska. Potencijal ovakve tehnologije ispitivan je na trenutnim klimatskim podacima brzine vjetra i njegove kvalitete. Došlo se do zaključka da instalacijom ovakvih tehnologija na pogodnim mjestima na moru dubine ispod 60 m i 60 km udaljenosti od obale može proizvesti 36 000 TWh električne energije godišnje, dok su svjetske potrebe za potrošnjom trenutno 23 000 TWh [1]. Dodatnim udaljavanjem od obale ta razlika postaje sve očitija, do 11 puta veća od svjetskih potreba do 2040. Nove tehnologije povećavaju kapacitet vjetroelektrana na moru. U nekim regijama se čak izjednačavaju s kapacitetom ugljena i nafte, iako vjetar nije dostupan uvijek. Novi projekti imaju faktor kapaciteta od 40-50 %. Cijene tehnologija za ovakve sustave su u padu i prognozira se da će do 2040. opasti i do 60 % [1]. Predviđen je godišnji rast od 13 % ovoga tržišta što u prenesenom značenju daje 20 GW dodatne snage godišnje do 2030 [1]. Suradnja između vjetroelektrana na moru i morskih postrojenja plina i nafte otvara nove tržišne mogućnosti, budući da je oko 40 % ulaganja u vjetroelektrane na moru u sinergiji s naftom i plinom. Istraživanja su pokazala da se u sljedeća dva desetljeća može izbjeći 5 do 7 milijardi tona emisija CO_2 pri tome smanjujući zagađenje zraka te osiguravajući energetsku sigurnost smanjenjem ovisnosti o ubrizgavanim gorivima. Međutim, postoje određene prepreke u razvoju ove tehnologije. Razvoj efikasnog opskrbnog lanca je važan da bi industrija vjetroelektrana na moru došla do jeftinih projekata. Uspjeh ovih projekata ovisi o razvoju obalne mrežne infrastrukture, bez toga prijeti opasnost da veliki broj vjetroelektrana na moru ostane neiskorišteno te da daljnji razvoj bude ugušen. Razvoj bi mogle usporiti i prakse planiranja u moru te propisi za dodjelu prava na razvoj i pitanja javnog prihvaćanja.

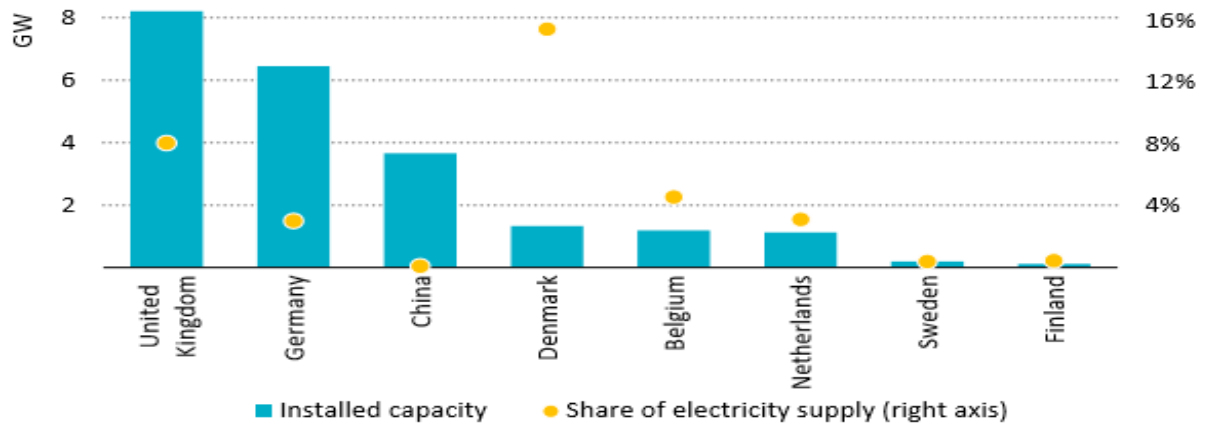
1.1 Energija vjetra na moru danas

Vjetroelektrane na moru su jedna od najdinamičnijih tehnologija u energetskom sustavu. Godine 2010. je njihov kapacitet bio 3 GW, dok je do 2018. to naraslo na 23 GW [1]. Godišnji rast od 30 % je veći od bilo kojeg izvora električne energije osim fotonaponskih solarnih ćelija. Do 2019. postavljeno je preko 5500 vjetroturbina na moru spojenih na mreže u 17 zemalja. Rast ovih tehnologija je potaknut u europskim zemljama koje izlaze na Sjeverno more, upravo zbog visoke kvalitete vjetra i relativno plitkog mora. U 2018. iskorak u kapacitetu energije vjetra je napravila Kina instaliravši 1,6 GW kapaciteta vjetroelektrana na moru, s ciljem da do 2020. to prošire na 5 GW.



Slika 1. Godišnji dodatak kapaciteta po regijama u razdoblju 2010-2018 [1]

Preko 100 projekata vezanih za energiju vjetra na moru bi trebalo biti gotovo do 2021. godine što će dodatno ubrzati rast kapaciteta ove energije. U Americi postoje projekti kapaciteta 25 GW, dok u državama kao što su Australija, Tajvan, Indija, Japan, Koreja, Novi Zeland, Turska i Vijetnam postoje također veliki projekti u području energetske opskrbe. Do 2018. je 80 % globalno instaliranih vjetroelektrana na moru bilo u Europi (većinom u Velikoj Britaniji i Njemačkoj) no očito se taj trend mijenja. Iako vjetroelektrane na moru napajaju samo 0,3 % svjetskih potreba u 2018. ona ima sve veću ulogu u zemljama koje su počele primjenjivati ove tehnologije.



Slika 2. Instalirani kapacitet i udio u opskrbi po državama [1]

1.2 Tržište

Ulaganja u tehnologije na moru su od 2010. do 2018. narasla s 8 milijardi na 20 milijardi godišnje [1]. To u 2018. predstavlja četvrtinu svih ulaganja u sektoru energije vjetra, te 6 % ulaganja u obnovljive izvore energije [1]. Najistaknutija ulaganja su u EU gdje je gotovo polovica ulaganja u energiju vjetra usmjerena upravo u projekte na moru. Ono što predstavlja prepreku u otvaranju novih postrojenja je i dalje visoka cijena koja se kreće otprilike u omjeru 250 MW=1 milijarda ulaganja [1]. Ulaganja u solarnu energiju i vjetroelektrane na obali i dalje su privlačnija jer su jeftinija i postoji još uvijek manje prepreka za „manje igrače“.

Organisation	Main activities	Assets (GW)			Market share	Headquarters	Ownership
		In operation	Under construction	In development			
Ørsted	DOO	2.97	2.79	5.23	12.86%	Denmark	Private
RWE	DOO	2.41	0.51	1.83	10.44%	Germany	Private
China Longyuan	DOO	1.23	0.40	1.00	5.34%	China	Public
Vattenfall	DOO	0.88	1.01	4.92	3.82%	Sweden	Public
Macquarie Capital	Investor	0.87	0.07	0.10	3.78%	Australia	Private
Northland Power	DOO	0.64	0.27	0.63	2.78%	Canada	Public
Global Infrastructure Partners	Investor	0.63	0.61	-	2.73%	United States	Private
Iberdrola	DOO	0.55	0.97	0.81	2.36%	Spain	Private
Equinor	DOO	0.48	-	2.17	2.10%	Norway	Public
Siemens Financial Services	Investor	0.46	-	-	1.98%	Germany	Private
Public Pension, Denmark	Investor	0.45	-	-	1.97%	Denmark	Public
Électricité de France	DOO	0.43	-	1.67	1.85%	France	Public
Stadtwerke München	Investor	0.41	-	-	1.79%	Germany	Public
China Three Gorges	DOO	0.40	0.88	6.87	1.74%	China	Public
Scottish and Southern Energy	DOO	0.34	0.24	0.52	1.49%	United Kingdom	Public

Notes: DOO = developer, owner and operator. Market shares are adjusted to reflect each company's equity stake across all of its projects.

Source: IEA analysis based on BNEF (2019).

Slika 3. Tablica vodećih igrača na tržištu vjetroelektrana na moru, 2019. [1]

Proizvođači turbina za vjetroelektrane na moru uglavnom se nalaze u Europi, a također se mali broj tvrtki bavi njihovom proizvodnjom i razvojem tehnologije.

Rank	Company	Offshore wind market share, 2018	Offshore wind market share, 1995-2018	Offshore wind capacity sold, 1995-2018 (MW)
1	Siemens Gamesa	41%	63%	13 881
2	MHI Vestas	30%	18%	3 882
3	Envision	15%	4%	804
4	Goldwind	8%	3%	574
5	Ming Yang	2%	1%	113
6	Sewind	2%	1%	306
7	GE Renewable Energy	0.4%	1%	177
8	Taiyuan	0.2%	0%	10
9	Senvion	-	6%	1 253
10	Bard	-	2%	405

Source: IEA analysis based on BNEF (2019).

Slika 4. Proizvođači vjetroturbina [1]

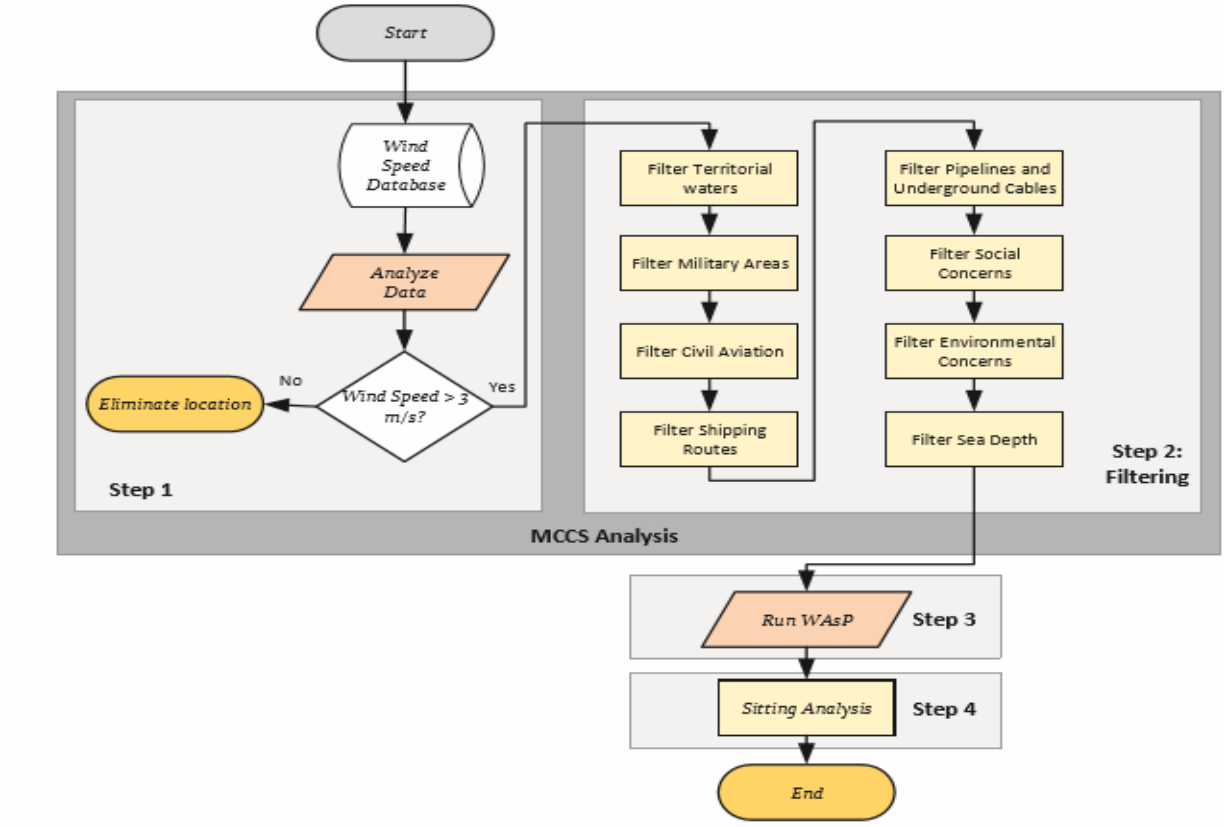
Ono što je važno za napomenuti u vrijednosnom lancu je konstrukcija i održavanja vjetroturbina na moru. Godišnje se troši 3,4 milijarde € na ulaganja u konstrukciju vjetroelektrana na moru u Europi i Kini dok je preko 1 milijarde € godišnje potrošeno na njihov rad i održavanje [1].

2. Analiza vjetra-izbor lokacije

2.1 Metoda

Metoda izbora lokacije vjetroelektrane na moru sastoji se iz četiri koraka koja će biti detaljno opisana u ovom poglavlju. Povijesni podatci vjetra se koriste prilikom odabira prihvatljivih lokacija. Opširno i podrobno proučavanje provodi se kako bi procijenili maksimalno moguću izlaznu snagu.

- Prvi korak je analiza brzine vjetra. Ukoliko nemamo dostupnih podatak za brzinu vjetra na moru, a zbog nedostatka mjernih stanica na moru to je obično tako, koristimo se podatcima prikupljenim na obližnjim meteorološkim stanicama na obali.
- Drugi korak je filtriranje odabranih lokacija korištenjem određenih kriterija koji će kasnije biti detaljnije objašnjeni. Područje koje zadovoljava sve kriterije odabire se kao lokacija za vjetroelektranu na moru.
- Treći korak bi bio određivanje glavnog smjera vjetra.
- Četvrti i zadnji korak je analiza smještaja vjetroelektrane gdje definiramo broj turbina, njihovu točnu lokaciju i konačne postavke.



Slika 5. Shema analize kvalitete vjetra [2]

2.2 Analiza potencijala vjetra

Da bi sustav energije vjetra bio održiv, vjetroelektrane na moru se instaliraju na područjima s potencijalno visokim brzinama vjetra. Točni i pouzdani podatci o vjetru su esencijalni za potencijalne energetske procjene odabranog područja. Kao primjer nam može poslužiti analiza provedena u Turskoj od strane njihove vlade. Oni su prikupili podatke za 55 obalnih područja u Turskoj. U obzir su uzete lokacije s brzinama vjetra većim od 3 m/s. Dobiveni podatci su temeljeni na mjerenjima koja su rađena na satnoj bazi i visini od 10 m na najbližoj mjernoj stanici na obali. Očigledno i logično je da će brzina vjetra na obali biti manja od one na moru. Budući da podaci o brzini vjetra uključuju mjerenja samo na visini od 10 m, brzine vjetra, V (m/s), moguće je računati po sljedećoj formuli:

$$V = V_0 \times (\frac{h}{10})^{\alpha}$$

Gdje je V_0 brzina vjetra na visini 10 m, V je brzina vjetra na visini h, a h je visina koja odgovara brzini V. α predstavlja koeficijent hrapavosti površine [2].

2.3 Kriteriji za izbor lokacije vjetroelektrane na moru

Izbor lokacije ključan je za uspjeh projekta vjetroelektrane na moru gledano i ekonomski i tehnološki. Potrebno je primarno odraditi inspekciju zabranjenih područja. Zavisno od svojstava područja, moguće je susresti područja ekstrakcije nafte i plina, vojne poligone, podvodne kablove, ulaze u luke i navigacijske rute, zabrane vezane za zaštitu okoliša, razne vodene kulture, područja ekstrakcije pijeska i šljunka, područja morske arheologije te područja javne baštine [2].

2.3.1 Teritorijalne vode

Prema međunarodnom pravu, teritorijalne vode su definirane kao područje mora odmah pokraj obale države i one su predmet teritorijalne uprave te države. Trenutna širina teritorijalnih voda, koja je zaštićena zakonom o moru Ujedinjenih Naroda iz 1982., iznosi 12 nautičkih milja što približno iznosi 22 km. Kao primjer će nam opet poslužiti Turska. Turske teritorijalne vode u Egejskom moru su jako uske zbog blizine grčkih otoka. Trenutno, obje države upravljaju područjem od 6 nautičkih milja (11 km) udaljenim od obale na Egejskom moru. Na nekim su područjima pak teritorijalne vode reducirane na manje od jedne nautičke milje. U područjima u kojima susjedne države nisu blizu ovaj kriterij postaje irelevantan.

2.3.2 Vojna područja

Neka mora i morska područja se koriste kao poligoni za vojne vježbe, pa su sukladno tome zabranjena za bilo kakvu drugu upotrebu. Vojna područja se sastoje od područja za trening, zabranjenih pomorskih zona, te pomorskih zona specijalne sigurnosti. Vojska obično koristi otvorena

područja s malom gustoćom stanovništva i podiže svijest o mogućem utjecaju vjetroelektrana na zrakoplovstvo. Oduvijek je postojao sukob između ekspanzije vjetroelektrana i vojnih područja. Stoga, zabrane nametnute od strane vojske kompliciraju instaliranje ekonomski izvedivih vjetroelektrana.

2.3.3 Civilno zrakoplovstvo

Buka koju generiraju vjetroelektrane dovodi do komplikacija u radarskim sustavima. U nekim zemljama, dodatna sredstva se dodjeljuju kao potpora istraživanju smanjenja štetnih efekata vjetroelektrana na radare. U Ujedinjenom Kraljevstvu je 2008. godine potpisan „Memorandum o razumijevanju“ između industrije vjetra i avionske industrije s vladom kako bi se ovi problemi riješili [2]. Uzletna i mjesta za slijetanje letjelica također moraju biti uzeta u obzir kod odabira lokacije vjetroelektrane na moru budući da zabrane nameću određenu udaljenost od istih.

2.3.4 Brodske rute

Uslijed povećane potražnje za vjetroelektranama na moru, brodske rute su postale glavni problem razvoja ovih tehnologija pogotovo u razvijenim zemljama. Kako bi se obalna područja što bolje iskoristila provodi se studija o morskom prostornom planu. Također se istražuje ekonomski utjecaj promjene brodskih ruta na vjetroelektrane na moru, budući da industrija vjetra povećava pritisak na vladine organizacije radi potrebe za većim prostorom. Detaljna analiza ja tako potrebna kako bi vjetroelektrana na moru bila u skladu s brodskim rutama.

2.3.5 Cjevovodi i podzemni kabeli

Cjevovodi i podzemni kabeli ne bi smjeli biti izloženi bilo kakvoj mogućoj šteti s vjetroelektrane na moru bilo kratkoročno ili dugoročno. Pomorci bi trebali izbjegavati sidrenje, jaružanje ili kočarenje na udaljenosti manjoj od 500 m od podmorničkih kabela i plinovoda jer je opasno i zabranjeno.

2.3.6 Društvene prepreke

Vizualni utjecaj i buka koja proizlazi iz vjetroelektrana su dvije najveće brige prilikom instalacije vjetroelektrana na moru. Pogled bez strukture na vjetroturbinu može uzrokovati vizualni nemir. No, vizualni efekt vjetroelektrana na moru može se smanjiti stacioniranjem turbina daleko od obale. Buka koja proizlazi iz vjetroelektrane može se čuti na udaljenosti od 1km i stoga može biti problematična za stanovništvo koje živi u blizini, pa se stoga javljaju određeni protivnici ove tehnologije. Iako je ovo mizeran problem za većinu vjetroelektrana, pravilnim instaliranjem vjetroelektrana te održanjem razumne udaljenosti od obližnjih žitelja, problemi s bukom mogu biti značajno smanjeni.

2.3.7 Zabrinutost za okoliš

Zabrinutost za okoliš uzrokovana pretjeranim korištenjem fosilnih goriva je jedna od najvećih snaga za rast obnovljivih izvora energije uključujući i energiju vjetra. Međutim, nedavni napredci u industriji energije vjetra su podigli druge probleme za okoliš u pogledu biološke raznolikosti. U Europi, postoji jak zakonski okvir koji zahtjeva balans razvoja tehnologije vjetroelektrana s očuvanjem prirode. Bilo kakav razvoj koji uzrokuje nepovoljan efekt je predmet za odgovarajuće procjene učinka. Učinak uključuje opasnost sudara ptica i šišmiša s komponentama vjetroturbine. Vjetroelektrane se smatraju odgovornima za promjenu smjera leta kod ptica, a također mogu biti uzrok promjene staništa ptica i morskih životinja uslijed buke i vibracija koju proizvode, te vizualnog efekta vjetroelektrana. Zavisno od veličine vjetroelektrane, gubitak staništa varira. U razvijenim državama, strateške procjene okoliša, uključujući mapiranje osjetljivosti na regionalnoj ili nacionalnoj razini, se upotrebljavaju za utvrđivanje raspoloživih i ograničenih područja za razvoj vjetra.

2.3.8 Dubina mora

Instalacija vjetroelektrane na moru zahtjeva posebnu pažnju vezanu za svojstva morskog tla, dubine mora i visine valova budući da temelji vjetroturbine moraju biti osigurani. Morska dubina je tehnički kriterij koji uglavnom utječe na cijenu instalacije vjetroelektrane. Cijena temelja je gotovo tri puta veća za povećanje dubine s 10-20 m na 40-50 m. U Europi je prosječna dubina mora na kojoj se postavljaju vjetroelektrane na moru , 2013. i 2014., bila od 20 m do 22,4 m. U novije vrijeme, točnije 2018., ta dubina se približila iznosu od 50 m

2.4 Analiza smještaja

Nakon odabira točne lokacije i njezinih granica kroz gore navedene kriterije, sljedeći korak je mikro-smještajna konfiguracija vjetroturbina koje su pažljivo smještene u predviđeno područje. Ukupan broj turbina, pa tako i ukupna snaga vjetroelektrane, ovisi o efikasnosti razmještaja turbina. Razmak između turbina ima kritičnu ulogu na efikasnost i izlaznu snagu vjetroelektrane budući da brzina vjetra ne može biti efikasno iskorištena jer se dio energije odvodi na lopaticama vjetroturbine. Pravilo palca za razmještaj stupova za pravokutno područje je 3 do 5 promjera lopatica između stupova i 5 do 9 promjera lopatica između redova. Kao dodatak kriteriju razmještaja vjetroturbina, glavni smjer vjetra na nekoj lokaciji se razmatra u vidu razmještaja i broja turbina. Izgled vjetroelektrane se priprema pozicioniranjem lokacije pojedinačnih vjetroturbina razmatrajući glavni smjer vjetra. Optimalno mikro-situiranje je osnovni korak minimiziranja niza gubitaka u energetskim projektima vjetra na moru. Udaljenost od obale se također razmatra kod razmještaja turbina budući da je blizina obali dio društvenih i ekoloških prepreka ostvarivanju energetskih projekata ovoga tipa.

3. Dijelovi vjetroelektrane na moru

Struktura vjetroelektrane na moru je organizirana hijerarhijski, u promatranju ćemo strukturalne dijelove podijeliti na tri razine [3]:

- Makroskopska (makro-razina), odnosi se na geometrijske dimenzije usporedive s cijelom konstrukcijom ili s generalnom ulogom u strukturnom djelovanju. Takve dijelove nazivamo makro-komponentama, od kojih svaka ima tri osnovna dijela. (Slika 6.)

    1. Glavna struktura koja je nosiva za glavna opterećenja
    2. Sekundarna struktura, odnosi se na strukturne dijelove direktno opterećene sustavom za proizvodnju energije
    3. Pomoćna struktura, odnosi se na posebne operacije koje turbina može susresti, u normalnim ili posebnim slučajevima, tijekom svoga životnog vijeka.

    Glavna struktura se dalje dijeli na dva segmenta:

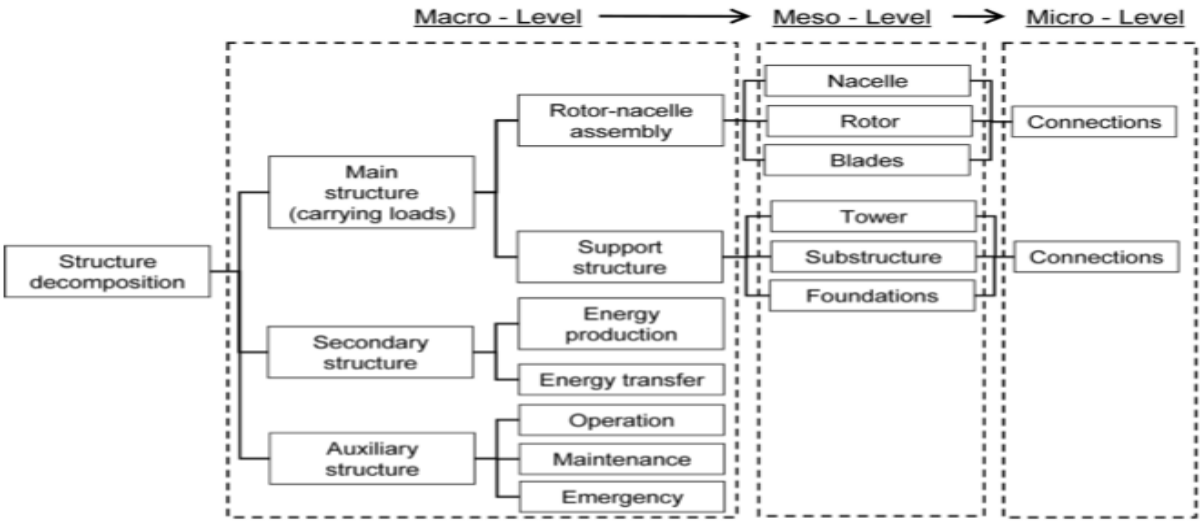
    1. Potporna struktura (temelji, substruktura i toranj)
    2. Sklop lopatice-rotor-gondola

- Mezoskopsku (mezo-razina), odnosi se na geometrijske dimenzije koje su još uvijek relevantne u usporedbi s čitavom konstrukcijom, ali povezane sa specijaliziranom ulogom u makro-komponentama. Dijelovi strukture ove razine se nazivaju mezo-komponente. Potporna struktura se na ovoj razini dijeli na:

    1. Temelji- dio koji prenosi opterećenja sa strukture na morsko dno
    2. Substruktura- dio koji se proteže uvis i spaja temelje s tornjem
    3. Toranj- dio koji spaja substrukturu sa sklopom rotora i gondole

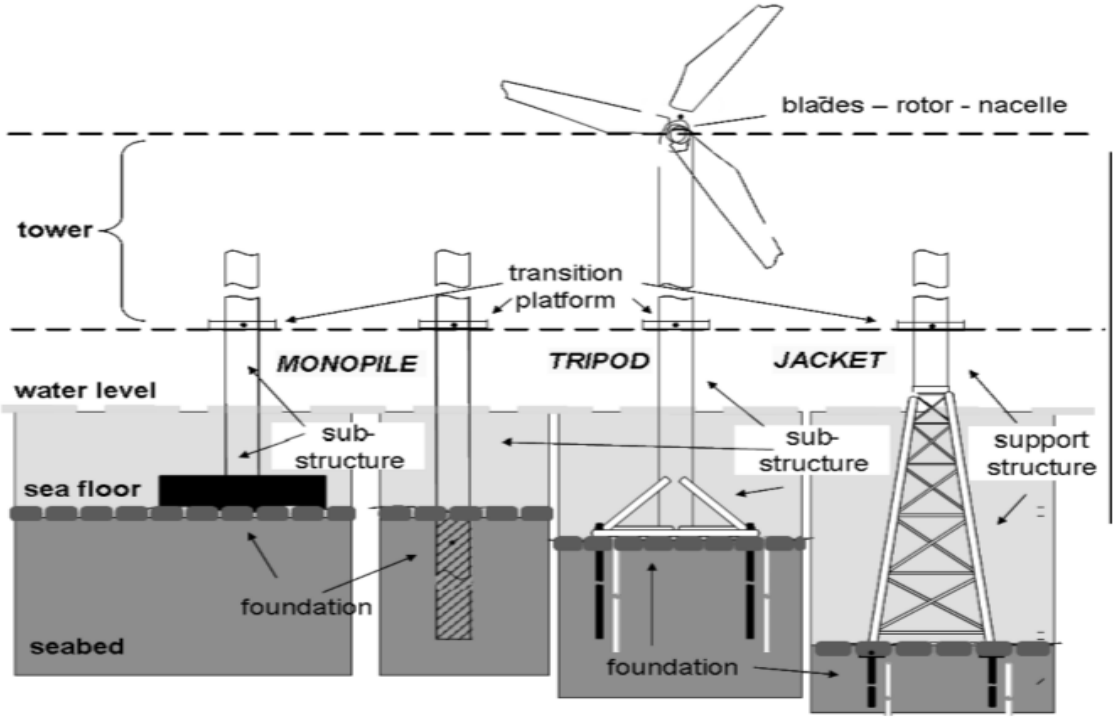
- Mikroskopsku (mikro-razina), odnosi se na manje geometrijske dimenzije sa specijaliziranim strukturnim ulogama, to su komponente ili elementi.

Strukturu ćemo grafički prikazati na sljedećoj slici.



Slika 6. Rastav strukture vjetroelektrane na moru [3]

Gore prikazana struktura ima više značenja. Jedno od najvažnijih se odnosi na različite sigurnosne karakteristike prepoznatljivih dijelova. Obično temelji imaju, zbog svoje osnovne uloge, sigurnosne zahtjeve veće nego dijelovi iznad njih koji toleriraju određena odstupanja. Govoreći ugrubo, prioritet sigurnosti imaju temelji, zatim substruktura i na kraju rotor i toranj.



Slika 7. Glavni dijelovi vjetroelektrane na moru [3]

3.1 Temelji vjetroelektrane na moru

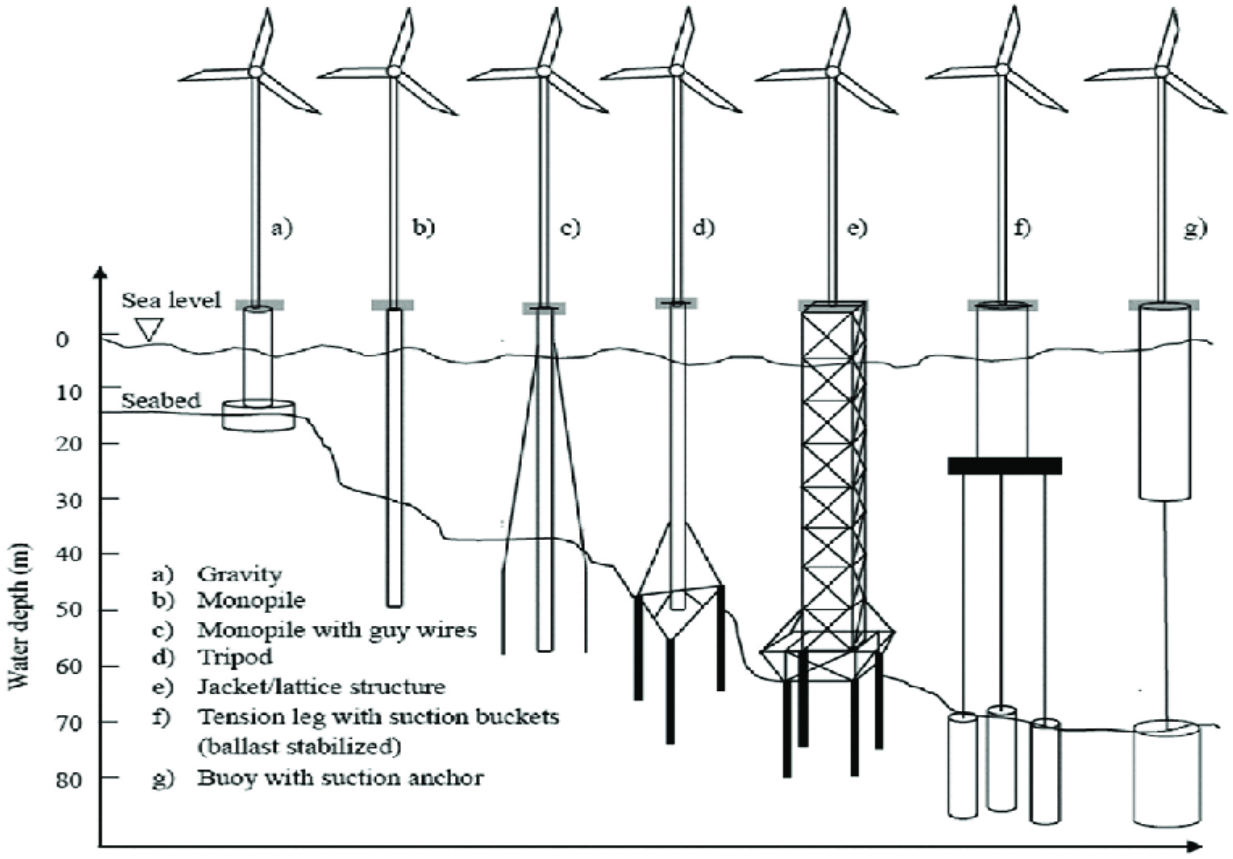
Temelji igraju značajnu ulogu u gradnji vjetroelektrane na moru u vidu kompetitivne cijene. Temelji vjetroelektrane na moru su dio potporne strukture koja opterećenja sa strukture prenosi direktno na morsko dno. Danas imamo temelje različitih oblika, veličina i materijala. U izboru isplativih temelja, posebna se pažnja daje sljedećim faktorima kao onima s najvećim utjecajem na isplativost projekta:

- Uvjeti tla
- Opterećenja (strukturna dinamika u vidu vjetra i valova je dominantna)
- Transport
- Instalacija i dubina vode

Dubina vode je krucijalni faktor u odabiru tipa temelja koji će se koristiti za specifičnu vjetroelektranu na moru. Različita dubina vode predstavlja različite inženjerske izazove vezane za temelje vjetroelektrana na moru. Danas na svijetu imamo različite izvedbe temelje za vjetroelektrane na moru od kojih su najpoznatiji:

- Jednostupni (Monopile)
- Temelji s gravitacijskom betonskom bazom (Gravity-based)
- Tronožni (Tripod)
- Rešetkasti (Jacket)
- Temelji s usisnom kantom (Suction bucket)
- Različite plutajuće strukture

U nastavku ćemo svaku izvedbu posebno detaljno opisati.



Slika 8. Ovisnost tipa temelja o dubini mora [7]

3.1.1 Jednostupni temelji

Jednostupni temelji su izrađeni od čeličnih ploča koje formiraju čelične cijevi s promjerom od 4 do 8 m i duljine oko 60 m. Jednostupni temelji su relativno lagana struktura težine oko 700 tona. Zavisno od stanja morskog dna, ova vrsta temelja se u morsko dno ugrađuje velikim udarima ili vibracijskim hidrauličkim čekićima, ili se umeće u provrte napravljene u kamenu. Standardni jednostupni temelji, koji nemaju bočnu potporu, se uglavnom koriste u tranzicijskim dubinama vode do 25 m, dok se jednostupni temelji s bočnom potporom koriste na dubinama od 25 do 40 m. Jednostupni temelji su najpogodniji za polutvrdo morsko dno. Što je morsko dno tvrđe veća je opasnost da se dogodi deformacija temelja prilikom njihove ugradnje. Prilikom procjene otpora podloge u odnosu na dijelove temelja, faktori kao što su dimenzije temelja, čvrstoća i deformacijska svojstva tla kao i svojstva smičnih naprezanja zahtijevaju posebnu pažnju. Svojstva materijala kao što su krutost i zamor ograničavaju razvoj jednostupnih temelja u dubokim vodama budući da su čelični materijali osjetljivi na zamor uslijed dinamičkog djelovanja valova i trenutnog tereta. Rizik od izvlačenja temelja bi trebali pažljivo procijeniti u procesu konstruiranja. Konstrukcija ove vrste temelja zahtijeva minimalnu pripremu morskog dna. Ukupni otklon (bočno kretanje uzduž temelja) i vibracije su

ograničavajući uvjeti za ovaj tip temelja. Jednostupni temelji imaju široku primjenu zbog njihove jednostavne geometrije i smanjenih troškova instalacije [3].



Slika 9. Primjer jednostupnih temelja [8]

3.1.2 Temelji s gravitacijskom betonskom bazom

Struktura ovih temelja se sastoji od vitkog čelika ili betonske gomile kao substrukture postavljene na teške i ojačane betonske temelje. Ovaj tip temelja je relativno težak u usporedbi s jednostupnim temeljima budući da je obično građen od betonskih materijala. Kako im samo ime kaže ovaj tip temelja se oslanja na težinu gravitacijske baze, koja vrši vertikalni pritisak na područje ispod postolja na morskom dnu i čini potporu konstrukciji i daje otpor prevrtanju. Temelji s gravitacijskom betonskom bazom su dobro prilagođeni homogenom tlu, s kompaktnim kamenjem i granitom. Vanjske sile i momenti savijanja koji dolaze s turbine prenose se direktno kroz bazu temelja. Struktura baze mora biti procijenjena radi opasnosti od smičnog naprezanja. Budući da se za ovu vrstu temelja koristi najčešće betonski materijal, oni se najčešće koriste na dubinama od 0 do 25 m. Veličina i težina ih čini jako teškim za transport i instalaciju, što upravo ograničava njihovo korištenje u dubokim vodama. Nedostatak je i potreba za velikim prostorom u lukama kako bi se konstruirali ovakvi temelji. Iako je beton jako jeftin materijal, strašno je skupo i dugotrajno instalirati ovakve temelje stoga ih se ne smatra idealnim rješenjem. Prednost im je ta što se lako uklanjaju [3].



Slika 10. Primjer temelja s gravitacijskom betonskom bazom [9]

3.1.3 Tronožni temelji

S kontinuiranim rastom u industriji vjetroelektrana na moru, zahtjevi za pomicanje projekata u dublje vode uvjetuju temelje sa stabilnijom strukturom. Tronožni temelji su temelji na tri noge sa širom bazom i gomilom sidra postavljenih na morsko dno kako bi održavali temelje čvrstima. Ovi temelji imaju visoku otpornost na dinamičke udare od strane valova i trenutnog opterećenja što ih čini idealnim za duboke vode. Tronožni temelji se koriste na dubinama od 25 do 50 m. Za vjetroturbine na moru koje su većih dimenzija, ovaj tip temelja nailazi na ekonomske probleme budući da zahtijevaju više vremena za konstrukciju te im je otežan transport [3].



Slika 11. Primjer tronožnih temelja [10]

3.1.4 Rešetkasti temelji

Ovaj tip temelja se također koristi kao potpora naftnim platformama i drugi je najčešće korišteni tip temelja za vjetroelektrane na moru. Rešetkasti temelji su obično tronožne ili četveronožne rešetkaste strukture, koja se sastoji od stupova na kutovima koji su međusobno povezani tankim čeličnim ojačanjima kako bi se formirala rešetkasta struktura. Opterećenja se prenose većinom u aksijalnom smjeru (kao kod potkrovnih struktura). Ovaj tip temelja je odgovarajući za vodu dubine od 30 do 80 m. Velika baza temelja pridonosi sigurnosti od prevrtanja strukture. Ovaj tip temelja je relativno tvrđi od jednostupnih temelja što ga čini otpornijim na udare valova i trenutnog opterećenja. Transport ove vrste temelja umjereno je zahtjevan i skup, troškovi održavanja su također. No, troškovi instalacije su niži, budući da se pojedini dijelovi strukture mogu potpuno ili djelomično sastavljati prije nego budu prevezeni na instalaciju. Dodatna korozijska zaštita je uzeta u razmatranje budući da je moguće da dođe do zamora u komponentama strukture. Zaštitni premaz koristi se za čelične komponente kako u atmosferskoj, tako i u zoni prskanja, dok je potopljena komponenta katodno zaštićena. Od puštanja u pogon prve rešetkaste strukture kod vjetroelektrana (Alpha Ventus) 2009. godine kojoj je dubina vode bila 30 m, razni projekti su rađeni s ovom vrstom temelja. Inženjeri i istraživači su radili na razvoju ove vrste temelja. U Koreji su, za vjetroelektranu na moru kapaciteta 5 MW, razvijene dvije različite rešetkaste potporne strukture tzv. X i Z tipovi. Tip Z ima bolja dinamička svojstva u usporedbi s X tipom. Daljnja istraživanja na ovoj vrsti temelja od iznimne su važnosti za razvoj temelja vjetroelektrana na moru. Kroz istraživanja je ispitivan i utjecaj brodova na ovaj tip temelja vjetroelektrana na moru. Zaključak je bio da sklopovi s tanjim zidovima imaju veću uštedu energije i veću sposobnost izbjegavanja sudara [3].



Slika 12. Primjer rešetkastih temelja [11]

3.1.5 Uvijeni temelji

Kod ove vrste temelja noge su uvijene oko centralnog stupa. Ovakve strukture su jednostavnije za proizvodnju i instalaciju od standardnih rešetkastih temelja, što utječe na smanjenje cijene vjetroelektrana na moru. Ova vrsta temelja prvi put je instalirana u Ujedinjenom Kraljevstvu, i najčešće se koriste na dubinama od 30 do 50 m. U usporedbi sa standardnim rešetkastim temeljima za njihovu izradu se koristi manje čeličnih materijala. Također je, budući da ima manje čvorova i komponenti, potrebno i manje zavara. Troškovi proizvodnje ove vrste temelja su također za oko 20 % niže nego kod standardnih rešetkastih temelja [3].



Slika 13. Primjer uvijenih temelja [12]

3.1.6 Temelji s usisnom kantom

Ovaj tip temelja je testiran i dokazan u naftnoj industriji već 20 godina, ali ga se tek nedavno počelo koristiti u gradnji vjetroelektrana na moru. Napravljeni su od čeličnih materijala u obliku kante čiji je promjer oko 60 m. U usporedbi sa standardnim čeličnim stupovima, ovaj tip temelja koristi manje čeličnih materijala što ih čini isplativijima i bržima za izradu [3].



Slika 14. Primjer temelja s usisnom kantom [13]

3.1.7 Plutajući temelji

Ovaj koncept se istražuje još od sredine 90-ih i predstavlja nešto što bi trebalo omogućiti pozicioniranje vjetroelektrana u duboke vode. Komercijalizacija ove tehnologije neće samo skratiti period instalacije, nego bi trebala uvelike smanjiti troškove projekata vjetroelektrana na moru. Mnoge vjetroelektrane na moru su montirane na temelje fiksirane za morsko dno, i kao takve nisu primjenjive na dubinama većim od 50 m. Novi koncept samih temelja, koji više neće biti ovisan o dubini vode, potreban je kako bi se u potpunosti iskoristilo potencijal vjetra na moru. Strukturna dinamika jedan je od glavnih problema implementacije plutajućih temelja, budući da oni imaju 6 stupnjeva slobode kretanja, jer mogu biti pokrenuti valovima, vjetrom i trenutnim opterećenjem mora i oceana. Čitav sustav bi trebao biti usidren i stabiliziran korištenjem linija usidrenja, balasta itd. U novim europskim prototipima temelja plutajući temelji su strukture koje se konstantno razvijaju usporedno s povećanjem vjetroturbina na moru te njihovim pomjeranjem u dublje vode. Vještine i tehnologije razvijene u Europi primjenjuju se u svim dijelovima svijeta. Postoji nekoliko prototipa ovakvih konstrukcija, a prvi od njih bio je postavljen u Hywindu u Norveškoj 2009. godine. Tri su glavne prednosti ovakvih tipova temelja:

- Statička i dinamička stabilnost koja omogućuje komercijalnu upotrebu vjetroelektrana na moru
- Veličina i konstrukcija omogućuju montažu na moru
- Do konačne lokacije je dotegljen

U Europi imamo na par lokacija postavljene plutajuće temelje, a neke od njih su:

- Windfloat- Portugal 2011.
- WINDFLO- Francuska 2014.
- IDEOL- Francuska 2014.

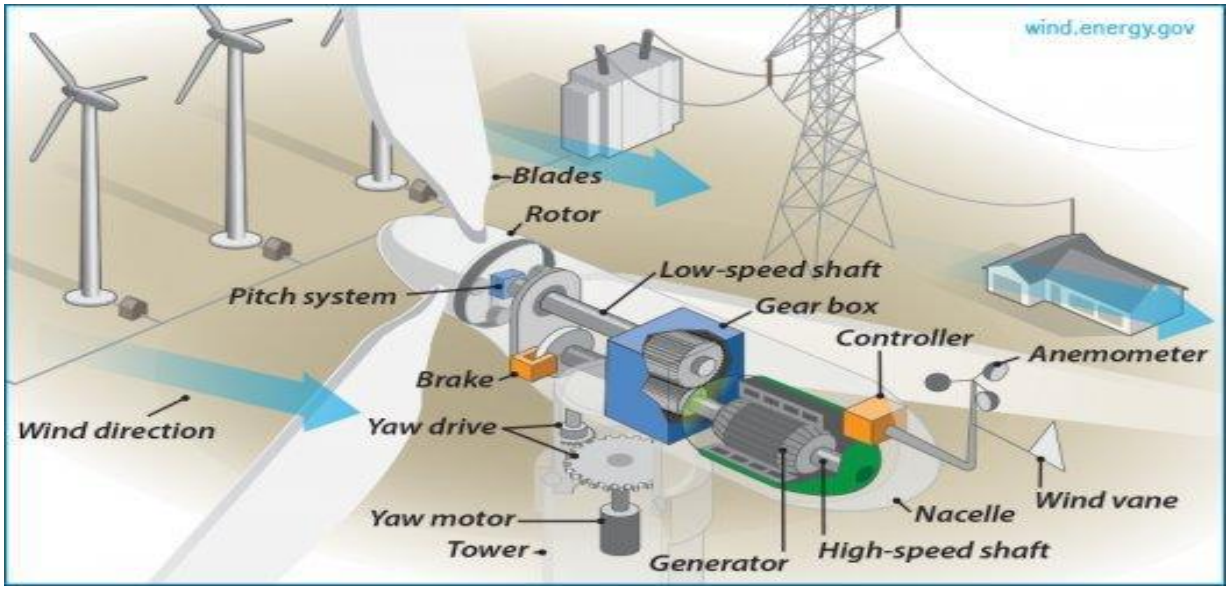


Slika 15. Primjeri plutajućih temelja [3]

Glavni problem komercijalizacije ovakvih temelja su i dalje instalacijski troškovi koji su enormno veliki za ove tehnologije. No, u skorijoj budućnosti očekuje se pozitivno rješavanje ovoga problema što će dovesti do revolucije u energiji vjetra na moru [3].

3.2 Sklop toranj-gondola-lopatice

Na temelje, koji su osnovni dio, se dalje postavljaju dijelovi vjetroturbine koji su zapravo i odgovorni za proizvodnju električne energije. Na sljedećoj slici vidimo svaki dio označen posebno, a u nastavku će svaki dio biti detaljnije opisan.

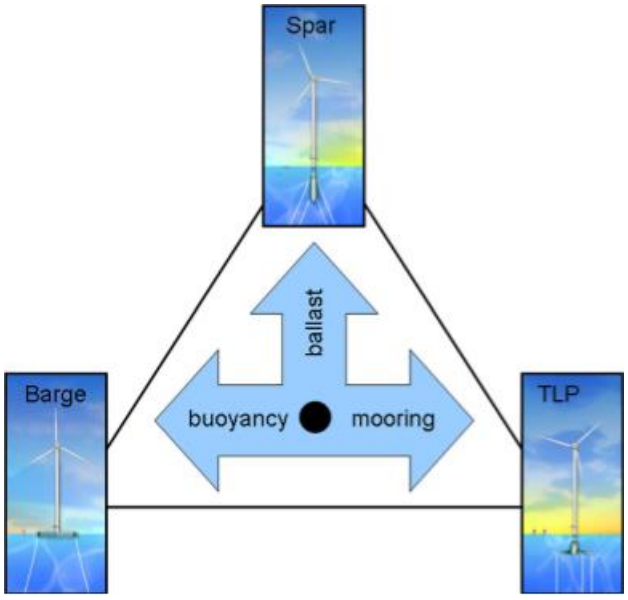


Slika 16.. Dijelovi sklopa toranj-gondola-lopatice [14]

3.2.1 Toranj

Ovaj dio konstrukcije se najčešće izrađuje od cjevastog čelika, betona ili čelične rešetke. On podupire konstrukciju turbine, i budući da s povećanjem visine raste i brzina vjetra, toranj omogućuje da turbine proizvode više električne energije. Tornjevi za vjetroelektrane na moru se dijele prema sljedećim kriterijima:

1. Prema metodi potpore koju ima toranj:
    - Fiksirani tip
    - Plutajući tip
2. Prema dubini vode:
    - Tornjevi plitke vode (5-30 m)
    - Tornjevi tranzicijske vode (30-60 m)
    - Tornjevi duboke vode (više od 60 m)
3. Prema metodi postizanja statičke stabilnosti:
    - Barka (Barge)- nagib se ponovno uspostavlja preko momenta trupa
    - Plutača (Spar)- nagib se ponovno uspostavlja pružanjem balasta
    - TLP- nagib se ponovno uspostavlja zatezanjem linija sidrenja



Slika 17. Trokut stabilnosti [6]

4. Prema načinu sidrenja

    - Katemptotsko sidrenje- podrazumijeva jeftina sidra ali kompleksnu dinamiku
    - Vertikalno sidrenje- podrazumijeva skupa sidra ali ima pojednostavljenu dinamiku [6]

3.2.2 Gondola

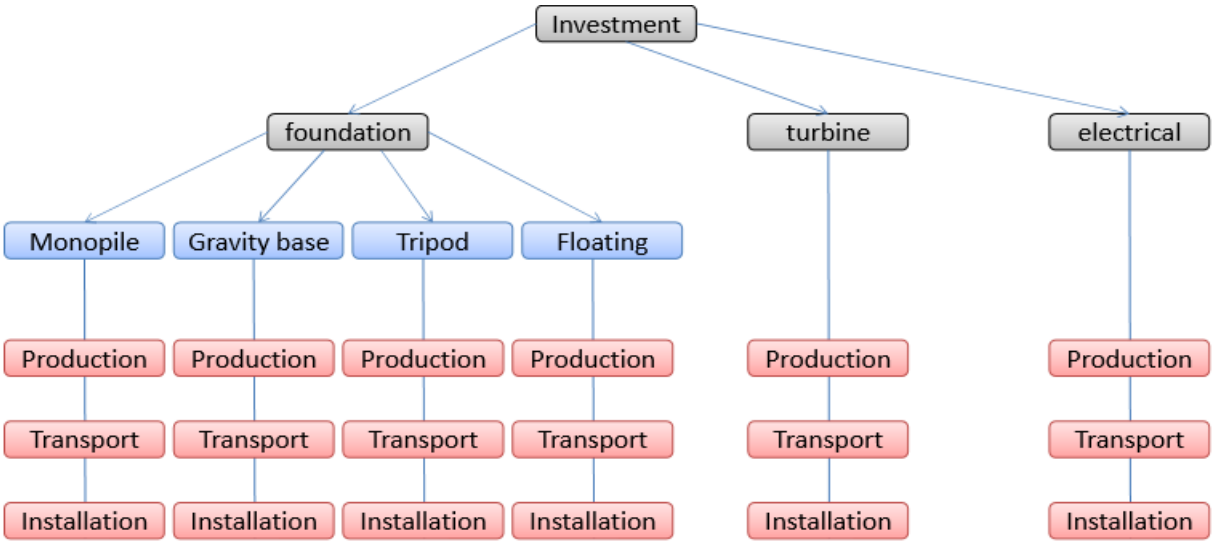
Gondola (Nacelle) se nalazi na vrhu tornja, a sastoji se iz više dijelova od kojih svaki obavlja svoju zadaću u konačnoj operaciji proizvodnje električne energije. Neke gondole su dovoljno velike da na njih sleti helikopter. Dijelovi gondole su:

1. Rotor- lopatice i glavina zajedno čine rotor
2. Nagibni sustav (Pitch system)- okreće lopatice od vjetra kako bi kontrolirao brzinu rotora, te kako bi spriječio pokretanje rotora kod prevelikih ili premalih brzina vjetra
3. Kočnice (Brake)- u slučaju opasnosti zaustavlja rotor. To može obavljati mehanički, elektronički ili hidraulički.
4. Vratilo male brzine (Low-speed shaft)- vratilo koje se okreće brzinom od oko 30-60 okretaja u minuti
5. Zupčanik (Gear box)- povezuje vratilo male brzine s onim velike brzine i povećava njegovu brzinu s 30-60 okretaja u minuti na 1000-1800 okretaja u minuti, što je najčešća tražena brzina vrtnje kod generatora kako bi se proizvodila električna energija. Također postoje gondole bez ovog dijela, i kod takvih se koriste „direct drive“ generatori koji rade na manjim brzinama vrtnje te im zupčanici nisu potrebni.
6. Vratilo velike brzine (High-speed shaft)- ovo vratilo pokreće generator
7. Generator- proizvodi naizmjeničnu struju
8. Kontrolor (Controller)- Pokreće turbinu kod minamalno traženog vjetra te istu zaustavlja kod maksimalno dopuštenog kako nebi došlo do oštećenja njezinih dijelova.
9. Anemometar- Mjeri brzinu vjetra i prenosi podatke kontroloru
10. Vjetrokaz (Wind vane)- određuje smjer vjetra i komunicira s pokretnom osi gondole kako bi pravilno orijentirao turbinu u odnosu na vjetar
11. Pokretna os (Yaw drive)- usmjerava turbine prema vjetru prilikom promjene smjera vjetra. Turbine koje su postavljene „niz vjetar“ nemaju pokretnu os [14].

4.Utjecaj dijelova vjetroelektrane na moru na ukupnu cijenu investicije

4.1 Metoda proračuna

Prvo se investicijski troškovi dijele na one vezane za temelje, turbinu i elektroniku. Dalje će se troškovi vezani za svaku od ove tri kategorije dijeliti na troškove proizvodnje, transporta i instalacije. Što je prikazano na slici ispod.



Slika 18. Shematski prikaz metode proračuna investicijskih troškova [5]

Sljedeći korak je prikupljanje podataka o investicijskim troškovima za svaku od pojedinih kategorija. Najčešće se koriste znanstveni članci i podatci o investicijskim troškovima već završenih projekata. Zatim se svi prikupljeni podatci pretvaraju u istu valutu, u ovom slučaju to će biti euro, te se podatci iz pojedinih godina niveliraju u traženu godinu (u ovom slučaju 2014.) uz pomoć diskontne stope. Zatim se radi linija koja daje prosjek svih prikupljenih podatka koji su razmatrani, a iz te linije se dobiva konačna jednadžba za sve tipove temelja i dijelova vjetroelektrane te ukupni investicijski troškovi za različite dubine vode. Na kraju se dobivaju grafovi na osnovu kojih se radi analiza investicijskih troškova.

Prikupljanje podataka otežano je radi nedostatka objavljenih materijala i zbog toga što dobavljači ovih tehnologija ne žele pustiti te podatke u javnost [5].

4.2 Istraživanje

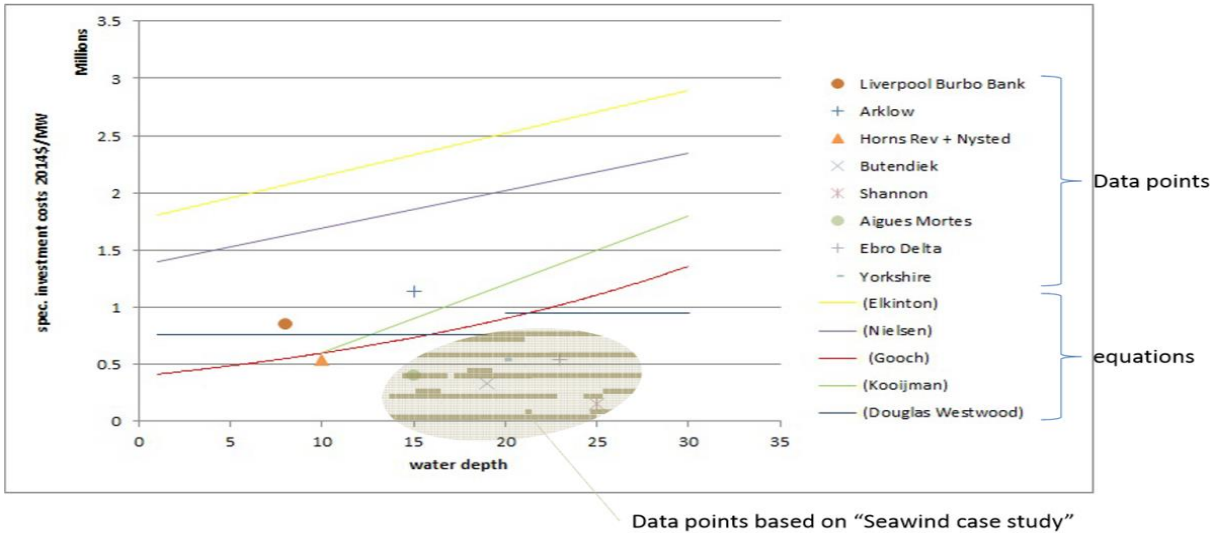
4.2.1 Temelji

Proizvođači temelja i tipovi temelja koje proizvode dani su u sljedećoj tablici. U obzir su uzete 4 vrste temelja za vjetroelektrane na moru, a to su jednostupni, temelji s gravitacijskom betonskom bazom, tronožni i plutajući temelji. Svaki tip temelja se koristi na određenoj dubini vode kako je i navedeno u dijelu rada kada je svaki tip posebno bio opisivan.

Proizvođač	Tip temelja
Ambau	**Tronožni**
Ramboll	**Jednotupni**
Aker Solutions	**Tronožni**
Trianel	**Tronožni, Jednostupni**
C-Power	**Temelji s gravitacijskom betonskom bazom**
Weser Wind	**Tronožni**
Bilfinger Berger	**Jednostupni**
Hochtief Construction	**Temelji s gravitacijskom betonskom bazom**

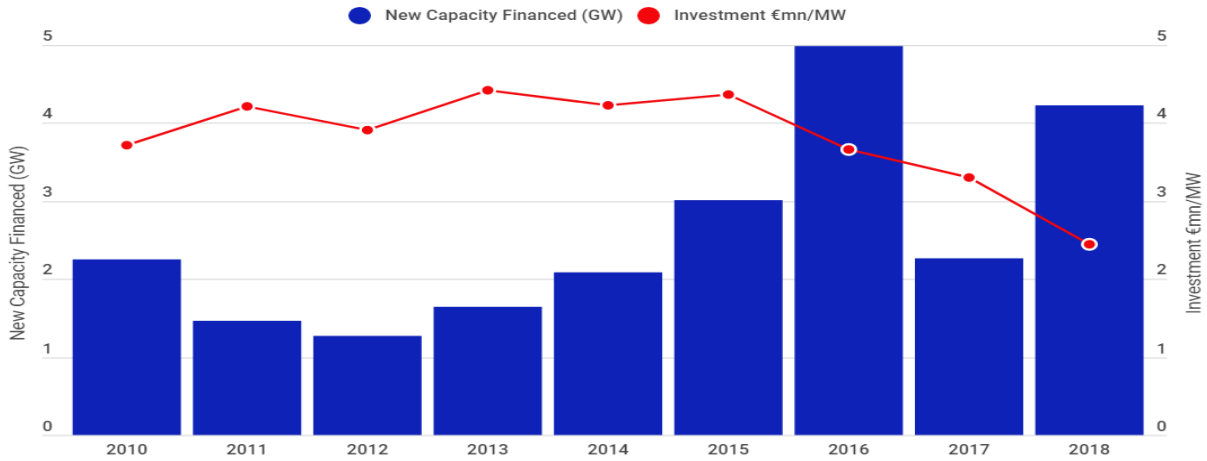
Tablica 1. Proizvođači temelja vjetroelektrana na moru [5]

Na sljedećim slikama vidjet ćemo ovisnost investicijskih troškova o dubini vode za svaki tip temelja posebno. Potrebno je naglasiti da su podatci iz 2014. godine.



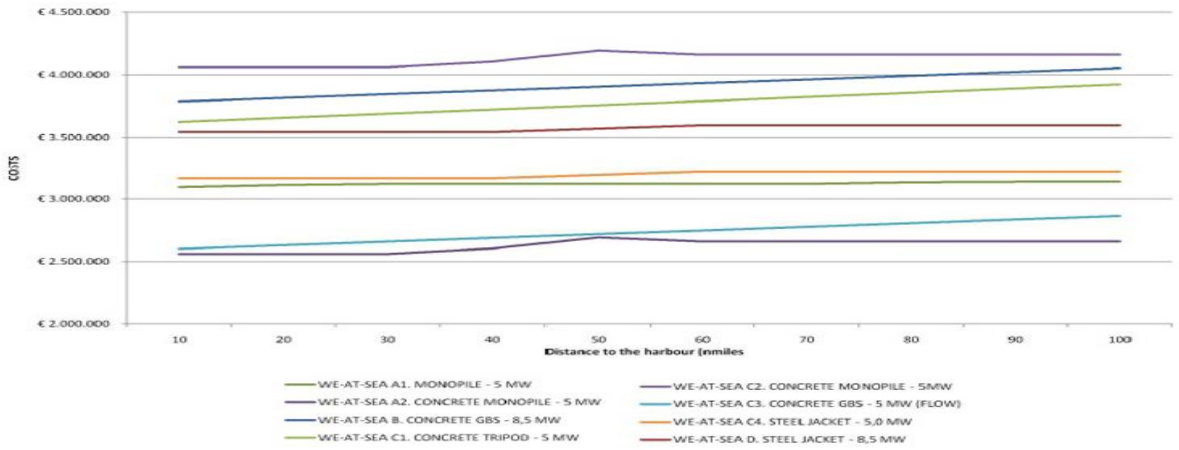
Slika 19. Investicijski troškovi kod jednostupnih temelja u ovisnosti o dubini vode [5]

Na slici je grafički prikazana ovisnost troškova kod jednostupnih temelja. Možemo zaključiti da s povećanjem dubine vode rastu i investicijski troškovi. U različitim projektima investicijski troškovi variraju. Razlog tomu je teren na kojem se vjetroelektrana na moru instalira, tj. koliki troškovi su potrebni da bi se teren osposobio za postavljanje samih temelja, te materijal samih temelja. Ako bi ove troškove usporedili s današnjima možemo zaključiti da su zbog razvoja u tehnologiji, a čemu se i teži, danas ovi troškovi niži. Točni iznosi nisu prikazani, jer su podatci iz 2014. godine. Međutim na sljedećem grafu moguće je vidjeti kako je aktivan trend opadanja cijena investicija u ovom sektoru.



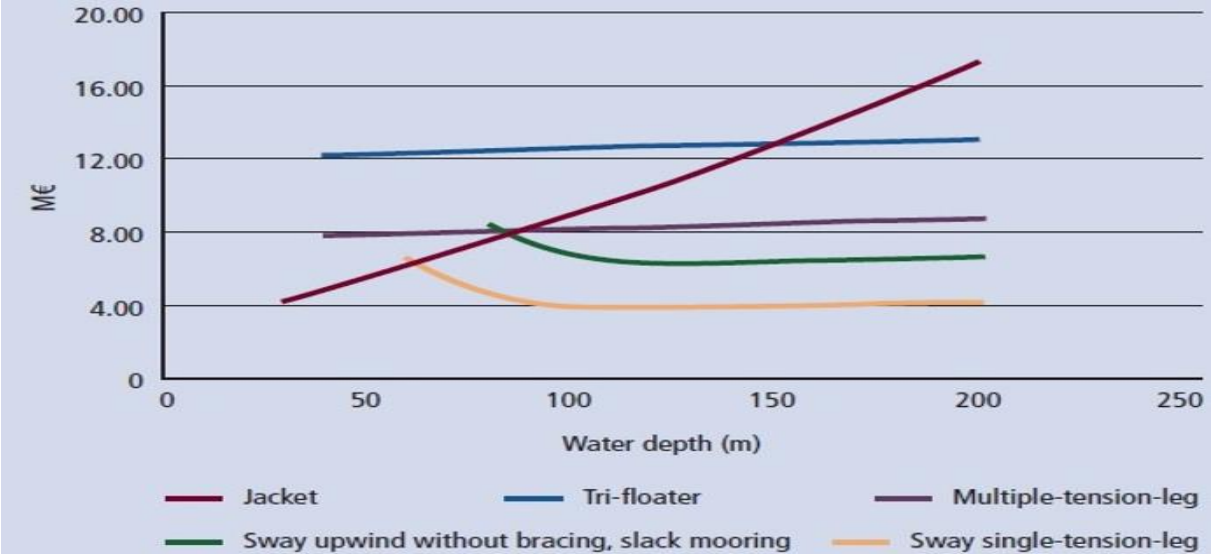
Slika 20. Grafički prikaz trenda opadanja cijene investicija vjetroelektrana na moru [15]

Na sljedećoj slici prikazana je ovisnost troškova investicije kod temelja s gravitacijskom betonskom bazom i tronožnih temelja. Možemo primijetiti da kod ove dvije vrste temelja udaljenost od obale ima manji utjecaj na ukupne investicijske troškove temelja nego kod jednostupnih temelja.



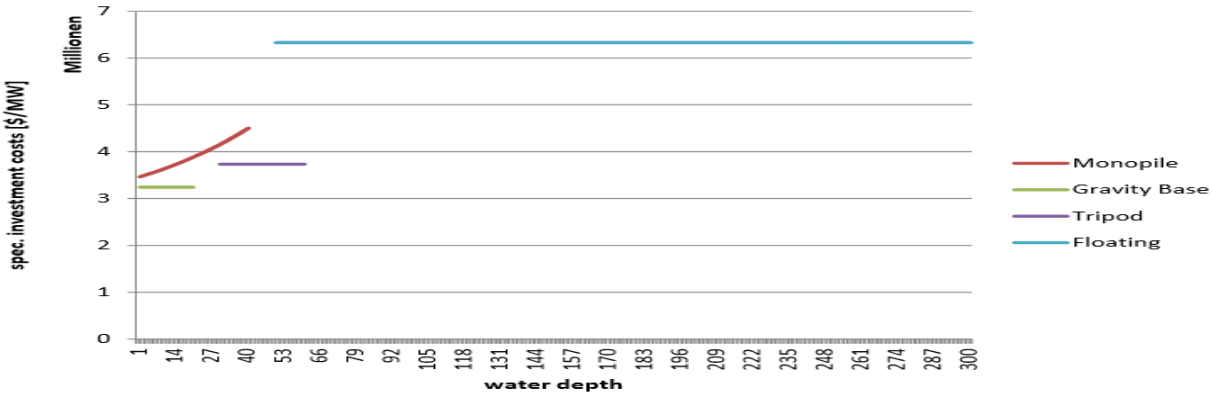
Slika 21.Ovisnost investicijskih troškova o udaljenosti od obale kod temelja s gravitacijskom betonskom bazom i tronožnih temelja [5]

Temelje rešetkaste izvedbe, te plutajuće temelje, i ovisnost njihovih investicijskih troškova prikazat ćemo na sljedećoj slici. Možemo zaključiti da kod rešetkaste izvedbe temelja cijena jako brzo raste u ovisnosti o dubini vode, dok je kod plutajućih temelja to gotovo ravna linija. Upravo ta neovisnost cijene kod plutajućih temelja je i glavna prednost njihove izvedbe.



Slika 22. Usporedba investicijskih troškova u ovisnosti o dubini vode za rešetkaste i plutajuće temelje [5]

Na sljedećoj slici prikazana je ovisnost investicijskih troškova za jednostupne, tronožne, plutajuće i temelje s gravitacijskom betonskom bazom u ovisnosti o dubini mora. Također na slici možemo vidjeti i raspon dubina mora na kojima se koristi pojedina vrsta temelja. Nameće se zaključak da najširi raspon dubina imaju upravu plutajući temelje te se njihov razvoj tj. razvoj tehnologija vezanih za plutajuće temelje smatra krucijalnim za komercijalizaciju tehnologija vjetroelektrana na moru.



Slika 23. Ovisnost investicijskih troškova o dubini vode i raspon dubina na kojima se koriste različite vrste temelja vjetroelektrana na moru [5]

4.2.2 Turbina i električne instalacije

Investicijski troškovi kod turbine su podijeljeni na troškove proizvodnje, transporta i instalacije. Podatci koje ćemo vidjeti u tablici 2. dobiveni su iz dvanaest izvora i prikupljani su iz različitih godina. Neki izvori su imali podijeljene troškove dok su drugi davali ukupne investicijske troškove. Vrijednosti se odnose na turbine nazivne snage 3 MW, ali su računate na bazi jednog MW. Prosječna visina ulaganja u turbine kod vjetroelektrana na moru iznosi 1.5 mil. €/MW.

Izvor	**Ukupni investicijski troškovi za turbinu (€)**
M. Dicorato	3 732 759,6
Gooch	2 588 849,2
EWEA	3 049 083,3
Douglas-Westwood	5 802 035,6
Ernst & Young	6 586 482,5
Nikolaos	6 483 459,9
Risoe DTU	3 184 763,9
Roland Berger	4 621 982,1
NREL	4 927 793,3

Tablica 2. Podatci za ukupne investicijske troškove za turbinu iz različitih izvora [5]

Troškovi električnih instalacija se također dijele na troškove proizvodnje, transporta i instalacije. Potrebni su međuturbinski kablovi te oni transmisijski kako bi se vjetroelektranu na moru povezalo s mrežom. Međuturbinski kablovi povezuju turbine na moru međusobno jednu s drugom i imaju površinu poprečnog presjeka između 240 i 630 mm^2, dok transmisijski kablovi imaju površinu poprečnog presjeka 1600 mm^2 i povezuju trafostanice jedne s drugima. Cijene ovih kablova su jako ovisne o cijeni bakra na tržištu. U sljedećim tablicama vidjet ćemo cijene kablova te ostalih električnih instalacija kod vjetroelektrana na moru.

Električni kablovi	**Investicijski troškovi**	**Izvor**	**Godina prikupljanja podataka**
Međuturbinski kablovi 240 mm^2	208 735 €/Km	Douglas-Westwood	2009
Međuturbinski kablovi 630 mm^2	566 567€/Km	Douglas-Westwood	2009
Međuturbinski kablovi	320 730 €/Km	Myhr	2013
Međuturbinski kablovi	146 610 €/Km	Nikolaos	2004
Međuturbinski kablovi	596 386 €/Km	NREL	2006
Međuturbinski kablovi	525 629 €/Km	DTI	2007
Transmisijski kablovi 1600 mm^2	492 019 €/Km	Douglas-Westwood	2009
Transmisijski HVDC kablovi	505 635 €/Km	Myhr	2013
Transmisijski kablovi	660 405 €/Km	Nikolaos	2004
Transmisijski kablovi	815 061 €/Km	NREL	2006

Tablica 3. Investicijski troškovi za električne kablove [5]

Osim kablova, potrebna je i druga električna oprema. Ovisno o ukupnom kapacitetu, jedna trafostanica na moru po vjetroelektrani je dovoljna. U tablici 4. možemo vidjeti cijene trafostanica.

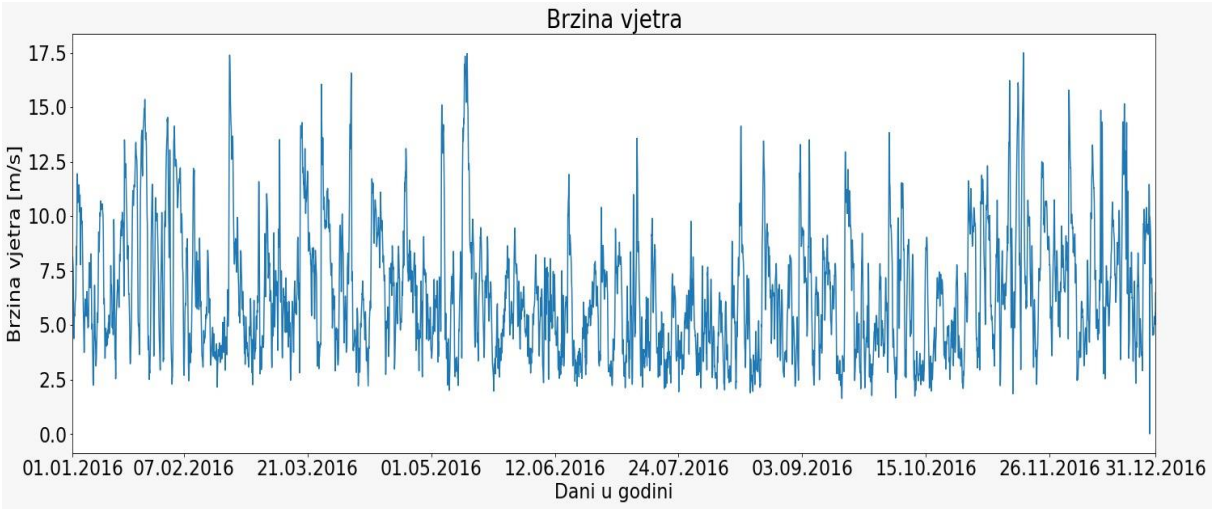
Oprema električne infrastrukture	**Investicijski troškovi**	**Izvor**	**Godina prikupljanja podataka**
Trafostanica na moru	39 624 €/MW	Nikolaos	2004
Trafostanica na moru	13 916 €/MW	NREL	2006
Trafostanica na moru	289 247 €/MW	Douglas-Westwood	2009
Trafostanica na moru	336 941 €/MW	Myhr	2013
Trafostanica na kopnu	9 940 €/MW	NREL	2006
Vjetroturbinski transformator	50 196 €/WT	NREL	2006

Tablica 4. Cijene dodatne električne opreme kod vjetroelektrana na moru [5]

Mogući su trendovi povećanja cijena s novijim podatcima. Stvar je u korištenju novih materijala u proizvodnji trafostanica što igra najveću ulogu u cijeni [5].

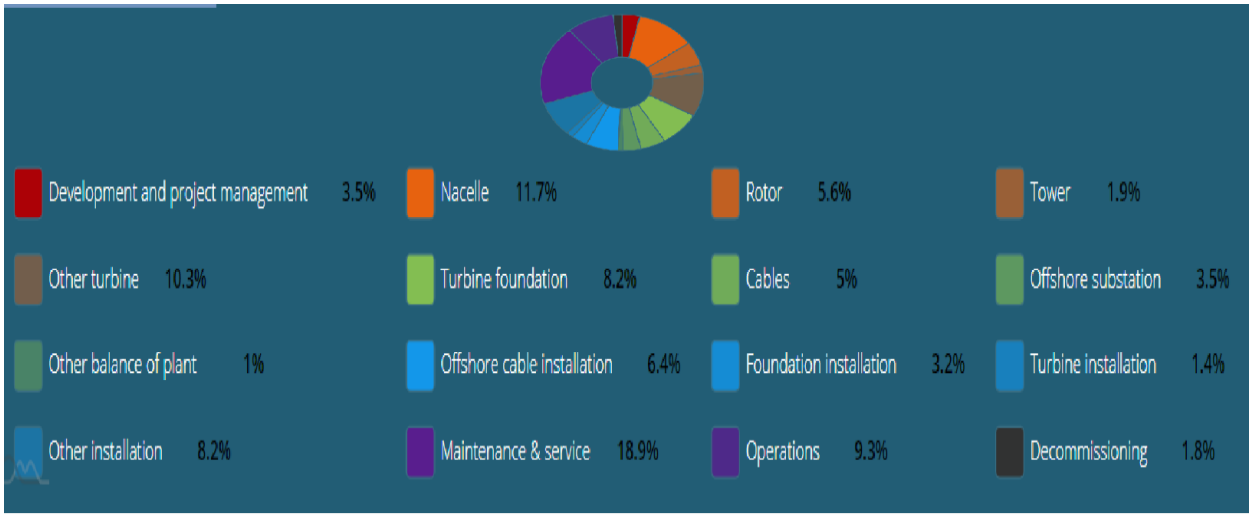
5.Tehno-ekonomska analiza potencijalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu

Na slici 25. vidimo brzine vjetra mjerene na platformi u sjevernom Jadranu, koje zadovoljavaju inicijalni uvjet prosječne brzine veće od 3 m/s. Stoga ovu lokaciju uzimamo kao onu na kojoj ćemo graditi potencijalnu vjetroelektranu na moru.



Slika 24. Brzina vjetra na mjernoj točki u sjevernom Jadranu

Kada govorimo o raspodjeli troškova kod izgradnje vjetroelektrane na moru, najveći dio otpada na samu turbinu točnije između 35-40 %. Troškovi uključuju one vezane za gondolu, rotor, toranj te troškove osiguranja, postavljanja i garancije. To možemo vidjeti na slici 25.



Slika 25. Raspodjela troškova kod izgradnje vjetroelektrane na moru [16]

Upravo zbog toga ćemo usporediti dvije vrste turbina od proizvođača Vestas-a. Modeli koje ćemo uspoređivati bit će Vestas V164-8.0 i Vestas V112 Offshore.

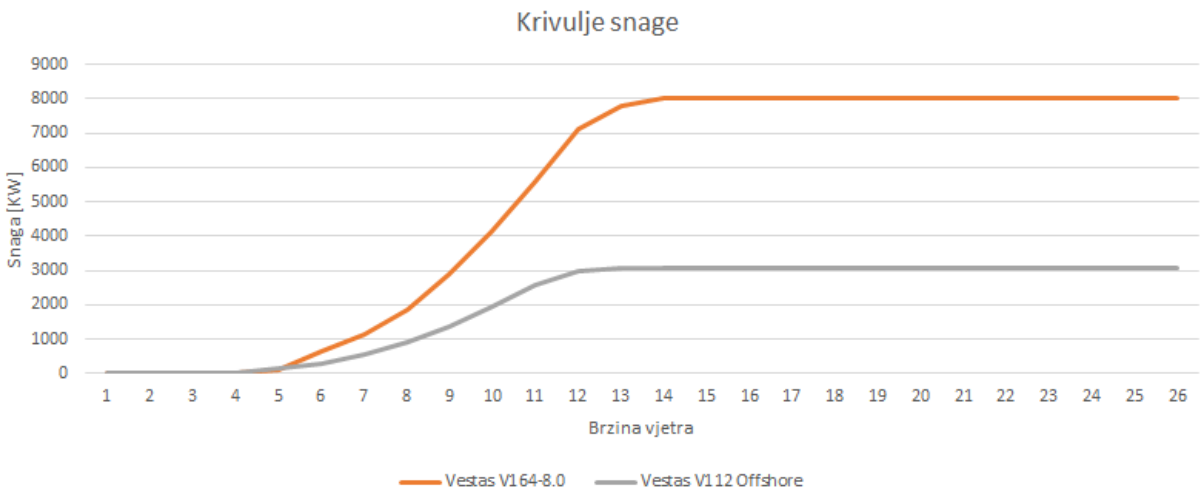
5.1 Vestas V164-8.0

Nazivna snaga ove turbine je 8 MW, dok je brzina vjetra kod koje se sama turbina uključuje 4 m/s. Brzina kod koje postiže nazivnu snagu iznosi 13 m/s, a brzina kod koje se isključuje je 25 m/s. Najveća brzina vjetra koju turbina može sigurno podnijeti je 50 m/s. Rotor se sastoji od 3 lopatice čiji je promjer 164m, i maksimalna brzina vrtnje mu je 12,1 okretaja/min. Težina jedne lopatice iznosi 35 t, a težina gondole je 375 t [17].

5.2 Vestas V112 Offshore

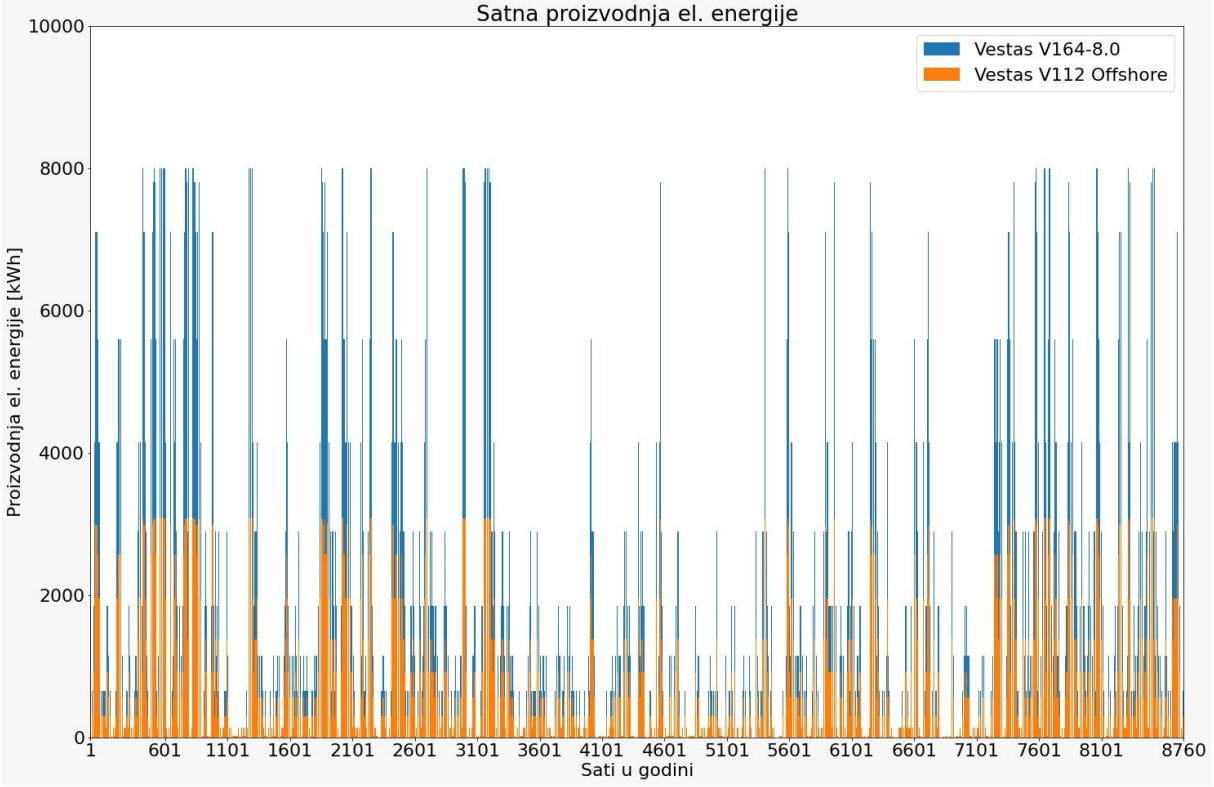
Nazivna snaga ove turbine je 3 MW, brzina kod koje se turbina uključuje je 3 m/s a brzina kod koje se postiže nazivna snaga je 12 m/s. Turbina se isključuje pri brzini vjetra od 25 m/s. Rotor se također sastoji od 3 lopatice čiji je promjer 112 m, a maksimalna brzina vrtnje je 17,7 okretaja/min [18].

5.3 Usporedba dviju promatranih turbina



Slika 26. Graf krivulja snage dviju uspoređivanih turbina

Na slici 26. možemo vidjeti krivulje snage za dvije promatrane turbine proizvođača Vestas-a, dok na slici 27. možemo vidjeti satnu proizvodnju tokom godine za pojedinu turbinu u KWh.



Slika 27. Graf satne proizvodnje dviju promatranih turbina u 2016. godini

Ako uzmemo kao relevantnu brzinu vjetra onu iz 2016. godine, te zbrojimo sve satne iznose proizvodnje doći ćemo do sljedećih iznosa. Turbina Vestas V164-8.0 godišnje bi proizvodila 15 661,9 MWh električne energije, dok bi turbina Vestas V112 Offshore u istom periodu proizvodila 7 141,3 MWh električne energije. Budući da se mjerno mjesto s kojega smo i dobili podatke o brzini vjetra nalazi u sjevernom Jadranu, uzmimo u obzir i potrošače u sjevernom Jadranu. Područje otoka Cresa i Lošinja godišnje troši 59665 MWh električne energije [19], što znači da bi se to područje moglo opskrbiti električnom energijom koju bi proizvodilo 5 Vestas V164-8.0 turbina ili 10 Vestas V112 Offshore turbina. Postrojenje sa 5 turbina nema smisla budući da nam je u cilju što više iskoristiti lokaciju, pa ćemo stoga u proračunu isplativosti samog projekta promatrati postrojenje s 10 Vestas V164-8.0 turbina.

5.4 Analiza isplativosti vjetroelektrane na moru u sjevernom Jadranu

Analizu isplativosti radit ćemo s podacima korištenim u prethodnim poglavljima rada, a isplativost ćemo vrednovati internom stopom prinosa tzv. IRR-om. Valja napomenuti da je podatke o cijenama pojedinih dijelova vjetroelektrane na moru jako teško pronaći, što je sigurno utjecalo na preciznost same analize. Međutim, ona će sigurno biti dobar pokazatelj u kojem bi smjeru razvoj ovakvih projekata trebao ići.

5.4.1 Ulazni podaci

Ulazni podatak	**Vrijednost**	**Jedinica**
Broj instaliranih turbina	10	
Snaga pojedine instalirane turbine	8	MW
Kapacitet proizvodnje el. energije turbine	15 661,9	MWh
Vijek trajanja (godina)	27	

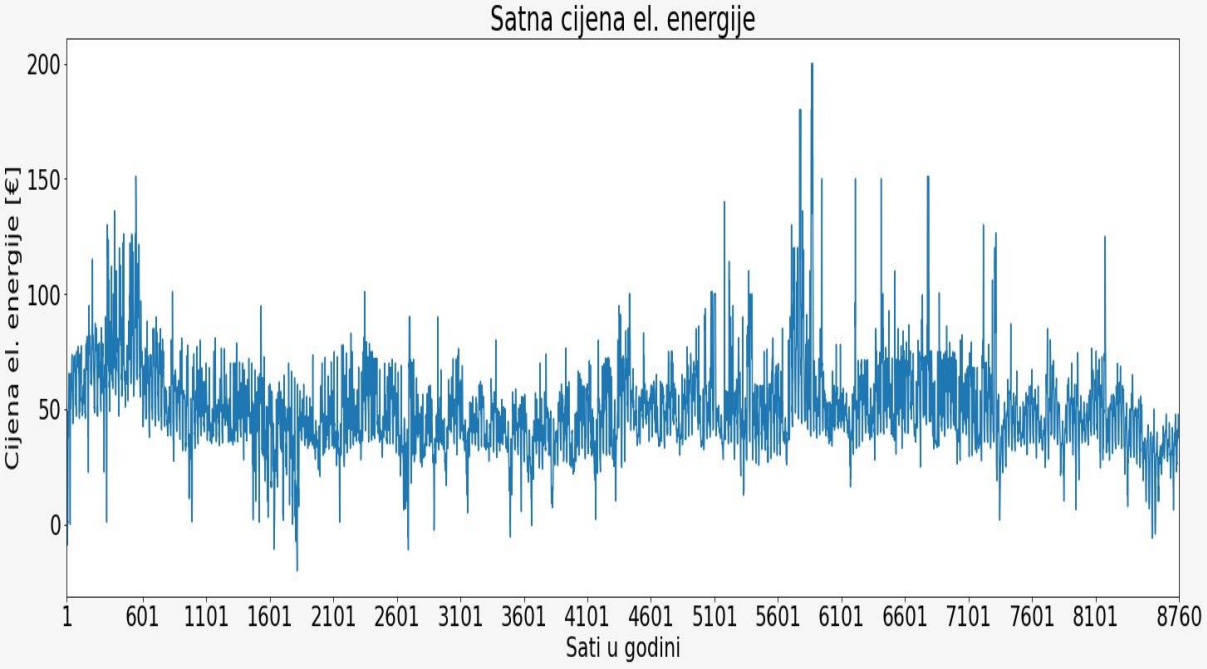
Tablica 5. Podaci o postrojenju

Od gornjih podataka izračunata je instalirana snaga postrojenja od 80 MW, a također i ukupni kapacitet proizvodnje svih 10 turbina koji iznosi 156 619 MWh godišnje. Kapacitet proizvodnje el. energije turbine dobiven je kao zbroj satnih proizvodnji sa slike 27.

Ulazni podatak	**Vrijednost**	**Jedinica**
Razvoj i upravljanje projektima	120 000	€/MW
Turbina	1 000 000	€/MW
Popratne strukture postrojenja	600 000	€/MW
Ugradnja i puštanje u rad	650 000	€/MW
Rad i održavanje (ukupno)	1 000 000	€/godišnje
Prihod od prodaje el. energije na tržištu za jednu turbinu	768 359,8	€/godišnje

Tablica 6. Podaci o troškovima i prihodima [16]

Iz podataka o cijenama izračunata je visina ukupne investicije od 189 600 000 €, od čega na opremu otpada 128 000 000 €, na instalaciju 52 000 000 € i na savjetovanje 9 600 000 €. Godišnje se na održavanje troši 1 000 000 €, dok su prihodi od prodaje el. energije na godišnjoj razini 7 683 598 €. Prodajna cijena el. energije zbroj je umnoška satne proizvodnje na slici 27. i satne cijene el. energije preuzete s CROPEX-a na slici 28.



Slika 28. Satna cijena el. energije

Ulazni podatak	**Vrijednost**
Diskontna stopa	9%
Porez na dobit	25%
Udio privatnog kapitala	40%
Kamata	5,3%
Vrijeme trajanja kredita (godina)	15
Amortizacije	
Oprema (u godinama)	15
Instalacija (u godinama)	20
Savjetovanje (u godinama)	5

Tablica 7. Ekonomski podaci

Od ukupne investicije koja je iznosila 189 600 000 €, privatni kapital iznosi 75 840 000 € dok će se ostatak projekta financirati kreditnim zaduživanjem od 113 760 000 € po kamatnoj stopi od 5,3 % na 15 godina. Anuitet ovoga kredita iznosi 11 183 262,8 €. Plan otplate kredita, kao i izračunate vrijednosti porezne osnovice i poreza na dobit vidljivi su u tablici 8. koja prikazuje financijski tok novca. Porez na dobit korišten je u ekonomskom toku novca, prikazanom u tablici 9.,a za izračun neto dobiti, koja je pak korištena za izračun IRR-a i NPV-a.

Godina	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Glavnica (€)		5.153.983	5.427.144	5.714.782	6.017.666	6.336.602	6.672.442	7.026.082	7.398.464	7.790.582	8.203.483	8.638.268	9.096.096	9.578.189
Kamata (€)		6.029.280	5.756.119	5.468.480	5.165.597	4.846.661	4.510.821	4.157.181	3.784.799	3.392.680	2.979.779	2.544.995	2.087.167	1.605.073
Rata (€)		11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263	11.183.263
Ukupni prihodi (€)		7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598
Rad, održavanje i osiguranje		- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000
Predviđeni gubitci (€)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bruto prihod (€)		6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598
Oprema		- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333	- 8.533.333
Instalacija		- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000
Savjetovanje		- 1.920.000	- 1.920.000	- 1.920.000	- 1.920.000	- 1.920.000								
Porezna osnovica (€)		12.399.015	12.125.854	11.838.216	11.535.332	11.216.396	8.960.556	8.606.917	8.234.534	7.842.416	7.429.515	6.994.730	6.536.902	6.054.809
Porez na dobit (€)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dobit nakon oporezivanja (€)		- 23.582.278	- 23.309.117	- 23.021.478	- 22.718.595	- 22.399.659	- 20.143.819	- 19.790.179	- 19.417.797	- 19.025.678	- 18.612.777	- 18.177.993	- 17.720.165	- 17.238.072

Godina	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Glavnica (€)	10.085.833	10.620.382												
Kamata (€)	1.097.429	562.880												
Rata (€)	11.183.263	11.183.263												
Ukupni prihodi (€)	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598
Rad, održavanje i osiguranje	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000
Predviđeni gubitci (€)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bruto prihod (€)	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598
Oprema	- 8.533.333	- 8.533.333												
Instalacija	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000	- 2.600.000							
Savjetovanje														
Porezna osnovica (€)	- 5.547.165	- 5.012.616	4.083.598	4.083.598	4.083.598	4.083.598	4.083.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598
Porez na dobit (€)	-	-	1.020.900	1.020.900	1.020.900	1.020.900	1.020.900	1.670.900	1.670.900	1.670.900	1.670.900	1.670.900	1.670.900	1.670.900
Dobit nakon oporezivanja (€)	- 16.730.428	- 16.195.878	3.062.699	3.062.699	3.062.699	3.062.699	3.062.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699

Tablica 8. Financijski tok novca

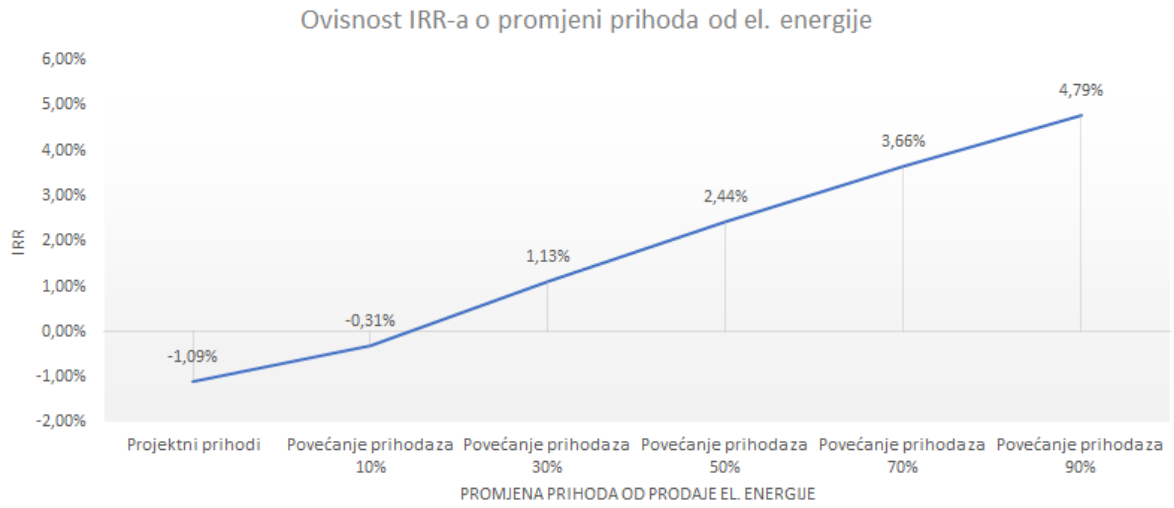
Godina	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Investicija (€)	189.600.000													
Prihodi		7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598
Rashodi		- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000
Bruto dobit (€)		6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598
Neto dobit (€)	- 189.600.000	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598
Godina	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Investicija (€)														
Prihodi	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598	7.683.598
Rashodi	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000
Bruto dobit (€)	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598	6.683.598
Neto dobit (€)	6.683.598	6.683.598	5.662.699	5.662.699	5.662.699	5.662.699	5.662.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699	5.012.699

Tablica 9. Ekonomski tok novca

Iz ekonomskom toka novca, vidljivog na tablici 9.., dolazimo do vrijednosti NPV-a od -125 177 070,4 € i IRR-a od -1,086 % iz čega možemo zaključiti da je ovako financiran projekt dugoročno neisplativ. Kroz analizu osjetljivosti vidjet ćemo kako i u kojim uvjetima projekt ulazi u sferu isplativog.

5.4.2 Analiza osjetljivosti

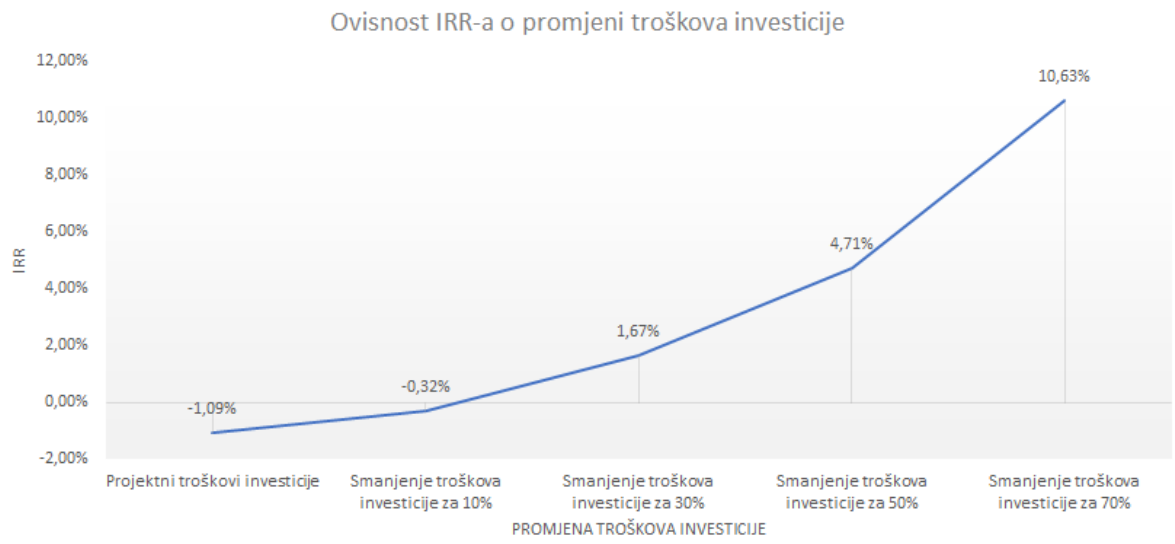
Prema izvješću IEA-a (International energy agency) o cijenama el. energije, u sljedećih 10 do 15 godina očekuje se znatan pad cijena vjetroelektrana na moru [21]. U izvješću je rečeno da će do 2030. pad cijena biti 40 %, uz mogućnost dodatnog pada uslijed razvoja tehnologije. Upravo u tom smjeru će i analiza osjetljivosti pokušati prikazati što se događa s isplativosti projekta ukoliko pretpostavimo rast cijena el. energije, te paralelni pad cijena investicije. Pad cijena investicije parametar je kojeg bi razvojem tržišta i povećanjem ponude samo tržište trebalo omogućiti. Pored ta dva parametra, razvoj samih tehnologija kod vjetroelektrana na moru od iznimne je važnosti jer bi nam trebao omogućiti produljenje životnog vijeka vjetroelektrana na moru. Trenutni životni vijek vjetroelektrana na moru je oko 25 godina.



Slika 29. Ovisnost IRR-a o promjeni prihoda od el. energije

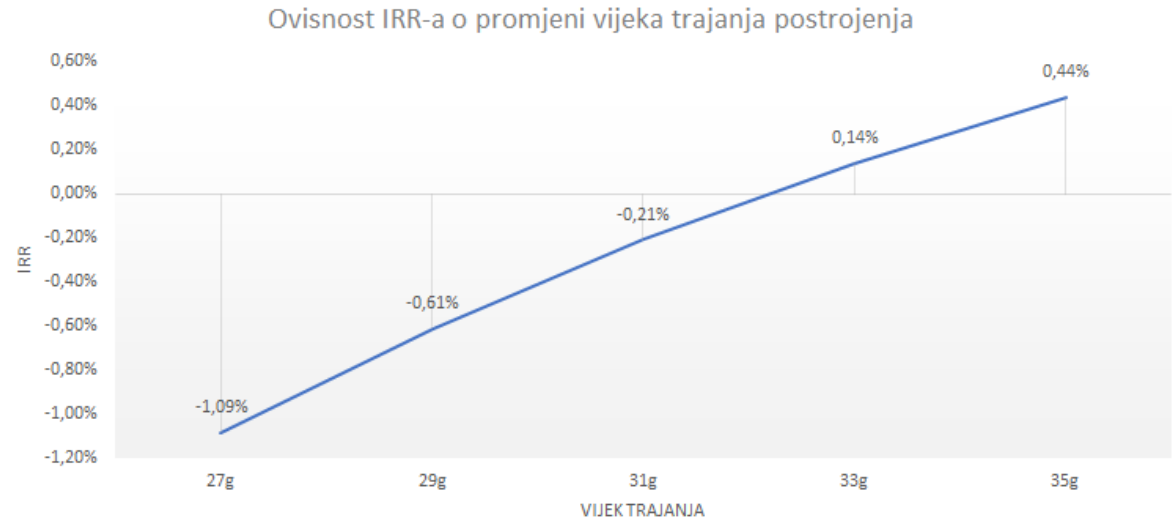
Na slici 29. vidimo ovisnost IRR-a o promjeni prihoda od el. energije . Iz grafa je vidljivo da se IRR rastom prihoda linearno povećava, dok se osjetnije povećanje vidi kod smanjenja troškova investicije, što je prikazano na slici 30.. Ako bi dakle tržište omogućilo povećanje prihoda od el. energije do 50 %, a njegovo širenje uzrokovalo očekivani pad troškova investicije od 50 % vrijednost IRR-a bi bila 9,821% , što je uzeći u obzir moguća odstupanja

u prihodima i troškovima jako blizu diskontne stope od 9% što bi ovaj projekt, i slične njemu, učinilo isplativima.



Slika 30. Ovisnost IRR-a o promjeni cijene investicije

Dodatno povećanje isplativosti bilo bi uzrokovano razvojem tehnologija vezanih za vjetroelektrane na moru koje bi za rezultat imale produljenje vijeka trajanja samih vjetroelektrana. Ovisnost IRR-a o produljenju vijeka trajanja postrojenja prikazana je na slici 31.



Slika 31. Ovisnost IRR-a o vijeku trajanja postrojenja

Sa slika 29., 30. i 31. vidljivo je da najveći utjecaj na isplativost projekta ima smanjenje troškova investicije, stoga možemo biti sigurni da će razvojem tržišta vjetroelektrana na moru i njegovim širenjem isplativost ove vrste projekata biti sve veća.

ZAKLJUČAK

U vidu globalne energetske tranzicije, i globalnog energetskog razvoja koji teži obnovljivim izvorima energije, vjetroelektrane na moru, kao najbrže razvijajuća tehnologija, polako ali sigurno postaju sve bitniji faktor na energetskom tržištu. Uzeti u obzir, još uvijek, nedovoljnu razvijenost tržišta ovakvih tehnologija smatram da će vjetroelektrane na moru postati jedan od vodećih svjetskih opskrbljivača električnom energijom. Pozitivni trendovi širenja tržišta te posljedično opadanje cijena investicija projekata vjetroelektrana na moru, siguran su pokazatelj kretanja energetske tranzicije u tome smjeru. Budući da se nalazimo u trenutku kada je svijetu potreban energetski zaokret u proizvodnji energije, vjetroelektrane na moru uz druge tehnologije obnovljivih izvora nude nam mogućnost istoga. Republika Hrvatska će, ukoliko želi biti energetski neovisna, svoja ulaganja u obnovljive izvore energije i njihova istraživanja morati znatno povećati. Gledajući razvijenost naše obale vjetroelektrane na moru nude se kao logično rješenje za kojim bi se trebalo posegnuti. Razvoj ovoga tržišta je neminovan, pa bi i Hrvatska unatoč nešto slabijoj financijskoj moći trebala imati priliku postati relevantan faktor u čitavoj toj priči. To bi dalo šansu zapošljavanju novih ljudi, uključilo bi nas u sve potrebniju energetsku tranziciju i gurnulo korak bliže energetskoj neovisnosti, a to je cilj kojemu moramo težiti. Tehno-ekonomskom analizom pokazano je da su ovakvi projekti još uvijek neisplativi, ali da bi isto tako, uzimajući u obzir očekivane promjene na tržištu, vrlo brzo trebali postati vrlo isplativi i donositi trajnu dobit. Najveći problem ove nove tehnologije je upravo njena cijena, a njenim padom vrata energetskoj tranziciji sa vjetroelektranama na moru kao jednom od vodećih tehnologija bit će širom otvorena.

LITERATURA

[1] International Energy Agency, IEA, (2019), Offshore wind Outlook 2019

[2] Mehmet, A. et al., (2018), Exploring the Offshore Wind Energy Potential of Turkey based on Multi-criteria Site Selection. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/329714363_Exploring_the_offshore_wind_energy_potential_of_Turkey_based_on_multi-criteria_site_selection [15.1.2020.]

[3] Petrini,F.,Li,H. i Bontempi,F.,(2010), Basis of design and numerical modeling of offshore wind turbines. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/234071589_Basis_of_design_and_numerical_modeling_of_offshore_wind_turbines [16.1.2020.]

[4] Jianhua,Z., Issa,F. i Ke,S., (2016), A GLANCE AT OFFSHORE WIND TURBINE FOUNDATION STRUCTURES. Dostupno na: https://hrcak.srce.hr/159863 [22.1.2020.]

[5] Rosenauer,E., (2014), Investment costs of offshore wind turbines. Dostupno na: http://css.umich.edu/sites/default/files/css_doc/CSS14-27.pdf [27.1.2020.]

[6] Joy,C.M., Joseph,A. i Mangal,L., (2019), An Overview of Offshore Wind Energy Tower Designs. Dostupno na: https://link.springer.com/article/10.1007/s40032-019-00511-3 [7.2.2020.]

[7] Arshad,M., O'Kelly, B.C. (2015), Analysis and design of monopile foundations for offshore wind-turbine structures. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/309174077_Analysis_and_design_of_monopile_foundations_for_offshore_wind-turbine_structures/figures?lo=1 [18.1.2020.]

[8] Weston,D., (2014), First Gemini monopiles arrive in Netherlands. Dostupno na: https://www.windpowermonthly.com/article/1305728/first-gemini-monopiles-arrive-netherlands [19.1.2020]

[9] http://www.anglersforoffshorewind.org/blog/offshore-wind-in-the-new-york-bight [19.1.2020]

[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Tripod_(foundation) [7.2.2020]

[11] https://www.offshore-stiftung.de/en/foundations [8.2.2020]

[12] https://www.energy.gov/eere/wind/articles/demonstration-projects-feature-innovative-offshore-wind-technologies [9.2.2020]

[13] http://www.dagensbyggeri.dk/artikel/28271-nye-fundamenter-kan-hjaelpe-fremtidens-havvindmolleparker [9.2.2020]

[14] https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine [10.2.2020]

[15] Weston,D., (2014), Europe's offshore wind costs falling steeply. Dostupno na: https://www.windpowermonthly.com/article/1525362/europes-offshore-wind-costs-falling-steeply [11.2.2020]

[16] https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs [15.7.2020]

[17] https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0 [25.7.2020]

[18] https://en.wind-turbine-models.com/turbines/667-vestas-v112-offshore [25.7.2020]

[19] https://euislands.eu/sites/default/files/2019-11/CRESLOSINJ_FinalTransitionAgenda_20191118.pdf?fbclid=IwAR3M31D7zMBPhUzNqt_-XBPY11hD5yEtsJIEeisQ2E_LcaOr1KTB0LQGflI [8.8.2020]

[20] https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:823113/FULLTEXT01.pdf [9.8.2020]

[21] http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf [12.9.2020]