

Parametarska analiza temeljenja pučinskih vjetroelektrana na sjevernom Jadranu primjenom sustava monopilota

Mario Bačić¹, Leon Kučinić², Meho Saša Kovačević¹

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb

²Infraplan Consulting, Nova cesta 109, Zagreb

Sažetak: U skladu s globalnim trendovima, gdje se izgradnja vjetroelektrana u velikoj mjeri premješta s kopna na pučinu, ovaj rad istražuje mogućnosti temeljenja vjetroelektrana na području sjevernog Jadrana, s fokusom na primjenu monopilota kao odabranog sustava dubokog temeljenja. Za odabranu lokaciju izračunat će se karakteristična opterećenja uzrokovana vlastitom težinom, vjetrom i valovima, dok će se geotehnički profil tla formirati na temelju rezultata istražnog bušenja, laboratorijskih ispitivanja i CPT ispitivanja, provedenih na lokaciji plinske platforme. Rezultati analize obuhvaćaju procjenu vertikalnih i bočnih pomaka, momenata savijanja te posmičnih sila monopilota. Ova analiza omogućit će evaluaciju odgovora vjetroturbina na različita opterećenja i uvjete tla, uz identifikaciju ključnih parametara tla koji najviše utječu na ponašanje monopilota kao izabranog sustava temeljenja. Navedena analiza ujedno će ilustrirati jednu od ključnih uloga geotehnike u podršci energetske tranziciji, posebno kroz razvoj održivih i pouzdanih sustava temeljenja za konstrukcije obnovljivih izvora energije.

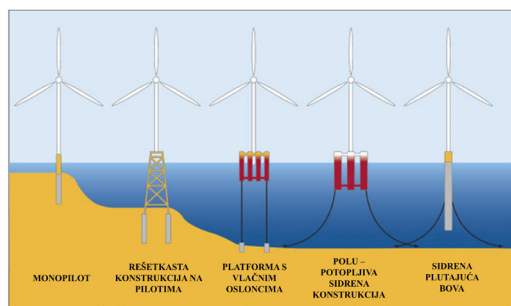
Ključne riječi: pučinska vjetroelektrana, temeljenje, monopilot, sjeverni Jadran

1. Uvod

Građevinarstvo ima važnu ulogu u energetske tranziciji, procesu koji ima za cilj smanjenje emisije stakleničkih plinova, povećanje energetske učinkovitosti i postizanje održivijeg razvoja društva. Među infrastrukturnim projektima koji doprinose ostvarivanju ovih ciljeva, vjetroelektrane zauzimaju značajno mjesto. One se mogu graditi na kopnu, ali i na moru, gdje prednosti vjetra čine pučinske vjetroelektrane vrlo učinkovitim rješenjem. Postojani vjetrovi na moru, uz mogućnost instaliranja većih vjetroturbina, smanjuju potrebu za opsežnom kopnenom infrastrukturom i mini-

miziraju negativan utjecaj na okoliš [1]. Energija vjetra s mora nudi nekoliko ključnih prednosti u odnosu na konvencionalne izvore energije. Za razliku od fosilnih goriva, energija vjetra je obnovljiva, neiscrpna i ekološki prihvatljiva. Osim toga, pučinske vjetroelektrane imaju veći kapacitet i manju varijabilnost u proizvodnji energije u odnosu na druge oblike obnovljivih izvora, što ih čini konkurentnim alternativama tradicionalnim izvorima energije. Globalni potencijal energije vjetra na moru je ogroman, s procjenama koje sugeriraju da bi mogao zadovoljiti čak 35 % svih svjetskih energetske potrebe [2]. S obzirom na rast tržišta pučinske energije vjetra od 13 % godišnje, predviđa se da će do 2040. godine ova industrija dostići vrijednost od 1 trilijun dolara [3], što zahtijeva velika ulaganja.

Pučinske vjetroturbine (engl. *Offshore Wind Turbine*, OWT) predstavljaju složene sustave koji se sastoje od nekoliko ključnih komponenata, koje zajedno omogućuju pretvorbu energije vjetra u električnu energiju. Osnovni dijelovi uključuju temeljeni sustav, toranj koji se uzdiže iznad razine mora, kućište na vrhu tornja u kojem se nalaze ključni elementi poput glavne osovine, prijenosnika i generatora koji pretvaraju kinetičku energiju vjetra u električnu energiju te glavčine s lopaticama. Pučinske vjetroturbine se razlikuju od onih na kopnu, prvenstveno u dizajnu te izazovima tijekom izvedbe i tijekom rada. Naime, pučinske vjetroturbine su obično veće, a njihova ugradnja je složenija zbog potrebe da se učvrste na morskom dnu ili da se koriste plutajuće platforme, ovisno o dubini vode. Također, ove vjetroturbine moraju podnijeti teže uvjete na moru, uključujući jake struje i valove, što čini temelje bitnim dijelom ukupnih troškova, prema nekim izvorima gotovo trećinu cijelog projekta pučinskih vjetroturbina [4]. Postoji nekoliko opcija za temeljenje pučinskih vjetroturbina, koje se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije: sustave s fiksnim potporama (kao što su pilot i četveronožno rešetkasto sidrište) i plutajuće sustave (poput platformi s napetim nogama, šupljih bova i polupotopljivih platformi). Ovi sustavi pričvršćuju vjetroturbine za morsko dno, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1: Vrste temeljenja pučinske vjetroturbine, modificirano iz [5]

Ovaj rad analizira sustav fiksnog temeljenja korištenjem monopilota. Piloti su vrsta dubokih temelja koji se buše ili zabijaju u tlo kako bi prenijeli opterećenje na dublje slojeve tla, te koji prenose opterećenje trenjem po plaštu ili otpornosti na bazi pilota. Monopiloti su cjevasti piloti većeg promjera koji se zabijaju u morsko dno kako bi osigurali stabilnost vjetroturbine. Tipični promjeri pilota kreću se od 3 do 7 metara, dok veće varijante, tzv. XL piloti, mogu doseći promjer i do 10 metara. Debljina stijenke pilota može biti do 150 mm, ovisno o projektnim zahtjevima. Dubina zabijanja u morsko dno varira ovisno o opterećenju i karakteristikama temeljnog tla. Čelična cijev kao prijelazni dio, spaja monopilot s tornjem vjetroturbine. Monopiloti se obično koriste u morima dubine od 30 do 35 metara, iako se mogu prilagoditi za veće dubine, čak do 60 metara, ovisno o specifičnostima projekta [6, 7]. Iako se smatra da će XXL monopiloti dosegnuti dubine i do 100 m, važno je posvetiti posebnu pažnju problemima poput izbočavanja vrha monopilota, rukovanja monopilotima, transporta i skladištenja, što može povećati troškove. Rešetkaste konstrukcije na više pilota manjeg promjera su trenutno najfleksibilniji tip temeljenja za srednje dubine (50-80 metara), dok plutajuće platforme postaju konkurentne u tim dubinama, a također su trenutno prvi izbor za dublja mora (> 90 metara). Jednostavnost u projektiranju, izradi i ugradnji, u kombinaciji s visokom učinkovitošću, čine monopilote preferiranim izborom za većinu projekata pučinskih vjetroelektrana, pa čak 60 % svih vjetroelektrana na svijetu koristi ovaj tip temeljenja [8], Slika 2.

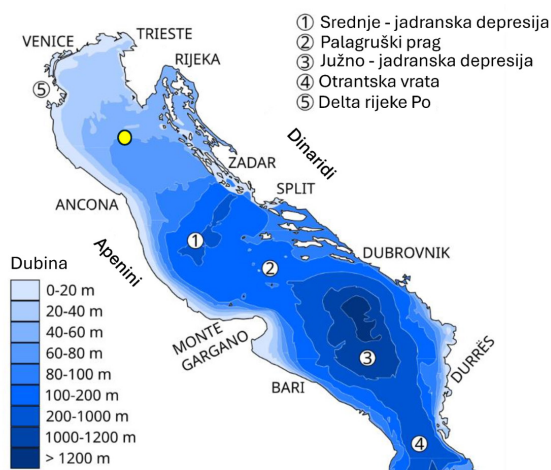


Slika 2: XL monopilot za temeljenje vjetroturbine [9] te neki primjeri izvedbe monopilota [10, 11]

Pri tome treba naglasiti da je Republika Hrvatske zabranila izgradnju kopnenih vjetroturbina na hrvatskim otocima općenito, kao i na kopnu u području unutar 1000 m od Jadranske obale (*Odluka o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog morskog područja* iz 2004. godine), što je još jedna motivacija za analizu pučinskih vjetroelektrana u hrvatskom dijelu Jadranskog mora [12]. Ovaj rad kroz analize osjetljivosti ispituje utjecaj parametara tla na ponašanje odabranog temelja monopilota, uzimajući u obzir karakteristična opterećenja koja djeluju na temelje vjetroturbina. Fokus je na specifičnoj lokaciji na sjevernom Jadranu, gdje se razmatraju geotehničke značajke tla koje mogu utjecati na učinkovitost temeljenja. Kroz provedene analize, identificiraju se ključni faktori koji imaju najveći utjecaj na pomake i rezne sile monopilota pod različitim uvjetima opterećenja.

2. Geološki i geotehnički uvjeti odabrane lokacije sjevernog Jadrana

U ovom poglavlju bit će predstavljeni rezultati geotehničkih istražnih radova provedeni na području eksploatacijskog polja plinske platforme Ika-C [13]. Ovi istražni radovi dio su šire kampanje koja obuhvaća veći dio sjevernog Jadrana, a lokalitet Ika-C predstavlja najjužnije ispitivano područje. Dubina mora na mjestu izvođenja istražnih radova iznosi oko 60 m, Slika 3, što se smatra prikladnom dubinom za efikasnu ugradnju monopilota kao sustava temeljenja prema trenutačnim tehnološkim mogućnostima. Važno je napomenuti da napredak tehnologije omogućava izvedbu monopilota i na većim dubinama od navedene.



Slika 3: Prikaz izobata Jadranskog mora, modificirano iz [14], s lokacijom plinske platforme Ika-C

2.1 Opća geologija područja

Lokacija Ika-C nalazi se u sjevernom Jadranskom moru, koje je poluzatvoreni, plitki bazen. Jadransko more ima duguljast i uski oblik, koji se prostire od sjeverozapada prema jugoistoku, a u njegovim sjevernim i središnjim dijelovima karakterizira ga vrlo blag nagib, što ga čini relativno ravnim. Nasuprot tome, južni Jadran ima strmiji nagib. Sjeverni Jadran može se smatrati podvodnim nastavkom Padske nizine, gdje su tijekom milijuna godina, posebno tijekom pliocenske epohe, taloženi pješčani i glinoviti sedimenti. Ovi sedimenti uglavnom potiču od erozije Alpa i Apenina, pri čemu rijeka Po ima glavnu ulogu u doprinosu materijala.

Tijekom kvartarne epohe, oscilacije razine mora, osobito u glacijalnim razdobljima, dovele su do značajnih promjena u obliku jadranske obale. Posljednja glacijacija, prije oko 18.000 godina, uzrokovala je pad razine mora za 120 metara, čime je veliki dio morskog dna bio izložen. S topljenjem ledenjaka, podizanje razine mora, poznato kao flandrijska transgresija, preplavilo je prethodno izloženo kopno, taložeći tanki sloj morskih sedimenata na starijim aluvijalnim naslagama.

2.2 Geološko – geotehnički profil tla

Na samom području plinske platforme Ika-C istražni radovi su provedeni na dvije mikrolokacije, Ika-C_CPT1 i Ika-C_BH1. Na lokaciji Ika C_CPT1 provedeno je ispitivanje statičkim prodiranjem (engl. *Cone Penetration Test*, CPT) do dubine od 30 metara ispod morskog dna, dok je na lokaciji Ika C_BH1 provedeno istražno bušenje s kontinuiranim uzorkovanjem do dubine 30 metara ispod morskog dna, a od 30 do 120 metara je naizmjenično provedeno istražno bušenje s uzorkovanjem i ispitivanje statičkim prodiranjem [13]. Istražna bušenja i statičko prodiranje su poželjni istražni radovi za projektiranje vjetroturbina na moru jer omogućuju precizno razumijevanje karakteristika tla na morskom dnu, što je ključno za evaluaciju mehaničke otpornosti i stabilnosti temelja vjetroturbina. Istražna bušenja omogućuju uzorkovanje i laboratorijsku analizu tla na različitim dubinama, dok CPT pruža informacije o svojstvima tla kroz kontinuirano mjerenje otpora pri penetraciji, što pomaže u procjeni čvrstoće i deformabilnosti tla. Profil tla na lokaciji istraživanja je prikazan u Tablici 1, zajedno s rasponima dubine za svaki sloj. Ovi podaci omogućuju bolje razumijevanje geoloških i geotehničkih uvjeta na lokaciji istraživanja.

Tablica 1: Opis slojeva tla s pripadajućim dubinama [13]

Sloj	Opis tla	vrh (m)	dno (m)
I	Rahli do srednje zbijeni vapnenački silicijski fini pijesak	0	1,2
II	Čvrsta do kruta vapnenačka glina s primjesama praha	1,2	4,5
III	Rahli do srednje zbijeni vapnenački silicijski prah	4,5	8,7
IV	Srednje zbijeni do zbijeni silicijski fini do srednji pijesak	8,7	43
V	Srednje zbijeni do zbijeni tamni vapnenački silicijski pjeskoviti prah do fini pjeskoviti pijesak, s glinom	43	61,35
VI	Vrlo krut vapnenački ilovasti prah do ilovasta glina sa slojevima finog pijeska	61,35	90,7
VII	Srednje zbijeni do zbijeni vapnenački silicijski fini do srednji pijesak	90,7	120,0 ¹

¹ dno bušotine, ne nužno i dno sloja

Na temelju rezultata istražnih radova, definirani su ključni parametri tla, čiji se opširan pregled i detaljna objašnjenja mogu pronaći u literaturi [13]. U ovom radu, u Tablici 2, prikazani su samo parametri čvrstoće i indikatori relativne zbijenosti, koji će biti korišteni u analizi osjetljivosti. Ovi parametri odabrani su jer predstavljaju osnovne ulazne vrijednosti za primjenu specifičnih modela tla, koji će omogućiti preciznu procjenu ponašanja tla pod opterećenjem, te time pomoći u optimizaciji temelja vjetroturbine.

Tablica 2: Preporučeni parametri čvrstoće tla i relativne zbijenosti, modificirano iz [13]

Sloj	Raspon (m)	q_t^1 (MPa)	S_u^1 LE ² (kPa)	S_u^1 BE ² (kPa)	S_u^1 UE ² (kPa)	S_t^1 (-)	D_r^1 LE ² (%)	D_r^1 BE ² (%)	D_r^1 UE ² (%)	Φ'^1 (°)
I	0,0 - 0,9	1	-	-	-	-	25	30	35	31
	0,9 - 1,2	4	-	-	-	-				
II	1,2 - 4,5	1	20	45	70	1,3	-	-	-	-
III	4,5 - 6,0	3	-	-	-	-	-	30	35	25
	6,0 - 6,7	2,5	40	60	80	1,3	25			
	6,7 - 7,0	2,5	-	-	-	-	-			
	7,0 - 8,7	3	-	-	-	-	17	22	27	31
IV	8,7 - 24	10	-	-	-	-	35	45	55	33,5
	24 - 27,6	8	40	70	100	2	30	40	50	30
	27,6 - 34	20	-	-	-	-	42	50	58	33,5
	34 - 43	15	-	-	-	-				
V	43 - 57	25	-	-	-	-	40	55	70	25
	57 - 61,4	25	-	-	-	-	25	30	35	
VI	61,4 - 66	4	70	110	140	2	-	-	-	-
	66 - 76	4	100	145	190		-	-	-	-
	76 - 91	4	100	145	190		-	-	-	-
VII	91 - 106	40	-	-	-	-	55	65	75	35
	106 - 118	30	-	-	-	-	50	60	70	33,5
	118 - 120	30	-	-	-	-	50	60	70	33,5

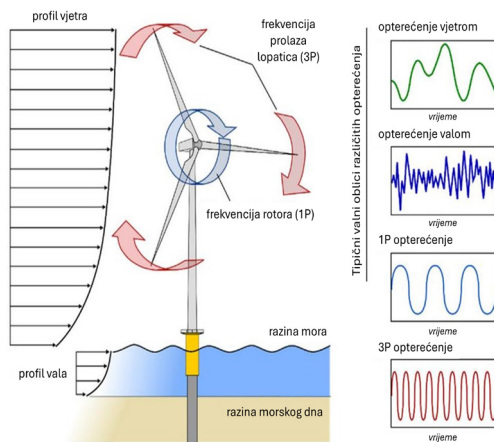
¹ q_t – otpor šiljka CPT-a; S_u – nedrenirana čvrstoća tla; S_t – osjetljivost tla; D_r – relativna zbijenost;

Φ' – efektivni kut trenja tla

² UE – upper estimate, tj. gornja granica procjene; BE – best estimate, tj. najbolja procjena; LE – lower estimate, tj. donja granica procjene

3. Analiza opterećenja na odabranoj lokaciji

Monopiloti pučinskih vjetroturbina prvenstveno se projektiraju da se odupru značajnim silama koje nastaju zbog okolišnih i radnih opterećenja. Jedna od ključnih sila kojima se piloti moraju oduprijeti je moment prevrtanja, koji se javlja zbog dvije glavne komponente: potiska koji djeluje na razini glavčine i opterećenja valova na donju konstrukciju, kao što je prikazano na Slici 4. Osim navedenih, treba spomenuti i 1P te 2P/3P opterećenja koja se odnose na harmonike rotacije rotora, koji uzrokuju oscilacije i vibracije konstrukcije turbine.



Slika 4: Tipovi opterećenja kod pučinskih vjetroturbina, modificirano iz [15]

Potisak vjetra na lopaticama i tornju turbine generira bočnu silu koja, u kombinaciji s visinom turbine, stvara značajan destabilizirajući moment prevrtanja na temelj vjetroturbine. Sile valova dodatno doprinose ovom momentu prevrtanja, osobito kada valovi udaraju u donji dio konstrukcije, stvarajući bočnu silu kojoj se monopilot mora oduprijeti. Osim toga, bočna opterećenja od vjetra i valova uzrokuju velike momente savijanja u samom monopilotu. Pučinske vjetroturbine izložene su oko 10 milijuna ciklusa opterećenja tijekom svog radnog vijeka. Ova dugotrajna ciklička opterećenja mogu uzrokovati promjene u krutosti monopilota i temeljnog tla, što potencijalno može utjecati na prirodnu frekvenciju sustava vjetroturbina-monopilot-tlo. Dugoročno cikličko bočno opterećenje, osobito u uvjetima visokog broja ciklusa opterećenja, može dovesti do većeg progiba i rotacije glave monopilota nego što je prvobitno predviđeno. Ovim radom su provedene preliminarne analize koje ne obuhvaćaju cikličko opterećenje, te je potrebno daljnje istraživanje bočnog odgovora monopilota u cikličkim uvjetima kako bi se bolje razumjelo i predvidjelo njihovo dugoročno ponašanje.

3.1 Ulazni parametri vjetroturbine i monopilota

Za potrebe analize opterećenja, odabrana je vjetroturbina nazivne snage od 3,6 MW, promjera rotora 120 m i površine rotora 11.300 m² (odgovara karakteristikama turbine *Siemens SWT-3.6-120 Offshore*). Počinje s radom pri 3,5 m/s, dok je brzina isključivanja 25 m/s. Nazivna brzina vjetra korištena u analizama je 12 m/s. Za proračun vlastite težine konstrukcije korišteni su ključni geometrijski i materijalni parametri tornja i RNA sklopa (engl. *Rotor-Nacelle Assembly* – sklop koji obuhvaća rotor, gondolu i pripadajuće komponente odgovorne za pretvorbu kinetičke energije vjetra u električnu energiju). Visina glavčine iznosi 87 m. Toranj ima promjer od 3 m na vrhu i 5 m na dnu te debljinu stijenke od 27 mm. Odabrani promjer čeličnog monopilota je 6 m, s debljinom stijenke od 120 mm.

Važan aspekt ovog rada predstavlja i sama dubina mora koja će se uvažiti u daljnjim analizama. Naime, istražni radovi su provedeni na lokaciji gdje je dubina mora 60 m. Analizirajući više lokacija na Jadranskom moru kao potencijalnih zona izvedbe pučinskih vjetroelektrana, Liščić i dr. [12] zaključuju da je optimalna lokacija za priobalnu vjetroelektranu s fiksnim sustavom temeljenja otvoreno more ispred grada Pule i otoka Malog Lošinja (udaljenost od cca 60 km zračne linije od lokacije plinske platforme Ika-C), gdje je, prema Slici 3, dubina mora oko 40 m. Stoga se i ova dubina mora obuhvatila analizama, koristeći isti profil tla kao i na lokaciji provedbe istražnih radova. Konačno, u ovom radu se analizira monopilot ukupne duljine 80 m, od čega je 40 m dio od površine mora do morskog dna, a 40 m je dio koji se zabija u tlo, odnosno monopilot ukupne duljine 120 m, od čega je 60 m dio od površine mora do morskog dna, a 60 m je dio koji se zabija u tlo. Za napomenuti je da je prikazana analiza opterećenja preliminarne prirode, provedena u cilju identifikacije relevantnih opterećenja i njihovih okvirnih vrijednosti.

3.2 Kombinacije opterećenja

Kako bi se procijenilo ponašanje temelja vjetroturbine pod različitim uvjetima, radom se analiziraju dvije ključne kombinacije okolišnih opterećenja. Scenarij E-1 predstavlja normalne operativne uvjete, uz vjetar s normalnom turbulencijom (NTM) pri nazivnoj brzini i valne uvjete s jednogodišnjom značajnom visinom valova (ESS). Scenarij E-2 prikazuje ekstremni valni scenarij, gdje se koristi ekstremni model turbulencije (ETM) pri istoj nazivnoj brzini, uz maksimalnu valnu visinu s pedesetogodišnjim povratnim periodom (EWH). Modeli vjetra sastoje se od statičke komponente, koja uglavnom odgovara nazivnoj brzini, i dinamičke komponente, koja uključuje utjecaj turbulencije te varira ovisno o tome je li primijenjen model normalne (NTM) ili ekstremne turbulencije (ETM). Modeli valova definirani su prema povratnom periodu i intenzitetu, pri čemu se analiziraju jednogodišnja značajna visina valova (ESS) i pedesetogodišnja maksimalna valna visina (EWH). Ove kombinacije omogućuju analizu ponašanja temelja u uvjetima od standardnog rada do ekstremnih opterećenja.

3.3 Opterećenje od vlastite težine

Toranj je izrađen od čelika, s ukupnom masom od 250 t, dok masa RNA sklopa iznosi 243 t. Ukupna sila težine konstrukcije na vrhu monopilota iznosi 4,84 MN.

3.4 Opterećenje od vjetra

Opterećenje od vjetra predstavlja horizontalnu silu koja djeluje na vjetroturbinu s hvatištem u središtu rotora. Računa se prema jednadžbi:

$$T_h = \frac{1}{2} \times C_t \times \rho_a \times A \times U^2 \quad (1)$$

gdje je T_h sila vjetra [N], C_t koeficijent otpora [–], ρ_a gustoća zraka [kg/m^3], A površina rotora [m^2], a U brzina vjetra [m/s].

Koeficijent otpora C_t ovisi o brzini vjetra u odnosu na nazivnu brzinu (U_R). Za brzine do nazivnog režima koristi se Froebhese – Schmuck izraz:

$$C_t = \frac{3,5 \times (2U_R + 3,5)}{U_R^2} \quad (2)$$

dok za brzine iznad nazivne vrijedi:

$$C_t = \frac{7 \times U_R^2}{U^3} \quad (3)$$

Kako C_t opada pri većim brzinama, konzervativniji pristup uključuje Froebhese-Schmuck izraz jer rezultira većim silama vjetra.

Brzina vjetra sastoji se od statičke i dinamičke komponente. Statička komponenta obično odgovara nazivnoj brzini turbine, dok dinamička uključuje utjecaj turbulencije. Brzina na visini glavčine računa se pomoću zakona profila vjetra:

$$U(z) = U_{ref} \times \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{0,1} \quad (4)$$

pri čemu je U_{ref} srednja godišnja brzina vjetra na referentnoj visini z_{ref} od 10 m. U proračunu su korištene vrijednosti iz DHMZ-ovog Atlasa brzine vjetra za zadanu lokaciju [16].

Za izračun turbulentne komponente brzine u NTM (engl. *Normal Turbulence Model* – model normalne turbulentncije) scenariju koriste se izrazi:

$$\sigma_{u,NTM} = I_{ref}(0,75 U_r + b) \quad (5)$$

$$u_{NTM} = 1,28 \times \sigma_{u,NTM} \quad (6)$$

gdje je $\sigma_{u,NTM}$ standardna devijacija turbulentne komponente brzine vjetra u NTM scenariju [m/s], I_{ref} je referentni intenzitet turbulentncije, b je konstanta [5,6 m/s], dok je u_{NTM} dinamička komponenta brzine vjetra za normalni model turbulentncije [m/s].

Za ETM (engl. *Extreme Turbulence Model* – model ekstremne turbulentncije) scenarij, turbulentna komponenta brzine računa se prema izrazu:

$$\sigma_{u,ETM} = cI_{ref}[0,072 (\frac{U_{avg}}{C} + 3)(\frac{U_R}{C} - 4) + 10] \quad (7)$$

$$u_{ETM} = 2 \times \sigma_{u,ETM} \quad (8)$$

gdje je $\sigma_{u,ETM}$ standardna devijacija turbulentne komponente brzine vjetra u ETM scenariju [m/s], a c je konstanta [2 m/s].

Ukupna brzina vjetra kombinira statičku i dinamičku komponentu. Statička vrijednost za oba scenarija iznosi 12 m/s, dok su konačne ukupne brzine 13,87 m/s za U-1 (NTM) i 18,09 m/s za U-2 (ETM). U Tablici 3 su dane konačne izračunate vrijednosti opterećenja od vjetra za oba scenarija te za dubine mora od 40 m i 60 m.

Tablica 3: Opterećenje od vjetra za analizirane scenarije

moment od vjetra [MNm]		
Dubina mora \ Scenarij	40 m	60 m
E-1	87,72	105,81
E-2	150,00	180,94

3.5 Opterećenje od valova

Opterećenje od valova na temelje vjetroturbine procjenjuje se pomoću Morison-ove jednadžbe, koja ukupnu silu prikazuje kao zbroj sile otpora i inercijske sile. Sila otpora proporcionalna je kvadratu brzine čestica vode, dok inercijska sila ovisi o ubrzanju čestica. Za izračun brzine i ubrzanja koristi se Airy-jeva linearna teorija valova, koja omogućuje aproksimaciju kretanja čestica pod utjecajem valova.

Brzina čestica vode određuje se izrazom:

$$u(z,t) = \frac{H_m}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(S+z))}{\sinh(kS)} \cos(\omega t) \quad (9)$$

dok ubrzanje čestica iznosi:

$$a(z,t) = -\frac{H_m}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(S+z))}{\sinh(kS)} \sin(\omega t) \quad (10)$$

gdje su H_m visina vala [m], ω kutna frekvencija [rad/s], k valni broj [1/m], S dubina vode [m], z visina iznad dna [m] i t vrijeme [s]. Budući da maksimalne vrijednosti sile otpora i inercijske sile ne nastupaju istovremeno, konzervativni pristup uključuje uzimanje njihovih najvećih vrijednosti za procjenu ukupnog opterećenja od valova.

Za određivanje opterećenja od valova korištena su mjerenja s platforme *Copernicus Climate Data Store* [17] za zadanu lokaciju, analizirana metodom prekoračenja praga i primjenom log-normalne distribucije. Na temelju tih podataka određena je 1-godišnja značajna valna visina (2,868 m) i 50-godišnja maksimalna valna visina (7,181 m).

Proračun je proveden primjenom diskretizacije pilota na segmente od 0,5 m, uz izračun sila za svaki segment pomoću Morison-ove jednadžbe. Parametri valova, kao što su kutna frekvencija, valna duljina i valni broj, izračunati su standardnim hidrauličkim formulama za idealne valove. Rezultati pokazuju da ukupne sile valova i pripadni momenti variraju ovisno o analiziranom scenariju. U Tablici 4 su dane konačne izračunate vrijednosti opterećenja od valova za oba scenarija te za dubine mora od 40 m i 60 m.

Tablica 4: Opterećenje od valova za analizirane scenarije

moment od valova [MNm]		
Scenarij \ Dubina mora	40 m	60 m
E-1	28,96	45,87
E-2	74,23	118,81

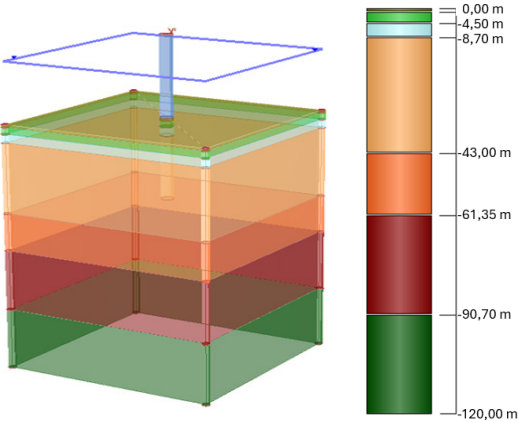
4. Analize osjetljivosti ponašanja monopilota

Cilj ove analize osjetljivosti je evaluirati utjecaj odabranih parametara tla na ponašanje temelja pod identificiranim karakterističnim opterećenjima, pri čemu će se analizirati vertikalni i bočni pomaci, moment savijanja i posmična sila. Parametri tla koji će se varirati uključuju kut trenja za nekoherentne materijale i nedreniranu posmičnu čvrstoću za koherentne materijale, koristeći konstitucijske modele API SAND i API CLAY za analize uzdužnog opterećenja te standardni model pijeska i potopljene krute gline (engl. *Submerged Stiff Clay*) za analize bočnog opterećenja. Sistematskom analizom ovih varijacija nastoje se identificirati ključni faktori koji najviše utječu na ponašanje monopilota. Za analizu se koristi računalni program *RS Pile*, specijaliziran za proračune ponašanja pilota u različitim uvjetima tla. *RS Pile* omogućava modeliranje i procjenu ponašanja temelja putem metoda t - z i p - y krivulja. t - z krivulje primjenjuju se za simulaciju osnovog ponašanja pilota, pri čemu se razmatra otpor tla duž cijele duljine pilota, omogućujući preciznu procjenu prijenosa opterećenja i identifikaciju zona s povećanom koncentracijom naprezanja. S druge strane, p - y krivulje, se koriste za modeliranje bočnog ponašanja pilota na horizontalna opterećenja poput vjetra i valova. Ove krivulje omogućuju simulaciju ponašanja konstrukcije u smislu savijanja i pomaka u uvjetima horizontalnog opterećenja, pri čemu se uzima u obzir nelinearna otpornost tla kroz dubinu, kao što je detaljno opisano u teoriji p - y krivulja [18].

Analiza se provodi u dvije kombinacije opterećenja koje predstavljaju normalne operativne uvjete i ekstremni valni scenarij. Osjetljivost, nedrenirana posmična čvrstoća i pregnječena posmična čvrstoća preuzeti su iz Tablice 2, dok su faktor deformacije i koeficijent krutosti K_s odabrani iz preporuka [18]. Najveće jedinično trenje na plašt monopilota postavljeno je kao jednako nedreniranoj posmičnoj čvrstoći tla, dok je jedinična nosivost na vrhu temelja određena kao $9 \times S_u$. U nastavku su prikazane vrijednosti parametara tla korištenih za analizu osjetljivosti ponašanja u različitim scenarijima, Tablica 5. Analize obuhvaćaju varijacije kuta unutarnjeg trenja za slojeve pjeskovitog tla i nedrenirane posmične čvrstoće za sloj glinovitog tla. Na Slici 5 je dan prikaz numeričkog modela monopilota s uslojenosti tla.

Tablica 5: Prikaz variranih parametara čvrstoće za pojedini sloj tla na predmetnoj lokaciji

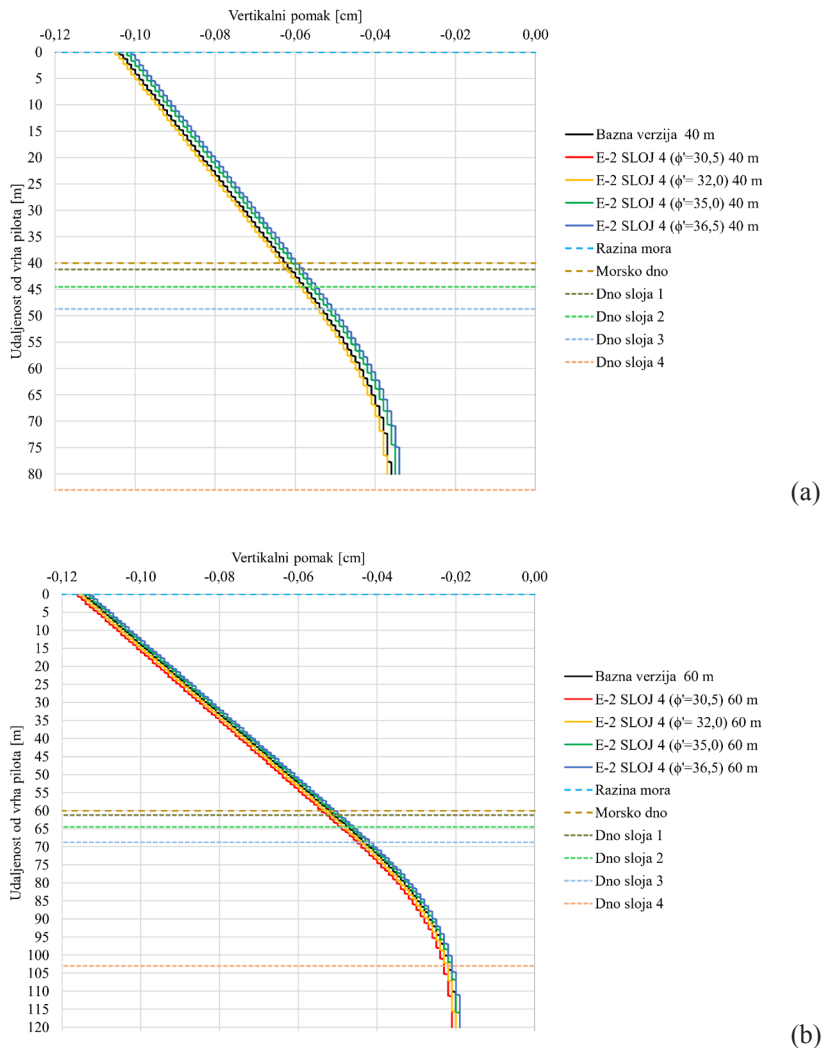
Sloj tla	Kut trenja tla (°)				
	-3°	-1.5°	BE	+1,5°	+3°
I	28	29,5	31	32,5	34
III	22	23,5	25	26,5	28
IV	30,5	32	33,5	35	36,5
V	22	23,5	25	26,5	28
Nedrenirana čvrstoća tla (kPa)					
	LE	Niža vrijednost	BE	Viša vrijednost	UE
II	20	32,5	45	57,5	70



Slika 5: Numerički model monopilota sa slojevima tla (bojama odgovaraju danom u Tablicama 1 i 2)

Provedene analize su obuhvaćale varijaciju navedenih parametara tla pojedinog sloja pri čemu su sve referentne vrijednosti za ostale slojeve tla ostale jednake vrijednostima najbolje procjene (BE). Od svih rezultata analiza se u nastavku prikazuju rezultati scenarija E-2 s obzirom da je isti rezultirao s većim vrijednostima pomaka i reznih sila. Osim toga, rezultati su prikazani samo za analize varijacija parametara onih slojeva koji imaju najveći utjecaj na vertikalni (Slika 6) i bočni (Slika 7) pomak monopilota, te na poprečne sile (Slika 8) i momente savijanja (Slika 9) monopilota.

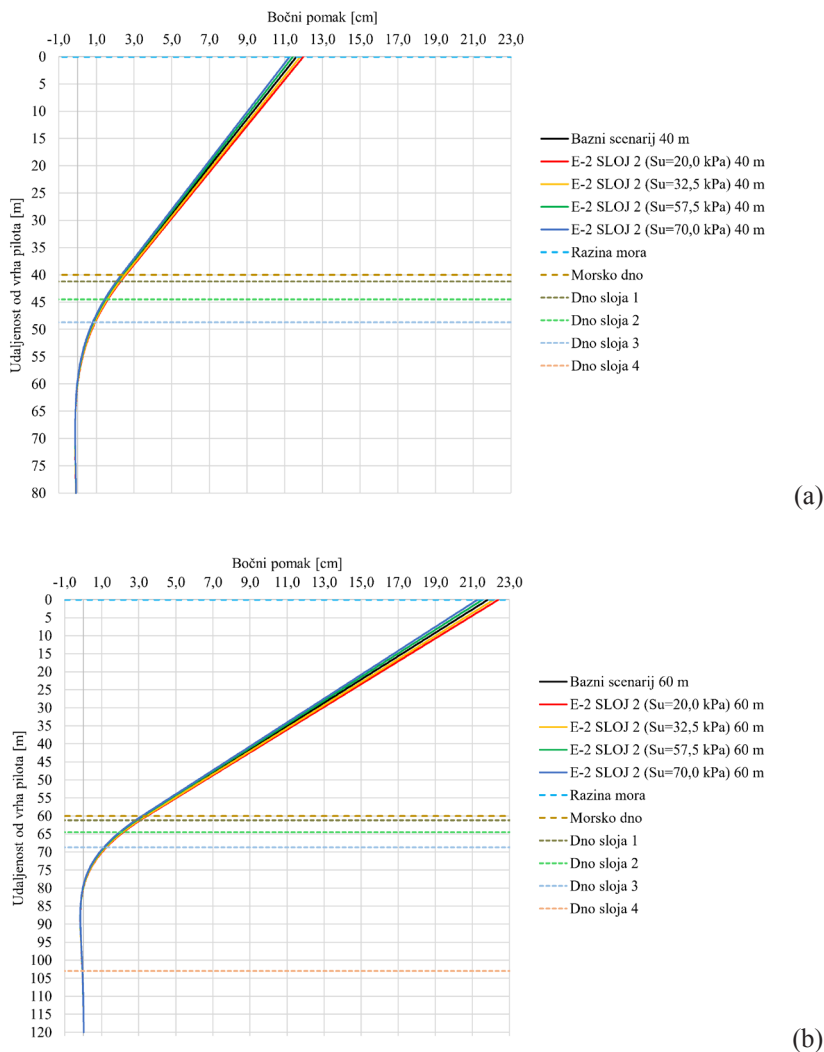
Vertikalni pomak monopilota, Slika 6, je dominantno uvjetovan uzdužnim opterećenjem nametnutim na vrh pilota. S obzirom da su u oba slučaja, i za 40 m i za 60 m dubinu mora, korištene iste dimenzije i karakteristike tornja i glavčine, uzdužno opterećenje je jednako. Na vertikalni pomak najveći utjecaj ima varijacija kuta trenja sloja IV. Vertikalni pomak u svim analizama iznosi od 10 do 12 cm te je tek nešto veći kod monopilota za dubinu mora od 60 m.



Slika 6: Vertikalni pomak monopilota za scenarij E-2 i varijaciju kuta trenja sloja IV:

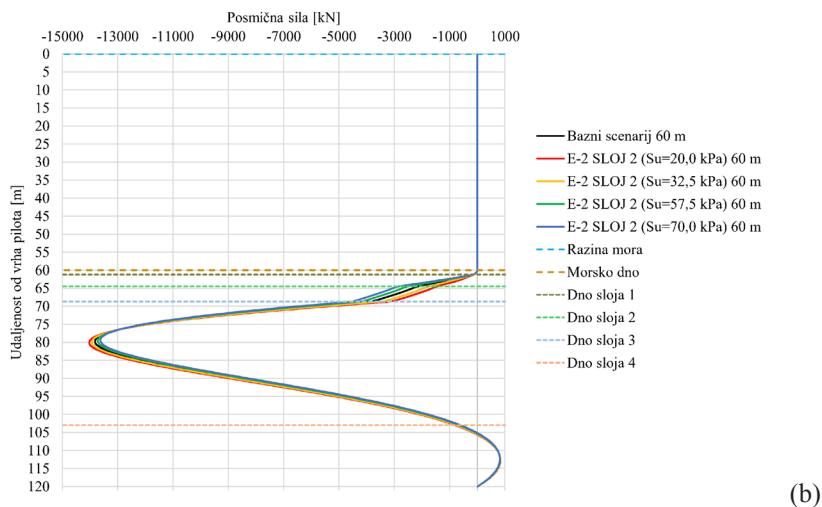
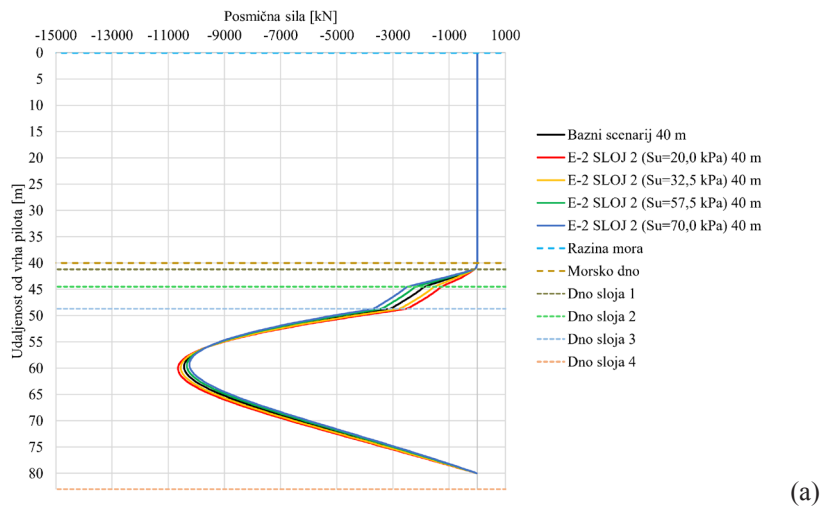
- (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora

Bočni pomak monopilota, Slika 7, je dominantno uvjetovan momentima od djelovanja vjeta i valova nametnutim na vrh pilota. Na vertikalni pomak najveći utjecaj ima varijacija nedrenirane čvrstoće sloja II. S obzirom da su navedena opterećenja značajno veća kod monopilota za dubinu mora od 60 m, njegov najveći bočni pomak je u granicama od 21 do 23 cm, dok je kod monopilota za dubinu mora od 40 m isti u granicama od 11 do 12 cm.

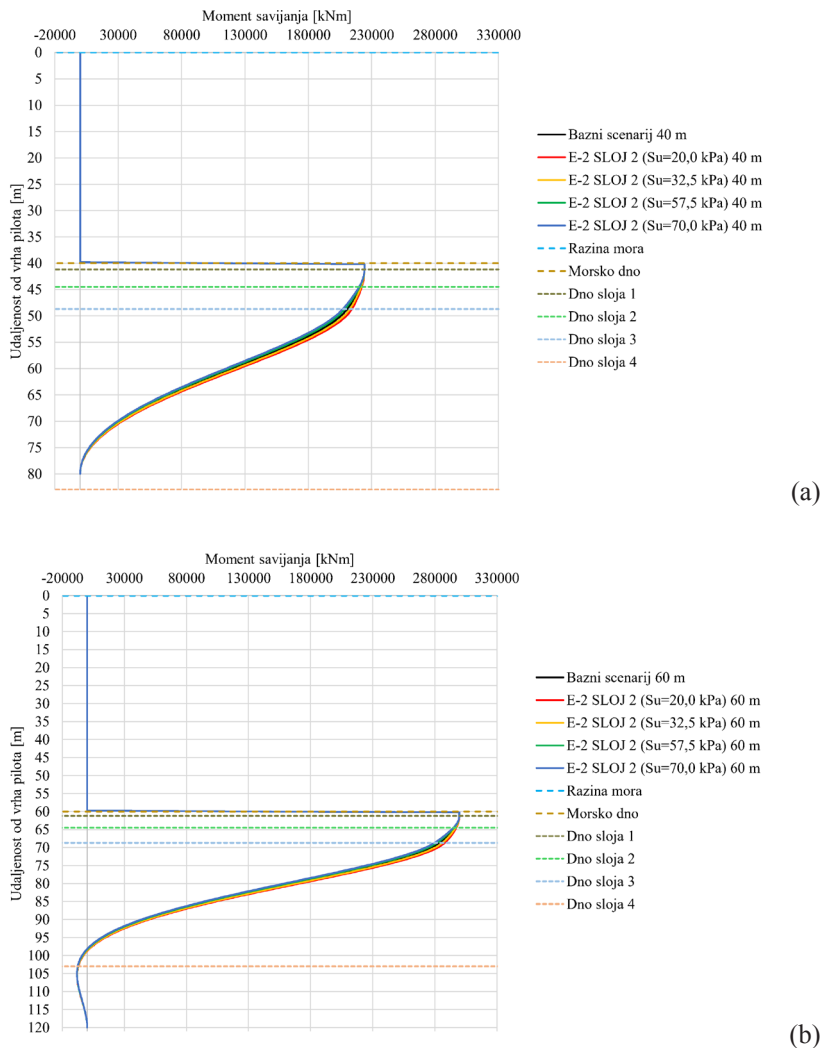


Slika 7: Bočni pomak monopilota za scenarij E-2 i varijaciju nedrenirane čvrstoće sloja II:
 (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora

Poprečna sila u monopilotu (Slika 8), kao i moment savijanja (Slika 9), poprimaju izrazito visoke vrijednosti za analizirani scenarij E-2. Najveće vrijednosti reznih sila se ostvaruju pri varijaciji nedrenirane čvrstoće sloja II. Pri tome su iste veće za oko 30% za dubinu mora od 60 m u odnosu na dubinu mora od 40 m.



Slika 8: Poprečna sila monopilota za scenarij E-2 i varijaciju nedrenirane čvrstoće sloja II:
 (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora



Slika 9: Moment savijanja monopilota za scenarij E-2 i varijaciju nedrenirane čvrstoće sloja II:
 (a) monopilot ukupne duljine 80 m s 40 m dubine mora,
 (b) monopilot ukupne duljine 120 m s 60 m dubine mora

5. Zaključak

U radu se daje prikaz analiza osjetljivosti monopilota kao odabranog sustava temelja vjetroturbine u sjevernom Jadranu. Na odabranoj lokaciji su provedeni geotehnički istražni radovi i identificiran je geološko – geotehnički profil tla koji se sastoji od izmjena koherentnih i nekoherentnih depozita varijabilne prekonsolidiranosti, odnosno zbijenosti. Određene su vrijednosti parametara tla koji imaju utjecaj na ponašanje temeljnog sustava. Provedenom preliminarnom analizom opterećenja su određena karakteristična djelovanja vlastite težine, vjetra i valova za monopilote koji se nalaze u moru dubine 40 m i 60 m. Numeričkim modeliranjem je simulirano ponašanje monopilota pod navedenim djelovanjima pri čemu su evaluirani pomaci i rezne sile u monopilotu uslijed varijacije parametara čvrstoće tla. Pokazalo se da najveći utjecaj na bočno ponašanje pilota ima varijacija nedrenirane čvrstoće sloja koji se nalazi neposredno ispod morskog dna, dok slijezanje pilota najviše ovisi o čvrstoći sloja u kojemu monopilot završava. Pri tome svakako treba naglasiti da veliki utjecaj na ponašanje monopilota imaju i krutosne karakteristike depozita sjevernog Jadrana, dok se ovaj rad fokusira na parametre čvrstoće. Stoga je nužno u daljnjim istraživanjima identificirati varijacije krutosnih karakteristika pojedinih slojeva te istražiti njihov utjecaj na ponašanje monopilota za različita opterećenja. Iako su prikazane analize preliminarne, one omogućuju određivanje najvažnijih parametara koji bi mogli biti potrebni za daljnje istraživanje, kao i smjernice za buduće projekte temeljenja pučinskih vjetroelektrana na sjevernom Jadranu.

Zahvala

Autori zahvaljuju tvrtki INA d.d. na ustupanju podataka iz geotehničkog elaborata za lokaciju plinske platforme Ika-C. Dio istraživanja je financiran kroz potpore Sveučilišta u Zagrebu, projekt *Optimizacija temeljenja priobalnih vjetroelektrana*, koji se provodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Literatura

- [1] Ledec, G. C.; Rapp, K. W.; Aiello, R. G.: *Greening the wind - Environmental and social considerations for wind power development*. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) Washington, DC: World Bank, 2011, ISBN: 978-0-8213-8926-3.
- [2] Filom, S.; Radfar, S.; Panahi, R.; Amini, E.; Neshat, M.: Exploring wind energy potential as a driver of sustainable development in the southern coasts of Iran: The importance of wind speed statistical distribution model, *Sustainability*, **13** (2021) 14, 7702, <https://doi.org/10.3390/su13147702>

- [3] International Energy Agency (IEA): *Offshore wind outlook 2019: World energy outlook special report*, International Energy Agency (2019)
- [4] Basack, S.; Dutta, S.; Saha, D.; Das, G.: Power generation by offshore wind turbines: An overview on recent research and developments, *WSEAS Transactions on Power Systems*, **16** (2021) 254-261, <https://doi.org/10.37394/232016.2021.16.26>
- [5] Arapogianni, A.; Genachte, A.; Ochagavia, R.; Vergara, J.; Castell, D.; Tsouroukdissian, A.; Korbijn, J.; Bolleman, N.; Huera-Huarte, F.; Schuon, F.; Ugarte, A.; Sandberg, J.; de Laleu, V.; Maciel, J.; Tunbjer, A.; Roth, R.; de la Gueriviere, P.; Coulombeau, P.; Jadrec, S.; Philippe, C.; Voutsinas, S.; Weinstein, A.; Vita, L.; Byklum, E.; Hurley, W.; Grubel, H.: *Deep Water: The Next Step for Offshore Wind Energy*, European Wind Energy Association report, Brussels, Belgium (2013)
- [6] Bhattacharya, S.: *Design of foundations for offshore wind turbines*, John Wiley & Sons Ltd (2019), <https://doi.org/10.1002/9781119128137>
- [7] Gupta, B. K.; Basu, D.: Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives, *Ocean Engineering*, **213** (2020) 107514, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107514>
- [8] Sánchez, S.; López-Gutiérrez, J-S.; Negro, V.; Esteban, M. D.: Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use, *Journal of Marine Science and Engineering*, **7** (2019) 12, 441, <https://doi.org/10.3390/jmse7120441>
- [9] URL: www.eew-group.com/projects-references/, EEW SPC. Completion of first monopile for Baltic Eagle project, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [10] URL: www.newcivilengineer.com/latest/innovation-to-enhance-installation-of-offshore-wind-monopiles-unveiled-26-11-2024/, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [11] URL: <https://iqip.com/products/handling-equipment/dynamic-outtrigger-frame/>, *Pristupljeno*: 2025-03-05
- [12] Liščić, B.; Senjanović, I.; Čorić, V.; Kozmar, H.; Tomić, M.; Hadžić, N.: Offshore Wind Power Plant in the Adriatic Sea : an Opportunity for the Croatian Economy, *Transactions on maritime science*, **3** (2014) 2, 103-110, <https://doi.org/10.7225/toms.v03.n02.001>
- [13] RINA: *Ika-C Geotechnical Investigation*, Final Report, INA d.d., Zagreb, Hrvatska (2022)
- [14] URL: www.en.wikipedia.org/wiki/Adriatic_Basin, *Pristupljeno*: 2025-02-18
- [15] Nikitas, G.; Vimalan, N.; Bhattacharya, S.: An innovative cyclic loading device to study long term performance of offshore wind turbines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **82** (2016), 154–160, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.008>
- [16] Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ): Atlas vjetrova Hrvatske, www.meteo.hr, *Pristupljeno*: 2024-09-29
- [17] URL: www.cds.climate.copernicus.eu/datasets, *Pristupljeno*: 2024-09-28
- [18] URL: www.rocsience.com/help/rspile/documentation, *Pristupljeno*: 2025-01-22