

Analiza osjetljivosti ponašanja monopilota pučinske vjetroturbine na sjevernom Jadranu

Kučinić, Leon

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:647475>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Leon Kučinić

**ANALIZA OSJETLJIVOSTI PONAŠANJA
MONOPILOTA PUČINSKE VJETROTURBINE NA
SJEVERNOM JADRANU**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Leon Kučinić

**ANALIZA OSJETLJIVOSTI PONAŠANJA
MONOPILOTA PUČINSKE VJETROTURBINE NA
SJEVERNOM JADRANU**

DIPLOMSKI RAD

izv. prof. dr. sc. Mario Bačić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Leon Kučinić

**SENSITIVITY ANALYSIS OF MONOPILE
BEHAVIOR OF AN OFFSHORE WIND TURBINE
IN THE NORTHERN ADRIATIC**

MASTER THESIS

Associate Professor Mario Bačić, Ph.D.

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Leon Kučinić

(Ime i prezime)

0082056904

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

Analiza osjetljivosti ponašanja monopilota pučinske vjetroturbine na sjevernom Jadranu

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Sensitivity analysis of monopile behavior of an offshore wind turbine in the northern Adriatic

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

Potpore Sveučilišta u Zagrebu (projekt: Optimizacija temeljenja priobalnih vjetroelektrana)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

13.11.2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Leon Kučinić, 0082056904

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Analiza osjetljivosti ponašanja monopilota pučinske vjetroturbine na sjevernom Jadranu

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

13.11.2024.

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Leon Kučinić, 32606569632

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Analiza osjetljivosti ponašanja monopilota pučinske vjetroturbine na sjevernom Jadranu

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Mario Bačić

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

21.11.2024

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

13.11.2024

Potpis:

ZAHVALE

Zahvaljujem INA d.d. na ustupanju geotehničkog elaborata za lokaciju plinske platforme Ika_C, čiji su stvarni parametri omogućili relevantniju i realističniju analizu u ovom radu. Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru, izv.prof.dr.sc Bačiću, koji mi je omogućio da radim na ovoj zanimljivoj temi i usmjeravao me kroz cijeli proces izrade rada. Također zahvaljujem profesoru Gavinu na korisnim savjetima i članku koji je olakšao proračun opterećenja. Neizmjereno sam zahvalan svojim roditeljima i bratu, koji su mi tijekom cijelog studija pružali podršku i poticali me da idem dalje. I za kraj, posebnu zahvalu upućujem svojoj djevojci Ivi, koja mi je svojim razumijevanjem i nesebičnom podrškom bila pravi oslonac tijekom pisanja ovog rada.

SAŽETAK

U diplomskom radu prikazat će se mogućnosti temeljenja vjetroelektrana na lokaciji sjevernog Jadrana za odabrani sustav dubokog temeljenja, s naglaskom na primjenu monopilota. Karakteristična opterećenja od vjetra i valova izračunat će se za odabranu lokaciju u sjevernom Jadranu. Na temelju karakterističnog profila temeljnog tla i tih opterećenja, provesti će se bočna i osna analiza opterećenja pilota. Izlazni rezultati analize uključuju vertikalne i bočne pomake, momente savijanja te uzdužne i posmične sile u monopilotu. Na ovaj način evaluirat će se odgovor vjetroturbina ovisno o različitim opterećenjima i parametrima tla, a definirat će se oni parametri tla koji imaju najveći utjecaj na ponašanje monopilota.

Ključne riječi: Analiza osjetljivosti, monopilot, pučinska vjetroturbina, Sjeverni Jadran

SUMMARY

The thesis will present the possibilities of wind turbine foundation systems at the Northern Adriatic location, focusing on the application of monopiles as the selected deep foundation system. Characteristic loads from wind and waves will be calculated for the chosen location in the Northern Adriatic. Based on the characteristic soil profile and these loads, lateral and axial pile analyses will be conducted. The output results of the analysis include vertical and lateral displacements, bending moments, as well as axial and shear forces in the monopile. This approach will evaluate the response of wind turbines to varying loads and soil parameters, identifying the soil parameters that have the greatest impact on the selection of the optimal foundation system.

Key words: Sensitivity analysis, monopile, Offshore wind turbine, Northern Adriatic

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. VAŽNOST VJETROENERGIJE	2
2.1. Važnost energije vjetra u održivom razvoju	2
2.1.1. Usporedba prednosti energije vjetra na moru	3
2.1.2. Ekološke prednosti i doprinos ublažavanju klimatskih promjena	4
2.1.3. Društveni i ekonomski utjecaj energije vjetra na moru	4
2.1.4. Globalni trendovi	5
2.1.5. Energetska sigurnost i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima	5
2.1.6. Politika i poticaji.....	5
2.1.7. Izazovi i prepreke u implementaciji rješenja	6
2.2. Pučinske vjetroturbine.....	6
2.2.1. Komponente vjetroturbine	6
2.2.2. Proces generiranje energije	8
2.2.3. Usporedba s kopnenim vjetroturbinama	9
2.2.4. Utjecaj okolišnih čimbenika	9
3. MONOPILOTI I PREGLED PROJEKATA PUČINSKIH VJETROELEKTRANA.....	10
3.1. Vrste temelja pučinskih vjetroelektrana	10
3.2. Monopiloti	12
3.2.1. Povijest korištenja monopilota za potrebe vjetroturbina	12
3.3. Opterećenja monopilota.....	13
3.3.1.1. Opterećenje od vlastite težine.....	13
3.3.1.2. Opterećenje vjetra	13
3.3.1.3. 1P opterećenje.....	14
3.3.1.4. 2P/3P opterećenje	14
3.3.1.5. Opterećenje valova.....	14
3.3.1.6. Opterećenje morskim strujama.....	15
3.3.1.7. Ostala opterećenja.....	15
3.3.1.8. Kombinacija opterećenja	15
3.3.2. Dodatni čimbenici u projektiranju monopilota	15

3.4.	Analiza djelovanja sila na monopilote	16
3.5.	Izvedba pučinskih monopilota	18
3.6.	Pregled projekata.....	19
3.6.1.	Vindeby	19
3.6.2.	Horns Rev.....	20
3.6.3.	Hornsea 1.....	21
3.6.4.	Hornsea 2.....	22
3.6.5.	Arcadis Ost 1	23
3.6.6.	Veja Mate.....	24
3.6.7.	Vineyard Wind 1	24
3.6.8.	Akita Noshiro	25
3.6.9.	Taranto.....	26
3.6.10.	Zaključci i trendovi u razvoju pučinskih vjetroelektrana	27
4.	GEOLOŠKE I GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE U SJEVERNOM JADRANU	28
4.1.	Korištena oprema i metode ispitivanja.....	30
4.1.1.	Downhole metoda ili ispitivanje u bušotini	31
4.1.2.	Ispitivanje statičkim prodiranjem (CPTU).....	32
4.1.3.	WISON® Mk V sustav	34
4.1.4.	Fugro Morski Cijevni Sustav za Jezgrovanje (Fugro Marine Core Barrel, FMCB)	35
4.2.	CPT ispitivanja.....	36
4.3.	Uzorkovanje	37
4.4.	Laboratorijska ispitivanja	38
4.4.1.	Brodski laboratorij	38
4.4.2.	Kopneni laboratorij.....	39
4.5.	Geološke prilike	40
4.6.	Profil tla.....	41
4.7.	Geotehnički parametri tla.....	42
5.	ANALIZA OSJETLJIVOSTI MONOPILOTA PUČINSKE VJETROELEKTRANE ZA KARAKTERISTIČNI PROFIL TLA SJEVERNOG JADRANA.....	46
5.1.	Uvod.....	46
5.2.	Ulazni parametri vjetroturbine i monopilota	47
5.3.	Opterećenje	49
5.3.1.	Opterećenje od vjetra.....	49
5.3.2.	Opterećenje od valova.....	50
5.3.3.	Kombinacije opterećenja	51
5.3.4.	Proračun opterećenja od vlastite težine	52
5.3.5.	Proračun opterećenja od valova.....	53

5.4.	Proračun opterećenja od vjetra.....	57
5.5.	Parametri tla za numerički model	60
5.6.	Definicija modela u RS Pile-u	62
5.7.	Rezultati baznih scenarija i minimalnih i maksimalnih vrijednosti	67
5.8.	Analiza osjetljivosti	72
5.8.1.	Sloj I.....	72
5.8.2.	Sloj II.....	77
5.8.3.	Sloj III.....	82
5.8.4.	Sloj IV	87
5.8.5.	Rekapitulacija analize osjetljivosti	92
6.	ZAKLJUČAK	93
	POPIS LITERATURE	94
	POPIS SLIKA	97
	POPIS TABLICA.....	100

1. UVOD

U ovom diplomskom radu istražuje se osjetljivost monopilota pučinskih vjetroturbina u uvjetima sjevernog Jadrana, s naglaskom na procjenu ponašanja temelja u odnosu na promjene ključnih geotehničkih parametara tla. Cilj rada je identificirati slojeve tla i parametre koji imaju najveći utjecaj na ponašanje temeljnog sustava, te time doprinijeti razumijevanju mogućnosti implementacije obnovljivih izvora energije u regiji sjevernog Jadrana. Tema je od iznimne važnosti s obzirom na globalni trend prijelaza na obnovljive izvore energije, u kojem pučinske vjetroturbine imaju ključnu ulogu kao održiv i ekološki prihvatljiv izvor energije, a motivacija za odabir ove teme proizlazi iz želje za doprinosom energetske tranziciji i proširenjem postojećih znanja te stjecanjem novih u području pučinske geotehnike .

Sjeverni Jadran predstavlja atraktivno područje za razvoj pučinskih vjetroelektrana zbog plitkog mora, čija prosječna dubina iznosi 50 metara i rijetko prelazi 100 metara, što omogućuje izvedbu monopilota. Povoljna brzina i učestalost vjetrova, pruža uvjete za učinkovito iskorištavanje energije vjetra. Iako su do sada na tom području dominirale plinske platforme, istraživanja pokazuju da regija ima značajan potencijal za prijelaz na obnovljive izvore energije kroz izvedbu vjetroelektrana, što može doprinijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova i povećanju energetske neovisnosti Hrvatske. U skladu s ciljevima Europske unije, koja planira povećati kapacitet odobalne energije s trenutnih 12 GW na 60 GW do 2030. i na 300 GW do 2050., sjeverni Jadran može igrati važnu ulogu u energetske tranziciji.

Korištene metode u ovom radu uključuju pregled literature i sintezu za teorijsku podlogu o održivosti, pučinskim vjetroturbinama i monopilotima, prikupljanje podataka o postojećim vjetroelektranama putem interneta te statističku analizu podataka o valnim visinama preuzetih s platforme Copernicus, obrađenih u programima MATLAB i Excel. Proračun opterećenja proveden je za vjetrove i valove korištenjem standardnih jednadžbi, dok je numeričko modeliranje u programu RS Pile omogućilo generiranje grafova za analizu osjetljivosti. Analiza je obuhvatila vertikalne i bočne pomake, momente savijanja te uzdužne i posmične sile.

2. VAŽNOST VJETROENERGIJE

2.1. Važnost energije vjetra u održivom razvoju

Održivi razvoj se definira kao zadovoljenje potreba sadašnjih generacija bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe. Vjetroenergija značajno doprinosi ovom cilju u obalnim područjima. Kao čist i neiscrpan izvor energije, pučinski vjetar smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima što je ključno za održivi razvoj [1]. Postojani i trajni vjetrovi na moru, zajedno s mogućnošću izgradnje većih vjetroturbina čini vjetar na moru posebno učinkovitim jer smanjuje potrebu za opsežnom kopnenom infrastrukturom i smanjuje utjecaj na okoliš [2]. Osim toga, eksploatacija vjetra na moru ima nisku potrošnju vode, bitan čimbenik u regijama s nedostatkom vode [3]. Širenjem pučinskih vjetroelektrana je predviđeno sprječavanje emisije 5-7 milijardi tona CO₂ na globalnoj razini, što dodatno povećava održivost, smanjuje onečišćenje zraka i ovisnost o uvezenim gorivima [4]. Pučinska vjetroenergija doprinosi raznim ciljevima održivog razvoja, koje je definirao UN u sklopu Programa za održivi razvoj do 2030. godine, prvenstveno cilju 7 - Pristupačna energija iz čistih izvora, a između ostalog, posredno i ciljevima 8 - Dostojanstven rad i ekonomski rast, 9 - Industrija, inovacije i infrastruktura, 11 - Održivi gradovi i zajednice, 13 - Zaštita klime.



Slika 1 Ciljevi održivog razvoja (SDGs) prema UN-ovom Programu za održivi razvoj do 2030. godine. Izvor: [5]

2.1.1. Usporedba prednosti energije vjetra na moru

Energija vjetra na moru predstavlja nekoliko bitnih prednosti, posebice pred konvencionalnim izvorima energije. Za razliku od fosilnih goriva, energija vjetra je neiscrpna i ekološki prihvatljiva, te je pouzdan izvor energije bez rizika iscrpljivanja [1]. Njezine minimalne emisije stakleničkih plinova, pogotovo u usporedbi s fosilnim gorivima, kao što je prikazano u Tablici 1. čine ju ključnom komponentom u smanjenju ugljičnog otiska i ublažavanju klimatskih promjena [3]. Energija vjetra na moru ima veći kapacitet i manju varijabilnost u usporedbi s ostalim obnovljivim izvorima energije što ju čini usporedivom s ostalim konvencionalnim izvorima [4]. Ova pouzdanost je dodatno ojačana sposobnošću energije vjetra da istisne konvencionalne elektrane na fosilna goriva, time smanjujući emisije štetnih plinova [6]. Zajedno, navedeni čimbenici čine vjetroenergiju superiorom alternativom konvencionalnim izvorima energije što potiče održivi razvoj kroz okolišne i ekonomske čimbenike.

Tablica 1 Emisije stakleničkih plinova (gCO₂/kWh) iz tehnologija za opskrbu električnom energijom (Izvor: [3])

Tehnologija	Minimum	Median	Maksimum
Ugljen—prašinski kotao (PC)	740	820	910
Plin—kombinirani ciklus	410	490	650
Biomasa	130	230	420
Sunčeva energija—velike jedinice (fotonaponski sustavi)	18	48	180
Sunčeva energija—krovne jedinice (fotonaponski sustavi)	26	41	60
Koncentrirana solarna energija	8,8	27	63
Geotermalna energija	6	38	79
Hidroenergija	1	24	2200
Nuklearna energija	3,7	12	110
Energija vjetra na moru	8	12	35
Energija vjetra na kopnu	7	11	56

2.1.2. Ekološke prednosti i doprinos ublažavanju klimatskih promjena

Okolišne prednosti vjetroenergije na moru su brojne i ključne za promicanje održive budućnosti. Globalno, potencijal energije vjetra je ogroman, s procjenama koje predlažu da može zadovoljiti 35 % svih svjetskih potreba za energijom [1]. Energija vjetra prepoznata je kao ključni izvor za budućnost s niskim udjelom ugljika jer tijekom rada stvara gotovo nezamjetne emisije stakleničkih plinova i drugih zagađivača [2].

Energija vjetra na moru ima ključnu ulogu u ublažavanju klimatskih promjena znatnim smanjenjem emisija stakleničkih plinova. Ova proizvodnja čiste energije izravno doprinosi smanjenju štetnih emisija CO₂, NO_x i SO_x povezanih s fosilnim gorivima, koja su glavni uzročnici globalnog zatopljenja, kiselih kiša i efekta staklenika [7]. Cjelokupni životni ciklus energije vjetra, od proizvodnje do dekomisije, rezultira u vrlo niskim emisijama CO₂, što ju čini održivom alternativom za ublažavanje klimatskih promjena [6]. Ove karakteristike čine energiju vjetra jednim od najvažnijih izvora energije u tranziciji prema održivoj budućnosti.

Visoka dostupnost i sezonski obrasci energije vjetra doprinose sigurnosti opskrbe električnom energijom te smanjuju potrebu za ulaganjem u elektrane s većim negativnim učinkom na okoliš [4]. Sustavni razvoj energije vjetra predstavlja strateški element u naporima Europske unije da izgradi 'zeleno gospodarstvo', povećava energetske sigurnost i smanjuje utjecaj proizvodnje energije na okoliš [8]. Općenito, energija vjetra na moru, zahvaljujući svojoj održivosti i minimalnom utjecaju na okoliš, ključna je u globalnim naporima za ublažavanje klimatskih promjena i stvaranje održive budućnosti [3].

2.1.3. Društveni i ekonomski utjecaj energije vjetra na moru

Energija vjetra na moru donosi značajne društvene i ekonomske koristi, posebno obalnim područjima, čime značajno doprinosi njihovom održivom razvoju. Jedna od ključnih prednosti je poboljšanje otpornosti elektroenergetske mreže putem distribuiranih sustava energije vjetra [3]. Decentralizacijom proizvodnje električne energije ovi sustavi smanjuju osjetljivost na lokalne poremećaje, što je sve važnije kako ekstremni klimatski događaji postaju sve češći [3]. Ovaj pristup također smanjuje gubitke u prijenosu energije, povećavajući pouzdanost opskrbe energijom i stabilnost opskrbe u obalnim regijama [3]. Takva stabilna opskrba energijom podržava lokalna gospodarstva, poboljšava kvalitetu života i doprinosi održivom razvoju [3].

Pučinska energija vjetra također je značajan pokretač ekonomskog rasta i stvaranja poslova. Kontinuirani rast ovog sektora stvara velike prilike za zapošljavanje u proizvodnji, ugradnji, održavanju i upravljanju farmama vjetroturbina [3]. Očekuje se da globalno tržište pučinske energije vjetra raste 13 % godišnje te da do 2040. postane industrija vrijedna 1 trilijun dolara, što će zahtijevati golema kapitalna ulaganja [4]. Posebno u obalnim područjima, prisutnost

industrije energije vjetra dodatno jača lokalna gospodarstva i otvara širok raspon radnih mjesta, čime doprinosi socijalno-ekonomskom razvoju regije [7].

2.1.4. Globalni trendovi

Globalno prihvaćanje energije vjetra na moru brzo raste, s nekoliko ključnih trendova i vodećih zemalja koje pokreću taj rast. Do kraja 2010. kapacitet pučinske vjetroelektrane dosegao je gotovo 3,1 gigavata, što predstavlja mali, ali rastući udio na globalnom tržištu energije vjetra [2]. Sektor je od tada doživio značajan rast, posebno u Kini, gdje su se kopnene vjetroelektrane oporavile 2022., i Njemačkoj, koja je povećala svoje ciljeve za obnovljivu energiju unatoč gospodarskim izazovima [3]. Ovi trendovi naglašavaju sve veću važnost pučinske energije vjetra u globalnim naporima za prelazak na obnovljivu energiju i postizanje ciljeva održivosti.

2.1.5. Energetska sigurnost i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima

Energija vjetra na moru značajno povećava energetska sigurnost i smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima korištenjem lokalnog, obnovljivog izvora koji nije podložan volatilnosti globalnih tržišta goriva. Energija vjetra ne oslanja se na uvezena goriva, što omogućuje zemljama da bolje iskoriste svoje lokalne resurse i diversificiraju svoje izvore proizvodnje energije [2]. Integracija energije vjetra u energetska portfelj nudi potencijal za značajno smanjenje ovisnosti o stranoj nafti, čime se poboljšava nacionalna energetska sigurnost [3]. Ovaj sustavni razvoj obnovljivih izvora energije također jača energetska sigurnost cijele EU, pridonoseći otpornijem i održivijem energetska sustavu [8].

2.1.6. Politika i poticaji

Učinkovite politike i poticaji odigrali su ključnu ulogu u promicanju pučinske energije vjetra, posebice u vidu održivog razvoja. Grupa Svjetske banke podržala je brojne projekte vjetroelektrana kombinacijom zajmova, ulaganja, bespovratnih sredstava i financiranja privatnog sektora, pokazujući važnost financijske potpore u unapređenju obnovljive energije [2]. Vladine politike, uključujući standarde učinka, sustave trgovanja emisijama i tarife za otkup energije, bile su ključne u poticanju prijelaza na energetska sustav s niskim udjelom ugljika i osiguravanju dosljednog rasta energije vjetra [3]. Dodatno, politička potpora u Europi, Sjedinjenim Državama i Kini bila je ključna, a zemlje poput Ujedinjenog Kraljevstva, Njemačke i Kine postavljaju ambiciozne ciljeve za pučinski kapacitet vjetroelektrana [4]. Ove politike potiču širenje energije vjetra na moru i doprinose održivosti smanjenjem emisija stakleničkih plinova te promicanjem energetska sigurnosti.

2.1.7. Izazovi i prepreke u implementaciji rješenja

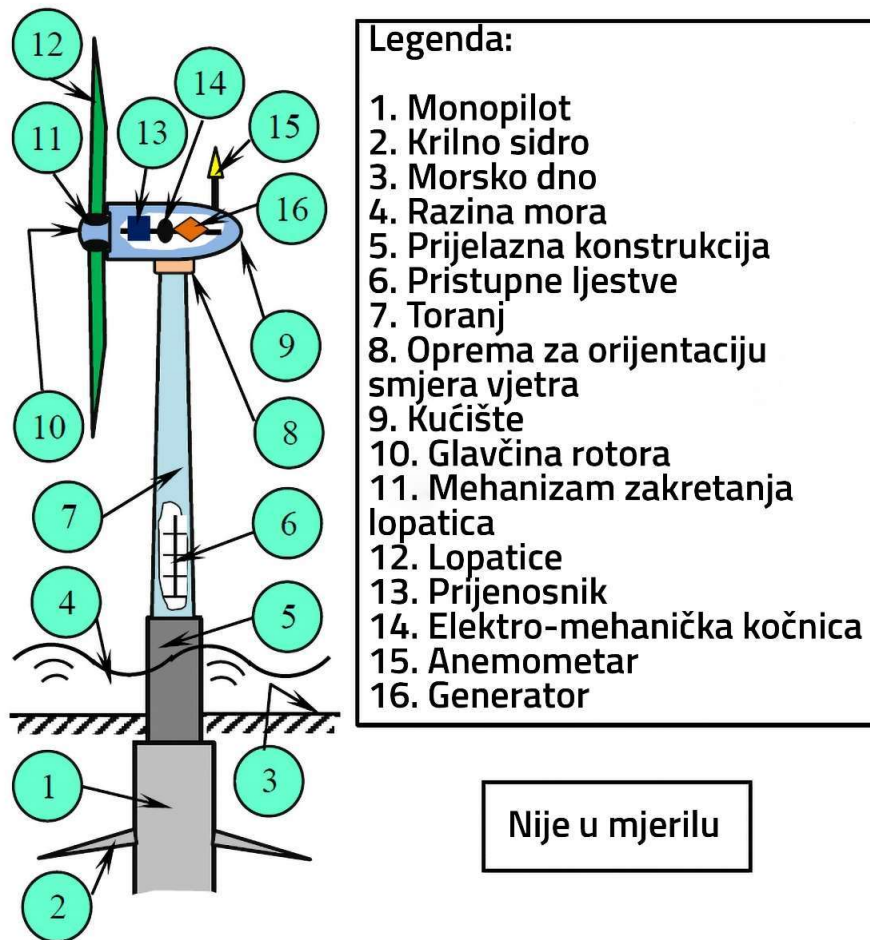
Usvajanje energije vjetra na moru suočava se s nekoliko ključnih izazova i prepreka koje se moraju riješiti kako bi se osigurao održivi razvoj. Projekti vjetroelektrana na moru skuplji su za izgradnju i rad od kopnenih projekata, često koštaju i do dvostruko više zbog složene logistike i surovih morskih uvjeta [2]. Industrija također snosi značajne troškove za instalaciju, održavanje i integraciju električne energije u mrežu, što predstavlja značajne izazove [3]. Osim toga, razvoj učinkovitih opskrbnih lanaca ključan je za isporuku jeftinih projekata, a kreatori politike moraju se pozabaviti ovim problemima opskrbnog lanca kako bi otvorili put za rast vjetroelektrana na moru [4]. Nadalje, potencijalna potreba za sustavima za pohranu energije s povećanjem prodora energije vjetra dodaje još jedan sloj složenosti, budući da trenutni elektrokemijski sustavi teško mogu konkurirati konvencionalnim postrojenjima koja fleksibilno prilagođavaju proizvodnju kako bi zadovoljila potražnju u mreži [6]. Rješavanje ovih izazova zahtijevat će ciljanu podršku politike, tehnološke inovacije i strateška ulaganja kako bi se osiguralo da energija vjetra na moru može učinkovito doprinijeti održivom razvoju.

2.2. Pučinske vjetroturbine

2.2.1. Komponente vjetroturbine

Pučinske vjetroturbine (Offshore wind turbine, skraćenica OWT) složeni su sustavi sastavljeni od nekoliko ključnih komponenti koje zajedno proizvode električnu energiju iz energije vjetra. Glavne komponente uključuju jedan od sustava sidrenja. Krilno sidro pruža dodatnu stabilnost. Toranj se uzdiže iznad razine mora, s kućištem na vrhu, koja je središte turbine [10,11]. Unutar kućišta, nalaze se ključni elementi kao što su glavna osovina, prijenosnik i generator, koji pretvaraju kinetičku energiju vjetra u električnu energiju. Glavčina rotora povezuje lopatice s kućištem, a kontrola nagiba lopatica prilagođava kut lopatica kako bi se optimiziralo hvatanje vjetra. Ostale komponente uključuju elektromehaničku kočnicu, koja može zaustaviti rotaciju lopatica u hitnim slučajevima, i anemometar, koji mjeri brzinu vjetra kako bi pomogao u kontroli rada turbine. Kabeli za napajanje spuštaju se od kućišta kroz toranj i spajaju na potpurnu infrastrukturu, te osiguravaju učinkovit prijenos generirane energije. Ova konfiguracija, koju pretežno koriste vjetroturbine s vodoravnom osi, maksimizira hvatanje energije vjetra, posebno u pučinskom okruženju gdje su brzine vjetra veće i konzistentnije [11]. Shematski prikaz svih glavnih komponenata pučinske vjetroturbine prikazan je na slici 3. Generirana električna energija prenosi se u električnu mrežu pomoću podmorskih kabela koji su dio visokonaponskog sustava istosmjerne struje (HVDC- high voltage direct current), češće korištena u odnosu na izmjeničnu struju zbog učinkovitosti u prijenosu energije na velikim udaljenostima. HVDC sustav može prenijeti velike količine energije, kao što je 2000 MW na 400 kV, 3000 MW na 500 kV i 4000 MW na 800 kV po trofaznom sustavu. Međutim, konvencionalni

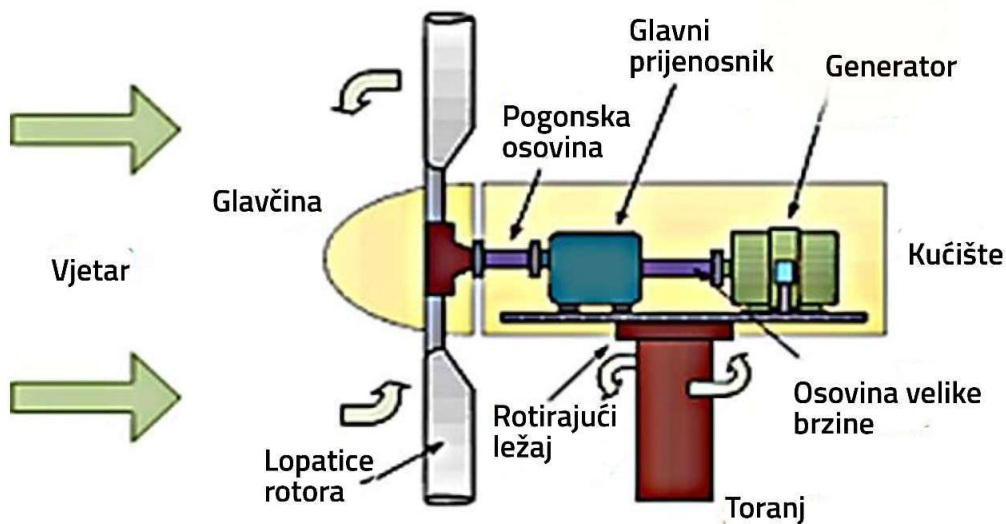
pretvarači napona neprikladni su za povezivanje pučinskih vjetroturbina na opskrbnu mrežu te smanjuju sigurnost učinkovitog prijenosa energije [10].



Slika 2 Shematski prikaz tipične pučinske vjetroturbinе (OWT) (Izvor: [10])

2.2.2. Proces generiranja energije

Pučinske vjetroturbine pretvaraju energiju vjetra u električnu kroz niz dobro koordiniranih procesa. Lopatice turbine hvataju kinetičku energiju vjetra, koristeći silu uzgona za pokretanje rotora. Velika brzina vrtnje ovog rotora ključna je jer omogućuje niži omjer prijenosnika, povećavajući učinkovitost procesa pretvorbe energije [6]. Ova se kinetička energija transformira u energiju rotacije pomoću aerodinamičkih lopatica, koje stvaraju okretni moment. Generator unutar kućišta zatim pretvara rotacijsku energiju u električnu energiju. Konačno, ta se električna energija prenosi od turbine kroz kabele za napajanje niz toranj do električne mreže [10]. Položaj i međusobni sklop mehaničkih komponenti unutar kućišta, uključujući lopatice, osovinu, prijenosnik i generator, prikazan je na slici 4.



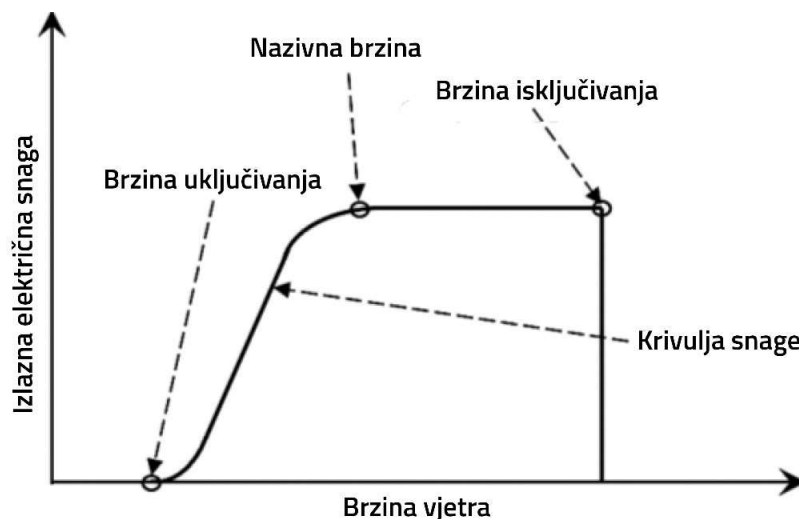
Slika 3 Mehaničke komponente unutar kućišta vjetroturbine (Izvor: [10])

2.2.3. Usporedba s kopnenim vjetroturbinama

Pučinske vjetroturbinе razlikuju se od turbina na kopnu prvenstveno po dizajnu i operativnim izazovima. Pučinske turbine općenito su veće i teže ih je postaviti zbog potrebe da se usidre u morsko dno ili koriste plutajuće platforme, ovisno o dubini vode [11]. Ove turbine moraju izdržati zahtjevnije morske uvjete, koji uključuju jake struje i valove, što njihove temelje čini značajnim dijelom ukupnih troškova—gotovo jedna trećina ukupnog projekta [10]. Osim toga, zbog svoje udaljenosti od obale, predstavljaju manji utjecaj na obližnju populaciju u smislu buke koju proizvode i vizualnog utjecaja na pejzaž, što je česta briga kod vjetroturbin na kopnu. Unatoč svim izazovima, njihova sposobnost za generiranje više energije zbog veličine i izloženosti jačim vjetrovima ih čini favoriziranim od strane investitora.

2.2.4. Utjecaj okolišnih čimbenika

Brzina vjetra i djelovanje valova predstavljaju ključne okolišne čimbenike koji značajno utječu na funkcioniranje i učinkovitost pučinskih vjetroturbin. Brzina vjetra potrebna za proizvodnju energije, to jest, minimalna brzina potrebna da se turbina pokrene iznosi oko 4 m/s, a naziva se još i „brzina uključivanja“. Izlazna snaga turbine nelinearno raste sve dok ne dosegne „nazivnu“ brzinu koja obično iznosi između 12-14 m/s, te pri toj brzini turbina doseže svoju maksimalnu snagu. Ako se brzina krene povećavati i prijeđe granicu od približno 25 m/s, takozvanu „brzinu isključenja“ turbina prestaje s radom kako bi se izbjegla mehanička oštećenja [10]. Odnos između brzine vjetra i izlazne snage vjetroturbinе prikazan je na slici 5. Djelovanje valova utječe na strukturnu stabilnost i trajnost turbine. Oštri uvjeti dovode do povećanog trošenja i habanja te vjetroturbinа zbog toga zahtijeva češće održavanje i potencijalno uzrokuje zastoje u radu. Praćenje valova i brzine vjetra je nužno za optimalno upravljanje vjetroturbinom kako bi se iskoristio maksimalni potencijal energije vjetra i produžila trajnost turbine.



Slika 4 Krivulja snage vjetroturbinе u odnosu na brzinu vjetra (Izvor: [12])

3. MONOPILOTI I PREGLED PROJEKATA PUČINSKIH VJETROELEKTRANA

3.1. Vrste temelja pučinskih vjetroelektrana

Temelji za pučinske vjetroturbine mogu se podijeliti su u dvije glavne kategorije: fiksni temelji, koji su u izravnom kontaktu s morskim dnom, i plutajući temelji, koji su sidrima povezani s dnom, ali nemaju direktan kontakt s podlogom. Izbor vrste temelja ovisi o dubini mora, svojstvima tla te tehničko-ekonomskim zahtjevima projekta [13].

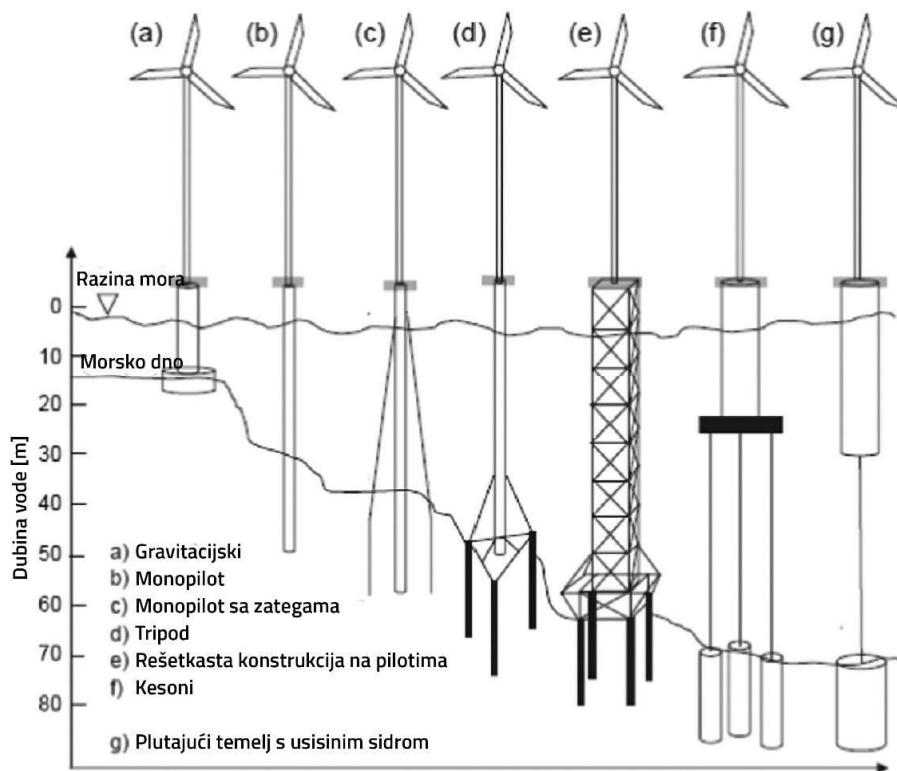
Gravitacijski temelji izrađeni su od armiranog betona u obliku kesona, oslanjaju se na vlastitu težinu za stabilnost te prenose sile na podlogu zahvaljujući širokoj bazi koja raspodjeljuje opterećenje. Povijesno su se koristili na ranim projektima pučinskih vjetroelektrana. Pogodni su za pliće vode, s dubinama do 10 metara. To su jednostavne konstrukcije koje imaju niske troškove izrade, ali isto tako i slabu nosivost te nisu prikladne za veće dubine [13].

Monopiloti, kao najčešće korišteni temelji za pučinske vjetroturbine, glavna su tema ovog rada te su detaljno obrađeni u poglavlju 3.2.

„Tripod“ temelji sastoje se od tri čelična pilota raspoređena u jednakostranični trokut, povezana gornjom rešetkastom konstrukcijom koja prenosi opterećenja od tornja na pilote. Pogodni su za dubine mora od 10 do 35 metara. Imaju nisku vlastitu težinu, ali složenu konstrukciju što ih čini skupljima u odnosu na monopilote [13].

Rešetkasti temelji izrađeni su od čeličnih cijevi povezanih u stabilnu prostornu rešetkastu konstrukciju, koja se najčešće sklapa na kopnu te potom transportira i postavlja na pilote izvedene na morskom dnu. Primjenjuju se na dubinama mora između 5 i 50 metara, što im omogućuje široku upotrebu u različitim uvjetima. Odlikuju se učinkovitom upotrebom čelika i visokim kapacitetom nosivosti, ali zahtijevaju kompleksnu logistiku i tehnički zahtjevu instalaciju, što može značajno povećati troškove projekt [13].

Plutajući temelji razvijeni su za iskorištavanje vjetropotencijala u dubljim morima, gdje fiksni temelji više nisu prikladni. Ovi temelji nisu u izravnom kontaktu s morskim dnom, već su povezani sidrima koja osiguravaju stabilnost i minimaliziraju pomicanje uzrokovano vanjskim silama. Glavna prednost plutajućih temelja je njihova primjenjivost na lokacijama s velikim dubinama, dok njihovi nedostaci uključuju složenost izvedbe i visoke troškove razvoja i instalacije [13].



Slika 5 Pregled vrsta temelja za vjetroturbine (Izvor: [13])

Tablica 2 Pregledna tablica vrsta temelja

Vrsta temelja	Dubina mora	Prednosti	Nedostaci
Monopiloti	30–60 m	Jednostavna izvedba, efikasni, široko primjenjivi	Ograničenja za vrlo duboke vode
Gravitacijski	<10 m	Jednostavna konstrukcija, niski troškovi	Niska nosivost
„Tripod“	10–35 m	Stabilnost, niska težina	Složena konstrukcija i viši troškovi
Rešetkasti	5–50 m	Visoka nosivost, ekonomična upotreba čelika	Kompleksna logistika i instalacija
Plutajući	Duboka mora	Primjenjivi za velike dubine	Složena tehnologija, visoki troškovi

3.2. Monopiloti

Monopiloti su vrsta dubokih temelja koji se buše ili zabijaju u tlo kako bi prenijeli opterećenje u dublje slojeve tla. Prijenos sile se odvija trenjem po plaštu i/ili nosivosti na bazi. Predstavljaju najčešće korišten oblik temelja za temeljenje pučinskih vjetroturbina. Ovakvi piloti su cjevastog profila širokog promjera koji se zabijaju u morsko dno kako bi se osigurala stabilnost vjetroturbine. Tipični promjer se kreće od 3 do 7 metara, iako postoje i veće varijante, takozvani XL piloti gdje promjer doseže i 10 metara. Dubina zabijanja u morsko dno se nalazi u rasponu od 25 do 40 metara [12,15]. Debljina stijenke pilota ide do 150 mm, ovisno o projektnim zahtjevima [16]. Čelična cijev koja se naziva prijelazni dio, pričvršćuje se na monopilot i povezuje toranj vjetroturbine s temeljem [12, 17]. Piloti se uglavnom koriste u moru dubine 30 do 35 metara, iako se mogu prilagoditi za korištenje u dubljem moru, ovisno o zahtjevima projekta, do dubine od 60 metara [12, 15]. S obzirom na prosječnu dubinu sjevernog Jadrana od 50 metara, te maksimalne dubine koje rijetko prelaze 100 metara, monopiloti su prikladan izbor za ovaj dio Jadranskog mora. Njihova jednostavnost u projektiranju, izradi i ugradnji u kombinaciji s učinkovitošću s kojom izvršavaju svoju funkciju, čini ih preferiranim izborom za većinu projekata pučinskih vjetroelektrana, utoliko da je 60 % svih vjetroelektrana na svijetu temeljeno na monopilotima [15,17].

3.2.1. Povijest korištenja monopilota za potrebe vjetroturbina

Pojedinačni piloti su prvi put masovno korišteni za temeljenje pučinskih vjetroturbina početkom 2000-ih kada je energija vjetra na moru postala konkurentna alternativa konvencionalnim izvorima, pogotovo u Europi, gdje su izvedeni značajni projekti kao na primjer Horns Rev 1 u Danskoj [17]. Iako je njihova prvotna funkcija bila podupiranje platformi za potrebe industrije nafte i plina, piloti su ubrzo pronašli svoj ulaz i u sektor obnovljivih izvora energije [15]. Ključna prednost pilota je i brz proces ugradnje, koji može trajati svega 24 sata te pritom smanjiti utjecaj na okoliš [16]. Napretkom tehnologije, vjetroturbine se povećavaju i postaju kompleksnije, troškovi temeljenja rastu, a piloti i dalje predstavljaju ekonomski isplativu varijantu [16]. XL varijante pilota su razvijene što omogućuje postavljanje vjetroturbina u sve dubljem moru. Iako su primarni izbor za plitke i umjerene dubine mora, trenutna istraživanja pokušavaju pronaći način za njihovu potencijalnu primjenu u još dubljim vodama.



Slika 6 XL pilot za temeljenje vjetroturbine (Izvor: [17])

3.3. Opterećenja monopilota

Temelji pučinskih vjetroturbina u vidu pilota su podvrgnuti raznim vrstama opterećenja koja treba s znatnom pažnjom uzeti u obzir prilikom projektiranja. Većina opterećenja su ciklička u naravi, što znači da se ponavljaju u predvidivim intervalima, te mogu dovesti do kompleksnih uzoraka naprezanja te zamora u samoj konstrukciji, kao što je prikazano na slici 7. Razumijevanje i pravilno modeliranje opterećenja je ključno za osiguranje stabilnosti i dugotrajnosti vjetroturbine u projektiranom životnom vijeku. Ova opterećenja se mogu u grubo podijeliti u opterećenje od vlastite težine, opterećenje od utjecaja vjetra, opterećenje valova, opterećenja morskih struja i ostala opterećenja.

3.3.1.1. Opterećenje od vlastite težine

To je statičko opterećenje i sastoji se od zbroja težine pojedinih komponenata vjetroturbine i njihovog kraka u odnosu na središte pilota. Kontinuirano se prenosi na pilot i predstavlja osnovni i minimalni zahtjev nosivosti.

3.3.1.2. Opterećenje vjetra

Predstavlja najznačajniji faktor koji utječe na temelje vjetroturbina. Vjetar stvara potisak na lopatice i na sam toranj vjetroturbine. Međutim, osim samog djelovanja vjetra koje se može prilikom projektiranja pojednostaviti kao statička horizontalna sila koja djeluje u središtu rotora, prisutna su i dinamička, to jest, ciklička opterećenja uzrokovana vjetrom koja proizlaze iz rotacijskog kretanja lopatica. Ona se mogu podijeliti na dvije osnovne komponente poznatije kao 1P opterećenje i 2P/3P opterećenje. [12].

3.3.1.3. 1P opterećenje

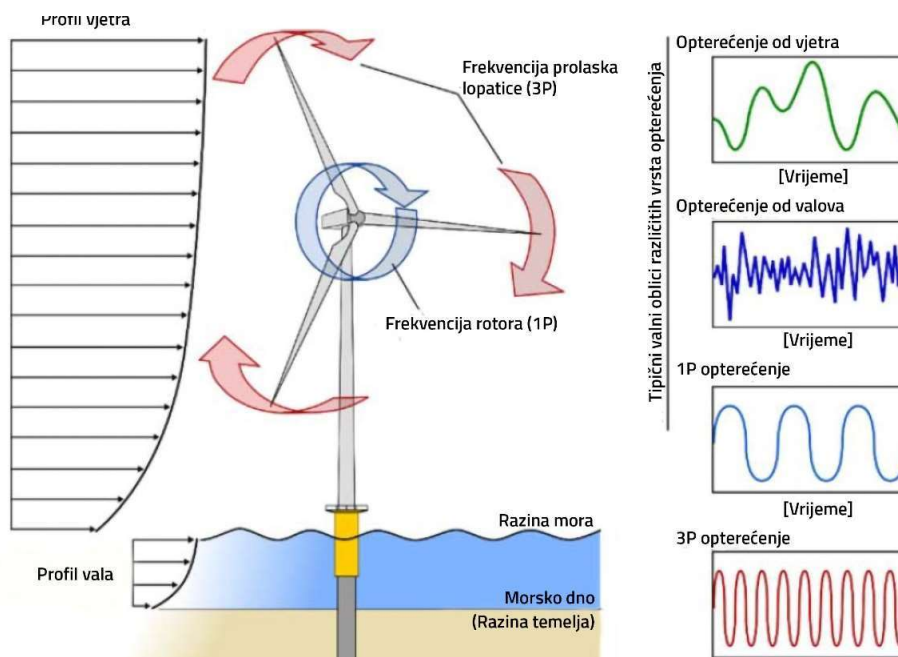
Odnosi se na cikličko opterećenje stvoreno rotiranjem turbine rotora. Pojavljuje se u istoj frekvenciji kao i sama rotacijska brzina rotora i uzrokovano je masom i aerodinamičkim disbalansom u rotoru. S obzirom da svi moderni rotori vjetroturbina mogu postići različite brzine rotacije, opterećenje 1P se ne pojavljuje samo na jednoj frekvenciji, već se nalazi na rasponu frekvencije od najmanje, do najveće brzine rotacije vjetroturbine [12].

3.3.1.4. 2P/3P opterećenje

2P/3P opterećenje je još jedno dinamičko opterećenje uzrokovano vjetrom, koje proizlazi iz efekta prolaska lopatica ispred tornja te uzrokuje privremeno smanjenje potiska zbog zasjenjenja. Za turbinu s tri lopatice, ovo se opterećenje javlja pri tri puta većoj frekvenciji okretanja rotora (3P), dok se za turbine s dvije lopatice javlja pri dvostrukoj frekvenciji (2P). Kao i sa 1P opterećenjem, obuhvaća frekvencijski pojas uvjetovan minimalnom i maksimalnom rotacijskom brzinom rotora [12].

3.3.1.5. Opterećenje valova

Djeluje bočno na pilot dok valovi udaraju na donju konstrukciju. Sam iznos sila ovisi o čimbenicima kao što su visina vala, period vala i dubina vode. Također, predstavlja cikličko opterećenje koje može značajno varirati i ovisi o stanju mora. Zahtijeva izradu detaljnih podloga prije faze projektiranja kako bi se precizno procijenile sile i osiguralo stabilnost pilota [12].



Slika 7 Tipovi opterećenja i učestalosti kod pučinskih vjetroturbina (Izvor: [12])

3.3.1.6. Opterećenje morskim strujama

Uzrokovana su horizontalnim kretanjem čestica vode, uglavnom zbog struja izazvanih vjetrom i učinkom plime i oseke. Te struje stvaraju silu otpora po cijeloj potkonstrukciji izloženoj moru. Brzina strujanja o kojoj ovisi iznos opterećenja varira s dubinom. Općenito strujanje izazvano vjetrom je jače blizu površine mora, dok su efekti plime i oseke dominantniji pri većim dubinama. S obzirom na neizvjesnost i znatnu varijabilnost brzine strujanja, konzervativni pristup se primjenjuje u modeliranju opterećenja. Pretpostavlja se konstantna brzina strujanja koja predstavlja ekstremne uvjete u 50-godišnjem povratnom periodu [12].

3.3.1.7. Ostala opterećenja

Osim svih prije spomenutih opterećenja, na pilote djeluju još i sljedeća opterećenja koja je potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja.

Opterećenje ledom uključuje opterećenje od nakupljanja leda na lopaticama i udarna opterećenja od plutajućih santi leda na konstrukciju.

Udarna opterećenja broda su sile koje se u izvanrednoj situaciji mogu pojaviti prilikom nezgode s brodom.

Izvedbena i radna opterećenja uključuju grešku u ugradnji i montaži, zaostala naprezanja i sila od pokretanja rotora i hitnog gašenja istog.

Seizmička opterećenja također mogu djelovati u obliku potresa i tsunamija, pogotovo u seizmički aktivnim regijama [12].

3.3.1.8. Kombinacija opterećenja

Kombinacija svih navedenih opterećenja predstavlja značajan inženjerski izazov, poglavito zbog cikličke prirode većine opterećenja. Piloti moraju biti projektirani da izdrže milijune ciklusa opterećenja, ponajviše onih izazvanih vjetrom i valovima i to za vrijeme cijelog životnog vijeka koji tipično iznosi 25 godina. Ova ciklička opterećenja mogu dovesti do zamora i promjene krutosti u temeljnom tlu tokom vremena te samim time utjecati na prirodnu frekvenciju i odaziv sustava vjetroturbina-pilot-tlo [12]. Za uspješan rad vjetroelektrana na moru, ključno je osigurati da temelji mogu izdržati složena i različita opterećenja

3.3.2. Dodatni čimbenici u projektiranju monopilota

Monopiloti su izloženi korozivnom okruženju zbog morske vode i prisutnosti kisika. Kako bi se spriječio gubitak nosivosti, koriste se različite mjere, uključujući povećanje debljine stijenke pilota (tzv. korozijski dodatak), zaštitne premaze poput cinka te katodnu zaštitu. Prema DNV standardima, referentna stopa korozije iznosi 0,1 mm godišnje [12].

Erozija tla (ili scour) nastaje zbog djelovanja valova i morskih struja na podnožje monopilota, što može rezultirati izlaganjem dubljih slojeva tla nepodržanim uvjetima. Ključni parametri uključuju dubinu erozije (S) i njezin doseg (Ls), koji ovise o brzini morske struje. Zaštita od erozije ključna je za smanjenje održavanja i osiguranje stabilnosti temelja [design].

Morski organizmi, poput školjkaša i algi, talože se na podvodne strukture, povećavajući masu i hidrodinamičke otpore, a time i ukupna opterećenja. Projektanti moraju uzeti u obzir te dodatne faktore prilikom određivanja opterećenja od djelovanja valova [12].

3.4. Analiza djelovanja sila na monopilote

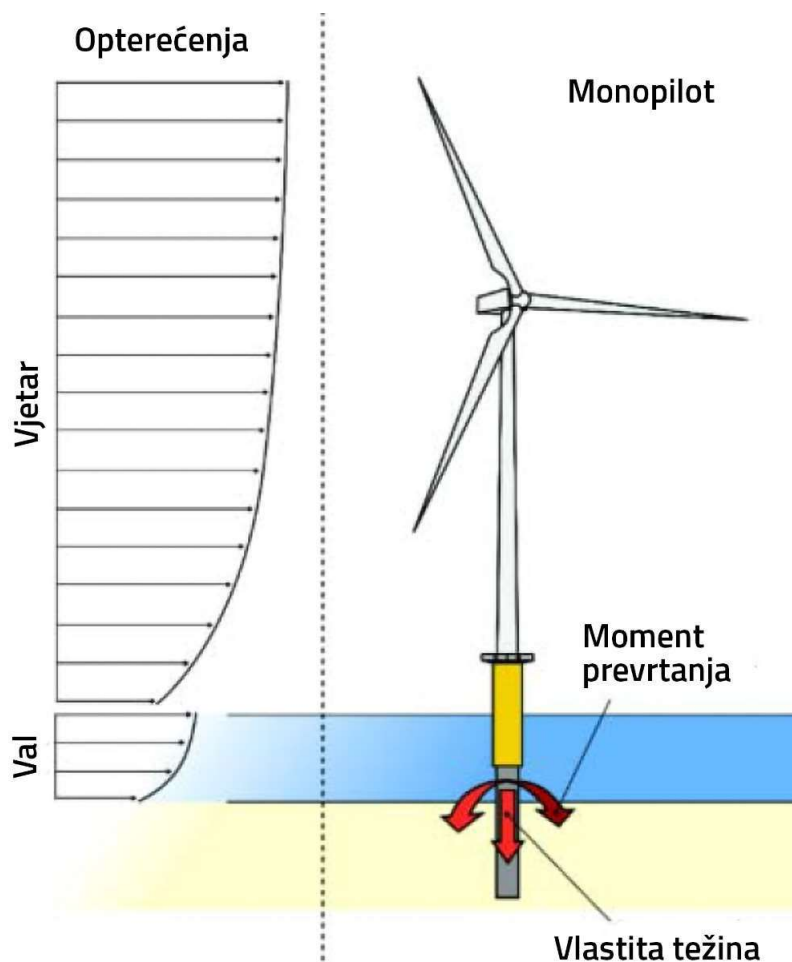
Monopiloti pučinskih vjetroturbina prvenstveno su projektirani da se odupru značajnim silama koje nastaju zbog okolišnih i radnih opterećenja. Jedna od ključnih sila kojima se piloti moraju oduprijeti je moment prevrtanja, koji se javlja zbog dvije glavne komponente: potiska koji djeluje na razini glavčine i opterećenja valova na donju konstrukciju, kao što je prikazano na slici 8. Potisak koji stvara vjetar na lopaticama i tornju turbine stvara vodoravnu silu koja, u kombinaciji s visinom turbine, stvara značajan moment prevrtanja u temelju. Slično tome, sile valova doprinose ovom momentu prevrtanja, posebno kada valovi udaraju u potkonstrukciju, te time stvaraju bočnu silu kojoj se pilot mora oduprijeti [14].

Osim momenta prevrtanja, momenti savijanja su druga kritična sila koja djeluje na pilot. Horizontalna opterećenja od vjetra i valova stvaraju velike momente savijanja zbog same geometrije pučinske vjetroturbine. Ovi momenti savijanja ključni su prilikom projektiranja s obzirom da diktiraju nosivost konstrukcije tokom vremena [12].

Pučinske vjetroturbine izložene su od 10 do 100 milijuna ciklusa opterećenja tijekom svog radnog vijeka. Ovo opsežno cikličko opterećenje može dovesti do promjena u krutosti pilota i temeljnog tla, potencijalno utječući na prirodnu frekvenciju sustava vjetroturbina-pilot-tlo. Dugoročno cikličko bočno opterećenje, posebno u uvjetima kada je broj ciklusa opterećenja iznimno visok, može rezultirati većim progibom i rotacijom glave pilota nego što je prvobitno predviđeno. Ovo naglašava potrebu za daljnjim istraživanjem bočnog odgovora pilota u takvim uvjetima kako bi se bolje razumjelo i predvidjelo njihovo dugoročno djelovanje [12].

Relativno jednostavan dizajn pilota omogućuje prilagodbu različitim dimenzijama i uvjetima okoline, te time pruža konkurentna rješenja kako u plitkom tako i u dubokom moru. Ova prilagodljivost pomaže minimizirati potrebu za opsežnim terenskim podacima, te čini pilote praktičnim izborom za niz projekata vjetroelektrana na moru [16].

Piloti vjetroturbina posebno su osjetljivi na dinamička opterećenja zbog fleksibilne prirode strukture, što rezultira niskom prirodnom frekvencijom. Ova osjetljivost znači da na pučinske vjetroturbine više utječu dinamičke sile, poput onih od vjetra, valova i vibracija izazvanih rotorom. Za razliku od čvrstih temelja koji se koriste u naftnim i plinskim instalacijama, piloti vjetroturbina moraju biti projektirani s fokusom na ove dinamičke interakcije, budući da se tradicionalni pristupi projektiranju ne mogu izravno primijeniti. Temeljita dinamička analiza ključna je za razumijevanje odgovora pilota na bočna dinamička opterećenja, što pomaže u određivanju najprikladnijeg strukturnog modela, bilo da se radi o Timoshenkovoj, Euler-Bernoullijevoj teoriji ili teoriji krute grede, kako bi se osigurala stabilnost i dugovječnost [12, 14].



Slika 8 Sile i momenti koji djeluju na temelje vjetroturbine (Izvor: [12])

3.5. Izvedba pučinskih monopilota

Ugradnja pilota za potrebe vjetroturbina uključuje nekoliko različitih metoda, svaka od njih pogodna za određenu vrstu morskog dna i zahtjeva ugradnje. Neke od glavnih metoda su:

1. **Hidraulički ili vibracijski čekić iznad površine:** Pogodan za morsko dno sastavljeno od gline, pijeska ili krede. Brža i manje osjetljiva na vremenske uvjete u usporedbi s drugim metodama, ali postoji opasnost od oštećenje glave pilota prilikom udarca čekića i problem s održavanjem okomitosti[12].
2. **Podvodni čekić:** U slučajevima kad je potrebno preciznije zabijanje ili gdje je čekić iznad vode nepraktičan. Metoda dozvoljava bolju kontrolu zabijanja, pogotovo u izazovnim uvjetima [12].
3. **Bušenje-zabijanje-bušenje:** Kada inicijalno zabijanje ne ostvari željeno prodiranje pilota u tlo, koristi se ova metoda. Prvotnim bušenjem se uklanja sloj tla, zatim se pilot zabija do određene dubine i potom bušenjem se osigurava željene dubina prodiranja pilota u tlo. Iako sporija od samog zabijanja, metoda je neophodna u otežanim uvjetima tla [12].
4. **Bušenje i injektiranje:** Za stjenovito morsko dno, gdje tradicionalno zabijanje je neefikasno, primjenjuje se metoda bušenja i injektiranja. Metoda se sastoji od bušenja bušotine, potom se postavlja pilot i ostvaruje se kontakt sa injektiranjem. Metoda je vremenski zahtijevna, ali nužna za stabilizaciju pilota u stijenskoj masi. [12].



Slika 9 Ugradnja pilota za pučinsku vjetroelektranu London Array (Izvor: [12])

3.6. Pregled projekata

3.6.1. Vindeby

Lokacija: 1,5–3 km od obale Lollanda, Danska

Kapacitet [MW]: 4.95

Broj turbina: 11

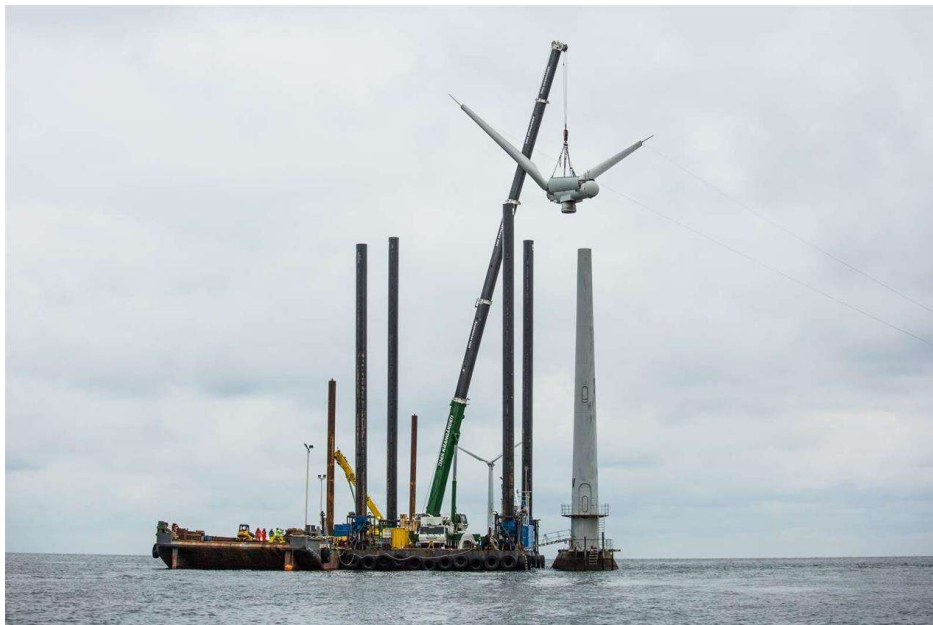
Dubina mora [m]: 2-5

Vlasništvo: Ørsted

Godina izgradnje: Puštena u pogon 1991.; demontirana 2017.

Značajke: Prva svjetska pučinska vjetroelektrana

Vindeby je bila prva offshore vjetroelektrana na svijetu, smještena u plitkim vodama Baltičkog mora. Sastojala se od 11 turbina snage 450 kW, ukupnog kapaciteta 4,95 MW, što je bilo dovoljno za opskrbu oko 2.200 danskih kućanstava. Turbine su bile postavljene na gravitacijske temelje, prilagođene plitkim vodama i mekom morskom dnu. Nakon 25 godina rada, vjetroelektrana je demontirana 2017. godine, a komponente su reciklirane ili ponovno upotrijebljene u istraživačke svrhe [18].



Slika 10 Demontaža vjetroelektrane Vindeby (Izvor: [19])

3.6.2. Horns Rev

Lokacija: 30 km od obale Jutlanda, Sjeverno more, Danska

Kapacitet [MW]: 209

Broj turbina: 91

Dubina mora [m]: 9-18

Vlasništvo: Ørsted

Godina izgradnje: Puštena u pogon 2009.

Značajke: Prva pučinska vjetroelektrana s offshore stanicom za stalno održavanje

Horns Rev 2, smještena 30 km od obale Jutlanda, bila je najudaljenija pučinska vjetroelektrana u vrijeme izgradnje. S 91 turbinom ukupnog kapaciteta 209 MW, može opskrbiti oko 200.000 kućanstava. Turbine su postavljene na monopilote, prilagođene dubinama mora od 9 do 18 metara. Posebnost ove elektrane je prva pučinska stanica za stalno održavanje, koja omogućuje tehničarima boravak na lokaciji, čime se povećava efikasnost održavanja. Horns Rev 2 dio je klimatskog partnerstva Ørsteda, koje obvezuje partnere da koriste energiju proizvedenu ovom vjetroelektranom [20].



Slika 11 Pučinska stanica za održavanje (Izvor: [20])

3.6.3. Hornsea 1

Lokacija: 120 km od obale Yorkshire-a, Sjeverno more, Ujedinjeno Kraljevstvo

Kapacitet [MW]: 1,218

Broj turbina: 174

Dubina mora [m]: 20-40

Vlasništvo: Ørsted (50 %), Jupiter Offshore Wind Limited (50%)

Godina izgradnje: U punom pogonu od 2019, izgradnja započeta u siječnju 2018.

Značajke: Prva farma vjetroturbina koja premašuje 1 GW kapaciteta, proizvodi struju za 1 milijun kućanstava.

Hornsea 1, najveća farma vjetroturbina u trenutku izgradnje, predstavlja ujedno i jedan od najvećih projekata u Europi. Za potrebe temeljenja vjetroturbina, piloti su zabijani u tlo koje se sastoji od slojeva pijeska i ledenjačkog tla. Za vrijeme izgradnje, primijenjen je kod građevinske prakse (eng. *Code of Construction Practice*) kako bi se zaštitile morske životinje, posebice sisavci zatečeni na lokaciji. Meki start je primijenjen za sve aktivnosti zabijanja pilota, početna energija zabijanja je ograničena na 20 % maksimalne snage čekića sa smanjenom frekvencijom broja udaraca kako bi se životinjama dalo dovoljno vremena da se udalje. [21,22]



Slika 12 Karta položaja vjetroelektrane Hornsea 1 (Izvor: [21])

3.6.4. Hornsea 2

Lokacija: 89 km od obale Yorkshire-a, Sjeverno more, Ujedinjeno Kraljevstvo

Kapacitet [MW]: 1,320

Broj turbina: 165

Dubina mora [m]: 30-40

Vlasništvo: Ørsted

Godina izgradnje: Izgradnja započeta u listopadu 2020. te dovršena u kolovozu 2022.

Značajke: Trenutno najveća pučinska farma vjetroelektrana

Sestrinski projekt farme Hornsea 1, svojom je izgradnjom pretekao i postao trenutno najveća dovršena farma vjetroelektrana. Prostire se na površini od 462 kilometra. Iako ima 9 turbina manje od Hornsea 1, proizvodi utoliko više energije da strujom snabdijeva dodatnih 400 tisuća kućanstava. To je moguće upravo izvedbom većih turbina, tako da ugrađene turbine model "SG 8.0-167 DD" proizvedene od tvrtke Siemens Gamesa jednim svojim okretajem proizvode dovoljno energije koliko jedno kućanstvo potroši u 24 sata. Sama veličina turbina koja konstantno raste, zahtijeva sve veće i veće pilote tako da su za ovaj projekt primijenjeni piloti visine od 60 do 78 metara, ovisno o dubini mora [23,24].



Slika 13 Transport pilota u luci (Izvor: [23])

3.6.5. Arcadis Ost 1

Lokacija: 19 km sjeveroistočno od otoka Rügen, Baltičko more, Njemačka

Kapacitet [MW]: 257

Broj turbina: 27

Dubina mora: 41-46

Vlasništvo: Parkwind

Godina izgradnje: Inaugurirana u prosincu 2023. godine

Značajke: Primjena XXL pilota

Rasprostranjen na površini od 29 kilometara kvadratnih, Arcadis Ost 1, predstavlja znatno dostignuće u području pučinskih vjetroelektrana. Opskrbljuje električnom energijom 290 tisuća kućanstava. Za ugradnju 28 XXL pilota (27 turbina i kolektor), promjera 9.5 metara, dužine do 110 metara, a prosječne težine 2000 tona, korišteno je specijalizirano plovilo Orion koje je opremljeno s hvataljkom koja kompenzira pokrete izazvane valovima te osigurava vertikalnost prilikom ugradnje. Ovaj način ugradnje smanjuje interakciju s morskim dnom, time čuva okoliš i ubrzava izvedbu. [25,26,27,28]



Slika 14 Instalacija lopatica na vjetroturbinu (Izvor: [27])

3.6.6. Veja Mate

Lokacija: 130 km sjeverno od Eemshavena, Njemačka, Sjeverno more

Kapacitet [MW]: 402

Broj turbina: 67

Dubina mora: 39-41 m

Vlasništvo:

Godina izgradnje: Operativna od siječnja 2018.

Značajke: Korišteni XXL piloti (1300 tona)

Veja Mate vjetroelektrana smještena je 130 km od Eemshavena u njemačkom Sjevernom moru. Projekt uključuje 67 Siemens SWT-6.0-154 turbina, svaka kapaciteta 6 MW, s rotorima promjera 154 metra. Turbine su postavljene na monopilote, prilagođene dubinama mora od 39 do 41 metar. Izgradnja je započela u veljači 2016., a vjetroelektrana je postala potpuno operativna u siječnju 2018., s godišnjom proizvodnjom električne energije većom od 1,6 TWh, što je dovoljno za opskrbu približno 400.000 njemačkih kućanstava [29].

3.6.7. Vineyard Wind 1

Lokacija: Obala Massachusettsa, SAD

Kapacitet [MW]: 800

Broj turbina: 62

Dubina mora: 37-49 m

Vlasništvo: Iberdrola Group, Copenhagen Infrastructure Partners

Godina izgradnje: 2023.

Značajke: Prva komercijalna pučinska vjetroelektrana u SAD-u

Vineyard Wind I, smješten oko 12 nautičkih milja od obala Martha's Vineyarda i Nantucketa, prvi je veliki projekt pučinska vjetroelektrane u SAD-u. S kapacitetom od 800 MW, projekt će opskrbiti više od 400.000 kućanstava u Massachusettsu čistom energijom. Razvijen od Iberdrole kroz Avangrid Renewables i Copenhagen Infrastructure Partners, projekt vrijedan 3 milijarde dolara stvorit će 3.600 radnih mjesta te smanjiti emisije CO₂ za 1,6 milijuna tona godišnje, što je ekvivalent uklanjanju 325.000 automobila s ceste. Također će omogućiti uštede u troškovima energije od 1,4 milijarde dolara tijekom prvih 20 godina rada [30].

3.6.8. Akita Noshiro

Lokacija: Obala prefektura Akita, Japansko more, Japan

Kapacitet [MW]: 139

Broj turbina: 33

Dubina mora: 10-30 m

Vlasništvo: Akita Offshore Wind

Godina izgradnje: 2022

Značajke: Prva komercijalna pučinska vjetroelektrana u Japanu

Akita Noshiro vjetroelektrana koristi masivne pilote prilagođene japanskim klimatskim i seizmičkim uvjetima. Svaki pilot teži oko 16.217 tona, s promjerom od 4,7 do 6 metara i duljinom od 50 do 79 metara, što osigurava stabilnost turbina u dubinama mora od 10 do 30 metara. Ova konstrukcija omogućuje otpornost na snažne tajfune i seizmička podrhtavanja specifična za ovo područje. Postavljanje turbina izvedeno je uz pomoć specijalizirane opreme koja osigurava visoku preciznost i smanjuje utjecaj na morski ekosustav, pružajući dugotrajnost i sigurnost ovoj prvoj komercijalno jpučinskoj vjetroelektrani u Japanu [31].



Slika 15 Transport pilota na lokaciju vjetroelektrane (Izvor: [31])

3.6.9. Taranto

Lokacija: Jonsko more, luka Taranto, Italija

Kapacitet [MW]: 30

Broj turbina: 10

Dubina mora: 4-18 m

Vlasništvo: Renexia

Godina izgradnje: Puštena u pogon u travnju 2022.

Značajke: Prva pučinska vjetroelektrana u Sredozemnom moru

Taranto vjetroelektrana, poznata i kao Beleolico, smještena u blizini luke Taranto, predstavlja prvu pučinsku vjetroelektranu u Sredozemnom moru. S kapacitetom od 30 MW, sastoji se od deset turbina koje godišnje proizvode oko 58.000 MWh električne energije, što može opskrbiti oko 60.000 ljudi. Projekt, koji je realizirala tvrtka Renexia, dio Toto Grupe, s ukupnom investicijom od 80 milijuna eura, dokazuje da su brzine vjetra u Sredozemlju dovoljno konkurentne za proizvodnju obnovljive energije te da ne postoje značajne tehničke prepreke za izvedbu vjetroelektrana u tom području. Vjetroelektrana je službeno puštena u pogon u travnju 2022. godine [32].



Slika 16 Izvedba vjetroturbina u Luci Taranto (Izvor: [32])

3.6.10. Zaključci i trendovi u razvoju pučinskih vjetroelektrana

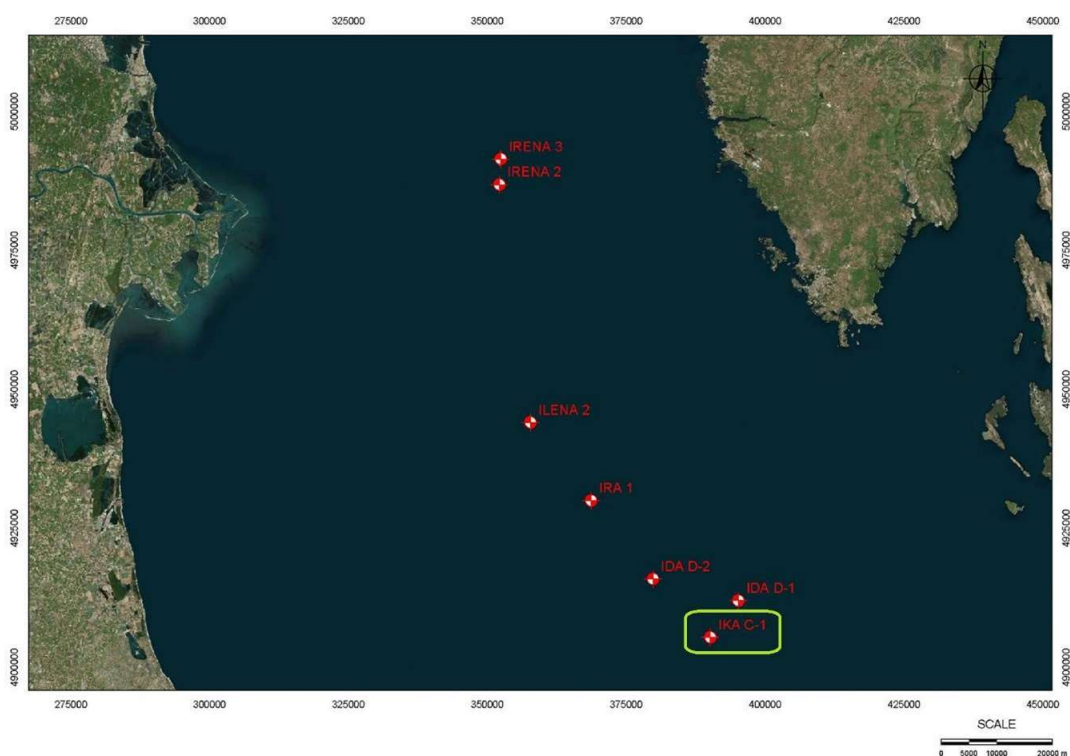
Brz tehnološki napredak omogućuje rapidno širenje pučinskih vjetroelektrana i dodaje na važnosti ovom izvoru obnovljive energije. Počevši s malim projektima kao što je Vindeby u Danskoj s 4,95 MW, današnji projekti poput Hornsea 2 u UK-u dostižu kapacitete od 1.320 MW, proizvodeći energiju za milijune kućanstava. Osim značajnog povećanja kapaciteta, vjetroelektrane su postale tehnički zahtjevnije, premještajući se u dublje vode i sve dalje od obale.

Ova promjena omogućena je napretkom u temeljenju, prelaskom s gravitacijskih temelja na masivne pilote, poput onih u Arcadis Ost 1, koji teže do 2.000 tona i osiguravaju stabilnost u kompleksnim morskim uvjetima. Europa, posebno Danska, Njemačka i Ujedinjeno Kraljevstvo, predvodi u inovacijama i broju instalacija, dok SAD i Azija tek razvijaju velika tržišta, s projektima poput Vineyard Wind i Akita Noshiro, prilagođenima za lokalne klimatske uvjete.

Sredozemno more polako se uključuje s projektom Taranto u Italiji, koji pokazuje da su vjetroelektrane održive i u ovom dijelu Europe. Uz ekološke koristi, kao što je smanjenje emisija CO₂, ovi projekti potiču i ekonomski razvoj stvaranjem tisuća radnih mjesta te podržavaju globalne klimatske ciljeve, osiguravajući održivu budućnost kroz čiste izvore energije.

4. GEOLOŠKE I GEOTEHNIČKE KARAKTERISTIKE U SJEVERNOM JADRANU

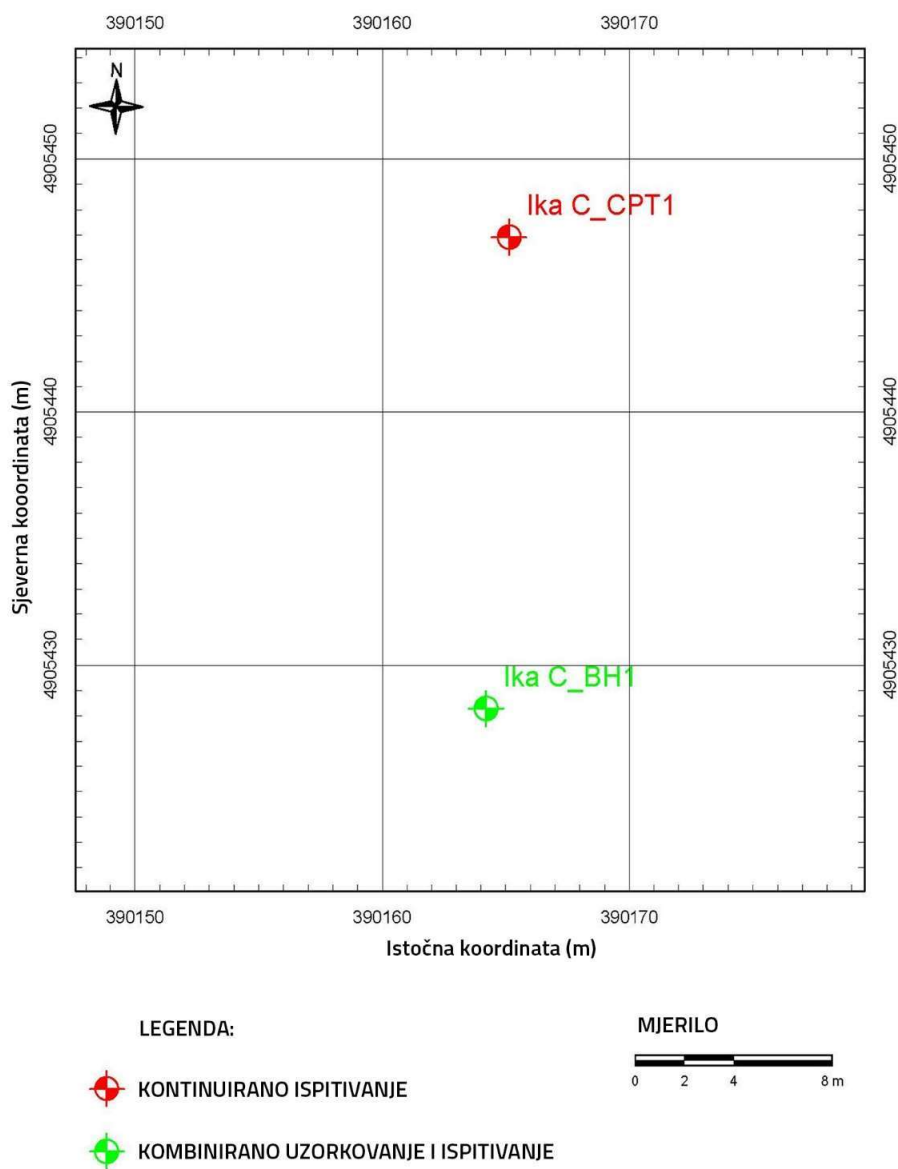
Podaci predstavljeni u poglavlju su sastavni dio izvještaja o geotehničkim istražnim radovima koje je provela tvrtka RINA Consulting S.p.A. za investitora INA d.d. na području Sjevernog Jadrana. Svrha provedbe istražnih radova je izrada podloga za projektiranje pučinskih platformi za eksploataciju zemnog plina. Uzorkovanje i in-situ ispitivanje provela je tvrtka Fugro Netherlands Marine, a sve pomorske radnje su izvršene na plovilu MV Gargano kojim upravlja tvrtka Tidewater. U okviru poglavlja biti će predstavljeni samo istražni radovi na području eksploatacijskog polja Ika-C na dvije lokacije (koordinate i dubina mora prikazani u tablici 6.1.) koji su provedeni u sklopu šire operacije istražnih radova koji obuhvaćaju veći dio sjevernog Jadrana, a pri tome je lokalitet Ika-C najjužnije ispitivano područje. Lokacija svih ispitivanih područja prikazana je na slici 17 Na samom području Ika-C, radovi su provedeni u dvije lokacije, Ika C_CPT1 i Ika C_BH1 prikazano na slici 18 Na lokaciji Ika C_CPT1 provedeno je ispitivanje statičkim prodiranjem (eng. Cone penetration test, CPT) do dubine 30 metara ispod morskog dna, dok je na lokaciji Ika C_BH1 provedeno kontinuirano uzorkovanje do dubine 30 metara ispod morskog dna, a od 30 do 120 metara je naizmjenično provedeno uzorkovanje i ispitivanje statičkim prodiranjem [33].



Slika 17 Karta s prikazom svih ispitivanih lokacija (Izvor: [33])

Tablica 3 Koordinate ispitivanih lokacija (Izvor: [33])

Lokacija	Y koordinata (m)	X koordinata (m)	Dubina ispitivanja (m)	Dubina mora (m)
Ika C_CPT1	390165.13	4905446.91	30.0	62.3
Ika C_BH1	390164.21	4905428.18	120.0	62.3



Slika 18 Pozicija ispitivanih lokacija (Izvor: [33])

4.1. Korištena oprema i metode ispitivanja

U pučinskim geotehničkim istražnim radovima koristi se širok spektar specijalizirane opreme i metoda za prikupljanje podataka o uvjetima tla ispod morskog dna. Ovo potpoglavlje daje pregled glavnih alata, instrumenata i metoda korištenih za prikupljanje podataka prikazanih u ovom poglavlju, počevši s brodom koji nosi opremu.

Svi istražni radovi provedeni in situ su obavljani s Fugro-ovog broda Gargano, jednog od najiskusnijih brodova za bušenje morskog dna. Opremljen je opremom za dinamičko pozicioniranje klase 2 (DP2) što znači da može održavati preciznu lokaciju, ključno svojstvo broda za bušenje, čak i kada otkáže jedna od aktivnih komponenti sustava [34]. Na njega je montirana brodska bušilica R50 koja se nalazi na kompenzacijskoj radnoj platformi. Veliko iskustvo u istražnim radovima stekao je na Sjevernom moru, Sredozemnom moru i na pučini Zapadne Afrike gdje je s radovima do dubine 300 metara ispod morskog dna, i pri dubini mora do 200 metara, provodio istražne radove za platforme, vjetroelektrane, luke, tunele i mostove. [33].



Slika 19 Brod Gargano (Izvor: [35])

4.1.1. Downhole metoda ili ispitivanje u bušotini

Naziv metode primijenjene u prikupljanju podataka prikazanih u ovom poglavlju je Downhole metoda. Odnosi se na prikupljanje podataka o tlu izravno u bušotini. Metoda se sastoji od spuštanja alata u izbušenu bušotinu, te provođenje ispitivanja ili uzimanja uzorka na njenom dnu [33].

Primjena ovog postupka sastoji se od sljedećih koraka:

1. **Bušenje bušotine:** Svrđlo pričvršćeno na bušaću garnituru, koja se sastoji od povezanih API bušaćih cijevi, koriste se za bušenje tla ispod razine morskog dna sve dok se ne postigne željena dubina.
2. **Stabilizacija bušaće garniture:** Bušaća garnitura se stabilizira pomoću velikog čeličnog okvira za morsko dno (Sea Bed Frame, SBF) u svrhu stabilizacije ispitivanja za vrijeme ispitivanja ili uzorkovanja.
3. **Spuštanje alata u bušotinu**
4. **Postavljanje alata:** na dno bušaće šipke u posebnom dijelu zvanom sklop dna bušotine (Bottom Hole Assembly, BHA) gdje se alat sam pričvršćuje i/ili brtvi pod vlastitom težinom.
5. **Provođenje ispitivanja ili uzorkovanja:** Alat se pomiče izvan BHA ekstruzijom kako bi se obavilo ispitivanje ili uzorkovanje.

Pučinsko geotehničko bušenje, koje se uvijek provodi sa specijaliziranih i posebno opremljenih brodova ili platformi, usmjereno je na očuvanje kvalitete ispitivanog tla, a ne na postizanje velikih dubina u kratkom vremenu. Dubine bušotina variraju od 10 do 30 metara za potrebe projektiranja *jack-up* sustava i od 100 do 400 metara za potrebe temelja platformi kakve se koriste u naftnoj i plinskoj industriji. Bušenje se može odvijati i na dubinama mora do 3000 metara [33].

Bušaća platforma je ključni dio cijelog sustava i sastoji se od sljedećih komponenti:

1. Bušaći toranj, postavljen iznad donjeg otvora broda, takozvanog *moonpoola*
2. Bušaća garnitura s kompenzacijom vertikalnih pomaka
3. Okvir za morsko dno (SBF)

Bušaća garnitura se sastoji od:

1. Svrđla s šupljom sredinom
2. Sklop dna bušotine (BHA)
3. API bušaćih ovratnika, bušaćih cijevi, pogonskih i zaštitnih elemenata te međuspojnice.

4.1.2. Ispitivanje statičkim prodiranjem (CPTU)

Predstavlja ključni alat za in-situ ispitivanje tla, pruža podatke o tlu u stvarnom vremenu tijekom ispitivanja. Ovaj alat omogućuje precizna mjerenja nekoliko ključnih svojstava tla, što je od izuzetne važnosti za izradu pouzdanih profila uslojenosti i razumijevanje ponašanja i strukture tla.

Mjereni parametri uključuju:

1. **Dubina prodiranja** – Dubina do koje je šiljak utisnut u tlo.
2. **Otpornost prodiranja šiljka (qc)** – Mjeri otpornost tla na prodiranje šiljka.
3. **Trenje na plaštu (fs)** – Mjeri trenje između tla i plašta prilikom prodiranja.
4. **Porni tlak (u)** – Mjeri tlak vode u porama unutar tla, uključujući:
 - **Prolazni porni tlak** – Zabilježen tijekom penetracije konusa, ključan za analizu tla s niskom propusnošću.
 - **Hidrostatski porni tlak** – Prirodni tlak vode u porama tla, neovisno o kretanju šiljka.
5. **Nagib od vertikale** – Bilježi svako odstupanje u vertikalnom poravnanju penetrometra tijekom ispitivanja.

Osim ovih mjerenja, uređaj također izračunava disipaciju prolaznog pritiska pora tijekom prekida penetracije. Ova funkcija omogućuje procjenu in-situ koeficijenta konsolidacije tla, što je ključno za procjenu stišljivosti tla i ponašanje tla pri slijeganju [33].



Slika 20 CPTU sonde (Izvor: [33])

4.1.3. WISON® Mk V sustav

WISON® (WIreline SOuNding) sustav koristi se za provođenje piezo-konusnih penetracijskih testova (PCPT), uzorkovanje i bušenje u pučinskim bušotinama. WISON® Mk V CPT sustav dizajniran je za ispitivanje in-situ svojstava tla na dubinama do 2000 metara ispod razine bušaće platforme, bilo u morskim ili kopnenim uvjetima.

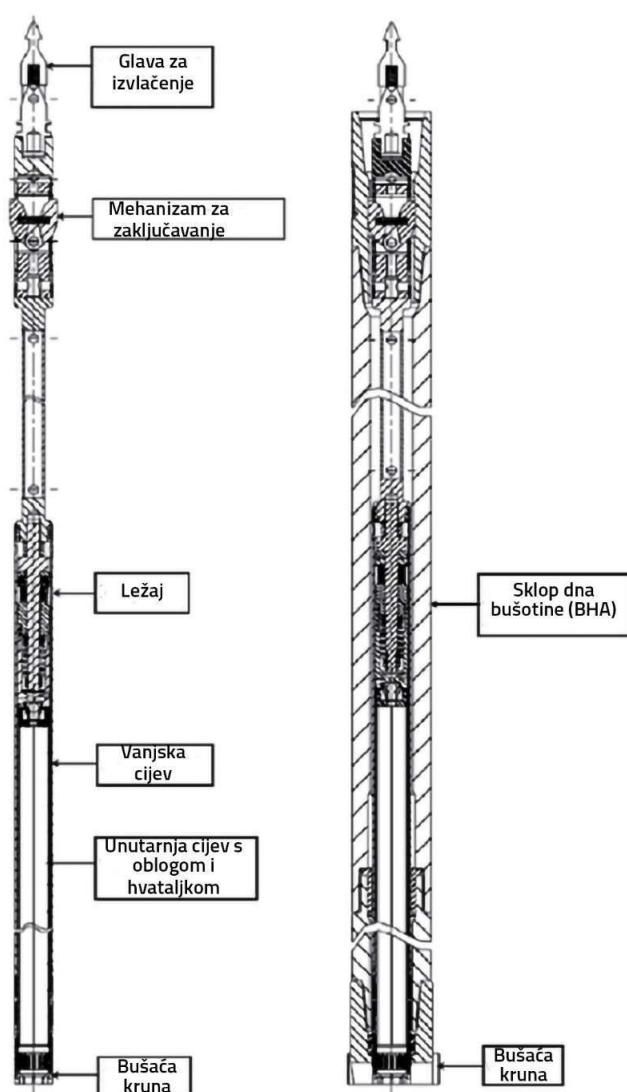
Sustav se sastoji od jedinice za dizalicu sa žicom s hodom od 3 metra i kapacitetom potiska od 90 kN. Nakon što je bušotina izbušena i očišćena ispiranjem blata, WISON® se spušta do bušaće glave, gdje se postavlja i učvršćuje vlastitom težinom. Šiljak se hidraulički potiskuje u tlo kontroliranom brzinom od 20 mm/s. Mjerenja otpornosti šiljka, trenja na plaštu i pornog pritiska bilježe se u stvarnom vremenu [33].



Slika 21 Sastavljanje WISON sustava (Izvor: [33])

4.1.4. Fugro Morski Cijevni Sustav za Jezgrovanje (Fugro Marine Core Barrel, FMCB)

FMCB je alat za uzorkovanje tla koji se koristi u žičanom bušenju jezgre, prvenstveno za krute gline, cementirana tla i stijene. Kompatibilan je s Fugro-ovim standardnim downhole sustavima, kao što je WISON®. FMCB se spušta u bušaću cijev pomoću čeličnog kabela. Vanjska cijev rotira zajedno s bušačom cijevi, dok unutarnja cijev ostaje nepomična te u kontaktu s tlom ili stijenom. Uzorak se prikuplja se u podijeljenoj košuljici unutar unutarnje cijevi. Nakon dovršetka uzorkovanja, FMCB se podiže pomoću kabela, a uzorak se vadi za analizu [33].



Slika 22 dijagram komponenti FMCB (Izvor: [33])

4.2. CPT ispitivanja

Korištenjem Fugro WISON[®] Mk V uspješno je izvedeno 33 CPT ispitivanja. Većina testova je koristila šiljak od 10 cm² (CP10) s kapacitetom od 5 tona i elementom za mjerenje pornih pritisaka postavljenim na ramenu (u2 tip).

Prije početka ispitivanja, okvir za morsko dno je postavljen i nadziran zbog stabilnosti nagiba, kotrljanja i slijeganja dok se nije postigla stabilnost. Ispitivanje se prekidallo prema unaprijed definiranim kriterijima, poput otkrivanja anomalija u tlu ili dostizanja kapaciteta potiska [33].

Svaki CPT test zabilježio je sljedeće izmjerene podatke:

- **qc**: Otpor šiljka (MPa)
- **fs**: Trenje na plaštu (MPa)
- **u2**: Porni pritisak (MPa)

Također su izračunati sljedeći izvedeni parametri:

- **qn**: Neto otpor na šiljku (MPa)
- **qt**: Ukupna otpornost šiljka (MPa)
- **Bq**: Omjer pornih pritisaka (-)
- **Rf**: Omjer trenja (%)
- **Ic ili ISBT**: Indeks tipa ponašanja tla (-)
- **Qtn**: Normalizirani otpor šiljka (-)
- **Fr**: Normalizirani omjer trenja (%)

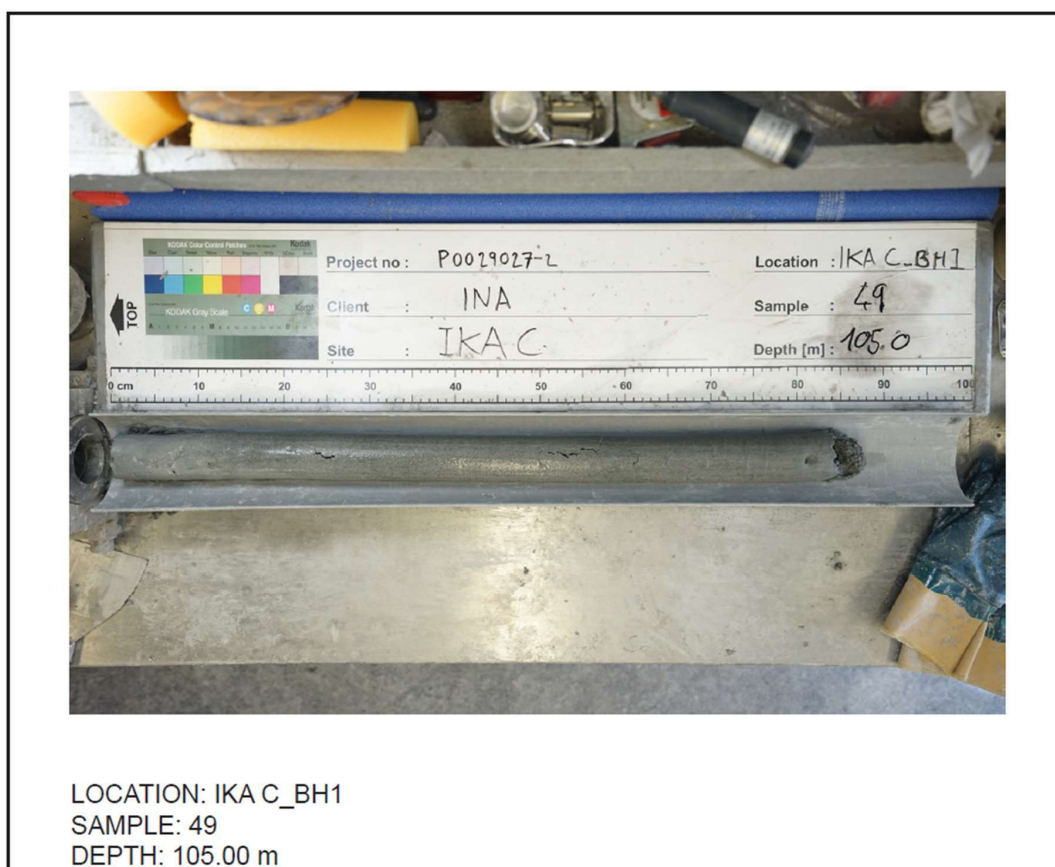
4.3. Uzorkovanje

Ukupno je prikupljeno 52 uzorka na ispitivanim lokacijama korištenjem downhole metode. Izbor uzorkivača je ovisio o očekivanim i stvarno susretanim uvjetima tla. Izvađeni uzorci su obrađeni u brodskom geotehničkom laboratoriju, a neporemećeni uzorci su odvojeni za naprednija laboratorijska ispitivanja na kopnu.

Program uzorkovanja bio je definiran prije bušenja svake bušotine i slijedio je sljedeću strukturu:

- Od razine morskog dna do 30 metara ispod morskog dna: Kontinuirano uzorkovanje
- Od 30 m ispod morskog dna do 120 metara ispod morskog dna: naizmjenično uzorkovanje s jednim uzorkom od 1 metra dužine i jednim 3-metarskim CPT testom.

Tijekom uzorkovanja, program se povremeno prilagođavao na temelju stvarnih uvjeta tla i kvalitete uzorka [33].



Slika 23 Fotodokumentacija uzorkovanja (Izvor: [33])

4.4. Laboratorijska ispitivanja

4.4.1. Brodski laboratorij

Sljedeće radnje i ispitivanja su provedena na uzorcima u brodskom laboratoriju:

- Opis i evidencija uzoraka
- Određivanje vlažnosti
- Određivanje specifične zapreminske težine
- Određivanje sadržaja karbonata (kvalitativno i kvantitativno na odabranim uzorcima)
- Određivanje udjela sitnih čestica (na odabranim uzorcima)
- Džepni penetrometar
- Džepna krilna sonda
- Troosni pokus na nedreniranim uzorcima bez konsolidacije (UU test)

Prilikom ekstruzije, uzorak je fotografiran i evidentiran, opis uzorka slijedi ASTM 2488 standard, a boja je određena prema Munsell karti boja tla. Svi testovi su izvedeni u skladu s ASTM standardima, osim ispitivanja džepnim penetrometrom koji je izveden prema ISO standardu.

Odabrani dijelovi uzoraka su označeni i pripremljeni za daljnja ispitivanja na kopnu, Poremećeni uzorci su bili pohranjeni u dvostruke plastične vrećice, dok su neporemećeni uzorci umotani u plastičnu foliju, aluminijsku foliju, i potom premazani voskom u kartonskom omotu. Obje vrste uzoraka bile su pohranjene u plastičnim kutijama i čuvane u temperaturno kontroliranom prostoru, zaštićenom od izravnog sunčevog svjetla.

Prilikom demobilizacije, sve kutije s uzorcima su otpremljene u RINA Consulting – GET geotehnički laboratorij u Italiji radi daljnjeg opisa, klasifikacije i laboratorijskih ispitivanja [33].

4.4.2. Kopneni laboratorij

Ispitivanja provedena na kopnu, zajedno s standardom prema kojem su izvršena prikazana su u sljedećoj tablici:

Tablica 4 Vrste ispitivanja i standardi (Izvor: [33])

Kategorija ispitivanja	Vrsta ispitivanja	Referentni standard
Klasifikacija	Prirodni sadržaj vode	ASTM D2216
	Zapreminska težina tla	ASTM D7263
	Sijanje (prosijavanje)	ASTM D1140
	Hidrometar	ASTM D7928
	Atterbergove granice	ASTM D4318
	Specifična težina čestica tla	ASTM D854
	Minimalna i maksimalna gustoća	ASTM D4253, ASTM D4254
Čvrstoća	Nedrenirani nekonsolidirani troosni pokus	ASTM D2850
	Konsolidirani nedrenirani troosni u kompresiji	ASTM D4767
	Konsolidirani drenirani troosni pokus	ASTM D7181
Konsolidacija	Edometar s inkrementalnim opterećenjem	ASTM D2435/D2435M
	Edometar s konstantnom brzinom deformacije	ASTM D4186/D4186M
Dinamičko	Bender elementi	ASTM D8295
Kemija	Sadržaj karbonata	ASTM D4373
	Sadržaj organske tvari	BS 1377-3+A1, ASTM D2974

4.5. Geološke prilike

Lokacija Ika C

Lokacija Ika C smještena je u sjevernom Jadranskom moru, koje predstavlja poluzatvoreni, plitki bazen. Jadransko more karakterizira dug i uski oblik koji se proteže od sjeverozapada prema jugoistoku, s vrlo blagim nagibom u njegovim sjevernim i središnjim dijelovima, što ga čini relativno ravnim. Nasuprot tome, južni Jadran ima znatno strmiji nagib. Sjeverni Jadran može se smatrati podvodnim produžetkom Padske nizine, gdje su tijekom milijuna godina, prvenstveno tijekom pliocenske epohe, nataloženi pješčani i glinoviti sedimenti. Ovi sedimenti uglavnom potječu od erozije Alpa i Apenina, pri čemu je rijeka Po glavni doprinositelj materijala.

Tijekom kvartarne epohe, oscilacije razine mora, osobito tijekom glacijalnih razdoblja, dovele su do značajnih promjena jadranske obale. Najnovija glacijacija, prije otprilike 18.000 godina, uzrokovala je pad razine mora za 120 metara, izlažući velik dio morskog dna. Kako su se ledenjaci topili, podizanje razine mora, poznato kao flandrijska transgresija, preplavilo je prethodno izloženo kopno, taložeći tanki sloj morskih sedimenata preko starijih aluvijalnih naslaga [33].

U sjevernom Jadranu prepoznaju se tri glavne sedimentne faze:

- **Low Stand System Tract (LST):** Krute gline i pijesci iz pleistocena, povezani s aluvijalnim i deltičnim okruženjima.
- **Transgressive System Tract (TST):** Naslage iz kasnog pleistocena do holocena, formirane tijekom flandrijske transgresije, koje sadrže pijeske, muljeve i slojeve treseta.
- **High Stand System Tract (HST):** Naslage od holocena do današnjeg dana, koje se uglavnom sastoje od normalno konsolidiranih plastičnih glina duž obalnih područja južno od delte rijeke Po.

Ovi geološki procesi oblikovali su sadašnju distribuciju sedimenata i konfiguraciju obale sjevernog Jadrana [33].

4.6. Profil tla

Profil tla na lokaciji istraživanja detaljno je prikazan u sljedećim tablicama. Tablica 5 pruža opis slojeva tla, u uključujući podatke o zbijenosti i vrsti materijala te vrsti tla Tablica 6 prikazuje raspon dubine za svaki sloj tla, čime se dobiva pregled raspodjele slojeva tla po dubini. Ovi podaci omogućuju bolje razumijevanje geoloških uvjeta na lokaciji istraživanja.

Tablica 5 Opis slojeva tla (Izvor: [33])

Sloj	Opis tla
I	Rahli do srednje zbijeni vapnenački silicijski fini pijesak
II	Čvrsta do kruta vapnenačka glina s primjesama praha
III	Rahli do srednje zbijeni vapnenački silicijski prah
IV	Srednje zbijeni do zbijeni silicijski fini do srednji pijesak
V	Srednje zbijeni do zbijeni tamni vapnenački silicijski pjeskoviti prah do fini pjeskoviti pijesak, s glinom
VI	Vrlo krut vapnenački ilovasti prah do ilovasta glina s slojevima finog pijeska
VII	Srednje zbijeni do zbijeni vapnenački silicijski fini do srednji pijesak

Tablica 6 Raspon slojeva tla (Izvor: [33])

Sloj	Vrh (m)	Dno (m)
I	0	1.2
II	1.2	4.5
III	4.5	8.7
IV	8.7	43
V	43	61.35
VI	61.35	90.7
VII	90.7	120.0 ¹

120.0 (1) označava kraj bušotine, ali ne nužno i kraj jedinice tla

4.7. Geotehnički parametri tla

Parametri tla koji će se koristiti za geotehničko projektiranje prikazani su u sljedećim tablicama. Tablica 7 prikazuje sadržaj vlage u tlu, dok Tablica 8 sadrži podatke o zapreminskoj težini tla. Indeks plastičnosti, kao važan pokazatelj svojstava tla, prikazan je u Tablici 9, dok je sadržaj sitnih čestica prikazan u Tablici 10. U nastavku, Tablica 11 sadrži preporučene osnovne parametre za projektiranje, dok su u Tablici 12 navedeni podaci o povijesti naprezanja i parametrima deformacije tla. Na kraju, Tablica 13 prikazuje preporučene parametre čvrstoće tla. Zajedno, ovi geotehnički parametri čine osnovnu podlogu za projektiranje temeljenja vjetroturbina.

Tablica 7 Rezultati ispitivanja vlažnosti tla (Izvor: [33])

Sloj	Broj ispitivanja	Minimalna vrijednost (%)	Prosječna vrijednost (%)	Maksimalna vrijednost (%)	Standardna devijacija (%)
I	5	28.5	31.2	33.4	-
II	9	27.8	32.5	37.2	3
III	11	27.5	32.1	40.9	4
IV	69	22.1	33	50.9	5.7
V	15	18.6	25.8	35.5	5.2
VI	27	22.5	27	34.2	3.2
VII	24	21.7	26.9	32.9	2.4

Tablica 8 Zapreminska težina (Izvor: [33])

Sloj	Broj ispitivanja	Minimalna vrijednost (kN/m ³)	Prosječna vrijednost (kN/m ³)	Maksimalna vrijednost (kN/m ³)	Standardna devijacija (kN/m ³)
I	2/5	19.4 / 18.5	19.6 / 19.0	19.9 / 19.4	-
II	8/9	16.1 / 18.4	18.2 / 18.9	20.1 / 19.5	1.6 / 0.4
III	7/11	16.7 / 18.0	18.6 / 19.0	20.0 / 19.6	1.2 / 0.5
IV	30/69	17.0 / 17.4	18.7 / 18.9	20.5 / 20.4	0.8 / 0.7
V	45/80	17.5 / 18.6	18.6 / 19.9	19.9 / 21.0	0.7 / 0.8
VI	14/27	17.3 / 18.7	18.9 / 19.7	19.9 / 20.4	0.7 / 0.5
VII	14/24	17.0 / 18.6	17.8 / 19.7	19.0 / 20.5	0.5 / 0.4

Izmjereno/ Izvedeno iz vlažnosti

Tablica 9 Rezultati ispitivanja indeksa plastičnosti (Izvor: [33])

Stoj	Broj ispitivanja	Minimalna vrijednost (%)	Prosječna vrijednost (%)	Maksimalna vrijednost (%)	Standardna devijacija (%)
I	-	-	-	-	-
II	1	-	29	-	-
III	2	12	13	14	-
IV	1	-	41	-	-
V	2	7	8	9	-
VI	6	9	11.5	15	-
VII	-	-	-	-	-

Tablica 10 Rezultati ispitivanja sadržaja sitnih čestica (Izvor: [33])

Stoj	Broj ispitivanja	Minimalna vrijednost (%)	Prosječna vrijednost (%)	Maksimalna vrijednost (%)	Standardna devijacija (%)
I	3	17.9	29.7	33.7	-
II	3	47.1	81	99.3	-
III	5	87.1	95.1	98.6	-
IV	13	3.2	44.3	100	39.9
V	7	28.4	70.4	86.6	18.5
VI	9	63.1	90.9	99.8	12.3
VII	6	3.1	26.3	89.9	30.6

Tablica 11 Preporučeni osnovni parametri (Izvor: [33])

Stoj	Raspon (m)	Wc (%)	γ' (kN/m ³)	PI (%)	FC (%)	ρ_s (Mg/m ³)	CaCO ₃ (%)
I	0.0 - 1.2	31	9.2	-	32	2.598	15
II	1.2 - 4.5	32.5	8.7	29	98	2.705	15
III	4.5 - 7.0	30	9.5	13	98	2.685	10
	7.0 - 8.7	33	8.5	-	85	2.685	10
IV	8.7 - 24.0	34	8.7	-	3.5	2.685	5
	24.0 - 27.6	25	9.5	41	95	2.685	21
	27.6 - 43.0	34	8.7	-	3.5	2.685	5
V	43.0 - 61.35	25	9.1	8	80	2.685	10
	61.35 - 76.0	24	10	12	95	2.718	10
VI	76.0 - 90.7	30	9	9	99	2.661	10
VII	90.7 - 120.0	27	9	-	5	2.626	8

Tablica 12 Preporučeni podaci o pritisku prekonsolidacije i brzini posmičnih valova (Izvor: [33])

Sloj	Raspon (m)	OCR (-)	Vs (m/s)
I	0.0 - 1.2	1	$50+44 \times z^{0.7}$
II	1.2 - 4.5	EXP(0.97-ln(z)+3.75)	125
III	4.5 - 7.0		150
	7.0 - 8.7		150
IV	8.7 - 24.0		$40+70 \times z^{0.3}$
	24.0 - 27.6		
	27.6 - 43.0		
V	43.0 - 61.35	1	$30+70 \times z^{0.3}$
	61.35 - 76.0	1	
VI	76.0 - 90.7	1	$30+60 \times z^{0.3}$
VII	90.7 - 120	1	$40+70 \times z^{0.3}$

Tablica 13 Preporučeni parametri čvrstoće tla (Izvor: [33])

Sloj	Raspon (m)	qt (MPa)	Su LE (kPa)	Su BE (kPa)	Su UE (kPa)	St (-)	Dr LE (%)	Dr BE (%)	Dr UE (%)	ϕ' (°)
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	-	-	-	-	-	-	-	-
	6.0 - 6.7	2.5	40	60	80	1.3	25	30	35	25
	6.7 - 7.0	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	7.0 - 8.7	3	-	-	-	-	17	22	27	31
IV	8.7 - 24.0	10	-	-	-	-	35	45	55	33.5
	24.0 - 27.6	8	40	70	100	2	30	40	50	30
	27.6 - 34.0	20	-	-	-	-	42	50	58	33.5
	34.0 - 43.0	15	-	-	-	-	-	-	-	-
V	43.0 - 57.0	25	-	-	-	-	40	55	70	-
	57.0 - 61.35	25	-	-	-	-	25	30	35	25
VI	61.35 - 66.0	4	70	110	140	-	-	-	-	-
	66.0 - 76.0	4	100	145	190	2	-	-	-	-
	76.0 - 90.7	4	100	145	190	2	-	-	-	-
VII	90.7 - 106.0	40	-	-	-	-	55	65	75	35
	106.0 - 118.0	30	-	-	-	-	50	60	70	33.5
	118.0 - 120.0	30	-	-	-	-	50	60	70	33.5

Napomena:

LE (lower estimate): donja procjena

BE (BEST ESTIMATE): najbolja procjena

UE (upper estimate): gornja procjena

5. ANALIZA OSJETLJIVOSTI DUBOKIH TEMELJA PUČINSKE VJETROELEKTRANE ZA KARAKTERISTIČNI PROFIL TLA SJEVERNOG JADRANA

5.1. Uvod

Jedna trećina ukupnih troškova na projektu izgradnje pučinske vjetroturbinе otpada na izvedbu temelja, što naglašava važnost pažljivog i učinkovitog geotehničkog projektiranja ovog dijela konstrukcije. Temeljito razumijevanje geotehničkih parametara tla i njihovog utjecaja na ponašanje temelja od ključne je važnosti za postizanje stabilnosti konstrukcije i optimalne upotrebe materijala. Time se, osim smanjenja troškova, doprinosi i smanjenju emisija stakleničkih plinova, što podržava ciljeve u borbi protiv klimatskih promjena.

Cilj ove analize osjetljivosti je evaluirati utjecaj odabranih parametara tla na ponašanje temelja pod karakterističnim opterećenjima, pri čemu će se analizirati vertikalni i bočni pomaci, moment savijanja, uzdužna i posmična sila. Parametri tla koji će se varirati uključuju kut trenja za pijesak i nedreniranu posmičnu čvrstoću za glinu, koristeći modele API SAND i API CLAY za analize osnog opterećenja te standardni model pijeska i potopljene krute gline (engl. Submerged Stiff Clay) za analize bočnog opterećenja. Sistematskom analizom ovih varijacija nastoji se identificirati ključni faktori koji najviše doprinose stabilnosti temelja.

Za ovu analizu koristi se software RS Pile, specijaliziran za proračune osnih i bočnih reakcija 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 osne reakcije pilota, pri čemu se razmatra otpor tla duž cijele duljine pilota, omogućujući preciznu procjenu prijenosa opterećenja i identifikaciju zona s povećanom koncentracijom naprezanja [36]. S druge strane, p-y krivulje, koriste se za modeliranje bočnih reakcija temelja na horizontalna opterećenja poput vjetrova 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 [37].

Analiza se provodi u dvije kombinacije opterećenja koje predstavljaju normalne operativne uvjete i ekstremni valni scenarij. Tako će se kroz definirane kombinacije opterećenja i variranje ključnih geotehničkih parametara tla analizirati ponašanje temelja u smislu pomaka i unutarnjih sila, čime će se utvrditi kritične vrijednosti i evaluirati utjecaj pojedinih parametara na stabilnost konstrukcije.

5.2. Ulazni parametri vjetroturbine i monopilota

Odabrana je proizvoljna vjetroturbina Siemens SWT-3.6-120 Offshore koja ima nazivnu snagu od 3,6 MW, promjer rotora od 120 m, i ukupnu površinu rotora od 11.300 m². Počinje s radom pri brzini vjetra od 3,5 m/s, dok je brzina isključivanja 25 m/s [38].



Slika 24 Prototip vjetroturbine Siemens SWT-3.6-120, Hvidovre, vjetropark Avedøre Holme, Danska (Izvor: [39])

Osnovni tehnički parametri vjetroturbine prikazani su u Tablici 14, koja obuhvaća ključne dimenzije i karakteristike konstrukcije. Ovi podaci su temelj za proračun opterećenja na konstrukciju.

Tablica 14 Osnovni tehnički parametri vjetroturbine SWT-3.6-120 (Izvor: [38])

Parametar	Simbol	Vrijednost	Jedinica
Visina glavčine	z	87	m
Promjer rotora	D_{rotor}	120	m
Visina tornja	H_{toranj}	68	m
Promjer tornja na vrhu	D_{vrh}	3	m
Promjer tornja na dnu	D_{dno}	5	m
Debljina stijenke tornja	t_{toranj}	27	mm
Gustoća materijala tornja	ρ_{toranj}	7860	kg/m ³
Masa tornja	m_{toranj}	250	t
Nazivna brzina vjetra	$U_{nazivna}$	12	m/s
Masa RNA sklopa	m_{RNA}	243	t

Osim tehničkih karakteristika vjetroturbine, odabrani su i ključni parametri za projektiranje pilota koji čine osnovu proračuna opterećenja.

Odabrani parametri pilota i lokacije su:

- **Promjer pilota:** 6 m
- **Modul elastičnosti (E) za čelik:** 2.1×10^5 MPa
- **Debljina stijenke:** 120 mm
- **Dubina zabijanja:** 40 m
- **Dubina mora:** 30 m

5.3. Opterećenje

5.3.1. Opterećenje od vjetra

Opterećenje od vjetra ili sila potiska (eng. *Thrust force*, Th) predstavlja horizontalnu silu koja djeluje na vjetroturbinu, s hvatištem u središtu rotora. Proračun sile vjetra temelji se na sljedećoj mjerodavnoj jednadžbi:

$$Th = \frac{1}{2} \times C_t \times \rho_a \times A \times U^2 \quad [38]$$

Gdje su:

- **Th:** Sila vjetra (N)
- **C_t:** Koeficijent otpora (bezdimenzijski)
- **ρ_a:** Gustoća zraka (kg/m³)
- **A:** Površina rotora (m²)
- **U:** Brzina vjetra (m/s)

Koeficijent otpora (C_t)

Koeficijent otpora (C_t) opisuje učinkovitost turbine u pretvaranju kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju. Vrijednost C_t ovisi o brzini vjetra u odnosu na nazivnu brzinu (U_R) i definira se pomoću dvije jednadžbe:

Za brzinu vjetra ispod ili jednaku nazivnoj brzini koristi se izraz prema *Froebhese i Schmuck*:

$$C_t = \frac{3.5 \times (2U_R + 3.5)}{U_R^2} \quad [38]$$

Za brzinu vjetra veću od nazivnog režima koeficijent opada, te se izražava kao:

$$C_t = \frac{7 \times U_R^2}{U^3} \quad [38]$$

Gdje je: U_R nazivna brzina vjetra.

S obzirom na to da C_t opada nakon prelaska nazivne brzine, konzervativniji pristup je korištenje Froebhese-Schmuck izraza jer rezultira većim iznosom sile vjetra, što pruža veću sigurnost.

Brzina vjetra se može podijeliti na:

- Statičku komponentu: Uobičajeno se zadaje kao nazivna brzina (U_R) ili brzina pri isključivanju (cut-out brzina).
- Dinamičku (turbulentnu) komponentu: Odnosi se na promjene brzine vjetra zbog turbulencije, a proračunava se ovisno o odabranom modelu brzine vjetra.

U skladu s tim, opterećenje vjetra također se dijeli na statički i dinamički dio, pri čemu turbulentna komponenta brzine doprinosi promjenjivosti sile vjetra.

5.3.2. Opterećenje od valova

Opterećenje od valova, koje djeluje na temelje vjetroturbine, može se procijeniti koristeći Morisonovu jednadžbu. Ova jednadžba izražava ukupnu silu kao zbroj sile otpora (F_D) i inercijske sile (F_I) koje valovi generiraju na strukturu. Morisonova jednadžba za elementarnu dužinu pilota glasi:

$$dF_w(z, t) = dF_D(z, t) + dF_I(z, t)$$

$$dF_D(z, t) = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |u(z, t)| u(z, t)$$

$$dF_I(z, t) = \rho C_M \frac{\pi}{4} D^2 a(z, t) \quad [40]$$

Gdje je:

- F_D : sila otpora
- F_I : inercijska sila
- ρ_w : gustoća vode
- C_D : koeficijent otpora
- D : promjer pilota
- $u(z, t)$: brzina čestice vode na visini z i u trenutku t
- C_M : koeficijent inercije
- $a(z, t)$: ubrzanje čestice vode na visini z i u trenutku t

Za izračun brzine i ubrzanja koristi se Airyjeva linearna teorija valova, koja aproksimira kretanje čestica pod utjecajem valova:

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

$$a(z, t) = -\frac{H_m}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(S+z))}{\sinh(kS)} \sin(\omega t) \quad [40]$$

Gdje je:

- H_m : visina vala
- ω : kutna frekvencija vala
- k : valni broj
- S : dubina vode
- z : vertikalna pozicija (od morskog dna)
- t : vrijeme
- T_s : valni period
- L : valna duljina

S obzirom da sila otpora ovisi o brzini, a sila inercije o ubrzanju, njihov maksimalni iznos se ne ostvaruje u istom trenutku te je stoga konzervativna pretpostavka uzeti maksimalnu vrijednost obje komponente za iznos opterećenja od vala [38].

5.3.3. Kombinacije opterećenja

Kako bi se adekvatno procijenilo ponašanje temelja vjetroturbine pod različitim radnim uvjetima, koristi se nekoliko kombinacija okolišnih opterećenja. Ove kombinacije obuhvaćaju različite scenarije brzine vjetra i visine valova, od normalnih operativnih uvjeta do ekstremnih scenarija. Preuzete su iz literature [39]. Kombinacije su prikazane u Tablici 15.

Tablica 15 Kombinacije okolišnih opterećenja (Izvor: [38])

Scenarij	Opis	Model vjetra	Model valova
E-1	Normalni operativni uvjeti	NTM pri UR (U-1)	1-godišnji ESS (W-1)
E-2	Ekstremni valni scenarij	ETM pri UR (U-2)	50-godišnji EWH (W-4)

Scenarij E-1 predstavlja normalne operativne uvjete, gdje se koristi model vjetra s normalnom turbulencijom (Normal Turbulence Model, NTM) pri nazivnoj brzini (U_R) i valna stanja s jednogodišnjom značajnom valnom visinom (Extreme Sea State, ESS). S druge strane, scenarij E-2 prikazuje ekstremni valni scenarij u kojem su kombinirani ekstremni model turbulencije (Extreme Turbulence Model, ETM) pri istoj nazivnoj brzini te maksimalna valna visina s pedesetogodišnjim povratnim periodom (Extreme Wave Height, EWH)

Modeli vjetra korišteni u kombinacijama opterećenja definiraju brzinu vjetra u statičkoj i dinamičkoj komponenti. Statička komponenta najčešće odgovara nazivnoj brzini (U_R), dok dinamička komponenta predstavlja utjecaj turbulencije, što je prikazano u Tablici 16.

Tablica 16 Scenariji vjetra (Izvor: [38])

Model vjetra	Naziv	Statička komponenta brzine	Dinamička komponenta brzine
U-1	Normal Turbulence Model (NTM)	UR	uNTM
U-2	Extreme Turbulence Model (ETM)	UR	uETM

Modeli valova predstavljaju različite razine visina valova, ovisno o povratnom periodu i vrsti valnog događaja. Modeli valova prikazani su u Tablici 17.

Tablica 17 Scenariji valova (Izvor: [38])

Model valova	Naziv	Valna visina	Oznaka
W-1	1-godišnji Extreme Sea State (ESS)	Jednogodišnja značajna valna visina	HS,1
W-4	50-godišnji Extreme Wave Height (EWH)	Pedesetogodišnja maksimalna valna visina	Hm,50

Kombinacijom različitih modela vjetra i valova u scenarijima E-1 i E-2 osigurava se da su obuhvaćeni različiti uvjeti rada vjetroturbine, od standardnih operativnih uvjeta do rijetkih, ekstremnih događaja koji mogu imati znatan utjecaj na stabilnost i performanse temelja.

5.3.4. Proračun opterećenja od vlastite težine

Podaci o masama tornja i RNA sklopa preuzeti su iz Tablice 14.

PRORAČUN:

$$m_{toranj} = 250,000 \text{ kg}$$

$$F_{toranj} = m_{toranj} \cdot g$$

$$F_{toranj} = 250,000 \cdot 9.81 = 2,452,500 \text{ N}$$

$$F_{RNA} = m_{RNA} \cdot g$$

$$F_{RNA} = 243,000 \cdot 9.81 = 2,383,830 \text{ N}$$

$$F_{ukupno} = F_{toranj} + F_{RNA}$$

$$F_{ukupno} = 2,452,500 + 2,383,830 = 4,836,330 \text{ N} = 4.836 \text{ MN}$$

5.3.5. Proračun opterećenja od valova

Za potrebe proračuna opterećenja prema kombinacijama E-1 i E-2, bilo je potrebno odrediti 50-godišnju maksimalnu valnu visinu i 1-godišnju značajnu valnu visinu. Podaci o značajnim valnim visinama prikupljeni su za lokaciju koja odgovara mjestu geotehničkog ispitivanja Ika_C. Ovi podaci preuzeti su s platforme *Copernicus Climate Data Store* za posljednje četiri godine, s podacima prikupljenim svakih sat vremena. Na temelju ovog skupa podataka izrađena je dugoročna procjena značajnih valnih visina primjenom log-normalne distribucije vjerojatnosti.

Metodologija određivanja značajnih valnih visina

1. Prethodna obrada podataka:

- Svi prikupljeni podaci su obrađeni primjenom metode prekoračenja visokog praga, gdje je prag postavljen na 1 metar. To omogućuje identifikaciju značajnih valnih visina koje prelaze određeni prag, čime se isključuju manji valovi koji nisu relevantni za projektiranje pilota.

2. Konstrukcija empirijske distribucije:

- Empirijska distribucija vjerojatnosti izrađena je primjenom Hazenove kompromisne formule, što je omogućilo izračun vjerojatnosti premašenja za različite razrede značajnih valnih visina. Distribucija učestalosti valnih visina prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 18 Učestalost i statistička analiza razreda značajnih valnih visina

Razred	Razred valnih visina d Hs - g Hs [m]		Srednja značajna valna visina Hs,i [m]	Apsolutna učestalost fi [1]	Kumulativna apsolutna učestalost Fi [1]	Vjerojatnost premašenja $P(Hs > Hs,i) =$ $(2Fi-1)/2n$	ln Hs,i	ui
1	3.25	3.5	3.375	1	1	0.002	1.216	2.870
2	3	3.25	3.125	2	3	0.010	1.139	2.317
3	2.75	3	2.875	4	7	0.027	1.056	1.933
4	2.5	2.75	2.625	6	13	0.051	0.965	1.633
5	2.25	2.5	2.375	18	31	0.125	0.865	1.150
6	2	2.25	2.125	9	40	0.162	0.754	0.987
7	1.75	2	1.875	25	65	0.264	0.629	0.630
8	1.5	1.75	1.625	34	99	0.404	0.486	0.244
9	1.25	1.5	1.375	57	156	0.637	0.318	-0.351
10	1	1.25	1.125	88	244	0.998	0.118	-2.870

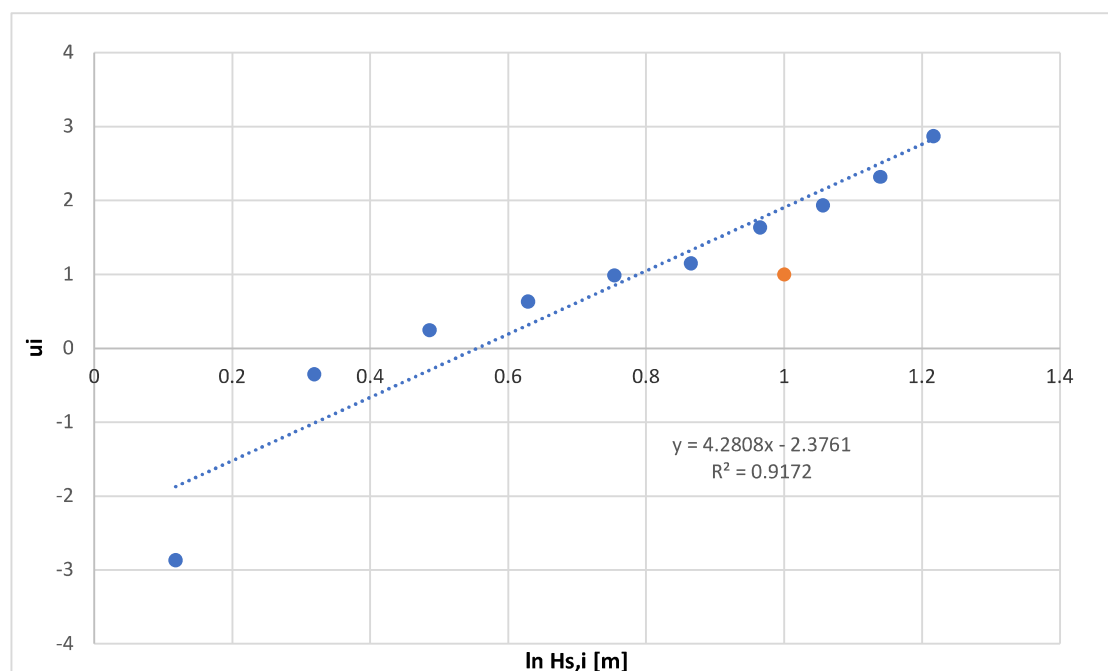
3. Prilagodba teorijske funkcije distribucije:

- Primjenom metode najmanjih kvadrata, teorijska funkcija log-normalne distribucije prilagođena je empirijskim podacima. Na temelju toga određene su značajne valne visine za povratne periode od 50 i 1 godine.

4. Izračun maksimalne valne visine:

- Na temelju dobivenih rezultata i empirijske korelacije, maksimalna valna visina izračunata je prema izrazu:

$$H_m = 1.86 \times H_s \quad [40]$$



Slika 25 Regresijska analiza između $\ln H_{s,i}$, i u_i za procjenu log-normalne distribucije valnih visina

Tablica 19 Prognozirane značajne valne visine za različite povratne periode

PR [god]	u_i	$\ln H_s$ [m] prognozirano	H_s [m] prognozirano
50	3.407	1.351	3.861
1	2.135	1.054	2.868

Vrijednosti valnih visina potrebne za proračun opterećenja su:

- $H_{m,50}=7.18146$ m: maksimalna valna visina za povratni period od 50 godina.
- $H_{s,1}=2.868$ m : značajna valna visina za povratni period od 1 godine

Za potrebe proračuna opterećenja od valova korištena je Morisonova jednadžba pomoću diskretizacije, gdje je pilot podijeljen na segmente duž njegove dubine u vodi. Ova metoda omogućuje izračun otpornih i inercijskih sila koje djeluju na svaki segment pilota. Na temelju tih podataka izračunata je ukupna sila od valova, kao i moment i krak ukupne sile.

Ulazni parametri

Za proračun su korišteni sljedeći ulazni parametri:

- **Dubina vode (S):** 30 m
- **Promjer pilota (D):** 6 m
- **Visina vala (Hm):** 2.868 m i 7.181 m
- **Period vala (Ts):** 10 s [40]
- **Gustoća vode (ρ_w):** 1025 kg/m³ [38]
- **Koeficijent otpora (CD):** 1 [40]
- **Koeficijent inercije (CM):** 2 [40]
- **Gravitacijsko ubrzanje (g):** 9.81 m/s²

Valni parametri

Valni parametri, poput kutne frekvencije (ω), valne duljine (L), i valnog broja (k), izračunati su pomoću sljedećih izraza:

$$\omega = \frac{2\pi}{T_s} \quad [40]$$

$$L = \frac{g \times T_s^2}{2\pi} \quad [40]$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad [40]$$

Diskretizacija pilota

Pilot je podijeljen na 80 segmenata, od dna pilota (na dubini od -40 m) do razine mora (0 m). Svaki segment ima duljinu od 0.5 m. Diskretizacijom se omogućuje precizno izračunavanje sila koje djeluju na svaki segment, uzimajući u obzir promjenu brzine i ubrzanja vode s dubinom.

Za svaki segment izračunate su:

- **Brzina čestice vode**
- **Akceleracija čestice vode**

Na temelju ovih vrijednosti izračunate su otporna sila za svaki segment koristeći Morisonovu jednadžbu.

Ukupna otporna i inercijska sila dobivene su zbrajanjem sila za svaki segment.

Rezultati proračuna prikazani su u sljedećoj tablici:

Tablica 20 Iznosi sila i momenata uslijed opterećenja valovima

Parametar	Normalni operativni uvjeti (E-1)	Ekstremni scenarij (E-2)	Jedinica
Visina vala	2.868	7.181	m
Ukupna sila otpora	35,588.38	405,000.69	N
Ukupna inercijska sila	943,488.63	2,595,442.06	N
Ukupna sila	979,077.01	3,000,442.75	N
Ukupni moment	16,192.25	36,771.00	MNm
Krak ukupne sile	16.54	12.26	m

5.4. Proračun opterećenja od vjetra

Za proračun opterećenja od vjetra korištena su dva scenarija:

1. **Scenarij U-1** (Normal Turbulence Model, NTM)
2. **Scenarij U-2** (Extreme Turbulence Model, ETM)

Koraci proračuna:

1. Proračun brzine vjetra na visini glavčine

Brzina vjetra na visini glavčine za pučinske uvjete izračunata je pomoću zakona o profilu vjetra:

$$U(z) = U_{ref} \times \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{0,1} \quad [41]$$

Gdje su:

U(z) : Brzina vjetra na visini z

U_{ref}: Brzina vjetra na referentnoj visini, srednja godišnja vrijednost

z_{ref} : Referentna visina

Vrijednost srednje godišnje brzine vjetra na 10 m iznad tla korištena je kao referentna za određivanje točne brzine na visini glavčine od 87 m.

Izračun turbulentne komponente brzine vjetra Za NTM scenarij:

$$\sigma_{u,NTM} = I_{ref}(0.75 U_R + b) \quad [38]$$

$$u_{NTM} = 1,28 \times \sigma_{u,NTM} \quad [38]$$

- Za ETM scenarij:

$$\sigma_{u,ETM} = c I_{ref} \left[0.072 \left(\frac{U_{avg}}{c} + 3 \right) \left(\frac{U_R}{c} - 4 \right) + 10 \right] \quad [38]$$

$$u_{ETM} = 2 \times \sigma_{u,NTM} \quad [38]$$

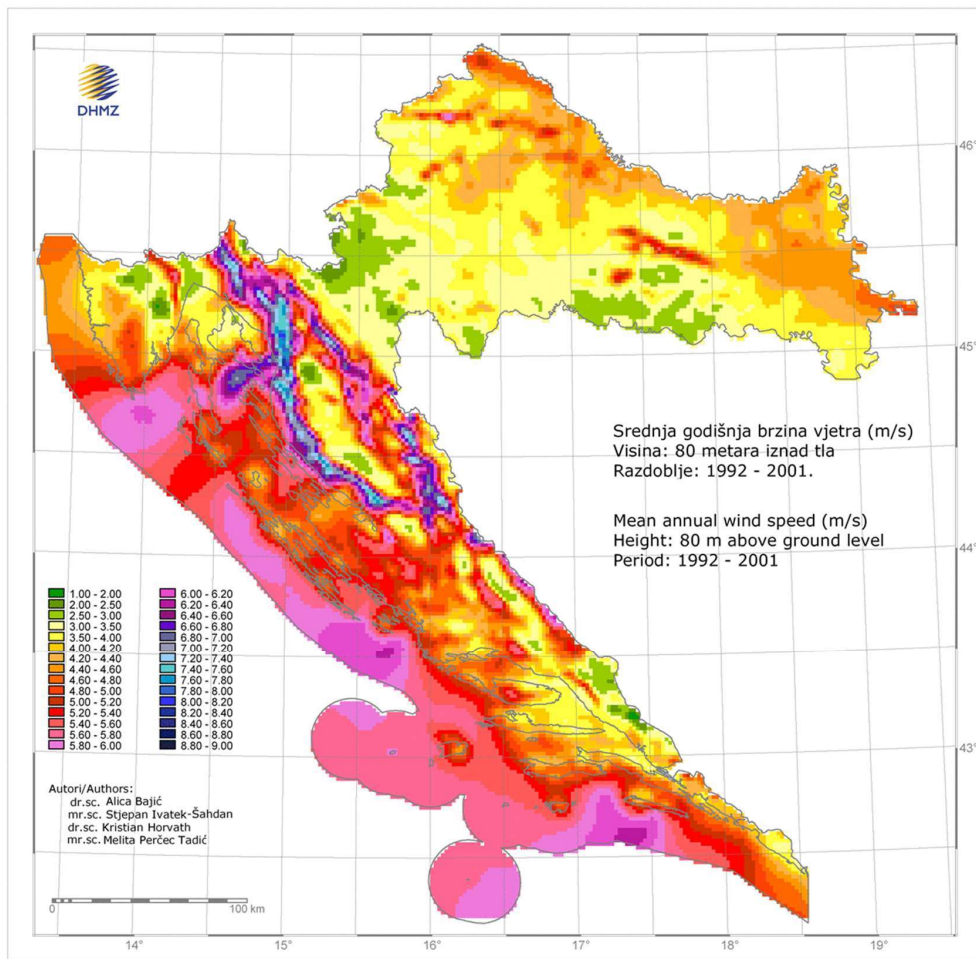
- Gdje su:

I_{ref} :referentni intenzitet turbulencije

b: 5.6 m/s (konstanta)

U_{avg} : srednja godišnja brzina vjetra na nekom području

c: 2 m/s (konstanta)



Slika 26 Atlas brzine vjetra na visini 80 m iznad tla (Izvor: [42])

2. Proračun ukupne brzine vjetra

Ukupna brzina vjetra za scenarije NTM i ETM uključuje statičku i dinamičku komponentu. Statička komponenta brzine vjetra za obje situacije iznosi 12 m/s i jednaka je nazivnoj brzini vjetroturbine. Dobivene ukupne brzine vjetra za scenarije U-1 i U-2 su 13.87 m/s i 18.09 m/s.

3. Proračun sile potiska i momenta

- Sila potiska (Th) i moment sile proračunati su za oba scenarija koristeći odgovarajuće brzine vjetra i koeficijent otpora prema Froebhese-Schmucku.

Tablica 21 Proračun opterećenja od vjetra

Parametar	Scenarij U-1 (NTM)	Scenarij U-2 (ETM)	Jedinica
Nazivna brzina U_r	12	12	m/s
Koeficijent otpora C_t	0.6684	0.6684	-
Turbulentna komponenta	1.46	3.05	m/s
Turbulentna brzina	1.87	6.09	m/s
Ukupna brzina	13.87	18.09	m/s
Sila potiska Th	909,071.56	1,546,461.76	N
Moment M	79.09	134.54	MNm

Ukupna opterećenja na pilot za pojedinačni scenarij prikazani su u rekapitulacijskoj tablici.

Tablica 22 Rekapitulacijska tablica opterećenja

Scenarij	Vlastita težina (MN)	Moment od valnog opterećenja (MNm)	Moment od opterećenja vjetrom (MNm)	Ukupni moment (MNm)
E-1	4.836	16.192	79.089	95.281
E-2	4.836	36.771	134.542	172.313

5.5. Parametri tla za numerički model

API Sand koristi se za pijeskovita tla i temelji se na elastično-plastičnom pristupu za proračun prijenosa osnih sila kroz pilot. Model koristi $t-z$ i $q-z$ krivulje za opisivanje trenja po plaštu i nosivosti na bazi. Potrebni parametri tla uključuju kut trenja, koeficijent bočnog pritiska, faktor nosivosti, jedinično trenje po plaštu i jediničnu nosivost na bazi pilota.

API Clay primjenjuje se na glinovita tla, također s elastično-plastičnim pristupom za izračun prijenosa osnih sila. Model se temelji na $t-z$ i $q-z$ krivuljama te koristi parametre poput nedrenirane i pregnečene posmične čvrstoće, jediničnog trenja po plaštu i jedinične nosivosti na bazi pilota.

Potopljena kruta glina koristi se za glinovita tla pod potopljenim uvjetima i temelji se na $p-y$ krivuljama koje opisuju odnos bočnog opterećenja i pomaka pilota. Ključni parametri uključuju faktor deformacije, nedreniranu posmičnu čvrstoću i početnu krutost tla.

Pijesak primjenjuje se na pijeskovita tla i koristi $p-y$ krivulje za opisivanje bočnog otpora. Potrebni parametri su kut trenja tla te početna krutost u suhim i zasićenim uvjetima.

Tablica 23 Parametri tla za pjeskovita tla

Sloj tla	Početak sloja (m)	Kraj sloja (m)	Zapreminska težina (kN/m ³)	Kut unutarnjeg trenja (°)	K_0 (koeficijent bočnog pritiska)	Faktor nosivosti N_q	Maksimalno trenje na stijenku (kPa)	Maksimalna nosivost na vrhu temelja (kPa)	Modul podloge kpy (kN/m ²)	Modul podloge kpy sat (kN/m ²)
I	0	1.2	19.6	31	0.484	40	50	200	6.8	5.4
III	4.5	8.7	19	25	0.576	20	40	150	6.8	5.4
IV	8.7	43	18.9	33.5	0.45	40	60	250	24.4	16.3
V	43	57	19.9	25	0.576	20	40	150	24.4	16.3
VII	90.7	106	19.7	35	0.426	50	70	300	24.4	16.3

Koeficijent bočnog pritiska K_0 izračunat je prema izrazu $K_0=1-\sin(\phi)$ gdje je ϕ kut unutarnjeg trenja. Faktor nosivosti N_q , maksimalno trenje, maksimalna nosivost na vrhu temelja i modul podloge očitani su iz priručnika RS Pile.

Tablica 24 Parametri tla za glinovita tla

Sloj tla	Početak sloja (m)	Kraj sloja (m)	Zapreminska težina (kN/m ³)	Osjetljivost (St)	Nedrenirana posmična čvrstoća (kPa)	Pregnječena posmična čvrstoća (kPa)	Faktor deformacije (E50)	Koeficijent krutosti Ks (MN/m ³)
II	1.2	4.5	18.9	1.3	45	34.62	0.007	135
VI	61.35	76	19.7	2	110	55	0.005	270

Osjetljivost, nedrenirana posmična čvrstoća i pregnječena posmična čvrstoća preuzeti su iz tablica preporučenih parametara čvrstoće, dok su faktor deformacije i koeficijent krutosti Ks očitani iz priručnika RS Pile. Maksimalno jedinično trenje na stijenu postavljeno je kao jednako nedreniranoj posmičnoj čvrstoći tla, dok je jedinična nosivost na vrhu temelja određena kao $9 \times S_u$, u skladu s preporukama u priručniku RS Pile za osno opterećene pilote.

U nastavku su prikazane vrijednosti parametara tla korištenih za analizu osjetljivosti temelja u različitim scenarijima. Tablice obuhvaćaju varijacije kuta unutarnjeg trenja za slojeve pjeskovitog tla i nedrenirane posmične čvrstoće za sloj glinovitog tla.

Tablica 25 Varijacije kuta trenja za analizu osjetljivosti

Sloj tla	-3°	-1.5°	Bazni kut	+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°

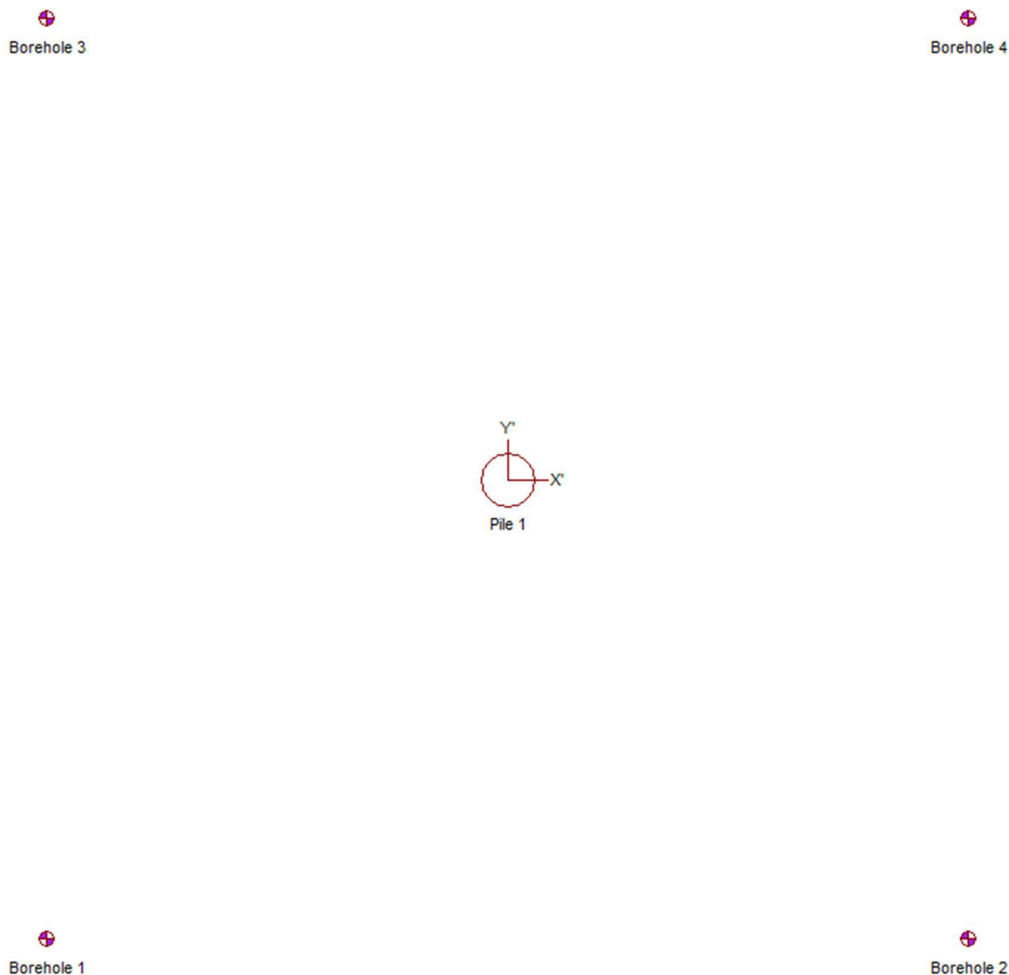
Tablica 26 Varijacija nedrenirane posmične čvrstoće za analizu osjetljivosti

Sloj tla	Donja procjena	Niža vrijednost	Bazna vrijednost	Viša vrijednost	Gornja procjena
II	20 kPa	32.5 kPa	45 kPa	57.5 kPa	70 kPa

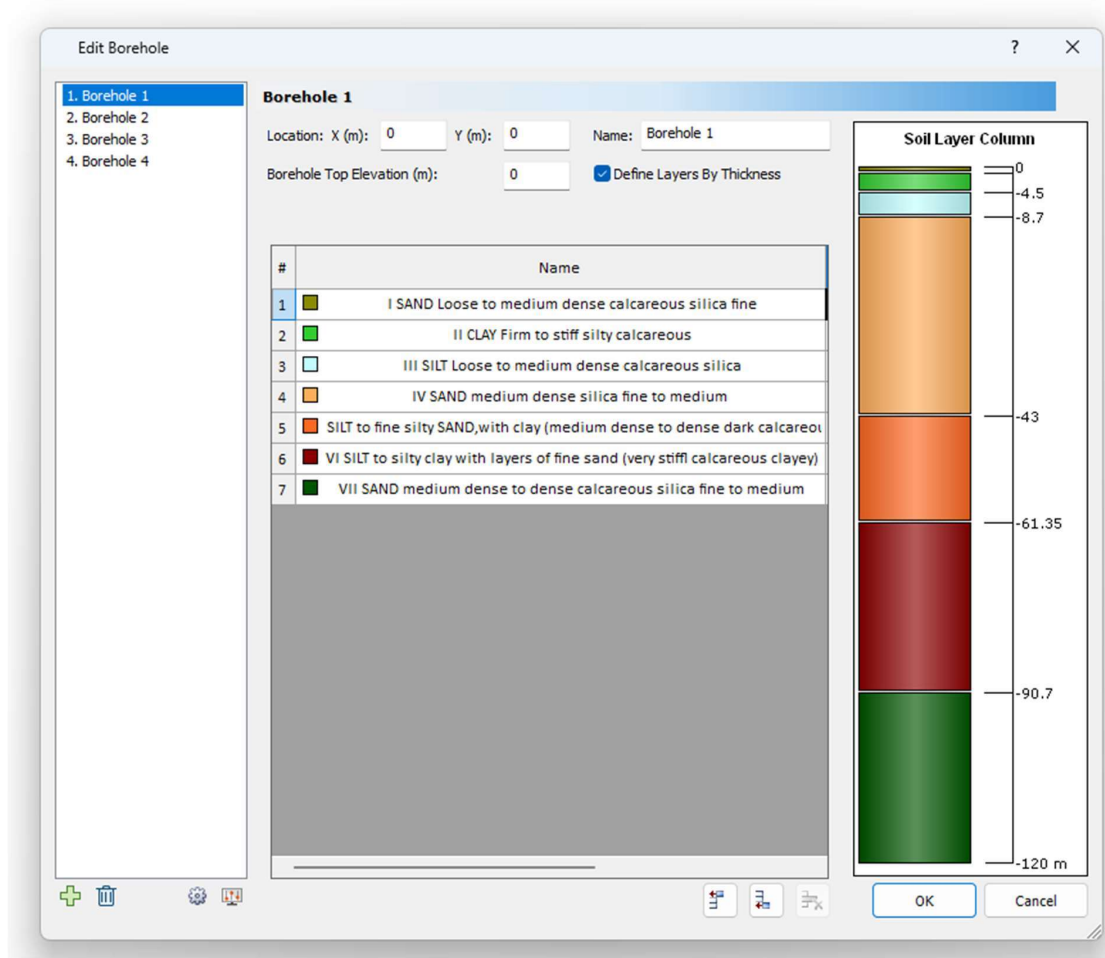
5.6. Definicija modela u RS Pile-u

Za analizu osnih i bočnih reakcija monopilota korišten je program RS-Pile. Ovaj software omogućava preciznu procjenu ponašanja temelja pilota pod različitim opterećenjima korištenjem metoda t-z i p-y krivulja, čime se omogućava detaljno razumijevanje prijenosa opterećenja i ponašanja temelja u stvarnim uvjetima.

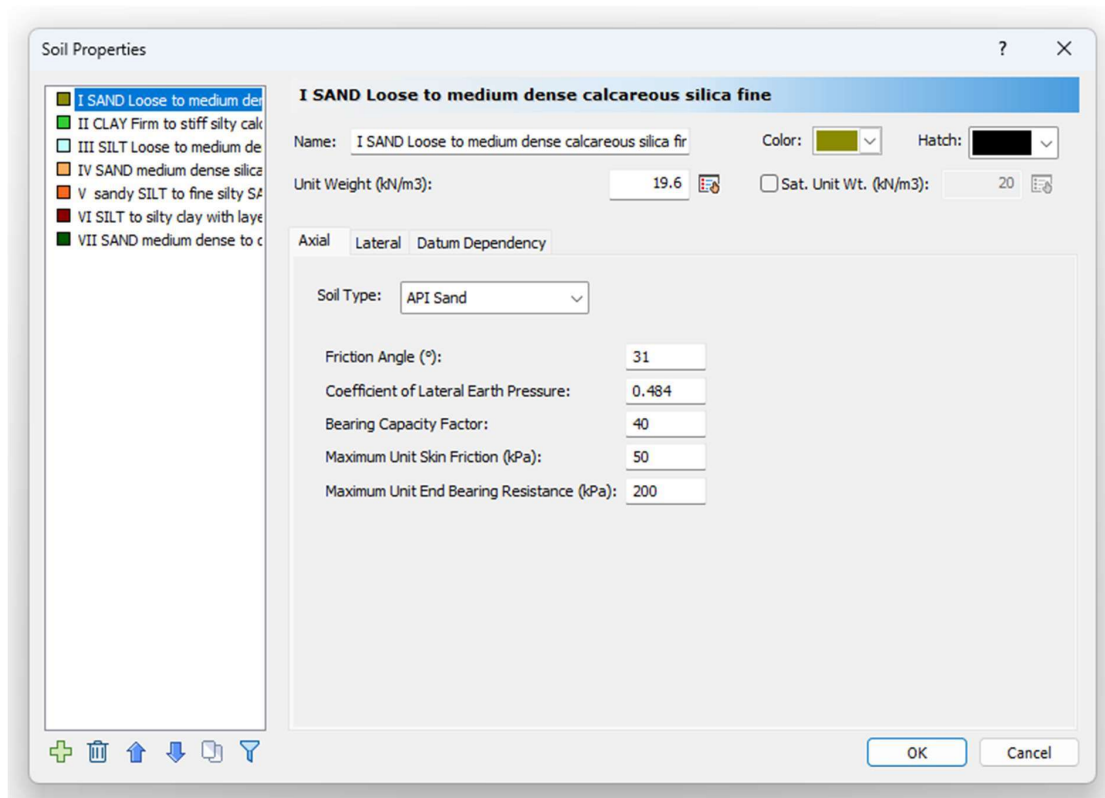
Uslojenost tla i odgovarajući geotehnički parametri tla prikazani su u Tablici 23 i Tablici 24. 3D model tla je zadan pomoću naredbe Borehole Editor gdje su bušotine zadane na rasteru 100 x 100 metara, a pilot se nalazi u središtu rastera. Visina slojeva je na svim bušotinama jednaka. U nastavku se nalaze slike koje prikazuju uslojenost tla i parametre za pjeskovito i glinovito tlo, s primjerima bočnih i osnih podataka unesenih u software.



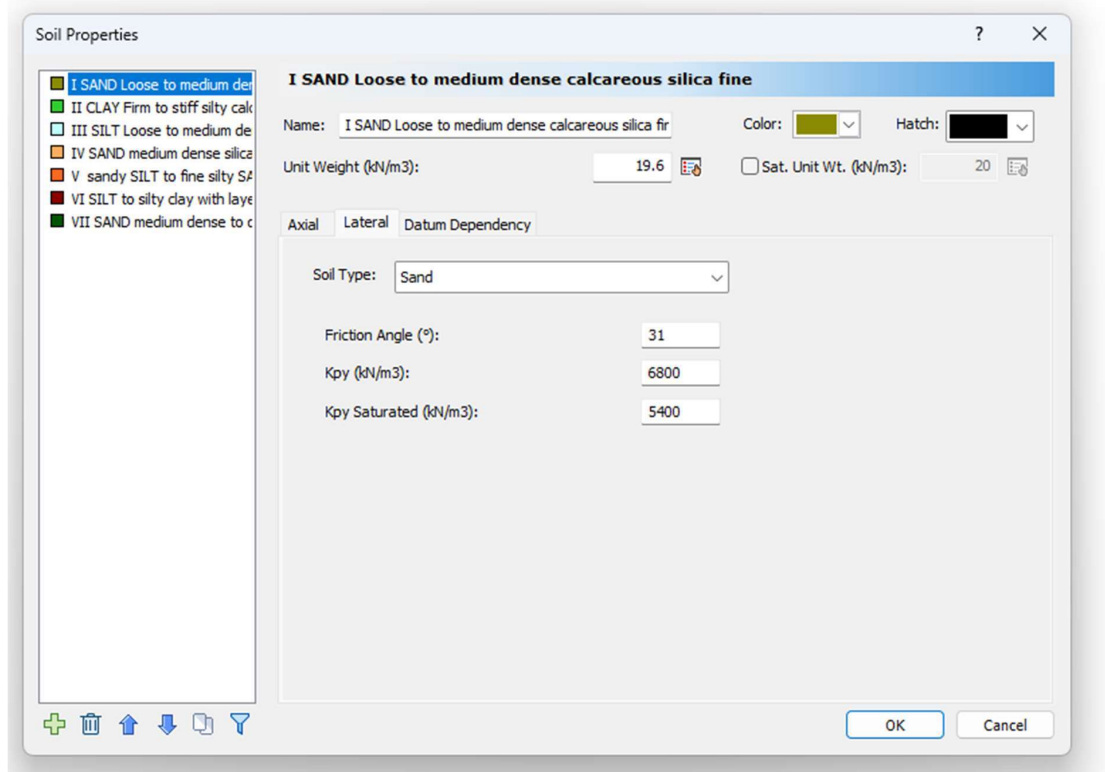
Slika 27 Tlocrtni položaj pilota i bušotina



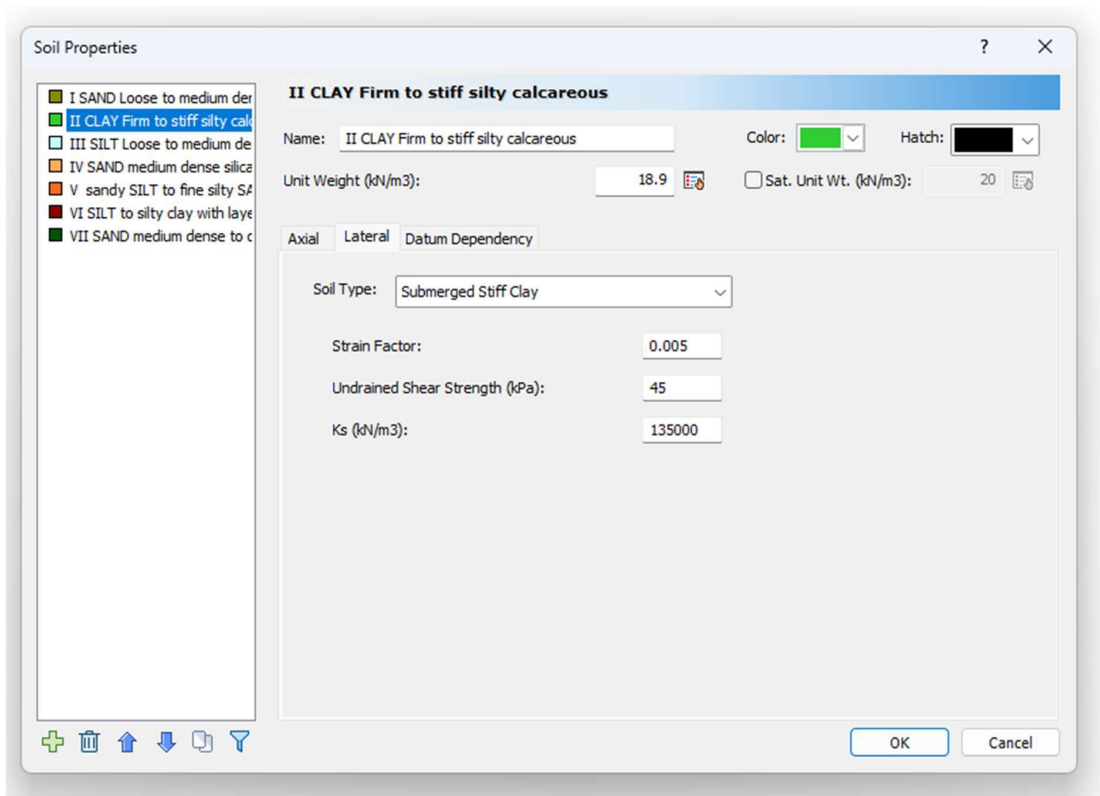
Slika 28 Borehole editor i uslojenost tla



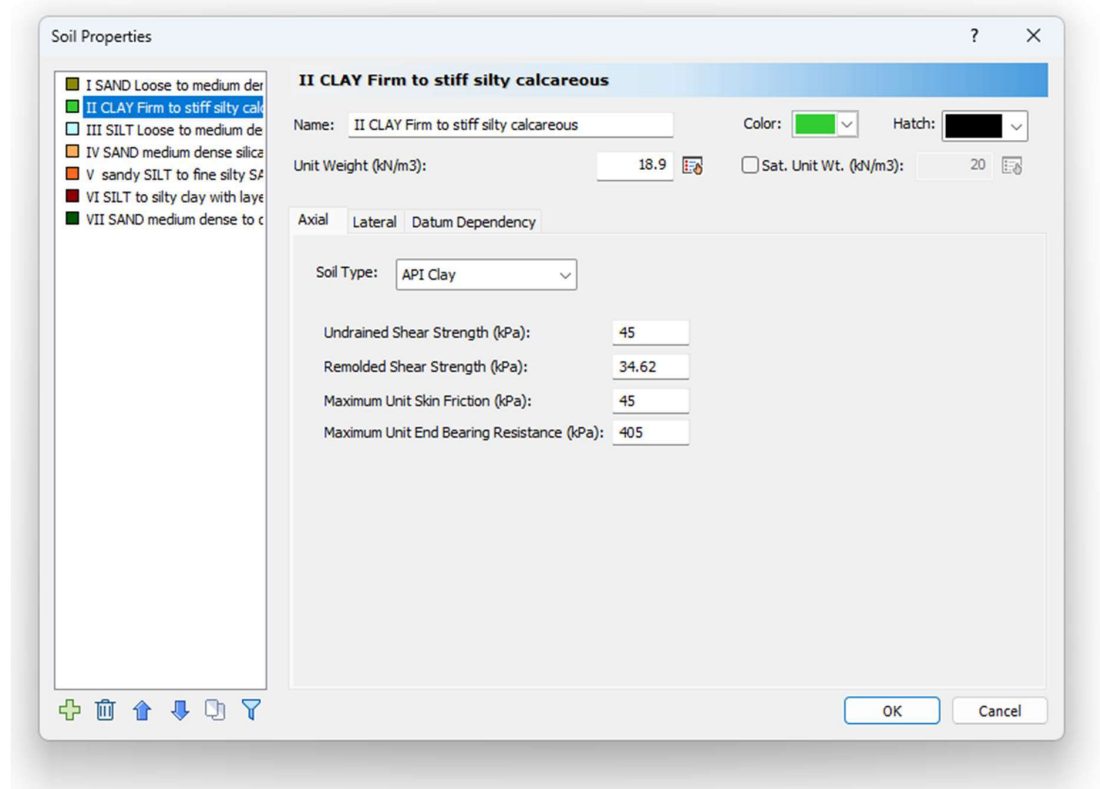
Slika 29 Zadavanje osnovnih parametara za pjeskovito tlo



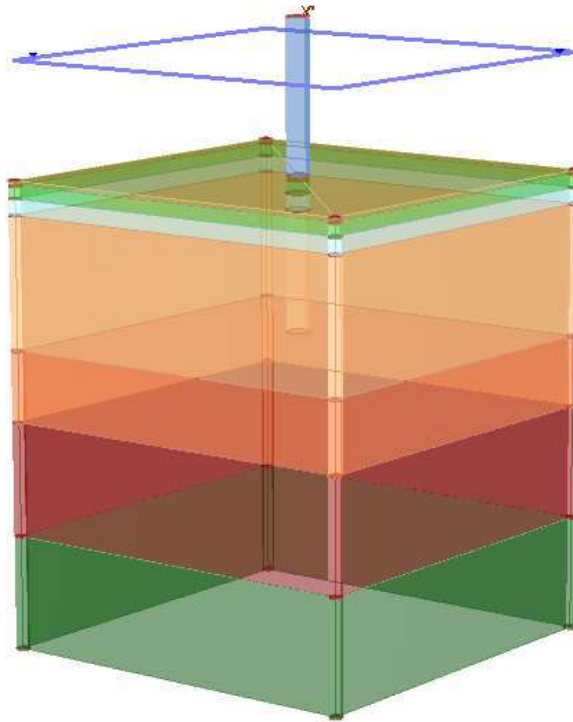
Slika 30 Zadavanje bočnih parametara za pjeskovito tlo



Slika 31 Zadavanje osnih parametara za glinovito tlo

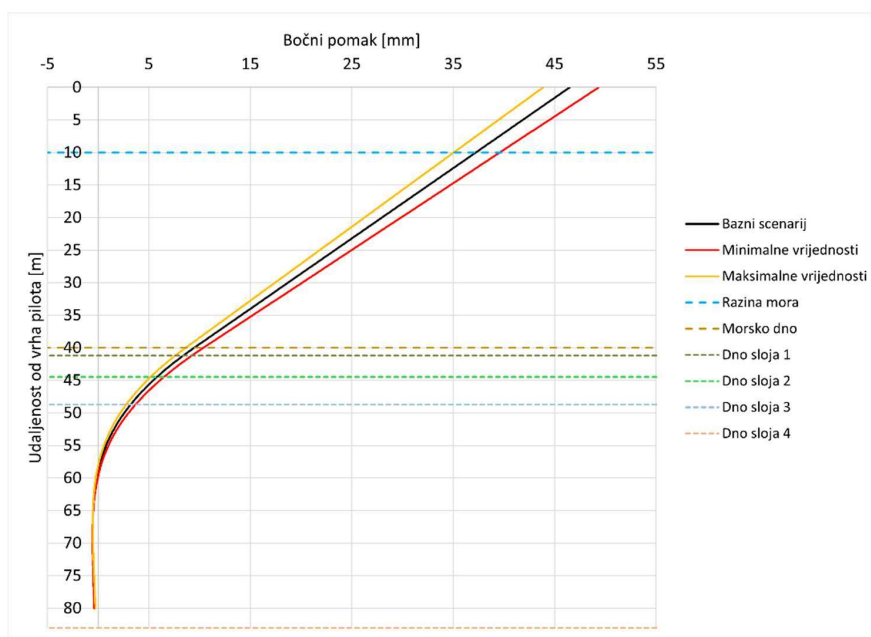


Slika 32 Zadavanje bočnih parametara za glinovito tlo

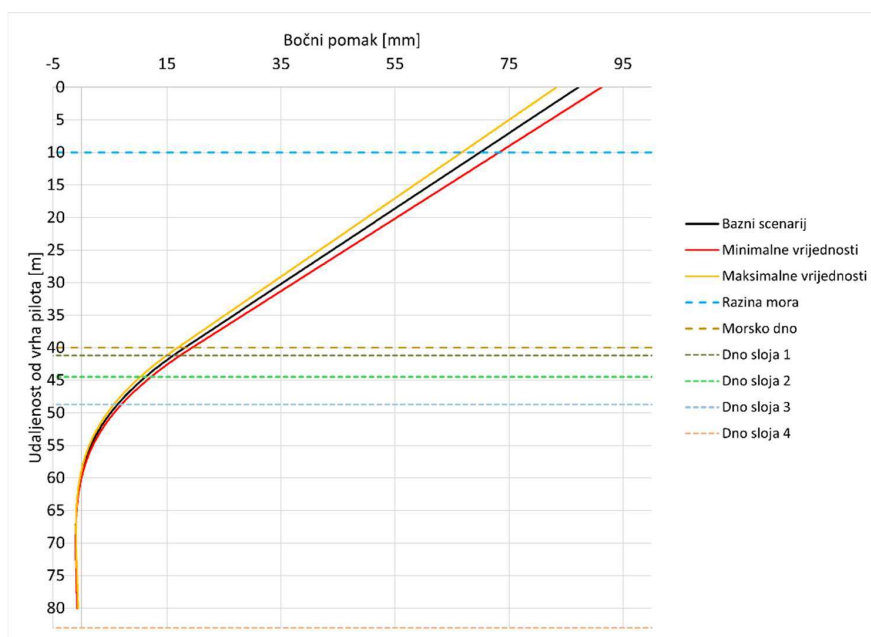


Slika 33 3D model pilota i tla

5.7. Rezultati baznih scenarija i minimalnih i maksimalnih vrijednosti

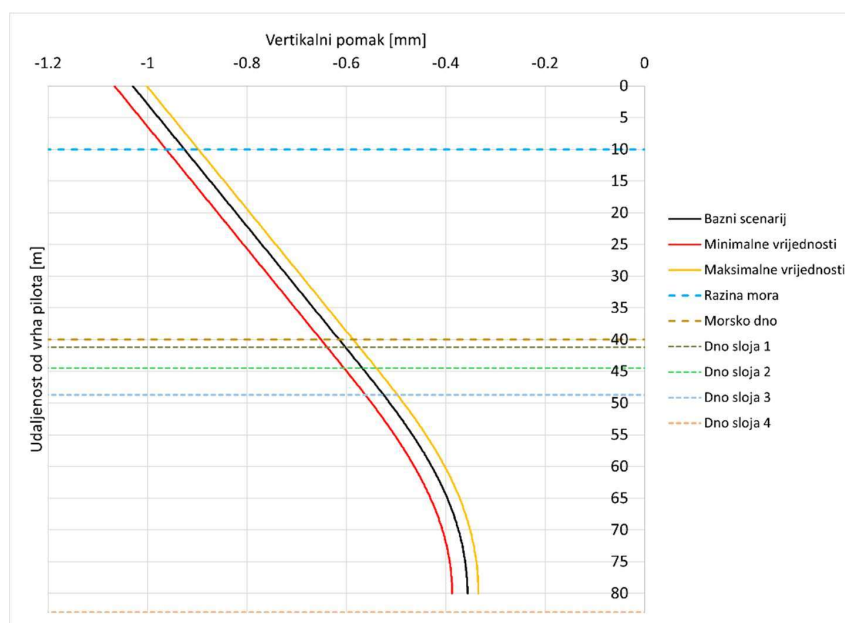


Slika 34 Bočni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-1

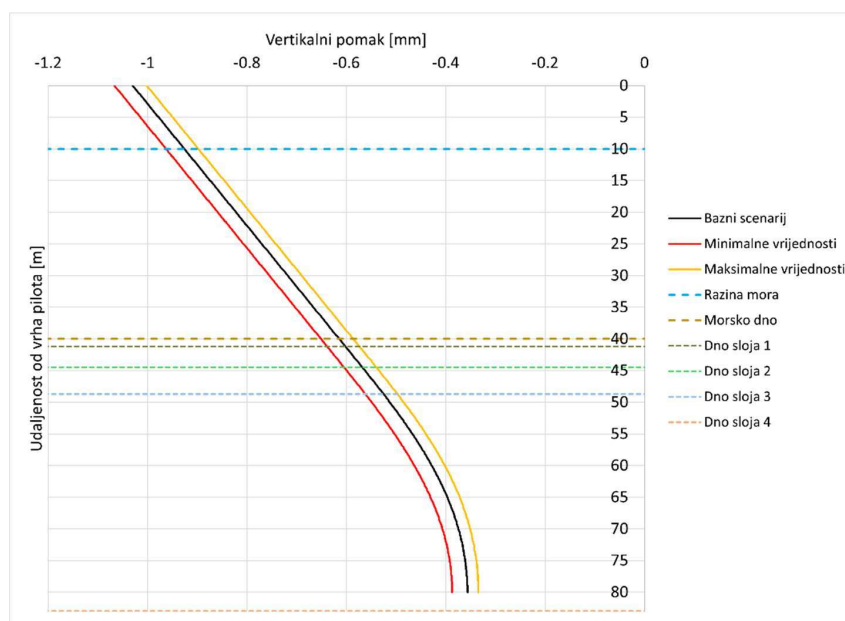


Slika 35 Bočni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-2

Bočni pomak je maksimalan pri glavi pilota i izraženiji je u rasponu od 0 do 40 metara, ujedno i dio pilota koji se nalazi izvan tla. Od 40 do 80 metara, bočni pomak se smanjuje i mijenja predznak. Scenarij E-2 prikazuje znatno veći pomak, ali trend kretanja je identičan.

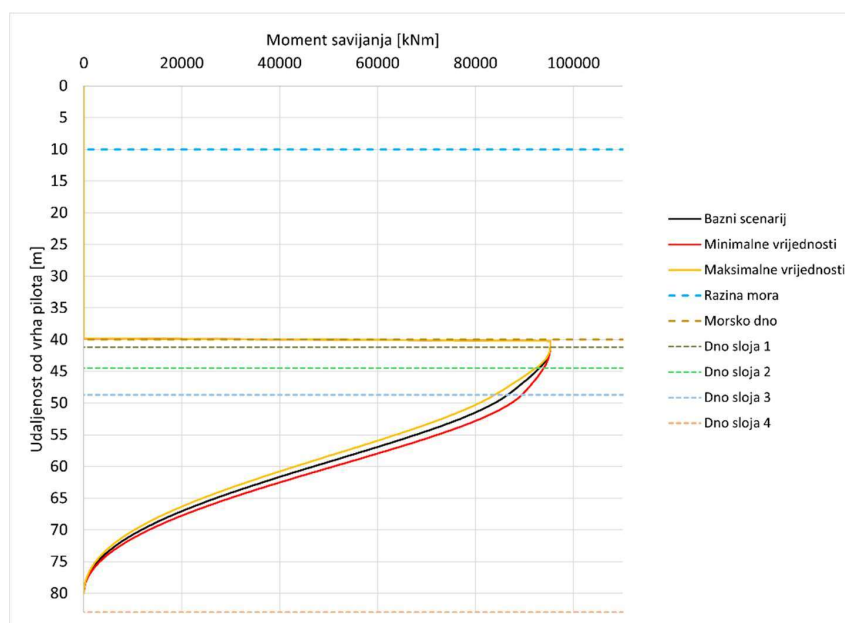


Slika 36 Vertikalni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-1

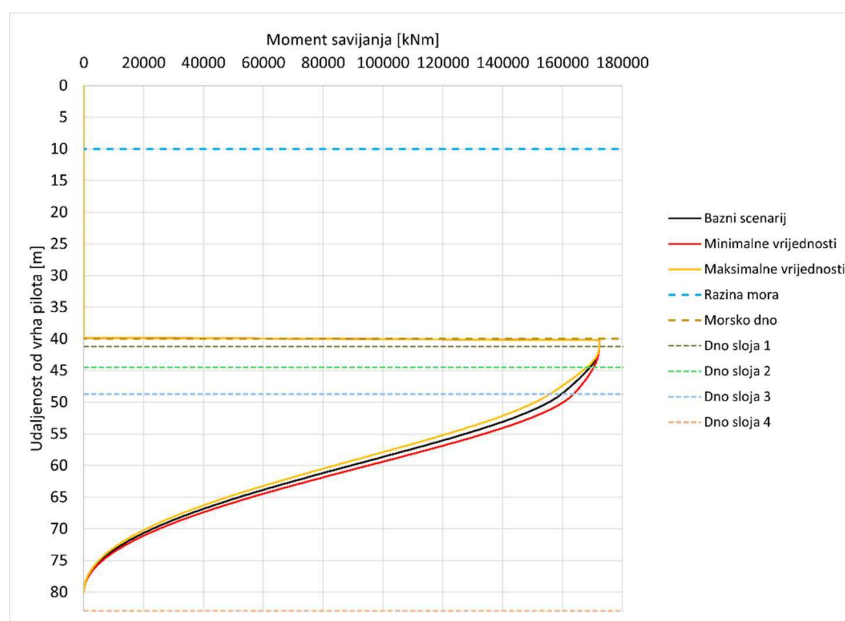


Slika 37 Vertikalni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-2

Vertikalni pomak poprima svoju maksimalnu vrijednost pri vrhu pilota i ima identičan trend opadanja do minimalne vrijednosti pri dnu pilota za oba scenarija opterećenja. Po iznosu, vertikalni pomaci su slični za oba scenarija opterećenja.

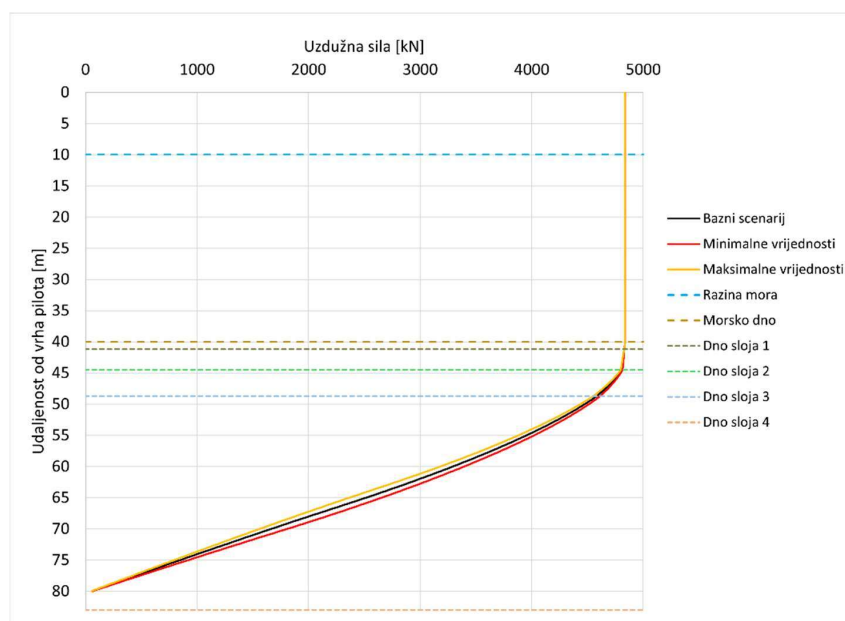


Slika 38 Moment savijanja po dubini pilota za scenarij opterećenja E-1

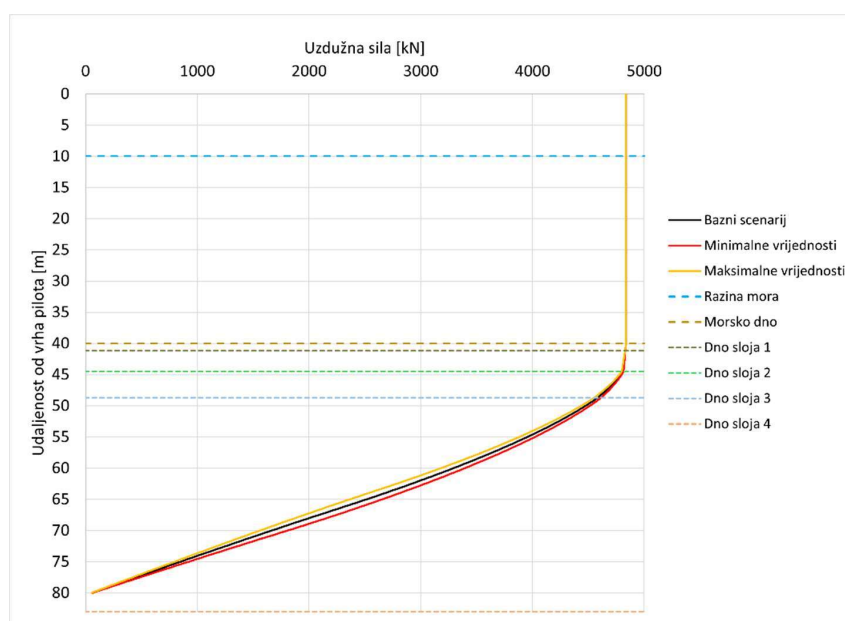


Slika 39 Moment savijanja po dubini za scenarij opterećenja E-2

Zbog postavki numeričkog modela gdje je hvatište momenta savijanja na razini morskog dna, moment savijanja u pilotu se pojavljuje tek od te razine, gdje poprima maksimalnu vrijednost jednakoj ukupnom opterećenju, a zatim opada zbog prijenosa opterećenja u tlo do dna pilota identičnim trendom za oba scenarija opterećenja. Moment savijanja je znatno veći za scenarij E-2 što je i očekivano s obzirom na razliku u iznosu opterećenja za oba scenarija.

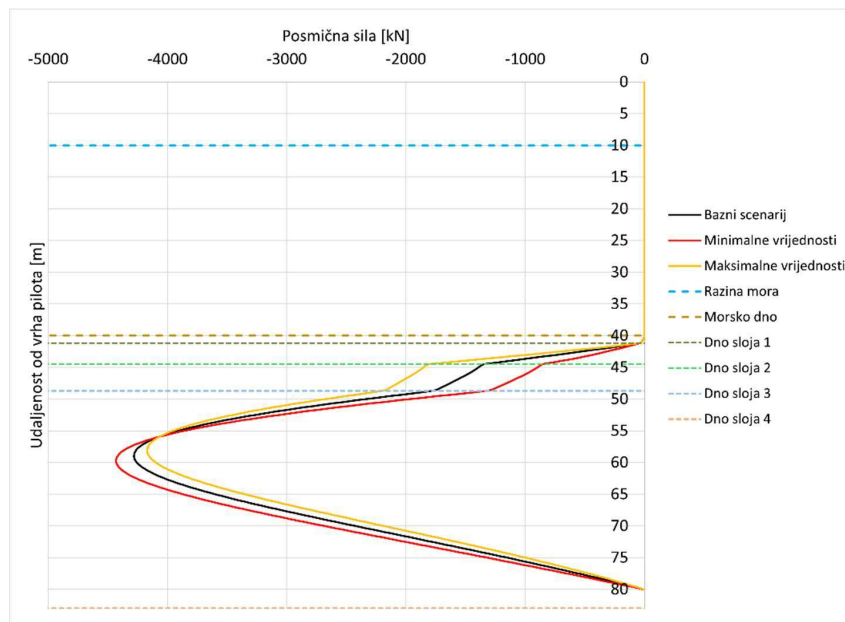


Slika 40 Uzdužna sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-1

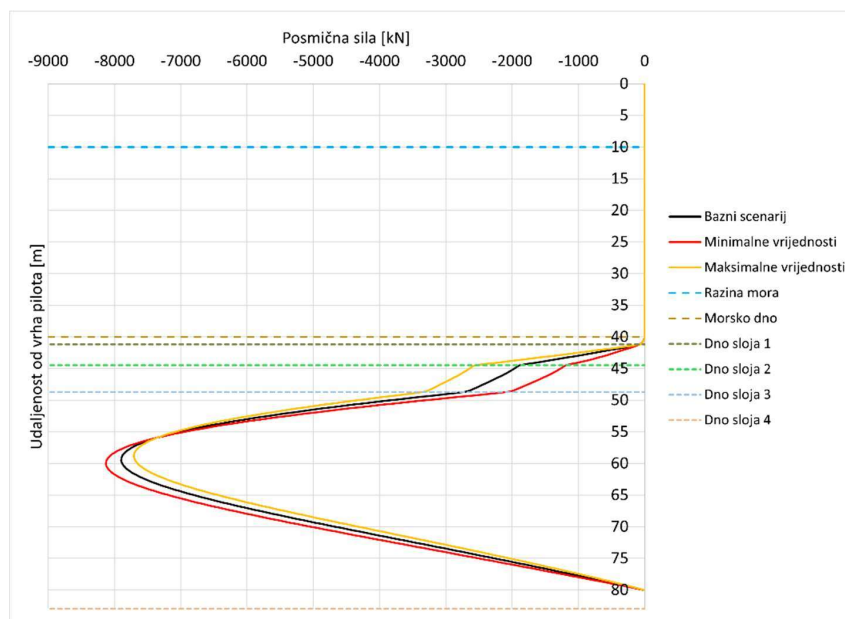


Slika 41 Uzdužna sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-2

Uzdužna sila svoju maksimalnu vrijednost poprima na vrhu pilota i iznosom je jednaka opterećenjem od vlastite težine vjetroturbinе, koje je jednako za oba scenarija opterećenja. Trend kretanja uzdužne sile je isti za oba slučaja te ona opada do dna pilota.



Slika 42 Posmična sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-1

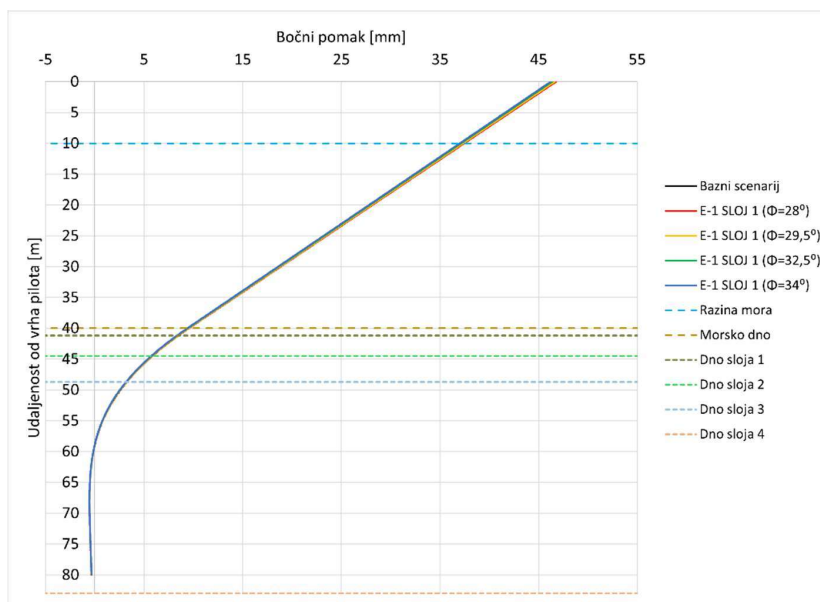


Slika 43 Posmična sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-2

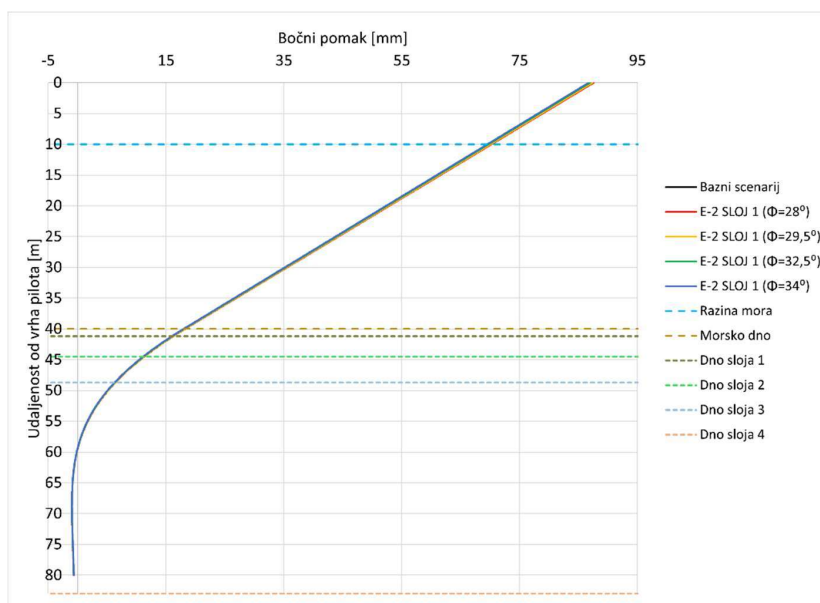
Posmična sila u monopilotu se pojavljuje tek od razine ukopavanja, identična je trendom kretanja za oba pilota, no iznosi su znatno veći za scenarij E-2 što je i očekivano s obzirom na razliku u opterećenju. Do dubine 60 metara, posmična sila raste zbog otpora tla u gornjim slojevima gdje je deformacija tla veća, a nakon toga opada i omogućava raspodjelu i konačan pad do kraja pilota.

5.8. Analiza osjetljivosti

5.8.1. Sloj I



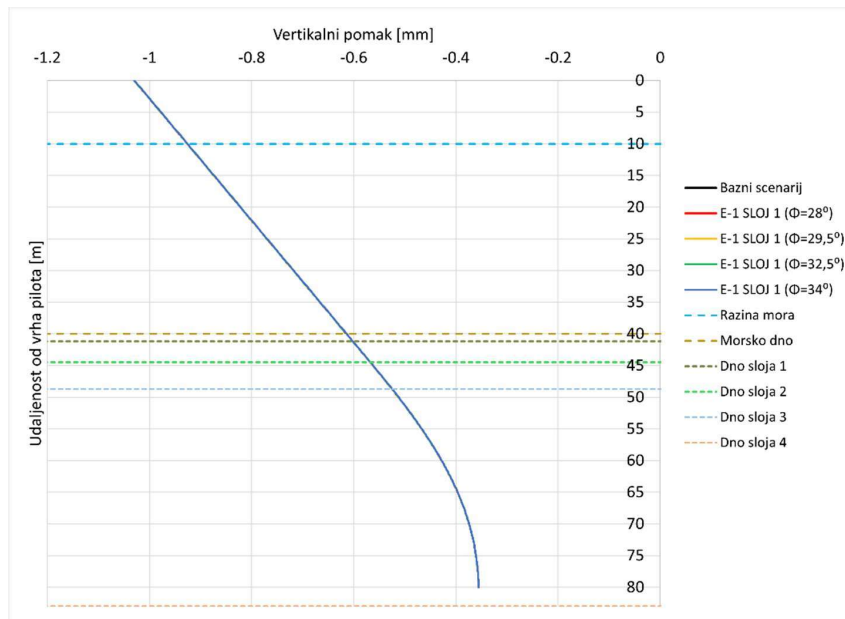
Slika 44 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1



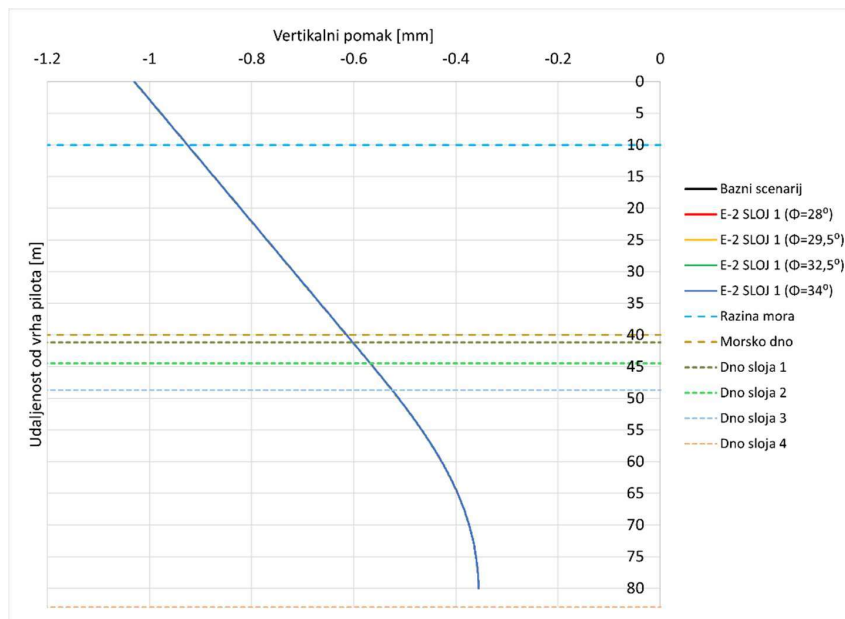
Slika 45 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-2

Na prikazanim grafovima primjetno je da utjecaj promjene kuta trenja u sloju I na bočni pomak je minimalan, ali postoji. Smanjenjem kuta dolazi do blagog povećanja bočnog pomaka, a

obratno povećanjem. Model je robustan na promjenu kuta trenja u zadanom rasponu i sloju I. Veće opterećenje nema značajan utjecaj.



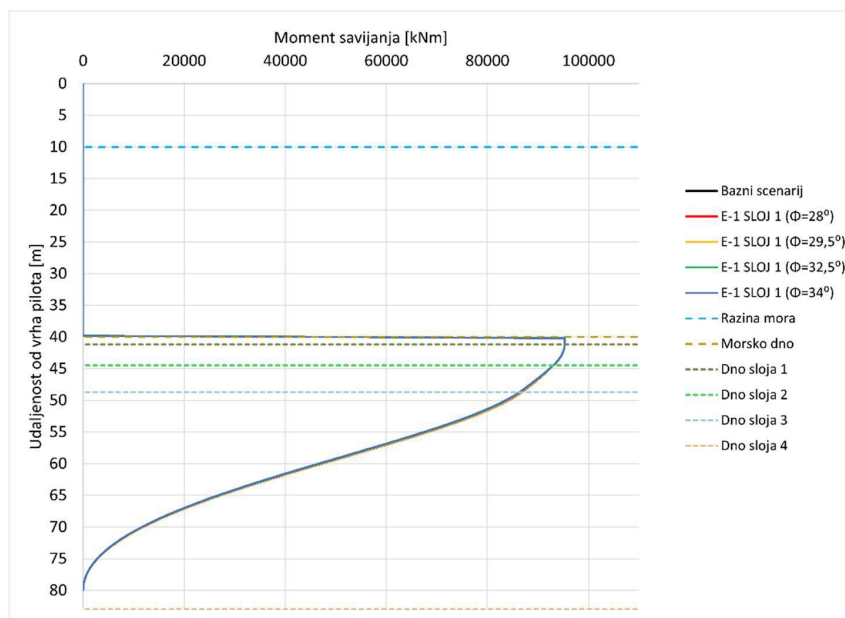
Slika 46 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1



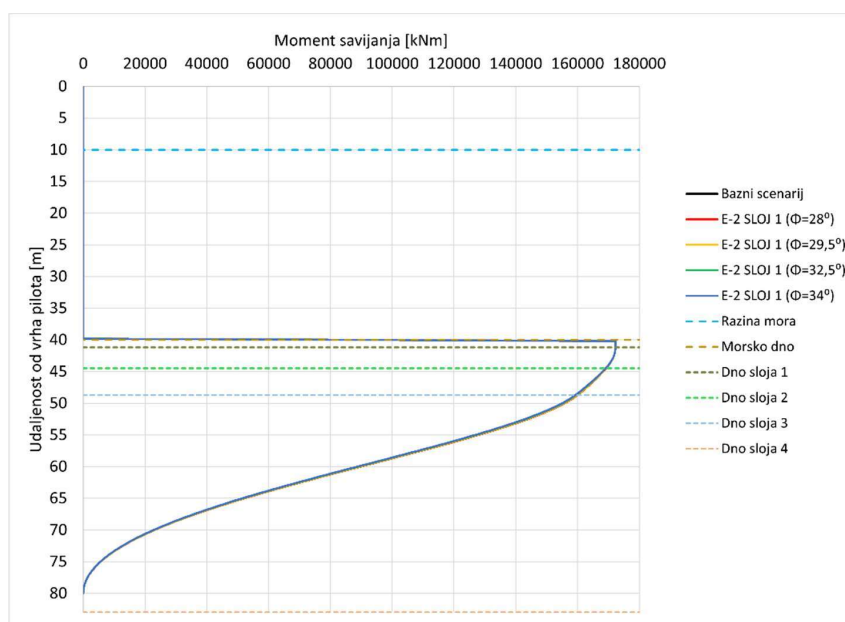
Slika 47 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-2

Na prikazanim grafovima vidljivo je da promjena kuta trenja u sloju I ima zanemariv utjecaj na vertikalni pomak, budući da su sve linije gotovo potpuno preklopljene. Vertikalni pomak

modela se pokazuje izrazito robusnim na promjene kuta trenja unutar zadanog raspona za oba scenarija opterećenja, gdje praktički između njih nema razlike.

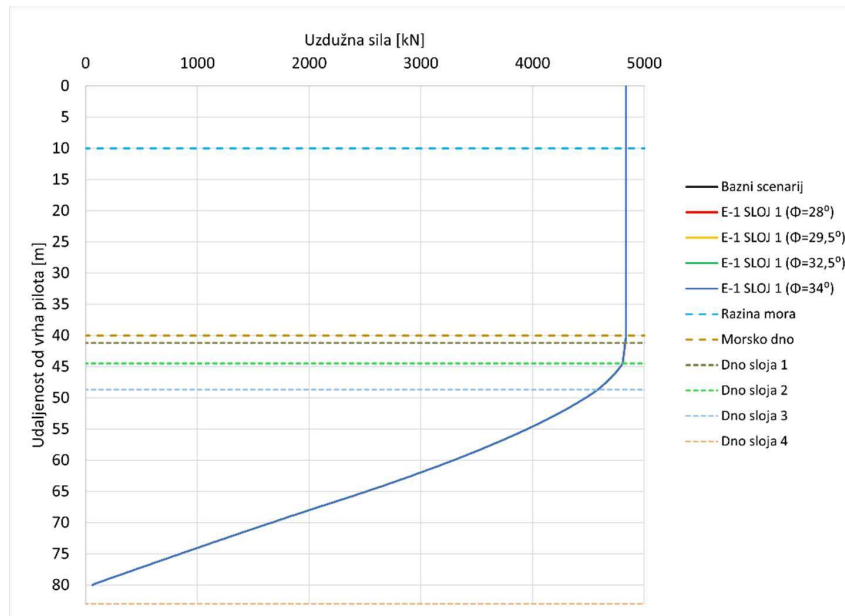


Slika 48 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1

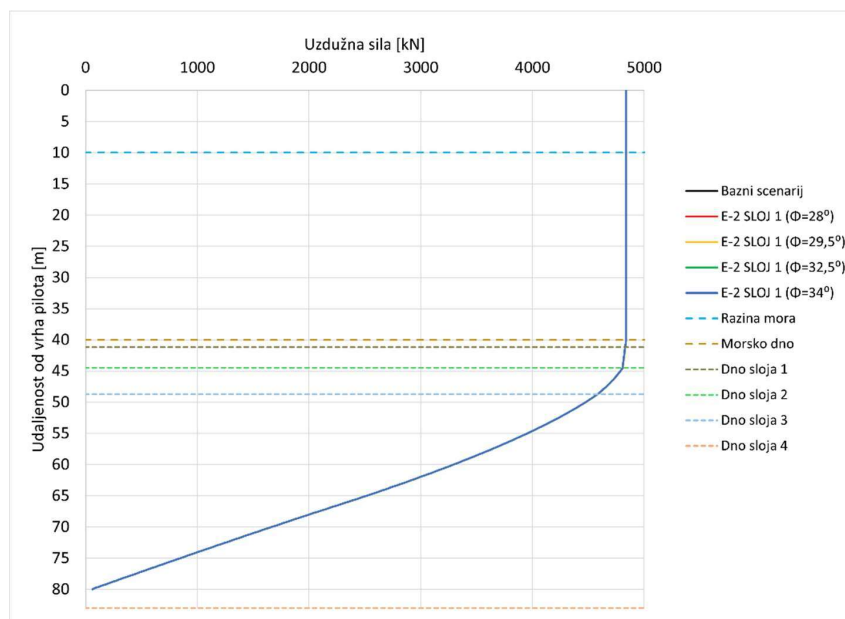


Slika 49 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-2

Na prikazanom grafu moment savijanja kroz dubinu pilota gotovo je nepromijenjen uz varijaciju kuta trenja u sloju I. Linije se značajno preklapaju, što ukazuje na robusnost modela u pogledu utjecaja promjene kuta trenja na moment savijanja za oba scenarija opterećenja.

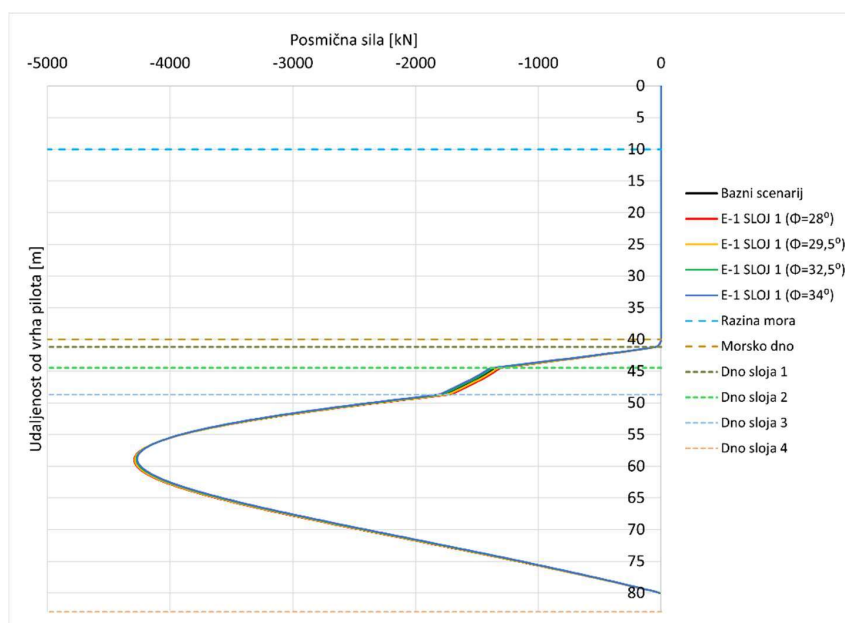


Slika 50 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1

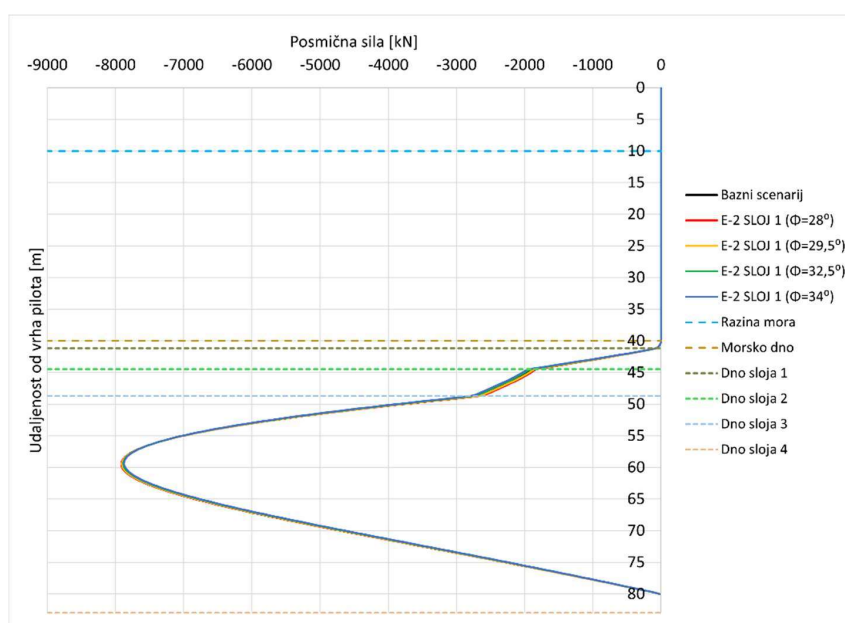


Slika 51 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja II pri opterećenju E-1

Na grafovima uzdužne sile po dubini pilota odstupanje od bazne verzije je gotovo nepostojeće s obzirom na varijaciju kuta trenja u sloju I. Svi se rezultati u potpunosti preklapaju što ukazuje na robustnost modela na promjenu uzdužne sile usred promjene kuta trenja u sloju I.



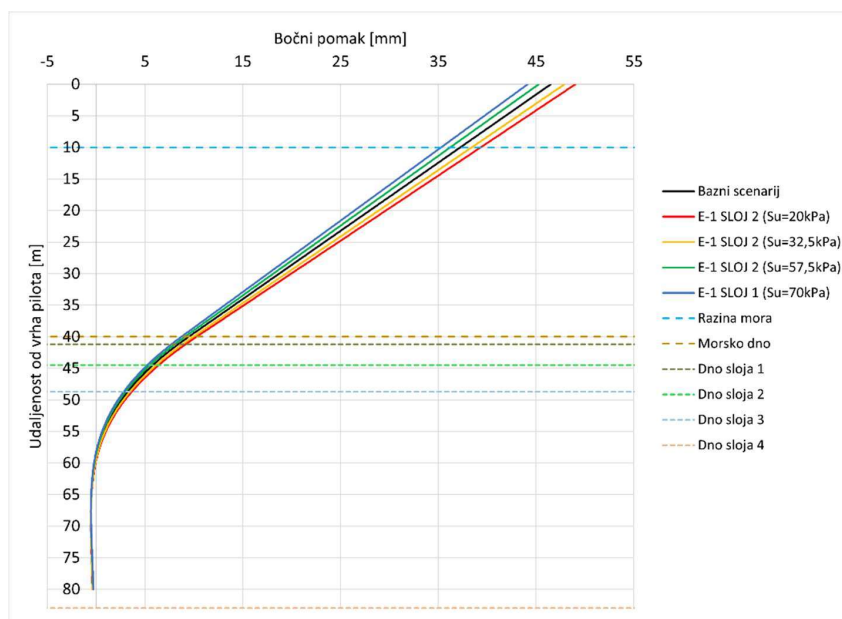
Slika 52 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1



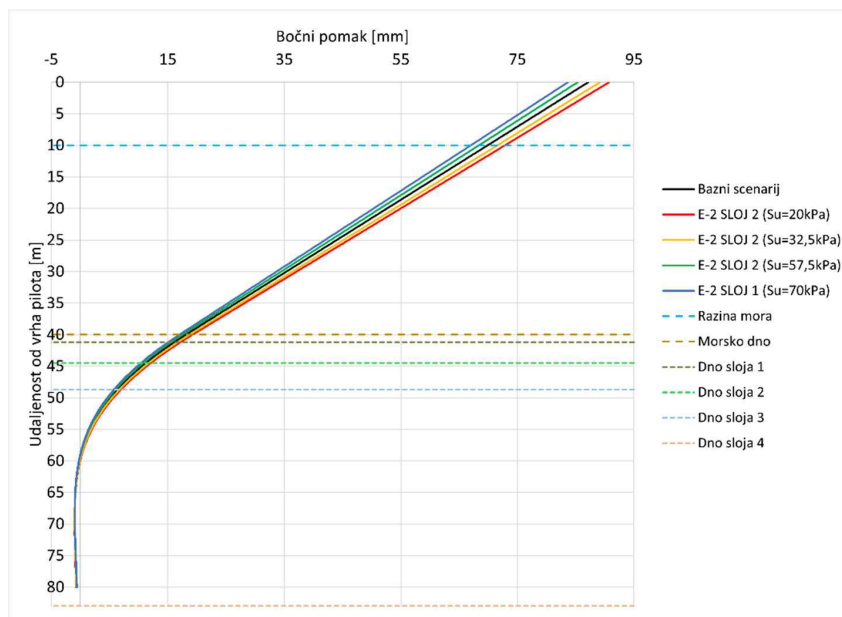
Slika 53 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1

Na prikazanim grafovima posmične sile, utjecaj promjene kuta trenja u sloju I minimalno mijenja profil posmičnih sila u pilotu. Smanjenjem kuta trenja dolazi do blagog smanjenja iznosa sile, a povećanjem kuta trenja do blagog povećanja sile. Model je ograničeno osjetljiv na varijaciju kuta trenja u odnosu na posmičnu silu. Rezultati su identični za oba opterećenja.

5.8.2. Sloj II

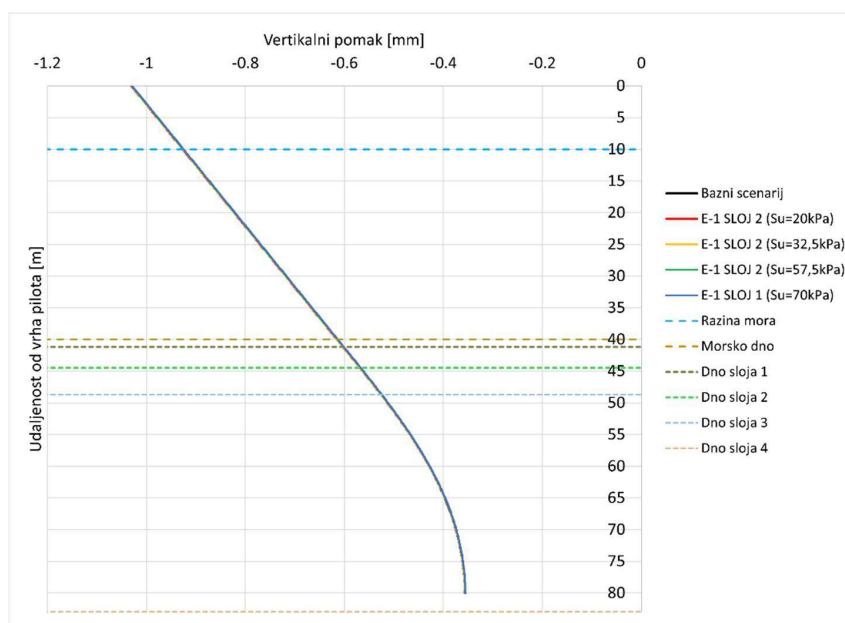


Slika 54 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1

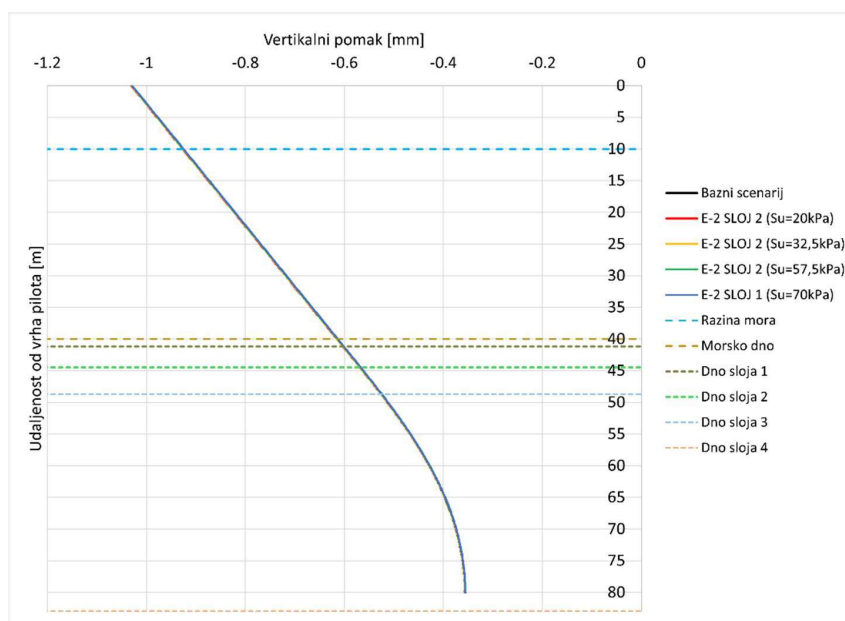


Slika 55 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2

Na grafovima se primjećuje utjecaj promjene nedrenirane čvrstoće na bočni pomak pilota, pogotovo u slobodnom dijelu pilota. Model je osjetljiv na promjenu nedrenirane čvrstoće, ali samo iznad zadanog sloja što se manifestira većim pomakom glave pilota.

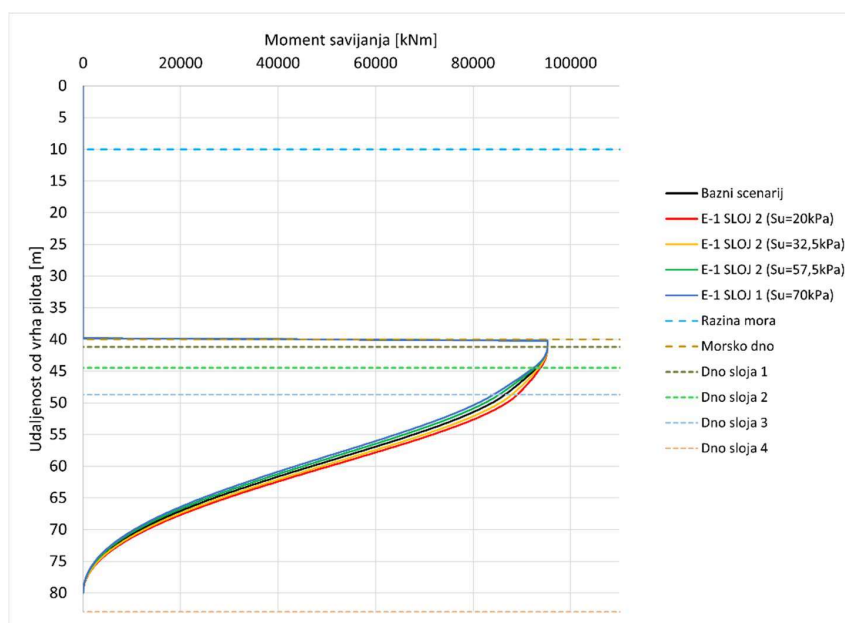


Slika 56 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1

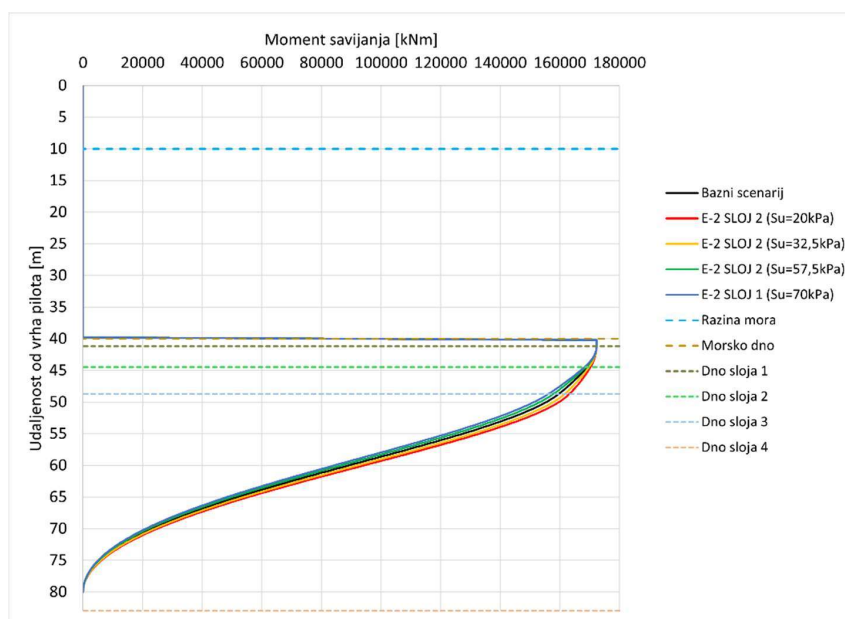


Slika 57 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2

Vertikalni pomak se ne mijenja promjenom nedrenirane posmične čvrstoće te je sustav robustan u tom pogledu. Iznos opterećenje nema utjecaj.

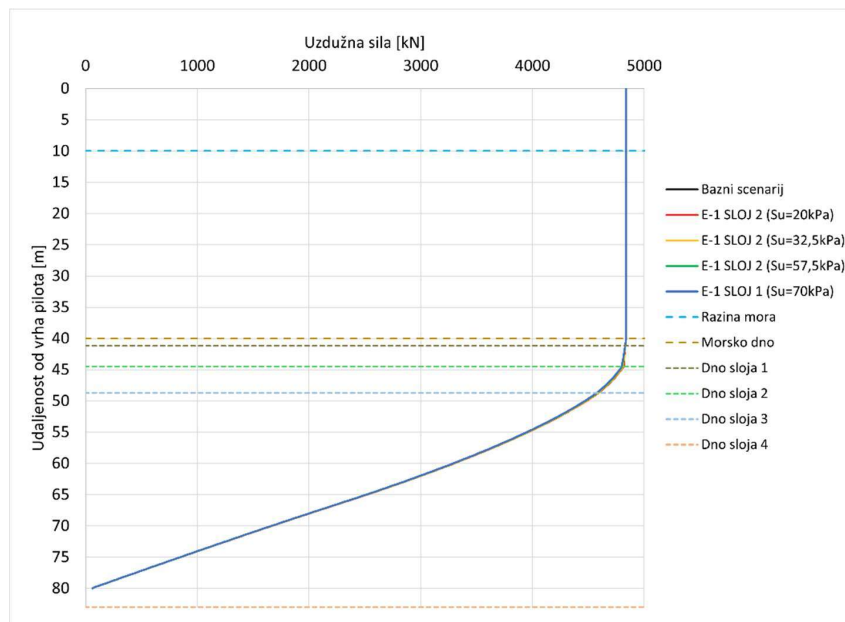


Slika 58 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1

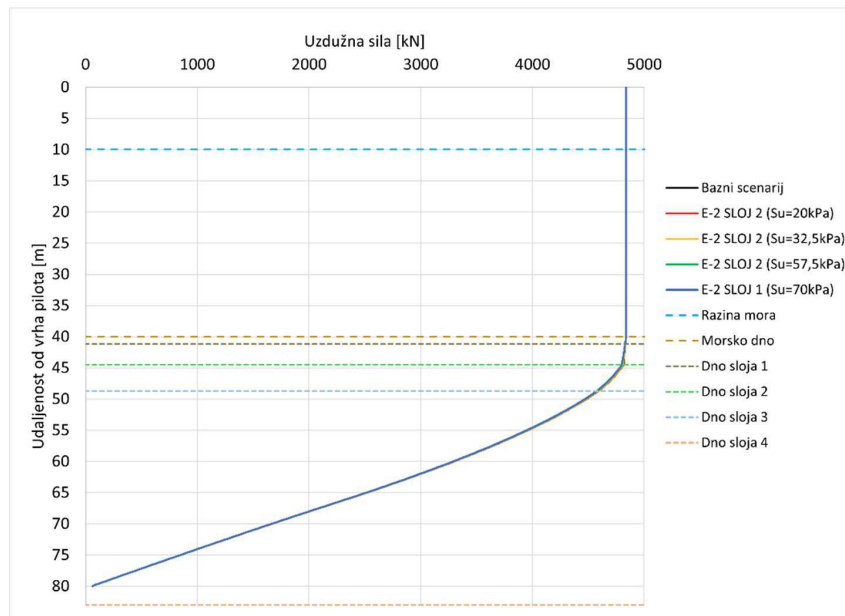


Slika 59 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2

Promjena nedrenirane čvrstoće dovodi do promjene dijagrama momenta savijanja te iznos momenta raste smanjenjem vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće. Sustav je osjetljiv na promjenu nedrenirane čvrstoće u pogledu momenta savijanja. Iznos opterećenja doprinosi uočljivijem trendu promjene momenta savijanja.

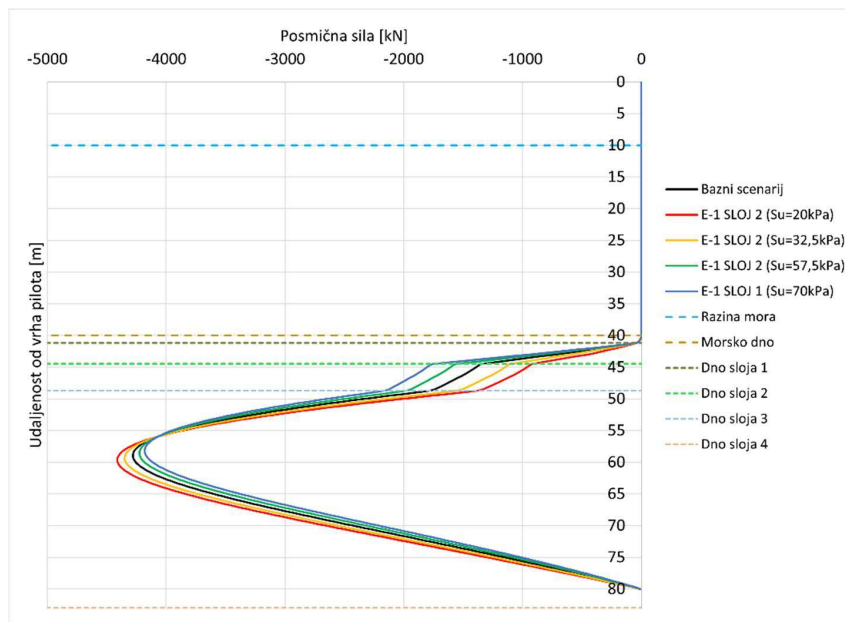


Slika 60 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1

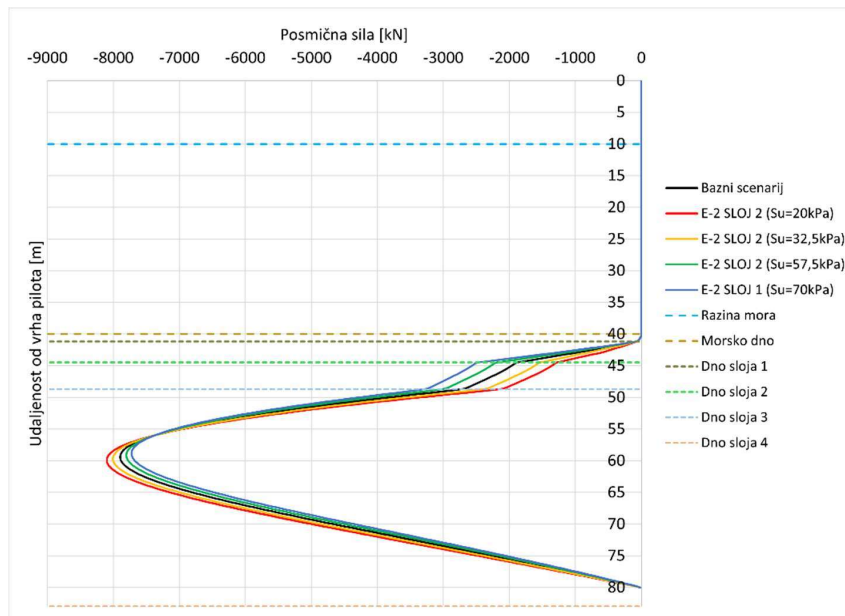


Slika 61 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2

Uzdužna sila se ne mijenja promjeno nedrenirane posmične čvrstoće te je model u tom pogledu robustan. Opterećenje nema nikakav utjecaj.



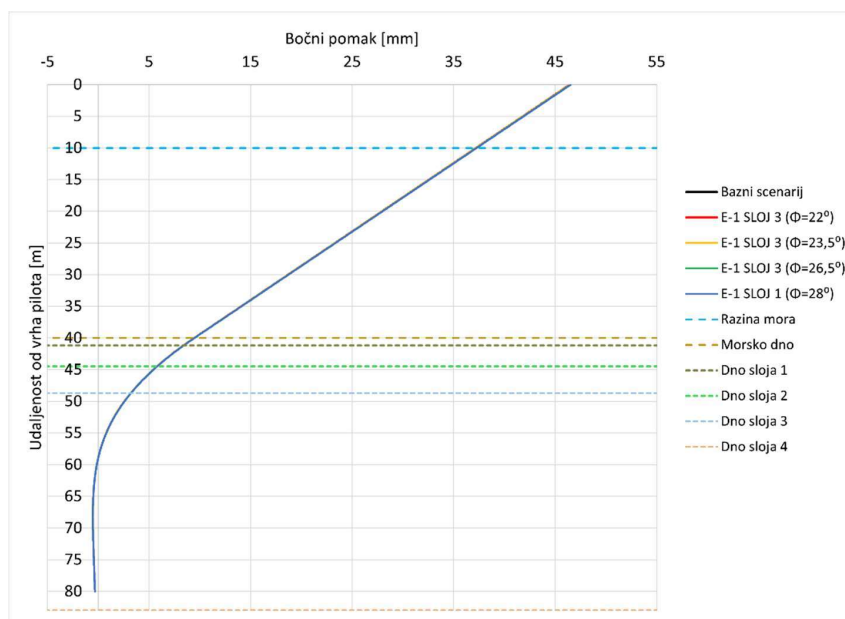
Slika 62 Prikaz posmične sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1



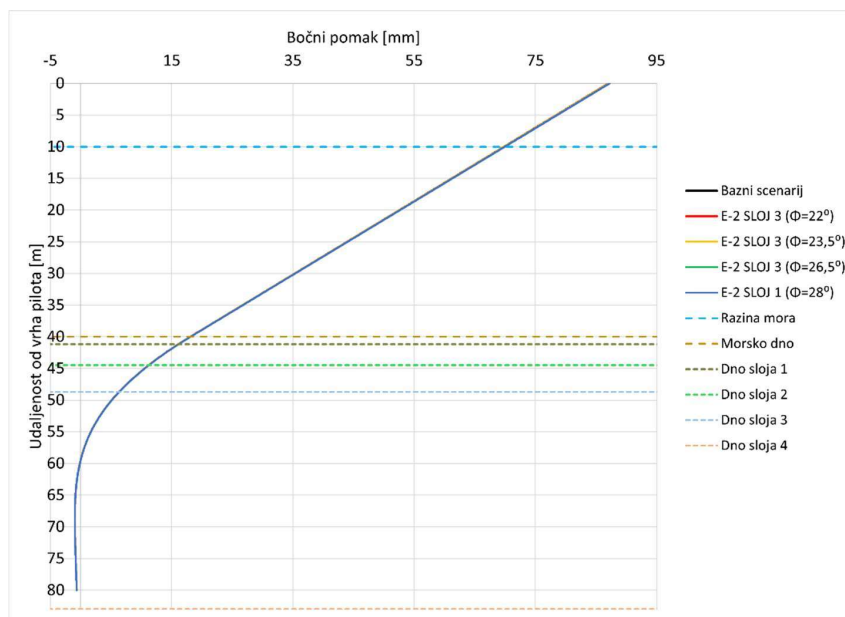
Slika 63 Prikaz posmične sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2

Nedrenirana posmična čvrstoća značajno utječe na posmičnu silu. Smanjenje čvrstoće u plićim slojevima dovodi do smanjenja posmične sile, dok se u dubljim slojevima posmična sila povećava. Povećanje čvrstoće uzrokuje suprotan trend, što čini sustav osjetljivim ne samo na apsolutnu vrijednost već i na trend promjena nedrenirane posmične čvrstoće.

5.8.3. Sloj III

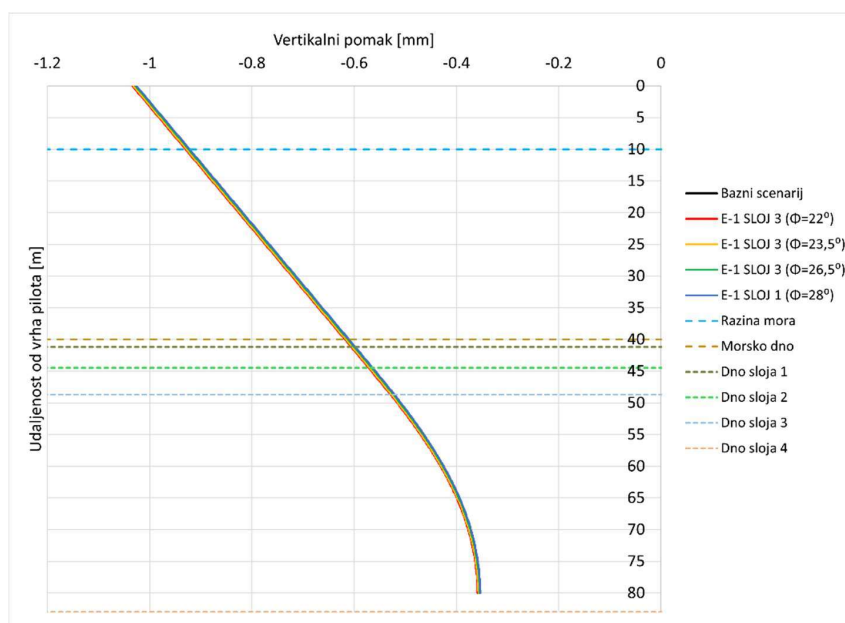


Slika 64 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1

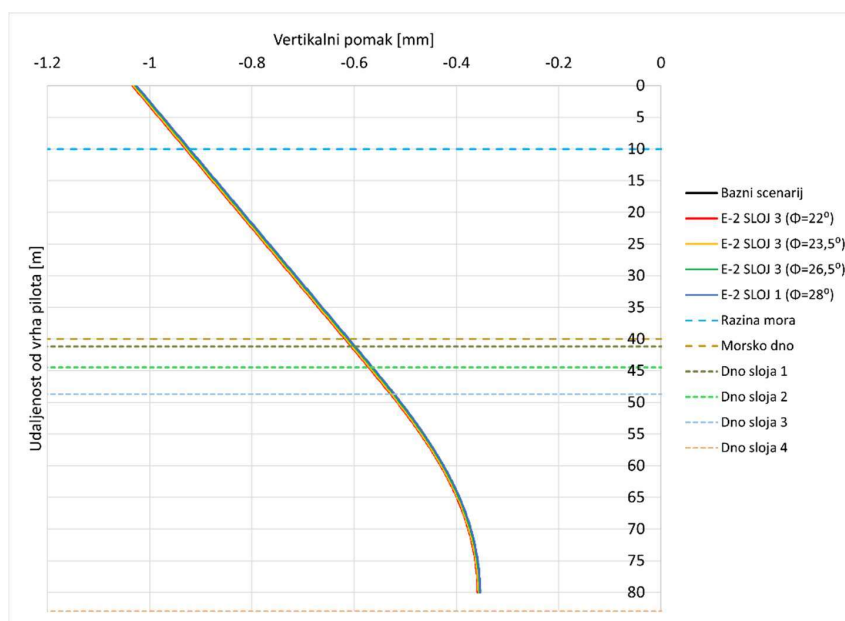


Slika 65 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2

Promjena kuta trenja nema nikakav utjecaj na iznos bočnog pomaka te je model u ovom pogledu robustan na promjenu kuta trenja sloja III. Iznos opterećenja nema utjecaja, osim na apsolutnu vrijednost pomaka.

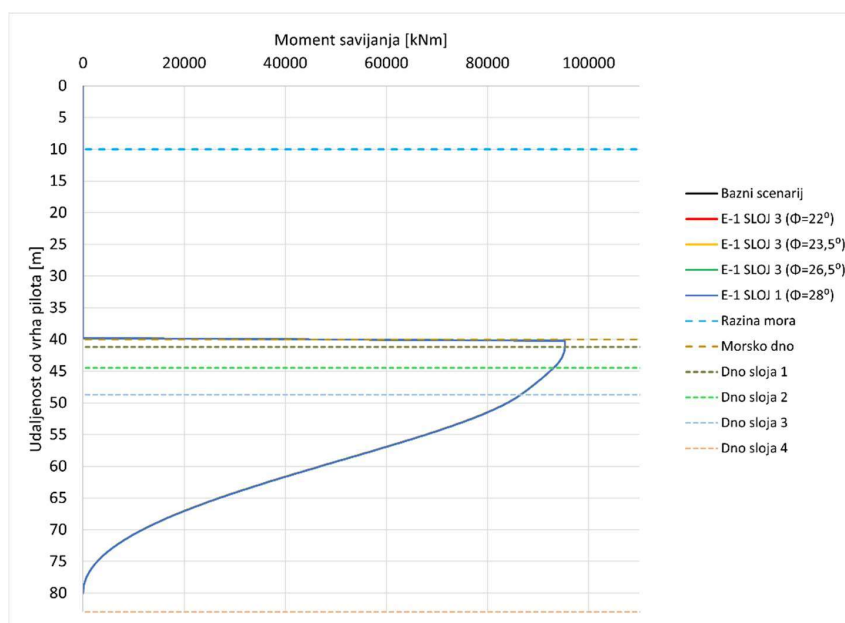


Slika 66 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1

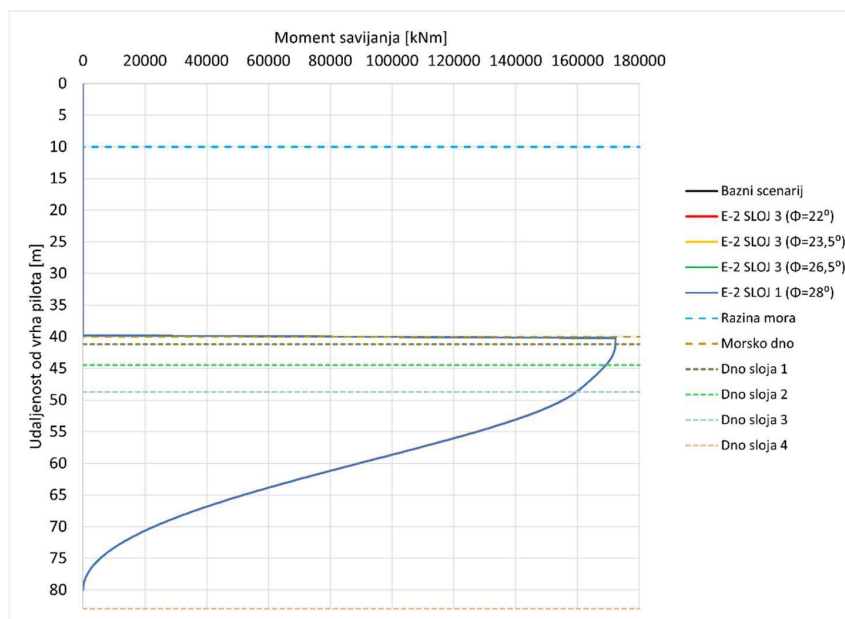


Slika 67 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2

Na prikazanim grafovima vertikalnog pomaka, vidljivo je da promjena kuta unutarnjeg trenja dovodi do blage promjene vertikalnog pomaka, to jest, smanjenjem kuta unutarnjeg trenja dolazi do povećanja pomaka, a povećanjem kuta dolazi do smanjenja pomaka. Model je osjetljiv na promjenu kuta unutarnjeg trenja sloja II u odnosu na vertikalni pomak.

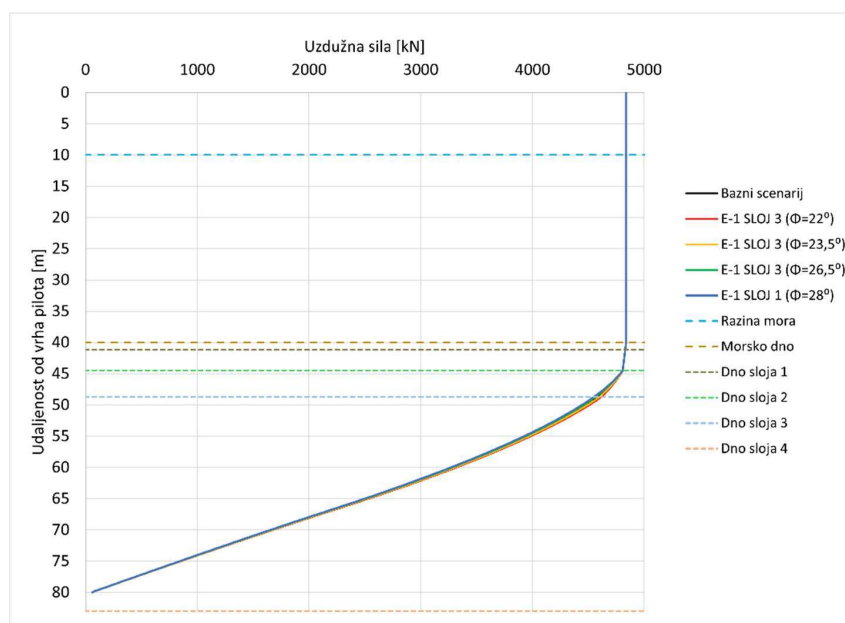


Slika 68 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1

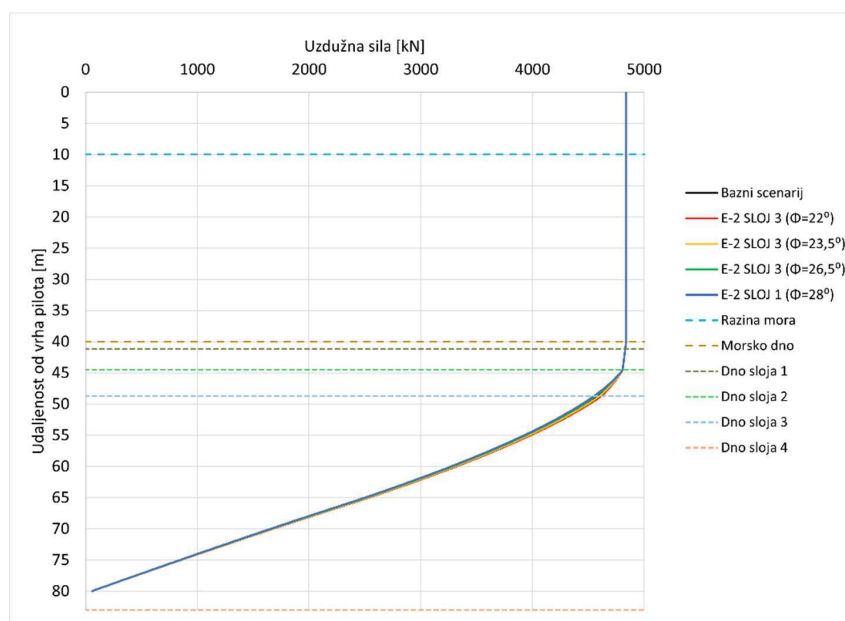


Slika 69 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2

Promjena kuta unutarnjeg trenja ne dovodi do nikakve promjene u obliku grafa momenta savijanja te je model robustan na promjenu kuta trenja u odnosu na moment savijanja.

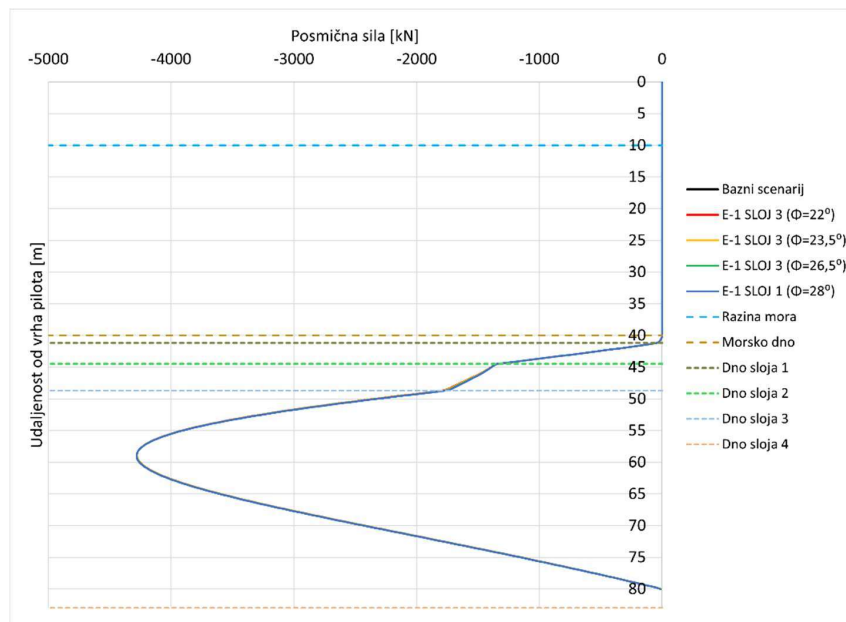


Slika 70 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1

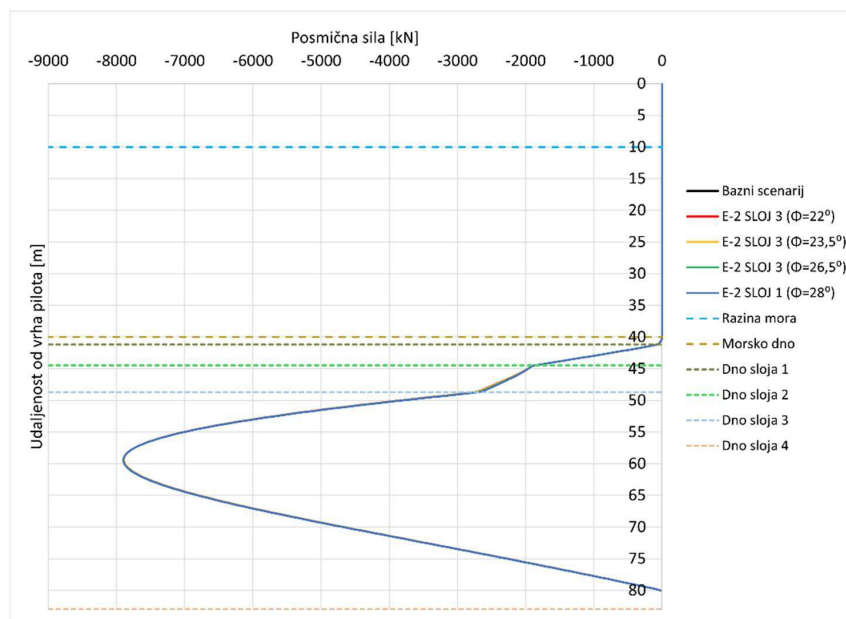


Slika 71 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2

Uzdužna sila prikazuje blage promjene prilikom promjene kuta unutarnjeg trenja, i to na način da iznos sile raste smanjenjem kuta unutarnjeg trenja, što je posebice vidljivo u rasponu od 45 do 60 metara. Sustav je ograničeno osjetljiv na promjenu kuta unutarnjeg trenja u odnosu na uzdužnu silu.



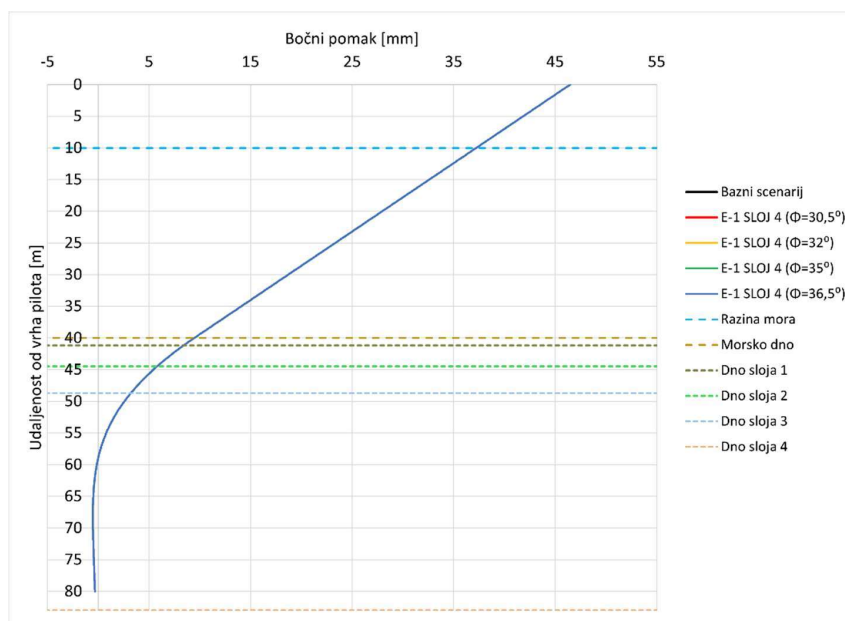
Slika 72 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1



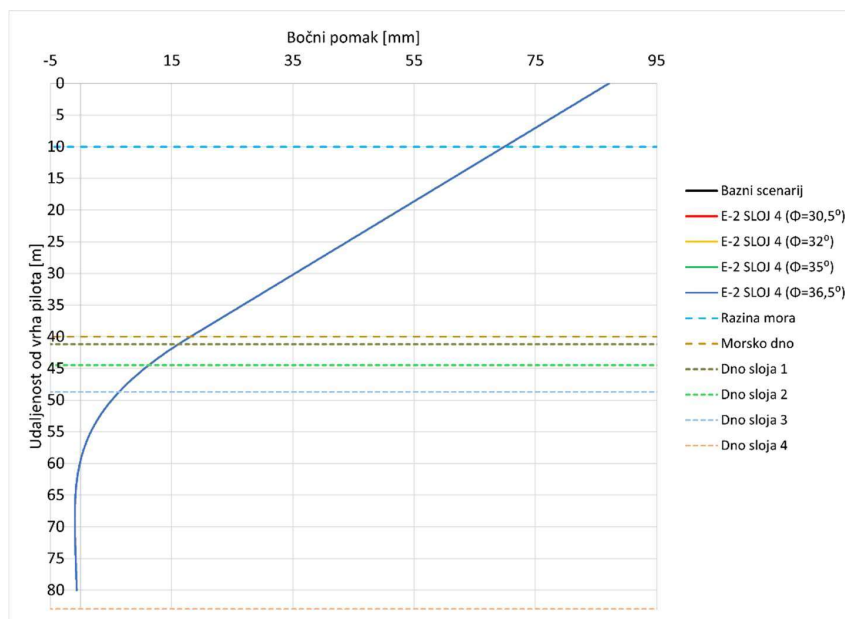
Slika 73 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2

Iznos posmične sile prilikom promjene kuta unutarnjeg trenja ne dovodi do vidljivih promjena u grafovima. Sustav je robustan na promjenu kuta trenja u odnosu na iznos uzdužne sile.

5.8.4. Sloj IV

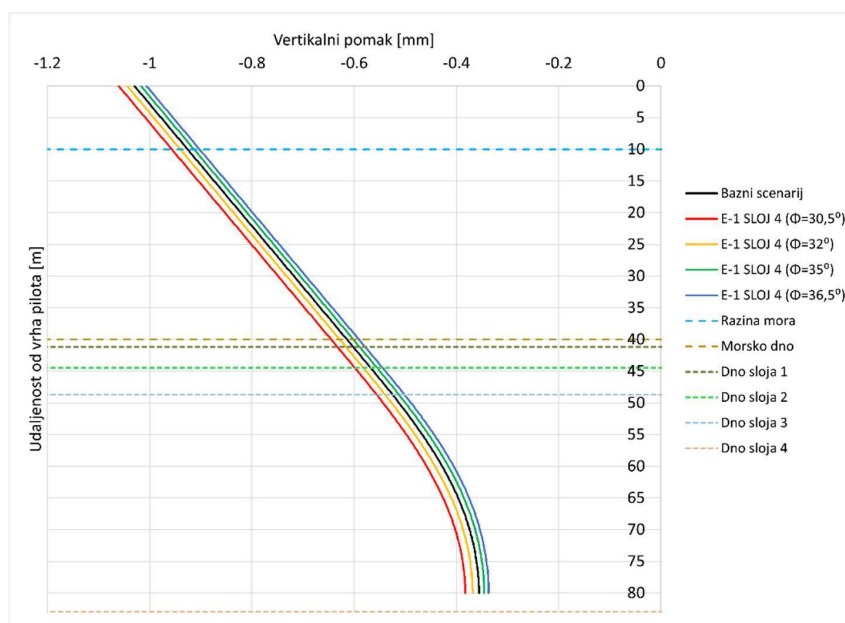


Slika 74 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1

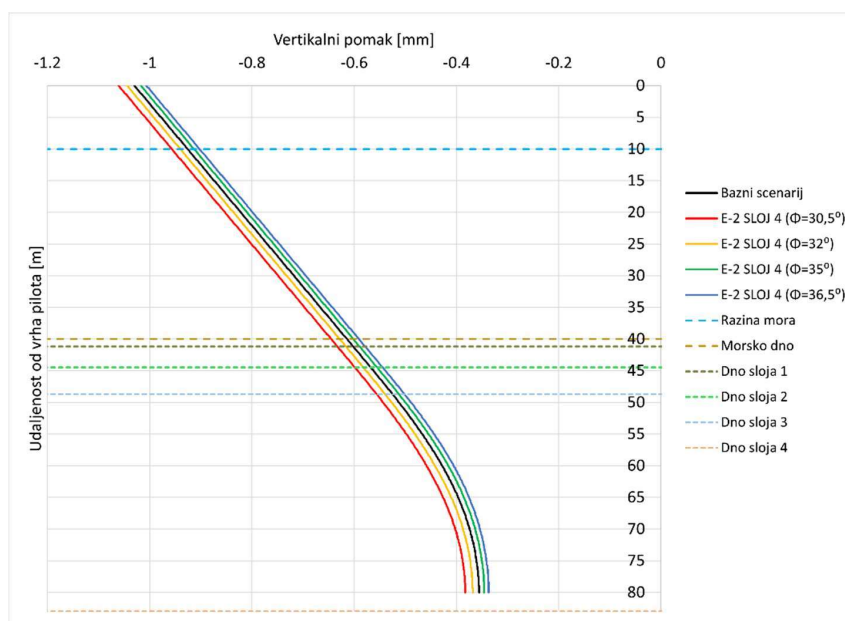


Slika 75 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2

Na grafu bočnog pomaka primjetan je minimalan utjecaj promjene kuta trenja sloja 4. Sve verzije prikazuju gotovo identične krivulje, što ukazuje na robusnost modela u pogledu bočnog pomaka za ove parametre tla u zadanoj dubini. Nema razlike između scenarija.

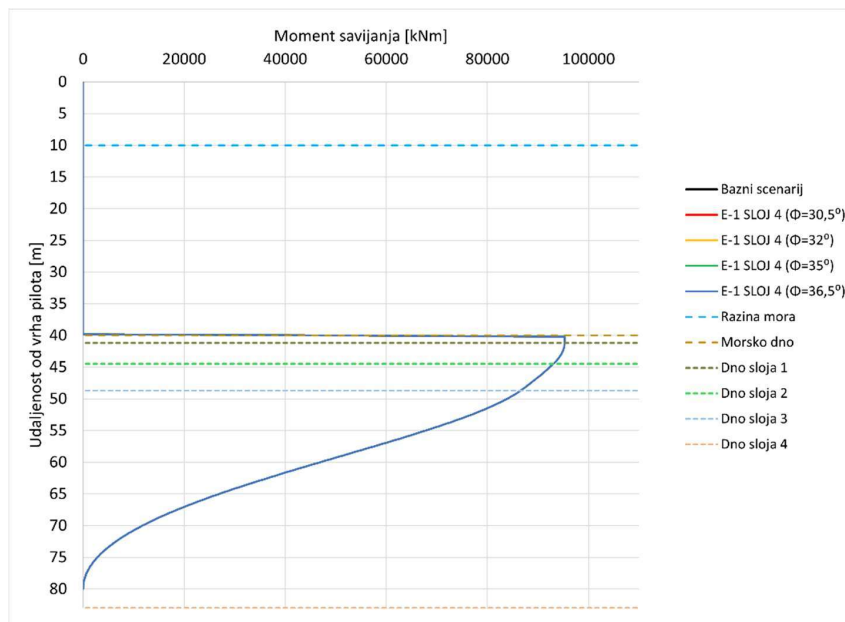


Slika 76 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1

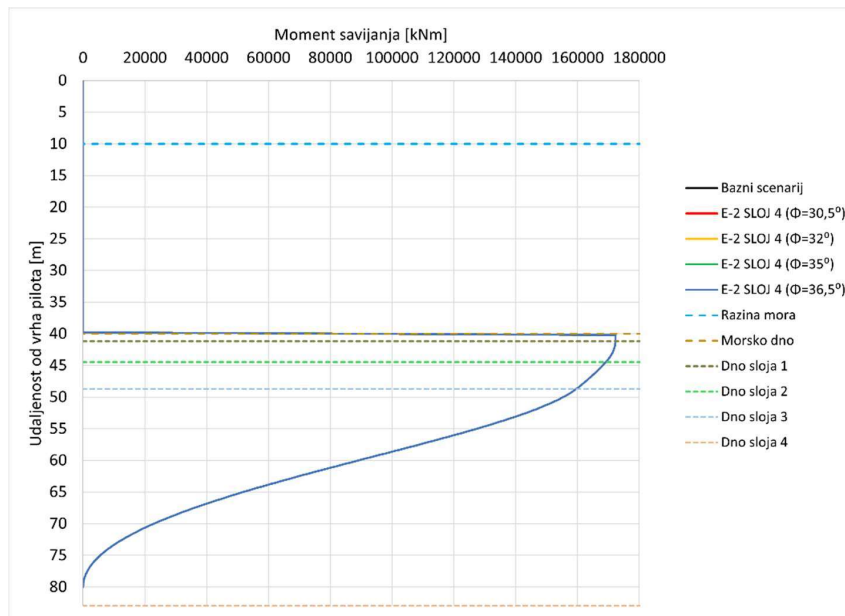


Slika 77 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2

Prikazani vertikalni pomaci pokazuju osjetljivost modela na promjene kuta trenja sloja 4. Iako su pomaci blizu, vidljivo je blago smanjenje vertikalnog pomaka s povećanjem kuta trenja, što ukazuje na smanjenje slijeganja. Iznos opterećenja, osim po apsolutnoj vrijednosti, nema utjecaja.

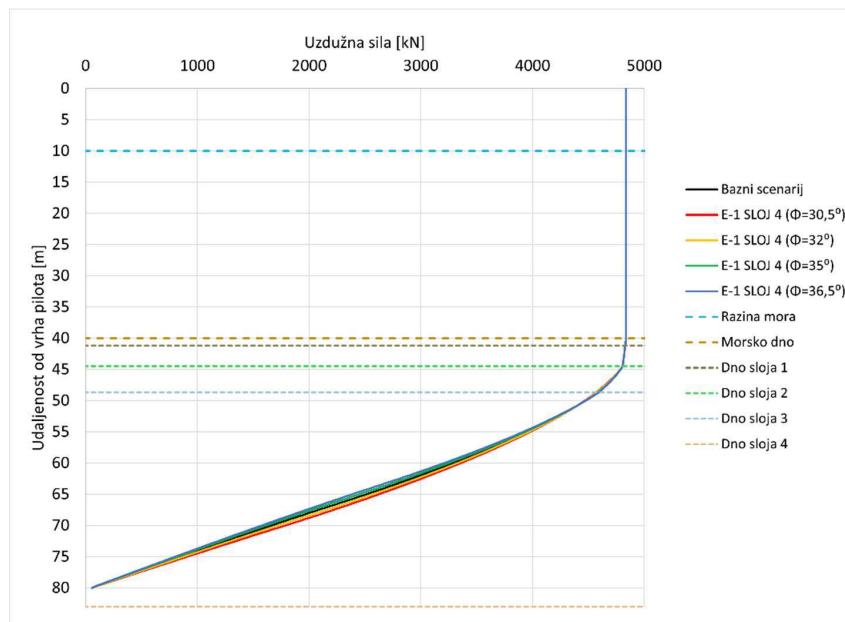


Slika 78 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1

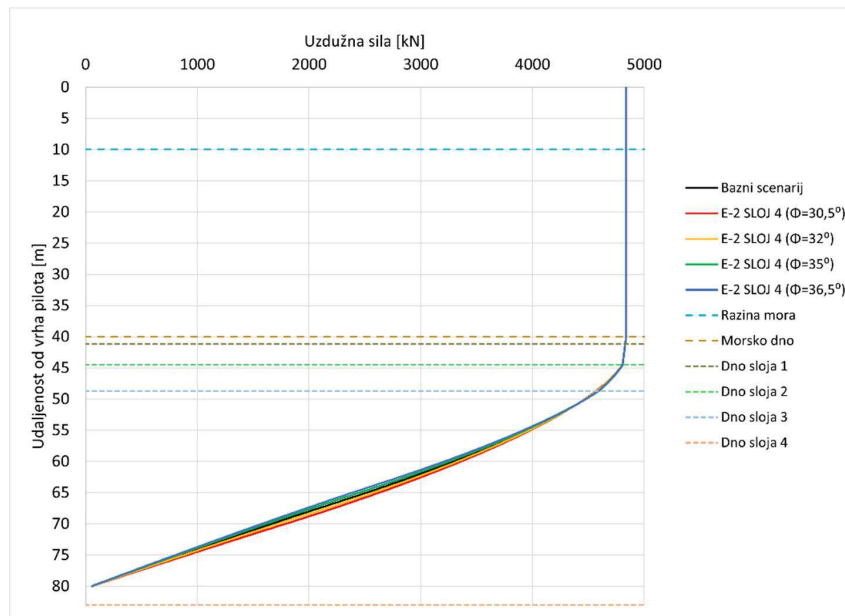


Slika 79 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2

Na prikazanim grafovima, utjecaj promjene kuta trenja na promjenu oblika dijagrama momenta savijanja je neprimjetan te se sve linije preklapaju. Model je izrazito robustan u tom pogledu. Iznos opterećenja nema nikakav utjecaja.

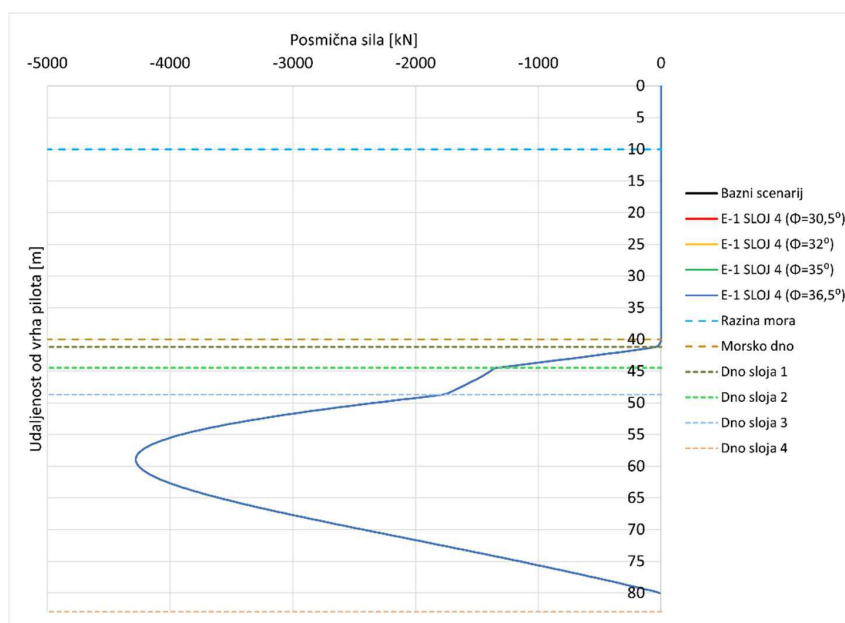


Slika 80 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1

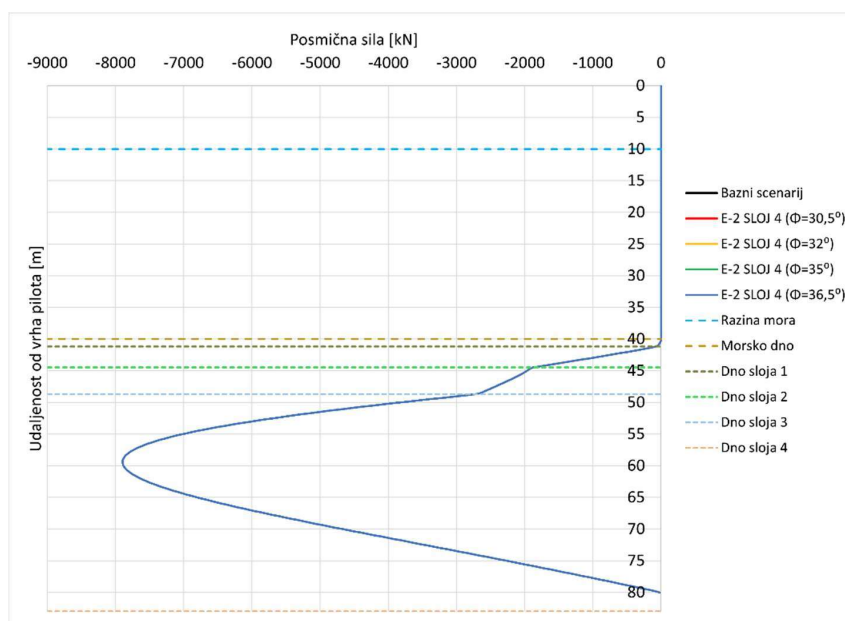


Slika 81 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2

Uzdužna sila pokazuje osjetljivost na promjenu kuta trenja u sloju 4 te je vidljivo da sa manjim vrijednostima kuta trenja, uzdužna sila poprima veću vrijednost pri istim koordinatama. Iznos opterećenja nema utjecaja na model u ovom slučaju.



Slika 82 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1



Slika 83 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2

Posmična sila nema nikakve promjene pri promjeni varijacije kuta trenja. Model je izuzetno robustan u ovom pogledu. Opterećenje nema nikakav utjecaj.

5.8.5. Rekapitulacija analize osjetljivosti

Sloj I (0-1.2 m)

- Bočni pomak: Minimalno osjetljiv; promjena kuta trenja izaziva male promjene.
- Vertikalni pomak: Zanemariv utjecaj promjene kuta trenja; model je vrlo robustan.
- Moment savijanja: Gotovo nepromijenjen; model robustan.
- Uzdužna sila: Nepostojeće odstupanje; model izrazito robustan.
- Posmična sila: Blago osjetljiv; blage promjene uz promjenu kuta trenja.

Sloj II (1.2-4.5 m)

- Bočni pomak: Osjetljiv na promjenu nedrenirane čvrstoće, posebno u slobodnom dijelu pilota.
- Vertikalni pomak: Ne mijenja se; model je robustan.
- Moment savijanja: Osjetljiv na promjenu nedrenirane čvrstoće, pogotovo pri većem opterećenju.
- Uzdužna sila: Robustan; nema promjena uz promjenu čvrstoće.
- Posmična sila: Blago osjetljiv; smanjenje čvrstoće dovodi do promjene trenda posmične sile.

Sloj III (4.5-6 m)

- Bočni pomak: Robustan; promjena kuta trenja nema utjecaj.
- Vertikalni pomak: Osjetljiv na promjenu kuta trenja; smanjenjem kuta raste pomak.
- Moment savijanja: Robustan; promjena kuta trenja nema utjecaja.
- Uzdužna sila: Ograničeno osjetljiv; smanjenje kuta trenja povećava silu.
- Posmična sila: Robustan; promjena kuta trenja nema utjecaja.

Sloj IV (8.7-43 m)

- Bočni pomak: Robustan; promjena kuta trenja ima minimalan utjecaj.
- Vertikalni pomak: Blago osjetljiv; veći kut trenja smanjuje pomak.
- Moment savijanja: Robustan; promjena kuta trenja nema utjecaja.
- Uzdužna sila: Osjetljiv; manji kut trenja povećava uzdužnu silu.
- Posmična sila: Robustan; promjena kuta trenja nema utjecaja.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražena je važnost pučinskih vjetroturbina s naglaskom na održivost, smanjenje emisija stakleničkih plinova i prijelaz na obnovljive izvore energije. Pregledani su ključni projekti vjetroelektrana poput Hornsea i Arcadis Ost 1, koji ilustriraju ubrzani napredak u industriji vjetroenergije, gdje novi modeli vjetroturbina s većim lopaticama, dostupni već tijekom razvoja projekata, značajno povećavaju opterećenja vjetra na temelje. U sklopu analize osjetljivosti, monopiloti su se istaknuli kao učinkovit sustav temeljenja za raznolike uvjete opterećenja. Numeričkim modeliranjem u programu RS Pile analizirani su utjecaji promjena parametara tla – kuta unutarnjeg trenja za pjeskovita tla i nedrenirane posmične čvrstoće za glinovita tla – na bočne i vertikalne pomake, moment savijanja te posmične i uzdužne sile. Analiza je pokazala da su slojevi II i IV ključni za stabilnost; sloj II (glina) osjetljiv je na promjene u nedreniranoj posmičnoj čvrstoći, što utječe na bočni pomak i moment savijanja, dok sloj IV (pijesak) reagira na promjene kuta unutarnjeg trenja, što utječe na vertikalni pomak i uzdužnu silu. Slojevi I i III pokazali su veću robusnost na promjene. Ovi rezultati ističu važnost precizne geotehničke karakterizacije tla pri projektiranju temelja.

POPIS LITERATURE

- [1] 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*. 2021;13:7702.
- [2] Ledec GC, Rapp KW, Aiello RG. Greening the wind - Environmental and social considerations for wind power development. World Bank Study. 2011. ISBN: 978-0-8213-8926-3.
- [3] Kara T, Şahin AD. Implications of climate change on wind energy potential. *Sustainability*. 2023;15:14822.
- [4] International Energy Agency (IEA). Offshore wind outlook 2019: World energy outlook special report. International Energy Agency. 2019.
- [5] Institut za društveno odgovorno poslovanje (IDOP). Ciljevi održivog razvoja. Dostupno na: <https://idop.hr/ciljevi-odrzivog-razvoja/>. Pristupljeno 4. rujna 2024.
- [6] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. John Wiley & Sons. 2001. ISBN: 0-471-48997-2.
- [7] Olabi AG, Obaideen K, Abdelkareem MA, AlMallahi MN, Shehata N, Alami AH, Mdallal A, Hassan AAM, Sayed ET. Wind energy contribution to the sustainable development goals: Case study on London Array. *Sustainability*. 2023;15:4641.
- [8] Iglinski B, Pietrzak MB. Renewable and sustainable energy: Current state and prospects. *Energies*. 2022;15:4735.
- [9] Gao Z, Bingham HB, Adam F. Offshore renewable energy. 2015.
- [10] Basack S, Dutta S, Saha D, Das G. Power generation by offshore wind turbines: An overview on recent research and developments. Elitte College of Engineering, Kolkata. 2021.
- [11] Asim T, Islam SZ, Hemmati A, Khalid MSU. A review of recent advancements in offshore wind turbine technology. *Energies*. 2022;15:579.
- [12] Bhattacharya S. Design of foundations for offshore wind turbines. Wiley. 2019.
- [13] Wu X, Hu Y, Li Y, Yang J, Duan L, Wang T, Adcock T, Jiang Z, Gao Z, Lin Z, Borthwick A, Liao S. Foundations of offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;104:379–393
- [14] Gupta BK, Basu D. Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives. *Ocean Engineering*. 2020;213:107514.
- [15] Ali MS, Bhattacharya S. A review of offshore wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;88:1-17.

- [16] Sánchez S, López-Gutiérrez J-S, Negro V, Esteban MD. Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019;7(12):441.
- [17] EEW SPC. Completion of first monopile for Baltic Eagle project. Dostupno na: <https://eew-group.com/projects-references/success-stories/news-detail/completion-of-first-monopile-for-baltic-eagle-project/>. Pristupljeno 25. listopada 2024.
- [18] Vindeby offshore wind farm. Wikipedia. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Vindeby_Offshore_Wind_Farm. Pristupljeno 25. listopada 2024.
- [19] Dong. Decommissioning of Vindeby in pictures. *Wind Power Monthly*. Dostupno na: <https://www.windpowermonthly.com/article/1427436/dong-begins-vindeby-decommissioning-pictures>. Pristupljeno 13. kolovoza 2024.
- [20] Ørsted. Horns Rev 2 wind farm project summary. Dostupno na: https://orsted.com/-/media/www/docs/corp/com/our-business/wind-power/wind-farm-project-summary/horns-rev-2_uk_2018.ashx?la=en&hash=c2efe01aac0b9706fc81774e5b8c7a3c. Pristupljeno 15. kolovoza 2024.
- [21] Ørsted. Hornsea 1 wind farm. Dostupno na: <https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/our-wind-farms/hornsea1>. Pristupljeno 17. kolovoza 2024.
- [22] Tethys. Hornsea 1 wind farm. Dostupno na: <https://tethys.pnnl.gov/wind-project-sites/hornsea-1-wind-farm>. Pristupljeno 18. kolovoza 2024.
- [23] Ørsted. Hornsea 2 wind farm. Dostupno na: <https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/our-wind-farms/hornsea2>. Pristupljeno 19. kolovoza 2024.
- [24] Tethys. Hornsea 2 wind farm. Dostupno na: <https://tethys.pnnl.gov/wind-project-sites/hornsea-2-offshore-wind-farm>. Pristupljeno 20. kolovoza 2024.
- [25] NS Energy Business. Arcadis Ost 1 offshore wind farm. Dostupno na: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/arcadis-ost-1-offshore-wind-farm/?cf-view>. Pristupljeno 20. kolovoza 2024.
- [26] Riviera Maritime Media. Monopile installation completed at Arcadis Ost 1. Dostupno na: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/monopile-installation-completed-at-arcadis-ost-1-offshore-windfarm-72157>. Pristupljeno 20. kolovoza 2024.
- [27] Heerema Marine Contractors. Arcadis Ost 1 offshore wind. Dostupno na: <https://www.heerema.com/heerema-marine-contractors/offshore-wind/arcadis-ost-1>. Pristupljeno 20. kolovoza 2024.
- [28] Parkwind. Arcadis Ost I. Dostupno na: <https://parkwind.eu/projects/arcadis-ost-i>. Pristupljeno 20. kolovoza 2024.

- [29] Power Technology. Veja Mate offshore wind farm project. Dostupno na: <https://www.power-technology.com/projects/veja-mate-offshore-wind-farm-project/>. Pristupljeno 22. kolovoza 2024.
- [30] Iberdrola. Vineyard wind offshore wind farm. Dostupno na: <https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/offshore-wind-energy/vineyard-wind-offshore-wind-farm>. Pristupljeno 25. kolovoza 2024.
- [31] Sif Group. Akita Noshiro. Dostupno na: <https://sif-group.com/en/products-services/references/akita-noshiro/>. Pristupljeno 29. kolovoza 2024.
- [32] Toto Holding. Beleolico offshore wind farm in Taranto. Dostupno na: <https://totoholding.it/en/media/inaugurato-oggi-a-taranto-beleolico-il-prvi-impianto-eolico-marino-del-mediterraneo/>. Pristupljeno 29. kolovoza 2024.
- [33] RINA. Ika C Geotechnical Investigation, Final Report. INA d.d., Zagreb, Croatia; 2022.
- [34] One Step Power. Difference between DP1, DP2 and DP3 vessels. Dostupno na: <https://www.onestepower.com/post/difference-dp1-dp2-dp3-vessels>. Pristupljeno 11. rujna 2024.
- [35] VesselFinder. Fotografija broda. Dostupno na: <https://www.vesselfinder.com/ship-photos/916378>. Pristupljeno 11. rujna 2024.
- [36] Rocscience Inc. RSPile Driven Pile Theory Manual. Toronto, Kanada; 2022
- [37] Rocscience Inc. RSPile Laterally Loaded Pile Theory Manual. Toronto, Kanada; 2022
- [38] Arany L, Bhattacharya S, Macdonald J, Hogan SJ. Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2017;92:126–152.
- [39] Siemens Wind Power A/S. SWT-3.6-120 offshore. Dostupno na: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/669-siemens-swt-3.6-120-offshore>. Pristupljeno 2. studenoga 2024.
- [40] Pršić M, Carević D. Pomorske građevine: Web skripta - Dio 2. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet; 2023.
- [41] Wikipedia. Wind profile power law. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_profile_power_law. Pristupljeno 2. studenoga 2024.
- [42] Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ). Klima Hrvatske. Dostupno na: https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8. Pristupljeno 2. studenoga 2024

POPIS SLIKA

Slika 1 Ciljevi održivog razvoja (SDGs) prema UN-ovom Programu za održivi razvoj do 2030. godine. Izvor: [5].....	2
Slika 2 Shematski prikaz tipične pučinske vjetroturbine (OWT) (Izvor: [10])	7
Slika 3 Mehaničke komponente unutar kućišta vjetroturbine (Izvor: [10])	8
Slika 4 Krivulja snage vjetroturbine u odnosu na brzinu vjetra (Izvor: [12])	9
Slika 5 Pregled vrsta temelja za vjetroturbine (Izvor: [Wu]).....	11
Slika 6 XL pilot za temeljenje vjetroturbine (Izvor: [17])	13
Slika 7 Tipovi opterećenja i učestalosti kod pučinskih vjetroturbina (Izvor: [12]).....	14
Slika 8 Sile i momenti koji djeluju na temelje vjetroturbine (Izvor: [12]).....	17
Slika 9 Ugradnja pilota za pučinsku vjetroelektranu London Array (Izvor: [12])	18
Slika 10 Demontaža vjetroelektrane Vindeby (Izvor: [19]).....	19
Slika 11 Pučinska stanica za održavanje (Izvor: [20]).....	20
Slika 12 Karta položaja vjetroelektrane Hornsea 1 (Izvor: [21])	21
Slika 13 Transport pilota u luci (Izvor: [23]).....	22
Slika 14 Instalacija lopatica na vjetroturbinu (Izvor: [27]).....	23
Slika 15 Transport pilota na lokaciju vjetroelektrane (Izvor: [31])	25
Slika 16 Izvedba vjetroturbina u Luci Taranto (Izvor: [32])	26
Slika 17 Karta s prikazom svih ispitivanih lokacija (Izvor: [33]).....	28
Slika 18 Pozicija ispitivanih lokacija (Izvor: [33]).....	29
Slika 19 Brod Gargano (Izvor: [35]).....	30
Slika 20 CPTU sonde (Izvor: [33]).....	33
Slika 21 Sastavljanje WISON sustava (Izvor: [33]).....	34
Slika 22 dijagram komponenti FMCB (Izvor: [33])	35
Slika 23 Fotodokumentacija uzorkovanja (Izvor: [33])	37
Slika 24 Prototip vjetroturbine Siemens SWT-3.6-120, Hvidovre, vjetropark Avedøre Holme, Danska (Izvor: [39]).....	47
Slika 25 Regresijska analiza između $\ln H_{s,i}$ i u_i za procjenu log-normalne distribucije valnih visina	54
Slika 26 Atlas brzine vjetra na visini 80 m iznad tla (Izvor: [42])	58
Slika 27 Tlocrtni položaj pilota i bušotina	62
Slika 28 Borehole editor i uslojenost tla.....	63
Slika 29 Zadavanje osnih parametara za pjeskovito tlo	64
Slika 30 Zadavanje bočnih parametara za pjeskovito tlo.....	64
Slika 31 Zadavanje osnih parametara za glinovito tlo	65
Slika 32 Zadavanje bočnih parametara za glinovito tlo	65
Slika 33 3D model pilota i tla	66

Slika 34 Bočni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-1.....	67
Slika 35 Bočni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-2.....	67
Slika 36 Vertikalni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-1	68
Slika 37 Vertikalni pomak po dubini pilota za bazni scenarij opterećenja E-2	68
Slika 38 Moment savijanja po dubini pilota za scenarij opterećenja E-1	69
Slika 39 Moment savijanja po dubini za scenarij opterećenja E-2	69
Slika 40 Uzdužna sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-1	70
Slika 41 Uzdužna sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-2	70
Slika 42 Posmična sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-1	71
Slika 43 Posmična sila po dubini pilota za scenarij opterećenja E-2	71
Slika 44 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1.....	72
Slika 45 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-2.....	72
Slika 46 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1....	73
Slika 47 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-2....	73
Slika 48 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1	74
Slika 49 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1	74
Slika 50 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1.....	75
Slika 51 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1.....	75
Slika 52 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1.....	76
Slika 53 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja I pri opterećenju E-1.....	76
Slika 54 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1	77
Slika 55 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2	77
Slika 56 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1	78
Slika 57 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1	78
Slika 58 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1	79
Slika 59 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2	79
Slika 60 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1	80
Slika 61 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2	80
Slika 62 Prikaz posmične sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-1	81
Slika 63 Prikaz posmične sile za sve varijacije nedrenirane posmične čvrstoće sloja II pri opterećenju E-2	81
Slika 64 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1.....	82

Slika 65 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2.....	82
Slika 66 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1..	83
Slika 67 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2..	83
Slika 68 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1 ...	84
Slika 69 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2 ...	84
Slika 70 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1.....	85
Slika 71 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2.....	85
Slika 72 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-1.....	86
Slika 73 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja III pri opterećenju E-2.....	86
Slika 74 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1	87
Slika 75 Prikaz bočnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2	87
Slika 76 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1 .	88
Slika 77 Prikaz vertikalnog pomaka za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2 .	88
Slika 78 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1...	89
Slika 79 Prikaz momenta savijanja za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2...	89
Slika 80 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1.....	90
Slika 81 Prikaz uzdužne sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-2.....	90
Slika 82 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1.....	91
Slika 83 Prikaz posmične sile za sve varijacije kuta trenja sloja IV pri opterećenju E-1	91

POPIS TABLICA

Tablica 1 Emisije stakleničkih plinova (gCO ₂ /kWh) iz tehnologija za opskrbu električnom energijom (Izvor: [3]).....	3
Tablica 2 Pregledna tablica vrsta temelja	11
Tablica 3 Koordinate ispitivanih lokacija (Izvor: [33])	29
Tablica 4 Vrste ispitivanja i standardi (Izvor: [33])	39
Tablica 5 Opis slojeva tla (Izvor: [33])	41
Tablica 6 Raspon slojeva tla (Izvor: [33])	41
Tablica 7 Rezultati ispitivanja vlažnosti tla (Izvor: [33])	42
Tablica 8 Zapreminska težina (Izvor: [33])	42
Tablica 9 Rezultati ispitivanja indeksa plastičnosti (Izvor: [33]).....	43
Tablica 10 Rezultati ispitivanja sadržaja sitnih čestica (Izvor: [33])	43
Tablica 11 Preporučeni osnovni parametri (Izvor: [33])	43
Tablica 12 Preporučeni podaci o pritisku prekonsolidacije i brzini posmičnih valova (Izvor: [33])	43
Tablica 13 Preporučeni parametri čvrstoće tla (Izvor: [33])	45
Tablica 14 Osnovni tehnički parametri vjetroturbine SWT-3.6-120 (Izvor: [38])	48
Tablica 15 Kombinacije okolišnih opterećenja (Izvor: [38]).....	51
Tablica 16 Scenariji vjetra (Izvor: [38])	51
Tablica 17 Scenariji valova (Izvor: [38])	52
Tablica 18 Učestalost i statistička analiza razreda značajnih valnih visina	53
Tablica 19 Prognozirane značajne valne visine za različite povratne periode.....	54
Tablica 20 Iznosi sila i momenata uslijed opterećenja valovima.....	56
Tablica 21 Proračun opterećenja od vjetra.....	59
Tablica 22 Rekapitulacijska tablica opterećenja	59
Tablica 23 Parametri tla za pjeskovita tla	60
Tablica 24 Parametri tla za glinovita tla.....	61
Tablica 25 Varijacije kuta trenja za analizu osjetljivosti.....	61
Tablica 26 Varijacija nedrenirane posmične čvrstoće za analizu osjetljivosti.....	61