

# Optimizacija trase podmorskih cjevovoda i kabela

---

**Banić, Nikola**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:338089>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-29**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA TRASE PODMORSKIH CJEVOVODA I KABELA**

Rijeka, rujan 2023.

Nikola Banić

0069080253

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA TRASE PODMORSKIH CJEVOVODA I KABELA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić

Komentor: Bepo Schira

Rijeka, rujan 2023.

Nikola Banić

0069080253

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

## IZJAVA

Sukladno s člankom 9. „Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija“ i sukladno „Uputama za izradu i samoarhiviranje završnog/diplomskog rada“ izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Optimizacija trase podmorskih cjevovoda i kabela“ pod vodstvom metora izv. prof. dr. sc. Stefana Ivića, komentora Bepo Schire i tvrtke Anemos Engineering d.o.o.

U Rijeci, rujan 2023.

Nikola Banić

0069080253

---

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Stefanu Iviću i komentoru Bepu Schiri, mag. ing. na njihovoj velikoj pomoći, izdvojenom vremenu, te mnogobrojnim korisnim komentarima i sugestijama pri izradi ovog diplomskog rada.

Također, za neprestanu podršku i vjeru u mene koju ste mi pružali tijekom svih ovih godina mojeg obrazovanja, zahvaljujem svojoj obitelji i mojoj Petri.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo**  
Predmet: **Optimizacije u tehnici**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Nikola Banić (0069080253)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Računarska mehanika i inženjerstvo**

Zadatak: **Optimizacija trasa podmorskih cjevovoda i kabela / Optimization of submarine pipelines and cables routes**

### Opis zadatka:

U uvodnom dijelu diplomskog rada predstaviti korištenje, projektiranje i instalaciju podmorskih cjevovoda i kablova. Definirati model procjene financijskih troškova postavljanja cjevovoda i kablova s obzirom na razne okolišne i tehnološke aspekte kao što vrsta morskog dna, nagib terena, zaštićena područja is sl. Implementirati parametrizaciju dvodimenzionalnu trase pomoću relativnih kuteva između segmenata jednakih duljina. Razmotriti izračun troškova eksploatacije i rada cjevovoda na poznatoj ruti. Formulirati optimizacijski problem uključujući sve relevantne ciljeve i ograničenja. Odabrati adekvatnu optimizacijsku metodu te provesti optimizacije na nekoliko različitih realističnih primjera. U zaključnom djelu završnog rada vizualizirati, analizirati te usporediti dobivene rezultate. Rad je izrađen u suradnji s tvrtkom (Anemos Engineering d.o.o.)

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



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr.sc. Stefan Ivčić



Bepo Schira (komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. NAMIJENA, PLANIRANJE I INSTALACIJA PODMORSKIH CJEVOVODA I KABELA .....</b>	<b>2</b>
2.1. Podmorski cjevovod .....	2
2.2. Podmorski kabeli .....	3
2.2.1. Komunikacijski kabeli .....	3
2.2.2. Kabeli za prijenos električne energije.....	3
2.3. Rizici oštećenja podmorskih cjevovoda i kabela.....	4
2.4. Morska istraživanja.....	6
2.5. Daljinski upravljana ronilica, ROV .....	7
2.6. Potrebni brodovi za instalaciju trase.....	9
2.7. Metode polaganja cjevovoda .....	10
<b>3. MCDA METODA .....</b>	<b>12</b>
3.1. Faktori cijene trase.....	13
3.2. Ograničenja trase .....	17
<b>4. PARAMETRIZACIJA I EVALUACIJA MODELA.....</b>	<b>19</b>
4.1. Evaluacija troškova.....	20
4.1.1. Cijena instalacije .....	20
4.1.2. Cijena eksploatacije .....	21
4.1.3. Dodatni troškovi.....	22
4.2. Batimetrija i nagib trase.....	23
4.3. Ograničenja trase i klasifikacija morskog dna.....	26
4.4. Priprema podataka .....	28
4.4.1. Vizualizacija podataka .....	30
<b>5. OPTIMIZACIJA PROBLEMA.....</b>	<b>34</b>
5.1. PSO algoritam.....	35
5.2. Postupak optimizacije.....	36
<b>6. ANALIZA REZULTATA OPTIMIZACIJE.....</b>	<b>37</b>
6.1. Rezultati optimizacije .....	40
6.1.1. Rezultat optimizacije trase podmorskog cjevovoda .....	42
6.1.2. Rezultat optimizacije trase podmorskih kabela .....	47
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>51</b>

<b>LITERATURA .....</b>	<b>53</b>
<b>POPIS OZNAKA I KRATICA .....</b>	<b>57</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>60</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>61</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>62</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>63</b>



# 1. UVOD

Podmorski cjevovodi i kabeli su od iznimne važnosti u današnjem svijetu, njihovo postavljanje je tehnički zahtjevan projekt za koji je potrebna velika financijska investicija, precizna instalacija i održavanje kako bi se osigurala pouzdanost, te sigurnost prijenosa različitih fluida ili telekomunikacija. Postavljanje trase cjevovoda i kabela započinje preciznim proučavanjem morskog dna, bilježenjem dubine mora, vrste morskog dna, praćenjem seizmičke aktivnosti i drugih bitnih faktora koji mogu imati negativan utjecaj na sigurnost trase podmorskih kabela i cjevovoda. Ukoliko se podmorski cjevovodi ili kabeli oštete, popravak je iznimno zahtjevan radi velike moguće dubine nastalog oštećenja i nepoznate lokacije oštećenja, a najveći problem koji nastaje uslijed oštećenja cjevovoda i kabela je prestanak komunikacija kroz kabele ili prestanak strujanja fluida koji prolazi kroz cjevovod, te ovaj problem može izazvati ogromnu financijsku štetu.

Zadatak optimalnog postavljanja trase cjevovoda i kabela jest smanjenje troškova instalacije i eksploatacije trase uz izbjegavanje zaštićenih područja, smanjenje negativnih utjecaja okoline na trasu, te povećanje pouzdanosti i trajnosti infrastrukture trase. U ovom radu optimalna trasa cjevovoda i kabela odrediti će se korištenjem javno dostupnih podataka za Jadransko more, te će se ti podaci pripremiti za optimizaciju u programskom jeziku Python. Razne opcije ruta trase i ograničenja koja trasa mora zadovoljiti postaviti će se prema analizi odlučivanja s više kriterija poznatijeg imena MCDA (engl. *Multi Criteria Decision Analysis*) i optimirati uz pomoć optimizacije rojem čestica PSO (engl. *Particle Swarm Optimization*). Napraviti će se dvije optimizacije između hrvatskog grada Dubrovnika i talijanskog grada Vieste. Prva optimizacija obuhvaća optimalan odabir trase podmorskog cjevovoda koji će prenositi naftu između dvaju gradova i njegov planirani period eksploatacije od 25 godina. Druga optimizacija obuhvaća optimalni odabir trase podmorskih komunikacijskih kabela između dvaju gradova.

## **2. NAMIJENA, PLANIRANJE I INSTALACIJA PODMORSKIH CJEVOVODA I KABELA**

Ovisno o njihovoj namjeni podmorski cjevovodi znatno se razlikuju naspram podmorskih kabela.

### **2.1. Podmorski cjevovod**

Podmorski cjevovodi se najčešće koriste za prijenos: nafte, plina i vode.

Podmorski cjevovodi koji se koriste za prijenos prirodnog plina ili nafte imaju bitnu ulogu u globalnoj energetskej infrastrukturi. Oni omogućuju siguran i učinkovit transport energenata s nalazišta na morskom dnu do kopnenih postrojenja, distribucijskih mreža i potrošača širom svijeta. Ovi cjevovodi su vitalni za opskrbu energijom, kako za industrijske potrebe, tako i za potrebe kućanstava. Podmorski plinovodi i naftovodi mogu biti dugi stotine ili čak tisuće kilometara, prelazeći velike udaljenosti i različite geografske i klimatske uvjete. Oni povezuju proizvođače prirodnog plina i nafte s tržištima potrošača, prenoseći velike količine plina na globalnoj razini. Grade se uz visoko postavljene tehničke i sigurnosne standarde kako bi bio osiguran učinkovit i siguran prijenos energenata. Gradnja i održavanje ovakvih cjevovoda je veoma zahtjevna zbog raznih ekoloških uvjeta i mogućih velikih dubina morskog dna.

Podmorski cjevovodi za prijenos vode koriste se uglavnom za opskrbu malih otoka koji su blizu kopna ili većih otoka gdje prirodni izvori vode na otocima nisu dovoljni za njihove potrebe [1]. Služe za opskrbu vodom. Postavljanje i održavanje ovih cjevovoda zahtijeva velike troškove i tehničke izazove, stoga se primjenjuju samo u specifičnim situacijama gdje je to neophodno. Glavni primjer ovakvih cjevovoda je Singapur koji dobiva vodu iz Malezije putem podmorskih cjevovoda [1].

U budćnosti se očekuje da će zeleni vodik postati jedno od ključnih sredstva za pomaganje dekarbonizaciji globalnog gospodarstva zbog svoje male proizvodnje stakleničkih plinova, budući da je vodik trenutno važan sirovinski materijal za različite industrijske procese i vjerojatno će odigrati važnu ulogu u tranziciji energetskeg sektora prema ekološki prihvatljivijoj alternativi [2]. Iz ovih razloga transport vodika kroz podmorski cjevovod u budćnosti mogao bi biti od ogromne važnosti ukoliko se cijena transporta zelenog vodika smanji na razinu cijene prijenosa električne energije kabelima.

## 2.2. Podmorski kabeli

Ovisno o vrsti namjene postoje dvije vrste podmorskih kabela, a to su podmorski komunikacijski kabeli i podmorski kabeli za prijenos električne energije. Skoro svi kabeli u moru služe uglavnom za nekakvu vrstu komunikacije dok kabeli za prijenos električne energije imaju puno manji utjecaj na globalnu ekonomiju i više na lokalne interese pojedine države ili grada [1]. Važnost kabela za prijenos električne energije naglo je porasla zadnjih nekoliko desetljeća, te će nastaviti rasti zbog sve veće važnosti zelene energije u današnjem društvu. Kabeli za prijenos električne energije iznimno su bitni za povezivanje vjetroelektrana, te valnih i plimnih postrojenja s obalom [2].

### 2.2.1. Komunikacijski kabeli

Bez podmorskih komunikacijskih kabela današnja ekonomija ne bi mogla funkcionirati. Trenutno se većina internacionalne trgovine obavlja preko interneta, te veći udio međukontinentalnog i međunarodnog internetskog prometa obavlja se podmorskim kabelima. Ovakav način obavljanja trgovine je od ogromnog značaja finansijskoj sferi i društvu za svjetsku međubanku finansijsku telekomunikaciju zvanu SWIFT (engl. *Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication*).

Podmorski telegrafski promet putem kabela započeo je između Engleske i Francuske 1850. godine. Prvi dugoročno uspješan transatlantski kabel položen je između Kanade i Irske 1866. godine [1]. Rani kablovi sastojali su se od bakrenih žica zaštićenih oklopljenom vanjskom ovojnicom. Ključni razvoj koji je omogućio moderni sustav bio je razvoj kabela s optičkim vlaknima: staklena vlakna koja prenose signale putem svjetlosti umjesto električne struje [1].

Postavljanjem prvog transatlantskog podmorskog optičkog kabela 1988. godine između Francuske, Ujedinjenog Kraljevstva i Sjedinjenih Američkih država internet je počeo uzimati svoj današnji oblik, a razvoj globalne mreže s optičkim vlaknima i interneta odvijao se istovremeno.

### 2.2.2. Kabeli za prijenos električne energije

Većina podmorskih kabela za prijenos električne energije nalazi se u vodama oko Europe [1]. Kabeli se dijele ovisno o tome prenosi li se električna energija u obliku istosmjernje DC (engl. *Direct current*) ili izmjenične struje AC (engl. *Alternating current*). Izbor vrste kabela ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući duljinu rute podmorskih kabela i potrebni prijenosni kapacitet. DC kabeli se preferiraju za veće udaljenosti i veće prijenosne kapacitete, dok se AC kabeli preferiraju na rutama kraćim od 80 km zbog ekonomske isplativosti [3]. DC kabeli mogu biti ili

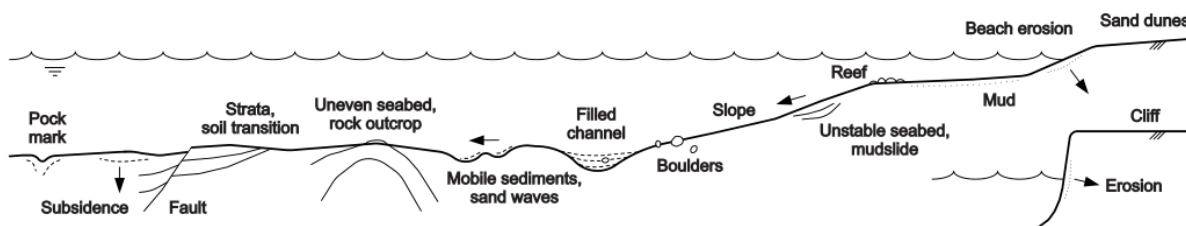
monopolarni (kada se struja vraća kroz morsku vodu) ili bipolarni (kada kabel ima dva dijela s suprotnim polaritetima) [1]. AC kabeli imaju lokalno važnu ulogu u upravljanju opskrbom električne energije, omogućujući prijenos viškova iz jedne zemlje ili područja u drugu ili omogućujući otocima da koriste električnu energiju koja se proizvodi u elektranama koje služe većem geografskom području.

### **2.3. Rizici oštećenja podmorskih cjevovoda i kabela**

Postupak postavljanja trase podmorskih cjevovoda i kabela potrebno je dobro isplanirati zbog svoje kompleksnosti, važnosti i velike financijske investicije. Trasa podmorskih cjevovoda i kabela se uglavnom postavlja u duboku vodu kako bi se osigurao neometan prolaz brodova i izbjegla oštećenja uslijed sidrenja i ribarenja. Potrebno je i osigurati sigurnost konstrukcije tijekom postavljanja i dugoročnog rada trase. Oštećenja trase se uvijek mogu pojaviti, ali je iznimno bitno postaviti trasu na optimalnu poziciju kako bi smanjili mogućnost oštećenja uslijed različitih ljudskih aktivnosti ili prirodnih pojava. Prirodne opasnosti su one koje uzrokuje okoliš, uključujući valne i strujne sile koje mogu uzrokovati nestabilnost trase cjevovoda i kabela na morskom dnu, pokrete tla i potrese, te razne druge opasnosti [4]. Ljudske aktivnosti uključuju sidrenje, ribolovne aktivnosti i odbačene predmete ostavljene na morskom dnu poput potonulih brodova ili ostataka koje su ostavila brodska postrojenja [4], te razne eksplozivne naprave odbačene prilikom vojnih vježbi i vojnih akcija.

Na sigurnost postavljanja i pravilnog rada podmorskih cjevovoda i kabela mogu utjecati neiscrpan popis raznih opasnosti. Nije moguće savršeno odabrati rutu trase podmorskih cjevovoda i kabela kako bi bila potpuno sigurna od svih opasnosti s kojima se može susresti, već se vodi principom koliko god je razumno izvedivo ALARP (engl. *As Low As Reasonably Practicable*) principima prema kojima se rezidualni rizici smanjuju koliko god je to razumno izvedivo. Ukoliko se izabere najoptimalnija ruta trase podmorskih cjevovoda i kabela gdje će se izbjeći većina mogućih opasnosti značajno se povećava dugovječnost infrastrukture. Potrebno je izbjegavati razne opasnosti prikazane na *slici 2-1*. prilikom odabira rute trase podmorskih cjevovoda i kabela. Neravne površine morskog dna poput grebena, padine, provalija, stijena i kanjona predstavljaju teške uvjete za instalaciju, popravak i svakodnevni rad cjevovoda i kabela [5]. Nepoželjan sastav tla može negativno utjecati na istraživačke i instalacijske aktivnosti [5]. Odron morskog dna „erozija“ može otkriti dio zakopanog cjevovoda i kabela, te ga izložiti utjecaju vrtložno

potaknutim vibracijama VIV (engl. *Vortex induced vibration*). VIV se odnosi na pojavu u dinamici fluida gdje prisutnost protoka fluida oko strukture kao što je cijev ili kabel, može izazvati vibracije ili oscilacije u strukturi, te dovesti do zamora materijala i time oštećenja cjevovoda ili kabela. Niska toplinska vodljivost tla, npr. na područjima s organskim materijalom može dovesti do nepoželjnog porasta temperature u cjevovodu i kabelima [5].

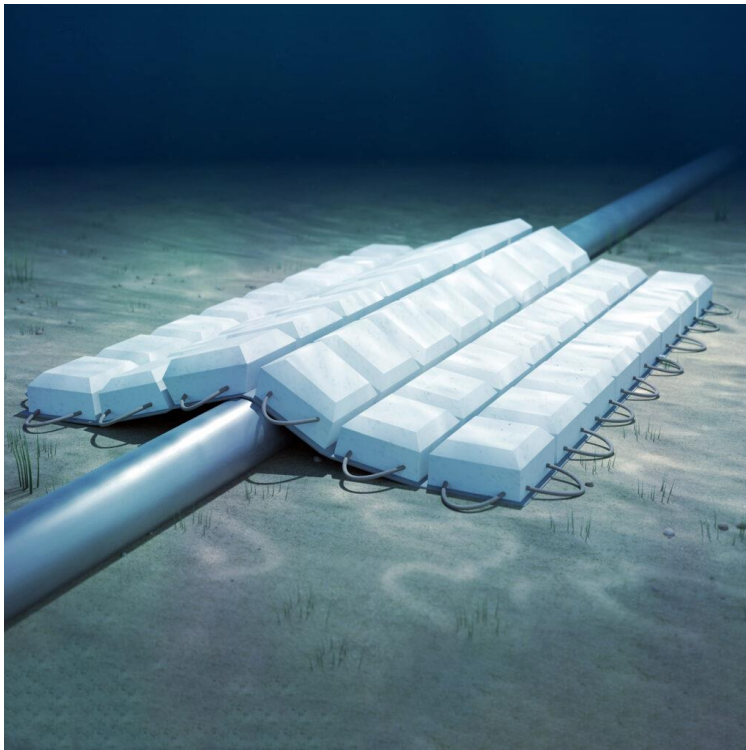


*Slika 2-1. Moguće opasnosti koje negativno utječu na sigurnost infrastrukture podmorskog cjevovoda i kabela (preuzeto iz [5])*

Ukoliko se ne obrati pozornost na razne prirodne opasnosti i utjecaje ljudske aktivnosti prilikom odabira rute trase cjevovoda i kabela mogu se pojaviti ogromne štete na podmorskom cjevovodu ili kabelu. Primjer tome je oštećenje trase podmorskih kabela na istočnoj obali Sjedinjenih Američkih Država nastalo uslijed pojave uragana Sandy 2012. godine. Oštećenje trase podmorskih kabela izazvalo je višesatni prekid komunikacije između Europe i Sjeverne Amerike, te financijsku štetu u iznosu od 71 milijarde dolara [6]. Nakon ovog događaja kompanije Facebook, Microsoft i Telxius odabrale su lokaciju za postavljanje transatlanskog kabela u Virginiji kako bi smanjili mogućnost oštećenja kabela pojavom velikih oluja i uragana [6].

Kako bi smanjili potencijalni rizik oštećenja trase cjevovoda i kabela, potrebno je prvo identificirati razne opasnosti koje se mogu pojaviti duž rute cjevovoda ili kabela, a zatim je potrebno poduzeti mjere kako bi osigurali sigurnost trase cjevovoda i kabela. Metode zaštite trase uključuju ukopavanje cjevi i kabela ispod morskog dna, sidrenje cjevovoda i kabela, povećanje debljine betonskog premaza i jačanje cjevovoda i kabela. Uobičajen način zaštite trase cjevovoda i kabela je ukopavanje ispod morskog dna zvano „Trenching“. Podmorsku trasu kabela na dubini manjoj od otprilike 1000 metara potrebno je ukopati u morsko dno iz razloga jer je ribarska aktivnost najčešći razlog oštećenja podmorske trase kabela. Dubina od 1000 metara se po preporukama smatra kao maksimalna dubina gdje se ribarskom aktivnošću može oštetiti trasa podmorski kabela [7]. Na mjestima gdje nije moguće ukopati kabela potrebno ih je zaštititi

postavljanjem kamenja ili betonskih madraca *slika 2-2*. Prilikom polaganja cjevovoda potrebno je paziti na razne hidrodinamičke sile na cjevovod izazvanih utjecajem morskih sila i valova. Ukopavanjem cijevi i kabela u morsko dno utjecaj hidrodinamičkih sila u potpunosti nestaje.



*Slika 2-2. Betonski madrac (Preuzeto iz [8])*

#### **2.4. Morska istraživanja**

Da bi se identificirale opasnosti koje mogu postojati duž predložene rute cjevovoda i kabela, trebaju se prvo prikupiti podaci o batimetriji, valovima, strujama, uvjetima tla na morskom dnu, vulkanskoj i seizmičkoj aktivnosti i drugim podacima. Na područjima gdje se nalaze aktivne priobalne instalacije, okolišni podaci obično se mogu dobiti od vlade i javnih izvora. Različite operativne tvrtke često imaju vlasničke podatke nad tim područja [4]. Takvi podaci mogu se iskoristiti prilikom izrade idejnog projekta. Na udaljenim područjima i gdje podaci nisu dostupni, provodi se morsko istraživanje kako bi se prikupili takvi podaci. Istraživanja se za svaku lokaciju provode u svrhu izrade glavnog projekta i tijekom faze izgradnje, a mogu se generalno podijeliti na geofizička i geotehnička istraživanja uzduž trase.

Cilj morskog istraživanja je:

- Identificirati poremećaje tla, seizmičku aktivnost, vulkansku aktivnost, kamene gromade, izvore plina, tendencije kretanja i udubljenja morskog dna, te prepreke koje mogu biti prisutne duž predložene rute cjevovoda ili kabela.
- Procijeniti stabilnost sedimenta u području
- Utvrditi dubinu vode/batimetriju duž predložene rute.
- Utvrditi podpovršinske značajke
- Dobiti podatke o okolišnim uvjetima u području predložene rute
- Identificirati različite krhotine koje mogu utjecati na instalaciju i koje je potrebno ili zaobići ili otkloniti (olupine brodova, izgubljene ribarske opreme, sidreni lanci, eksplozivnih naprava UXO (engl. *Unexploded Ordnance*) itd.)

Kako bi se dobili podaci o batimetriji koriste se sonari koji su najčešće postavljeni na istraživačkom brodu, na plutjućem objektu koji se tegli brodom ili postavljeni na daljinski upravljano ronilicu ROV (engl. *Remotely operated vehicle*). Sonar je tehnika gdje se prijenosom zvuka određuje dubina mora, te prepoznaju različiti objekti ispod mora. Postoje različiti tipovi sonara, neki imaju visoku preciznost kako bi se povećala točnost mjerenja dubine. Princip rada sonara sastoji se u slanju kontroliranog akustičnog signala visoke frekvencije prema morskome dnu s podvodnog pretvornika. Kako se signal reflektira na morskome dnu i prima od strane pretvornika, točno se mjeri vremenska razlika između početnog prijensa i vremena primanja poslanog signala.

Nakon što su ispravke i kalibracije uzete u obzir u vezi s brzinom akustičkog signala u vodi, dubinom pretvornika i drugim uvjetima, vremenska razlika se može kalibrirati kako bi se proizvela dubina vode na određenoj stanici. To obično pruža kontinuirani prikaz dubine dok istraživačko plovilo putuje duž predložene rute. Dubinu vode moguće je mjeriti s preciznošću od +0,1% do 1% dubine vode, ovisno o preciznosti specifičnih instrumenata koji se koriste [4].

## **2.5. Daljinski upravljana ronilica, ROV**

Daljinski upravljane ronilice, su visoko tehnološki razvijeni uređaji koji se upravljaju daljinski putem operatera na površini. Namijenjeni su obavljanju različitih zadataka pod vodom, često u zahtjevnim i dubokim morskim okruženjima gdje ljudski roniooci ne mogu sigurno djelovati. ROV-ovi igraju ključnu ulogu u podvodnom istraživanju, istraživanju morskog dna, instalaciji trase cjevovoda i kabela, inspekciji, održavanju i industrijskim aktivnostima. Povezani s površinom

putem kabela koji pruža napajanje, komunikaciju i kontrolne signale, taj kabel omogućava operaterima daljinsko upravljanje kretanje ronilice, kamerama, sensorima i drugom opremom. Osim toga, opremljeni su potisnicima koji im omogućuju kretanje u svim smjerovima, uključujući naprijed, natrag, gore, dolje i bočno. Ta sposobnost manevriranja ključna je za obavljanje preciznih zadataka i navigaciju izazovnim podvodnim terenima. Uz sve ovo opremljeni su kamerama visoke rezolucije, svjetlima i različitim sensorima, poput sonara, dubinomjera i mjerača temperature. Ti senzori pružaju stvarne podatke i slike operaterima, omogućavajući im procjenu podvodnih uvjeta i donošenje informiranih odluka. Također, mnogi ROV-ovi imaju robotske manipulatorske sustave koji mogu izvoditi zadatke poput prikupljanja uzoraka, rukovanja ventilima, rezanja žica i obavljanja različitih oblika održavanja i popravaka [9].



*Slika 2-3. Daljinski upravljana ronilica, ROV (preuzeto iz [9])*

Fleksibilnost ROV-ova omogućava prilagodbu specijaliziranim alatima i teretom temeljem specifičnih zadataka koje trebaju obaviti. To ih čini nezamjenjivim alatima za istraživanje i intervenciju u dubokom moru. Sve ove karakteristike čine ROV-ove neprocjenjivim resursima za



različite primjene, od znanstvenih istraživanja do operacija u naftnoj i plinskoj industriji. Znanstvena istraživanja su ključna primjena ROV-ova, omogućavajući istraživačima da proučavaju podvodne ekosustave, morski život, geološke formacije i arheološka nalazišta. Ovi uređaji pružaju dragocjene podatke za znanstvena istraživanja i praćenje okoliša, doprinoseći našem razumijevanju dubokih oceana.

## **2.6. Potrebni brodovi za instalaciju trase**

Ovisno o dubini mora, željenoj duljini trase i promjeru cijevi ili kabela potrebno je odabrati prikladne brodove i metode postavljanja podmorskih kabela i cjevovoda. Za postavljanje podmorskih cjevovoda i kabela potrebno je koristiti nekolicinu brodova od kojih svaki ima različitu svrhu, veličinu i cijenu rada. Nakon što se donese odluka za izgradnju cjevovoda na određenoj dionici potrebno je napraviti različita istraživanja. Ispitivački brodovi (engl. *Survey ships*) prevoze, te upravljaju sonarom i daljinski upravljanom ronilicom ROV za istraživanje morskog dna, mogu biti opremljeni i opremom za geotehnička istraživanja morskog tla. Istraživački brodovi prate napredak postavljanja cijevi na morsko dno, osiguravaju da se cjevovod postavlja ispravnom rutom, te provjeravaju integritet cjevovoda nakon postavljanja kako bi utvrditi treba li provesti korektivne radove [10]. Nakon što se cijevi izrade i mehanički testiraju prenose se od kopna do pomorskog objekta za polaganje cjevovoda baržama ili brodovima za transport cijevi (engl. *Pipe carrier*).

Pomorski objekti za polaganje cjevovoda su plutajuće tvornice gdje se cijevi spajaju i zavarivaju na cjevovod prilikom njihove instalacije [10]. Takvi objekti mogu biti u obliku broda ili barže, mogu imati vlastitu propulziju ili se kretati pomoću sustava za sidrenje, ili mogu koristiti kombinaciju tih dvaju sustava. Nadalje, takvi objekti mogu biti izvedeni i kao poluuranjajući objekti. Ukoliko se koristi vlastita propulzija onda su takvi pomorski objekti opremljeni sustavom za dinamički pozicioniranje (engl. *DP – Dynamic Positioning*), klase 2 ili više. Ukoliko se pomorski objekt za polaganje cjevovoda koristi sidrenim sustavom, sidra se pozicioniraju i postavljaju tegljačima za postavljanje sidra (engl. *AHT – Anchor Handling Tug*)

Temeljna razlika između podmorskih cjevovoda i kablova je u načinu izrade – dok se cijevi približne duljine 12m moraju kontinuirano zavarivati, kablovi se isporučuju u jednom ili više dugačkih segmenata, a koji su duljinom ograničeni zbog nosivosti pomorskog objekta za polaganje kablova. Ukoliko se kabel postavlja u više segmenata potrebno je segmente spojiti posebnim

spojevima. Za postavljanje podmorskih kablova najčešće se koriste specijalni brodovi kabelopolagači opremljeni minimalno DP2 sustavom za dinamičko pozicioniranje. Međutim, koriste se i barže za polaganje kablova opremljene s 4 ili više sidrenih sustava. Barže za polaganje kablova se najčešće koriste u područjima s plitkim dubinama ili gdje je potrebno nasukavanje prilikom oseke, i u zonama s jakom morskom strujom.

## **2.7. Metode polaganja cjevovoda**

Za postavljanje cjevovoda koriste se četiri metode koje se razlikuju po načinu postavljanja cijevi, dubini na kojoj mogu postavljati cjevovode, cijeni, brzini polaganja cjevovoda, opremi itd.

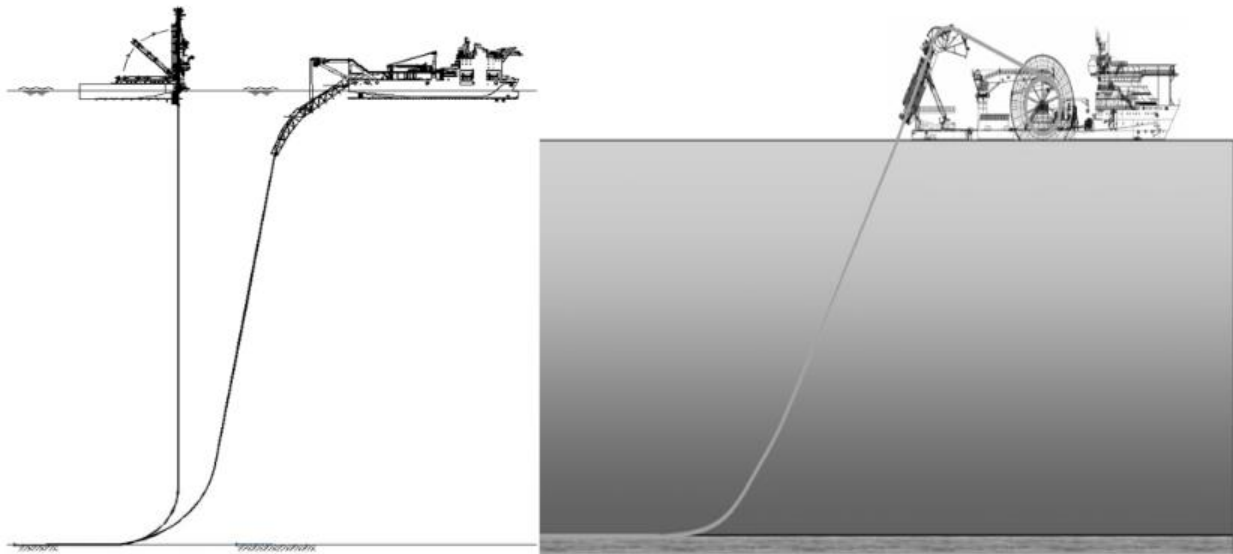
S-LAY (S-Polaganje) metoda prikazana na *slici 2-4*. dobila je ime po obliku cijevi koja se polaže s kraja broda u obliku slova „S“. Prilikom postavljanja cijev mora biti napeta kako bi odražala svoj oblik [10]. Potrebno je paziti na liniju sastavljanja cijevi i na kontrolu krivulje polaganja. Cijevi koje se s plutajuće tvornice spajaju i spuštaju na dnu duge su približno 12 metara i promjera uglavnom između 25 i 75 cm [11], ova metoda se koristi za polaganje cijevi u duboko more. Ukoliko se cijevi polažu u plitko more dubine manje od 16 metara potrebno je koristiti posebnu vrstu S-LAY brodova i time dolazi do rasta troškova postavljanja trase cjevovoda [10].

J-LAY (J-Polaganje) metoda dobila je ime isto po obliku slova „J“ cijevi koja se polaže s kraja broda na morsko dno. Prilikom korištenja J-LAY metode pojavljuju se manja naprezanja prilikom polaganja cijevi u odnosu na S-LAY metodu. Glavno ograničenje J-Lay metode je što u većini slučajeva ima samo jednu radnu stanicu za montažu cijevi. Većina J-Lay sustava koristi prethodno sastavljeni niz od 4 do 6 cijevi. Dodatno vrijeme koje se potroši na spajanje na jednoj radnoj stanici djelomično se nadoknađuje spajanjem 4 do 6 cijevi umjesto samo jedne. Metoda je razvijena za polaganje cijevi u veoma dubokim vodama. Često se dijelovi cjevovoda u manjim dubinama polažu uz pomoć S-lay brodova [12].

Pipeline tow (hrv. *Vuča cjevovoda*) koristiti se ukoliko je potrebno nekoliko vrsta cjevovoda zapakirati zajedno unutar jedne velike noseće cijevi. Cjevovod se izrađuje u određenoj duljini na kopnu i vuče se u more [13]. Budući da se unutar velike noseće cijevi nalazi nekoliko cjevovoda koji su skupljeni zajedno, potrebno je sve pravilno pripremiti prije postavljanja. Iz tog razloga, ova tehnika instalacije omogućuje da se skupljeni cjevovod zavari, pregleda i testira na kopnu. Ograničenje ove metode je kraća duljina podmorske trase cjevovoda i potreba za ravnim morskim

dnom bez ikakvih prepreka. Postoje četiri metode vuče cjevovoda: vuča na površini i blizu površine, kontrolirana dubinska vuča, vuča iznad dna i vuča na dnu. Vuča na dnu se koristila prilikom postavljanja cjevovoda na dnu Meksičkog zaljeva gdje je postavljen cjevovod duljine 10 kilometra [14]. Metoda je često korištena i za postavljanje ispustnih cjevovoda u priobalnim područjima.

Reel-LAY (hrv. *Poglaganje s koluta*) je metode gdje se kruti ili fleksibilni cjevovod namotava s koluta, te prolazi kroz tenzionere (održavaju napetost u cjevovodu prilikom polaganja) do J-LAY tornja, a zatim se polaže preko rampe na morsko dno [14]. Prednost ovog postupka je što većinu spojeva cijevi može se zavariti, testirati i zaštititi u objektu na kopnu, gdje je lakše kontrolirati kvalitetu spojeva.



Slika 2-4. J-LAY, S-LAY i Reel-LAY metoda (preuzeto iz [15])

### 3. MCDA METODA

Analiza odlučivanja s više kriterija MCDA (engl. *Multiple-Criteria Decision Analysis*) je metoda koja procjenjuje više konfliktivnih kriterija pri donošenju odluke. Sukobljeni kriteriji su uobičajeni pri procjeni opcija: cijena ili trošak obično je jedan od glavnih kriterija, dok je neka mjera kvalitete ili sigurnosti tipično drugi kriterij, često u konfliktu s troškom [16]. U slučaju optimizacije podmorske trase cjevovoda i kabela postoje dva sukobljena kriterija, a oni su cijena trase i sigurnost trase, tj. dugovječnost trase. Kriteriji su skup smjernica ili zahtjeva koji se koriste kao osnova za donošenje odluke, odluka predstavlja odabir između nekoliko alternativa koji su u našem slučaju različite rute trase cjevovoda i kabela.

Postoje dva tipa kriterija: faktori i ograničenja.

- Faktori su kriteriji koji mogu poboljšati ili umanjiti prikladnost određene alternative za razmatranu aktivnost. Na primjer, kraća duljina trasa je prikladnija zbog manje financijske investicije i bržeg transporta fluida ili signala, dok veća duljina trase je manje prikladna [17].
- Ograničenja su stroge granice ili restrikcije koje sužavaju mogućnosti koje se razmatraju. One predstavljaju karakteristike koje nisu poželjne ni na bilo koji način. Pod ograničenja spadaju zaštićena područja, druge eksploatacijske aktivnosti i slično [17].

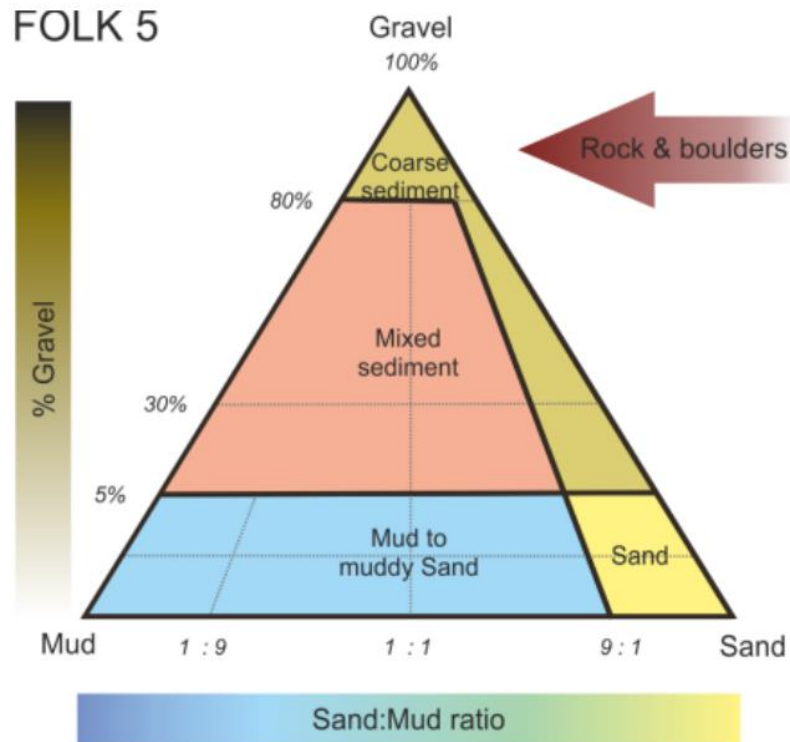
Trasa podmorskih cjevovoda i kabela polaže se s broda na morsko dno. Trasa je osjetljiva na savijanje i jake morske struje mogle bi savinuti ili potrgati dio trase. Kada se trasa polegne na morsko dno izložena je još nekolicini drugih faktora koji bi mogli oštetiti trasu poput: jakosti struje, vrsti morskog dna, nagibu terena, izloženosti sidrenju brodova, ribarenju i vulkanskoj aktivnosti itd. Trasa podmorskih kabela i cjevovoda je iznimno duga i ako uslijed raznih prirodnih ili ljudskih utjecaja nastane šteta, događaju se ogromni financijski gubici zbog prekida transporta bitnih resursa ili informacija. Iz navedenih financijskih i sigurnosnih razloga potrebno je odabrati optimalnu rutu trase gdje je trasa najviše financijski isplativa i sigurna.

### 3.1. Faktori cijene trase

Za svaku dionicu trase  $L$  potrebno je izračunati sumu faktora cijene  $f_i$  koji se pojavljuju na području dionice trase. U slučaju kada se na nekoj dionici trase ne pojavi negativni faktori koji utječu na povećanje cijene instalacije trase, tada iznos faktora cijene iznosi 0, te ne povisuje ukupnu cijenu instalacije trase. Broj faktora na jediničnoj dužini trase ovisi o broju „prepreka“ koji se na jediničnoj dužini trase pojavljuju poput velikog nagiba dna, kamenog tla, plitke vode i slično.

Trasu podmorskih cjevovoda i kabela poželjno je polagati u pijesak, a potrebno je izbjegavati kamenja i stijene. Vrstu morskog dna klasificirati ćemo prema folk5 klasifikaciji prikazanu na *slici 3-1*. [18]: Sand (hrv. *Pijesak*), Mud to muddy Sand (hrv. *Blato i pjeskovito-blato*), Coarse sediment (hrv. *Grubo sedimentno tlo*), Mixed sediment (hrv. *Mješoviti sediment*), Rock & boulders (hrv. *Kamen i stijene*).

Folk5 klasifikacija je uobičajena klasifikacija koja se koristi pri klasifikaciji vrste morskog dna i proizlazi iz klasifikacije koju je predložio Folk 1954. godine. Čestice grupira u blato, pijesak i šljunak na temelju njihovog promjera, pri čemu je granica između čestica veličine blata i pijeska 0,063 mm) a granica između čestica veličine pijeska i šljunka 2 mm [19]. Svaka vrsta morskog dna imati će nekakvu vrijednost faktora cijene prikazanu u *tablici 1*. koja će utjecati na ukupnu vrijednost rezultata optimizacije. Za pijesak vrijednost faktora cijene je 0, a za kamenja i stijene vrijednost faktora cijene trase je 1 zbog nepoželjnosti polaganja trase u područje kamenja i stijena.



Slika 3-1. Vrsta morskog tla prema folk5 klasifikaciji (preuzeto iz [18])

Tablica 1. Faktori cijene trase ovisno o vrsti morskog tla

Vrsta morskog tla – folk5	Omjer pijeska, blata i šljunka	Faktor cijene trase
Pijesak	Pijesak	0
Grubo sedimentno tlo	Šljunak $\geq 80\%$ ili (šljunak $\geq 5\%$ i pijesak $\geq 90\%$ )	0.1
Mješoviti sediment	Blato 95-10%, pijesak $< 90\%$ , šljunak $\geq 5\%$	0.2
Blato i pijeskovito blato	Blato 100-10%, pijesak $< 90\%$ , šljunak $< 5\%$	0.3
Kamen i stijene	/	1

Trasa podmorskih cjevovoda i kabela trebala bi imati što blaži nagib, te ovisno o veličini nagiba raste faktor cijene trase. Postavljanje podvodne trase cjevovoda i kabela na nagibu može biti skuplje iz nekoliko razloga: složenosti postavljanja trase, potrebom za specijaliziranom opremom i brodovima, dodatnim mjerama sigurnosti, dodatnim pregledom i pripremom terena.

- Postavljanje cjevovoda na nagibu donosi dodatne sigurnosne zabrinutosti. Rizik od savijanja ili oštećenja cijevi tijekom postavljanja veći je na nagibu morskog dna, što zahtijeva strože sigurnosne mjere.
- Potrebna su dodatna istraživanja i procjene kako bi se planirao postupak instalacije trase

Unatoč većim troškovima, postavljanje trase na nagibu može biti neophodno za optimalnu poziciju trase. Vrijednost faktora cijene trase u ovisnosti o nagibu prikazani su u *tablici 2*.

*Tablica 2. Koeficijent faktora cijene trase ovisno o nagibu trase*

Nagib jedinične duljine trase	Faktor cijene trase
<2°	0
2-5°	0.3
5-10°	0.9
>10°	1.8

Ukoliko se dio trase treba postaviti u plitku vodu potrebno je koristiti drugu vrstu broda koji je sposoban polagati cjevi ili kabele u plitku vodu, te je onda potrebno iznajmiti dodatan brod i time raste ukupna cijena trase prema faktorima cijene trase prikazanih u *tablici 3*.

*Tablica 3. Koeficijent faktora cijene trase ovisno o dubino vode*

Dubina vode	Faktor cijene trase
>16 m	0
<16 m	3

Ukoliko je potrebno ukopavati kabele i cijevi u teren kako bi ih mogli postaviti pojavljuju se dodatni koeficijenti faktora cijene trase. Iako se ranije koristio indeks ukopa BPI (engl. *Burial Protection Index*) [20], od nedavno se primarno koristi metoda procjene rizika CBRA (engl. *Cable Burial Risk Assessment*) [21] za definiranje zahtijevane dubine ukopa cjevovoda uzduž trase. Različiti zahtjevi za dubinom ukopavanja rezultirati će i korištenjem različitih tehnologija, koje će cijenom varirati, te će zahtjevi za većim dubinama (općenito iznad 2m) rezultirati većim troškovima, a što je pokriveno u tablici 4.

Trenching (hrv. *Ukopavanje*) je postupak kopanja morskog dna, koristi se za ukopavanje podvodnih kabela i cijevi omogućujući njihovo sigurno i zaštićeno postavljanje podvodnih infrastruktura uz osiguravanje zaštite od oštećenja u izazovnim morskim uvjetima [22]. Trenching je uska iskopina u odnosu na svoju duljinu napravljena ispod površine tla [23]. Morsko dno se kopa mehaničkim iskopavanjima ili korištenjem daljinskim upravljanim ronilicama. Izvađen materijal se prenosi na morsku površinu ili se ispušta u ukolno okruženje ovisno o okolnostima i ekološkim uvjetima. Ukoliko je potrebno otkloniti više od 5 m dubine morskog dna može se koristiti tehnika *jaružanja* (engl. *Dredging*) ili vertikalnim injektorom (engl. *Vertical Injectior*). Jaružanje je tehnika koja se koristi za uklanjanje materijala s morskog dna, te se koristi kod uklanjanja dugoročne sedimentacije i nagomilavanje materijala na morskom dnu [24]. U lukama i pristaništima, potrebno je povećati dubinu vode kako bi se omogućilo većim brodovima da pristupe lukama i obavljaju svoje regularne aktivnosti, što može postaviti zahtjev za većim dubinama ukopavanja kako ne bi došlo do oštećenja infrastrukture prilikom regularnog održavanja. U *tablici 4.* prikazane su vrijednosti faktora cijene trase prema potrebama ukopavanja trase. Dodatni iskopi rezultiraju povišenim vrijednostima faktora cijene trase prema *tablici 4.*, te još dodatno povišenim vrijednostima faktora cijene trase zbog potrebe rada u plitkoj vode prema *tablici 3.*

*Tablica 4. Faktori cijene trase ovisno o potrebama ukopavanja trase*

Dubina ukopavanja trase u morsko dno [m]	Faktor cijene trase
<2	0
2-5	1



5-10	2
>10	5

U ovome radu pretpostavilo se da je potrebno napraviti dodatne iskope do dubine od 20 m ukoliko je dubina vode manja od 20 m u blizini 1 km gradova Dubrovnika i Vieste

### 3.2. Ograničenja trase

Trasa podmorskih kabela i cjevovoda ne smije se postavljati u područjima gdje se nalaze: naftne platforme, naftne bušotine, u blizini olupina brodova, zaštićenih područja i tako dalje. Prilikom optimizacije potrebno je osigurati da trasa izbjegne zabranjene zone, te provjeriti da se svaka dionica nalazi izvan zabranjenih zona tj, ograničenja.

U ovom radu postaviti će se 6 različitih ograničenja koja se pojavljuju prema javno dostupnim podacima na odabranom području gradova Dubrovnika i Vieste.

Ograničenja trase:

1. Ekološki zaštićena područja
2. Podmorska klizišta
3. Bušotine
4. Vjetroleketrane
5. Olupine brodova
6. Ribarenje

1. Ekološki zaštićena područja obuhvaćaju biološki raznolik i osjetljiv ekosustav poput koraljnih grebena, morskih rezervata i močvara. Postavljanje podmorske trase cjevovoda i kabela u ovim područjima može imati veoma negativne, dugoročne i nepopravljive posljedice na morski ekosustav. Razne morske vrste životinja uključujući ugrožene i endemske vrste, mogu biti ugrožene i njihov habitat može biti uništen. Ekološki zaštićena područja često su podložna posebnim zakonima i međunarodnim propisima kako bi se osigurala njihova zaštita, te postavljanje podmorske trase u tim područjima može zahtijevati posebne dozvole i suglasnosti.

2. Na području podmorskih klizišta dolazi do pomicanja i odrona sedimenta na morskom dnu koje može biti izazvano raznim čimbenicima poput geoloških procesa, potresa i ljudske aktivnosti.

Trasa cjevovoda i kabela koja prolazi kroz područje podmorskog klizišta može biti izložena opasnosti od klizanja koje može oštetiti strukturu trase. Masovna kretanja duž morskog dna neizbježno će stvarati valove na površini oceana koji se mogu širiti na velike udaljenosti, te ovisno o prirodi i veličini klizišta, kao i njegovoj lokaciji, učinci valova duž obale mogu varirati od neprimjetnih do iznimno destruktivnih [25]. Osim toga, podmorska klizišta mogu uzrokovati promjene u tlu i sedimentima koji mogu otežati instalaciju i održavanje infrastrukture trase.

3. Podmorska bušenja za eksploataciju nafte i plina mogu stvoriti rizik od nesreća kao što su curenje nafte ili plina koje mogu izazvati ogromne nesreće. Stavljanje cijevi ili kabela u blizini područja s aktivnim bušotinama može dovesti do povećanog rizika od curenja nafte ili plina u slučaju nesreće ili oštećenja. Bušotine mogu sadržavati kompleksne sustave cijevi i opreme za vađenje i transport nafte i plina. Trasa cjevovoda ili kabela koja prolazi blizu područja podmorskih bušotina može se sudarati s postojećom infrastrukturom, te dovesti do oštećenja cijevi ili kabela.

4. Vjetroelektrane mogu otežati instalaciju, održavanje i praćenje cijevi ili kabla u području polaganja cijevi i kabela. Trasa podmorskog cjevovoda ili kabela koja prolazi kroz područje vjetroelektrana može biti izložena opasnostima poput sudara s vjetrogeneratorima ili drugim postojećim strukturama, što može dovesti do oštećenja infrastrukture trase cjevovoda i kabela.

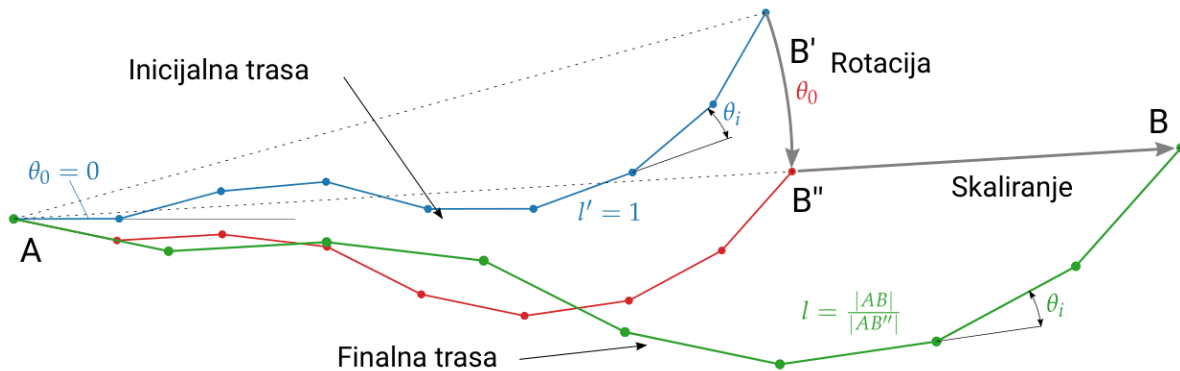
5. Olupine brodova na dnu mora mogu biti opasne za podmorsku trasu cjevovoda i kabela. Njihovi ostaci, poput oštih metalnih dijelova ili udubina, mogu oštetiti cijevi ili kabele koji prolaze kroz to područje. Olupine brodova na dnu mora obično su zaštićena zakonima i međunarodnim propisima kako bi se spriječila njihova neovlaštena eksploatacija i očuvala kulturna baština, te su često staništa za morski život i stvaraju umjetni greben na morskom dnu.

6. Ribarske mreže i oprema mogu predstavljati opasnost za podmorsku infrastrukturu cjevovoda i kabela. Ako cijev ili kabel zapne u ribarske mreže može doći do njihovog oštećenja i prekida rada. Ribari svojim sidrenjem mogu slučajno oštetiti podmorsku trasu cjevovoda i kabela pa je potrebno izbjegavati takva područja ili ukupovati trasu u morsko dno kako ne bi bila izložena mogućem oštećenju prilikom ribarske aktivnosti.

## 4. PARAMETRIZACIJA I EVALUACIJA MODELA

Parametrizacija se u geometriji odnosi na postupak definiranja parametarske jednadžbe krivulje ili površine [26]. U kontekstu optimizacije podmorskih cjevovoda i kabela parametrizacija predstavlja postupak definiranja izgleda trase podmorskih cjevovoda i kabela.

Putanja modela koja predstavlja trasu podmorskih cjevovoda i kabela nasumično se generira ovisno o zadanom broju varijabli, te dopuštenom rasponu kuteva između dionice trase. Trasa se sastoji od 180 dionica jednake duljine sa mogućim rasponom kuteva između svake dionice u vrijednosti do  $20^\circ$ . Na slici 4-1. prikazan je pojednostavljeni postupak parametrizacije putanje. Parametrizacije putanje započinje u točki A koja predstavlja grad Dubrovnik s početnim kutom od  $0^\circ$ , svaki sljedeći segment krivulje poprima nasumičnu vrijednosti kuta  $\theta$  koji predstavlja odmak segmenta krivulje u odnosu na prethodni segment krivulje u pozitivnom ili negativnom smjeru. Nakon generiranja nasumičnih vrijednosti kuteva zadnji segment krivulje  $B'$  se nalazi na nepoznatoj lokaciji. Potrebno je rotirati početnu točku krivulje A za kut rotacije  $\theta_{rot}$  i pomnožiti sve segmente krivulju sa omjerom skaliranja  $l_s$  kako bi krajnja točka krivulje  $B'$  se prvo pomakla u točku  $B''$  uslijed rotacije pa zatim u točku B uslijed skaliranja koja predstavlja grad Vieste.



Slika 4-1. Pojednostavljena parametrizacija putanje (preuzeto iz [26])

Kut dužine  $\overline{AB}$ ,  $\theta_{\overline{AB}}$ :

$$\theta_{\overline{AB}} = \tan^{-1} \left( \frac{(\overline{AB})_y}{(\overline{AB})_x} \right) \quad (4.1)$$

Kut dužine  $\overline{AB'}$ ,  $\theta_{\overline{AB'}}$ :

$$\theta_{\overline{AB'}} = \tan^{-1} \left( \frac{(\overline{AB'})_y}{(\overline{AB'})_x} \right) \quad (4.2)$$

Kut rotacije,  $\theta_{rot}$ :

$$\theta_{rot} = \theta_{\overline{AB}} - \theta_{\overline{AB'}} \quad (4.3)$$

Dužina  $\overline{AB}$ ,  $l_{\overline{AB}}$ :

$$l_{\overline{AB}} = \sqrt{(l_{\overline{AB}})_x^2 + (l_{\overline{AB}})_y^2} \quad (4.4)$$

Dužina  $\overline{AB''}$ ,  $l_{\overline{AB''}}$ :

$$l_{\overline{AB''}} = \sqrt{(l_{\overline{AB''}})_x^2 + (l_{\overline{AB''}})_y^2} \quad (4.5)$$

Omjer skaliranja,  $l_s$ :

$$l_s = \frac{l_{\overline{AB}}}{l_{\overline{AB''}}} \quad (4.6)$$

#### 4.1. Evaluacija troškova

Za dobivanje ukupnih troškova postavljanja i dugoročnog rada podmorskih cjevovoda i kabela potrebno je izračunati: cijenu instalacije, cijenu eksploatacije, te dodane troškove.

##### 4.1.1. Cijena instalacije

Cijena instalacije trase  $C_I$  dobiva se sumiranjem duljine dionice trase  $L$  [m] s cjenom dionice trase  $C$  [€/m] i s zbrojem faktora cijene trase  $f_i$  koji se pojavljuju na pojedinoj dionici trase.

Gdje je cijena instalacije trase  $C_I$ :

$$C_I = \sum_i^n L \cdot C \cdot (1 + f_1 + f_2 + \dots + f_n) \quad (4.7)$$

#### 4.1.2. Cijena eksploatacije

Cijena eksploatacije uzeti će se u obzir samo pri optimizaciji podmorske trase cjevovoda, zbog pojave duljinskih gubitaka na svakoj dionici cjevovoda i značajne cijene struje koja se u dužem periodu rada cjevovoda akumulira, te zahtjeva veliku financijsku investiciju. Pretpostavljeni period eksploatacije cjevovoda  $T$  [s] je u trajanju od 25 godina, a odabrani fluid koji će strujati kroz cjevovod je nafta zbog svoje široke primjene u automobilskoj, kemijskoj industriji, te za proizvodnju električne energije i toplinske energije. Kroz cjevovod promjera  $D = 30.48$  [cm] pretpostavlja se da će dnevno prolaziti 25000 barela nafte.

Izračun troškova eksploatacije  $C_E$  [€] temelji se na snazi pumpe  $P$  [W] potrebnoj za savladavanje duljinske gubitaka  $h_L$  [m] nastalih u cjevovodu i dobivaju se izrazom (4.8). Za dobivanje troškova eksploatacije potrebno je uzeti u obzir različite vrijednosti prikazane u *tablici 5*.

Troškovi eksploatacije  $C_E$ :

$$C_E = P \cdot T \cdot C_{elek} \quad (4.8)$$

*Tablica 5. Vrijednosti potrebne za izračun troškova eksploatacije i instalacije trase cjevovoda*

Vrijednost	Oznaka vrijednosti	Iznos vrijednosti	Mjerna jedinica
Protok	$Q$	46	[l/s]
Duljina dionice	$L$	100	[m]
Promjer cijevi	$D$	30.48	[cm]
Gustoća nafte	$\rho_n$	755	[kg/m <sup>3</sup> ]
Hrapavost cijevi	$\epsilon$	$0.05 \cdot 10^{-3}$	[m]
Kinematička viskoznost nafte	$\nu$	$1 \cdot 10^{-5}$	[m <sup>2</sup> /s]
Cijena cijevi	$C_{cijevi}$	800	[€/m]

Cijena struje	$C_{elek}$	0.2	[€/kWh]
Iskoristivost pumpe	$\eta$	0.85	/

Brzina strujanja u cijevi  $v$ :

$$v = \frac{Q}{(D^2 \cdot \pi \cdot 0.25)} \quad (4.9)$$

Reynoldsov broj  $Re$ :

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (4.10)$$

Koeficijent trenja  $\mu_{TR}$ :

$$\mu_{TR} = 0.11 \cdot \left( \left( \frac{eps}{D} \right) + \left( \frac{68}{Re} \right) \right)^{0.25} \quad (4.11)$$

Duljinski gubici u cjevovodu  $h_L$ :

$$h_L = \mu_{TR} \cdot \left( \frac{L}{D} \right) \cdot \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4.12)$$

Potrebna dobavna visina pumpe  $h_P$ :

$$h_P = \frac{P_B}{\rho g} - \frac{P_A}{\rho g} + h_2 - h_1 + h_L \quad (4.13)$$

Potrebna snaga pumpe  $P$ :

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot h_P}{\eta} \quad (4.14)$$

#### 4.1.3. Dodatni troškovi

U dodatne troškove instalacije trase ne uračunavaju se troškovi: rada posade brodova, istraživanja morskog dna, rada daljinski upravljane ronilice, niti dodatno vrijeme rada ukoliko dođe do vremenskih nepogoda poput oluja i lošeg vremena zbog potrebe evakuacije skupe opreme i posade

radi njihove sigurnosti. Pod dodatne troškove  $C_D$  [€] računa se dnevni najam broda potrebnog za instalaciju podmorske trase cjevovoda i kabela, te ukupan iznos troškova ovisi o cijeni dnevnog najma broda  $C_B$  [€/dan], ukupnoj dužini trase  $L_U$  [m] i dnevnom limitu instalaciju trase  $D_L$  [m/dan].

Dodatni trošak instalacije trase  $C_D$  [€]:

$$C_D = C_B \cdot \text{round} \left( \frac{L_U}{D_L} \right) \quad (4.15)$$

Potrebno je zaokružiti vrijednost  $(L_U/D_L)$  na prvi veći cijeli broj kako bi dobili točan broj dana najma broda potrebno za instalaciju trase.

#### 4.2. Batimetrija i nagib trase

Podaci o batimetriji (dubini morskog dna) preuzeti su s Europske mreže za promatranje mora i prikupljanje podataka EMODnet (engl. *European Marine Observation and Data Network*) [18] u xyz. formatu. Vrijednosti x i y predstavljaju stupnjevima geografske dužine °E i stupnjevima geografske širine °N, dok vrijednost z predstavlja dubinu mora (batimetriju). Za dobivanje udaljenosti izraženu u metrima između dvaju točaka potrebnu za izračunavanje nagiba pojedine dionice podmorske trase cjevovoda i kabela potrebno je koristiti Haversineovu formulu [27].

Nagib je potrebno izračunati kako bi mogli odrediti faktore cijene trase prema *tablici 2.* koji utječu na ukupnu cijenu instalacije trase.

Haversineova formula:

$$a = \sin \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right)^2 + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin \left( \frac{\Delta\lambda}{2} \right)^2 \quad (4.16)$$

$$c = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{1-a}} \right) \quad (4.17)$$

$$L = \frac{R \cdot c}{1000} \quad (4.18)$$

Gdje su:  $\Delta\varphi$  razlika dvaju točaka geografske širine °N,  $\Delta\lambda$  razlika dvaju točaka geografske dužine °E,  $\varphi_1$  početna točka geografske širine °N,  $\varphi_2$  krajnja točka geografske širine °N,  $R$  radijus zemlje iznosa 6371 km,  $L$  duljina dionice trase [m].

Nagib dionice trase  $s$ :

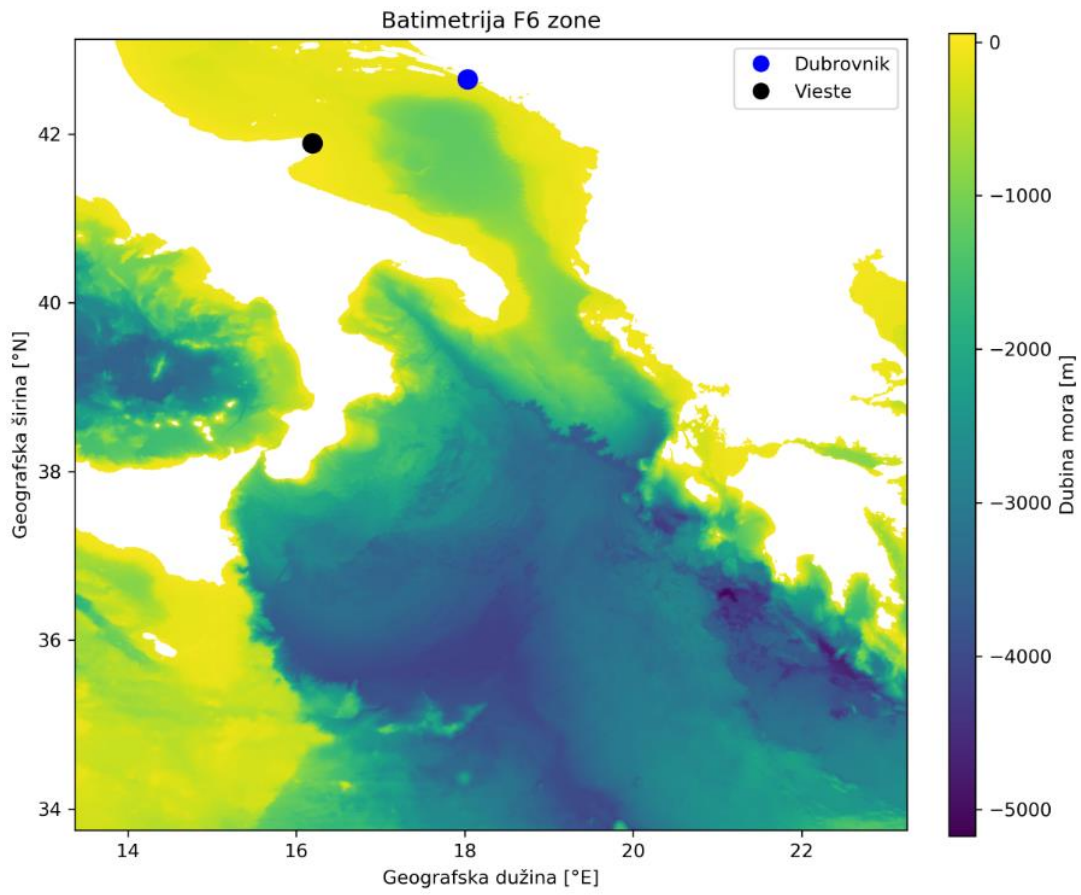
$$s = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta h}{d}\right) \quad (4.19)$$

Gdje su:  $d$  duljina dionice trase,  $\Delta h$  razlika „visine“ početne i krajnje točke dionice trase.

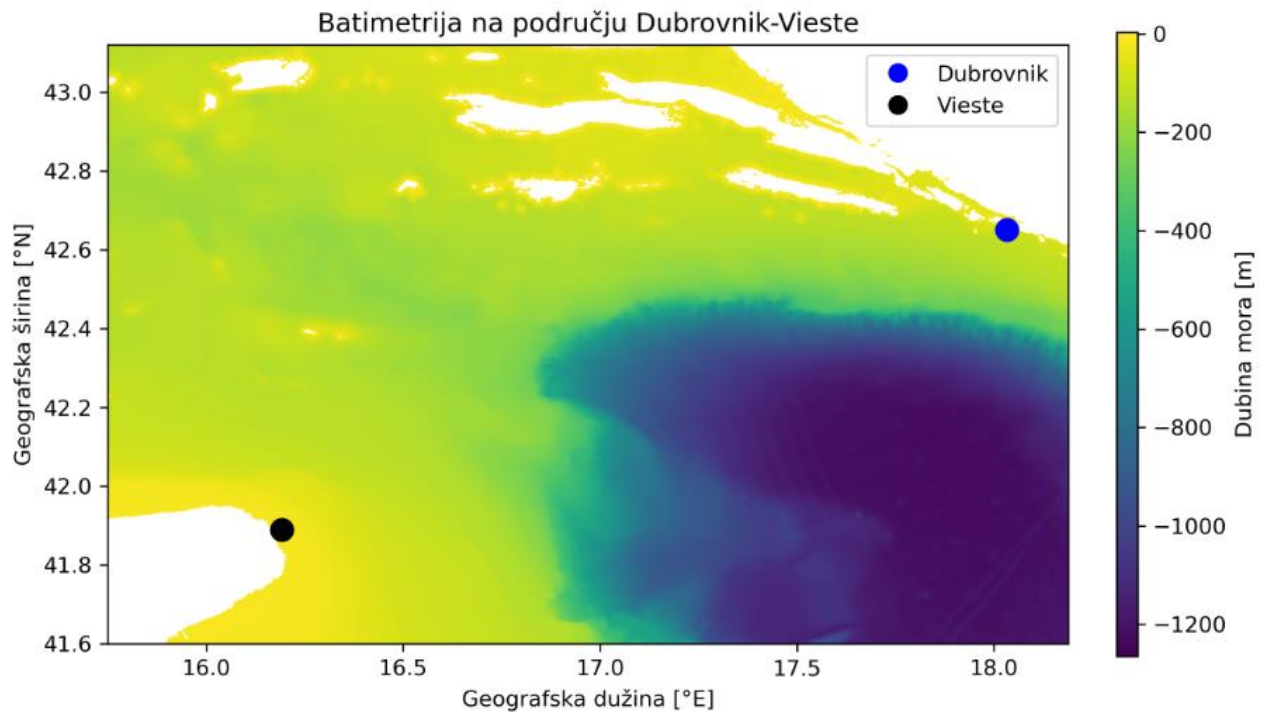
Podaci o batimetriji preuzeti su za F6 zonu i vizualizirani su na slici 4-2. Podaci o batimetriji nisu strukturirani u pravilnu kockastu mrežu, pa je podatke potrebno interpolirati prije bilo kakvih proračuna koji zahtijevaju podatke o batimetriji. Podatke je potrebno sužiti za odabranu rutu trase na područje u blizini gradova Duborvnika i Vieste. Suženo područje otprilike je: široko 200 km, dugo 170 km, površine 34000 m<sup>2</sup> i prikazano na slici 4-3. Odabrano područje optimizacije prostire se od 15.75°E do 18.19°E geografske dužine i od 41.60°N do 43.12°N geografske širine. Trase kreće s pozicije grada Dubrovnika koji se nalazi na 18.033°E geografske dužine i 42.65°N geografske širine sve do grada Vieste koji se nalazi na 16.192°E geografske dužine i 41.89°N geografske širine. Zračna udaljenost odabranih točaka koje predstavljaju gradove Dubrovnik i Vieste iznosi 173.45 km.

Suženo područje je i dalje iznimno prostrano, te dataset u kojem su zapisani xyz podaci batimetrije sačinjeni su od 3 milijuna redaka. Ukoliko prepostavimo da se podaci mjereni uniformno sa istim duljinskim razmakom kvaliteta mreže batimetrije je malo lošija od 100x100 m. Zbog kvaliteta mreže, te pretpostavljenoj dužini optimalne trase u iznosu od otprilike 180 km pri izračunu potrebno je imati 1800 dionica trase, kako bi osigurali da je svaka dionica trase duga otprilike 100 m i „glatko“ sjedi na reljefu mora, te da je evaluacija popratnih troškova točna. Problem kod tako velikog broja dionica trase je iznimno dugo vrijeme proračuna naspram vremenu proračuna kod trase sa 180 dionica. Ukoliko odabremo trasu koja se sastoji od 180 dionica potrebno je nakon optimizacije podijeliti svaku dionicu trase dužine 1 km na 10 manjih dionica dužine 100 m kako bi trasa odgovara reljefu mora, te evaluacija troškova bila točna.





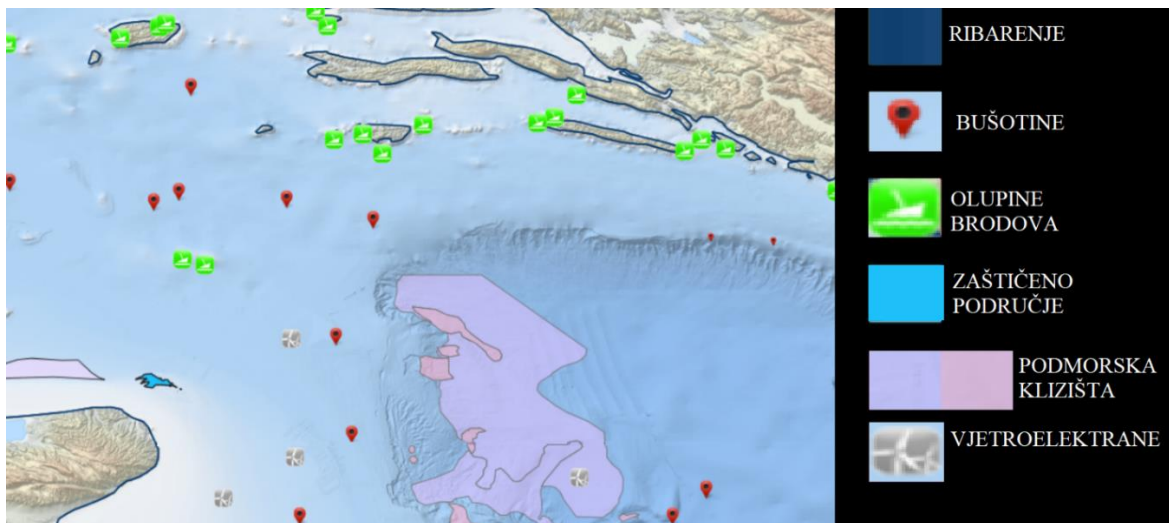
*Slika 4-2. Batimetrija F6 zone*



Slika 4-3. Batimetrija na području Dubrovnik-Vieste

#### 4.3. Ograničenja trase i klasifikacija morskog dna

Na slici 4-4. preuzetu sa internet stranice EMODnet [18] različitim bojama i oznakama prikazana su područja ograničenja koja trasa podmorskih cjevovoda i kabela mora zaobići. Tamno plavom konturom oko obala i otoka označena su područja gdje je učestalo ribaranje, zelena oznaka prikazuje mjesta gdje su pronađene olupine brodova, crvene oznake prikazuju bušotine, svijetlo plavom bojom označeno je koraljno područje koje je ekološki zaštićeno, bijelom oznakom prikazane su vjetroelektrane, ljubičastom i rozom bojom prikazana su podmorska klizišta [18]. Na području prikaznom na slici 4-4. ne nalazi se postojeća trasa cjevovoda i kabela, nema poznatih minskih polja, nema ni aktivnih vulkana prema javno dostupnim podacima pa ih ne uzimamo u obzir pri optimizaciji podmorske trase cjevovoda i kabela.



Slika 4-4. Ograničenja trase koja ruta trase podmorskih cjevovoda i kabela mora zaobići (preuzeto iz [18])

Potrebno je još pregledati podatke o već spomenutoj folk5 klasifikaciji morskog dna na odabranom području koje je prikazano na slici 4-4. jer vrsta morskog dna utječe na iznos faktora cijene trase prema tablici 1. i time na ukupnu cijenu instalacije trase, te na vrijednost optimizacije. Najveći dio morskog dna sastoji se od blata i pjeskovitog blata, dok se najmanje morskog dna sastoji od kamena i stijena.

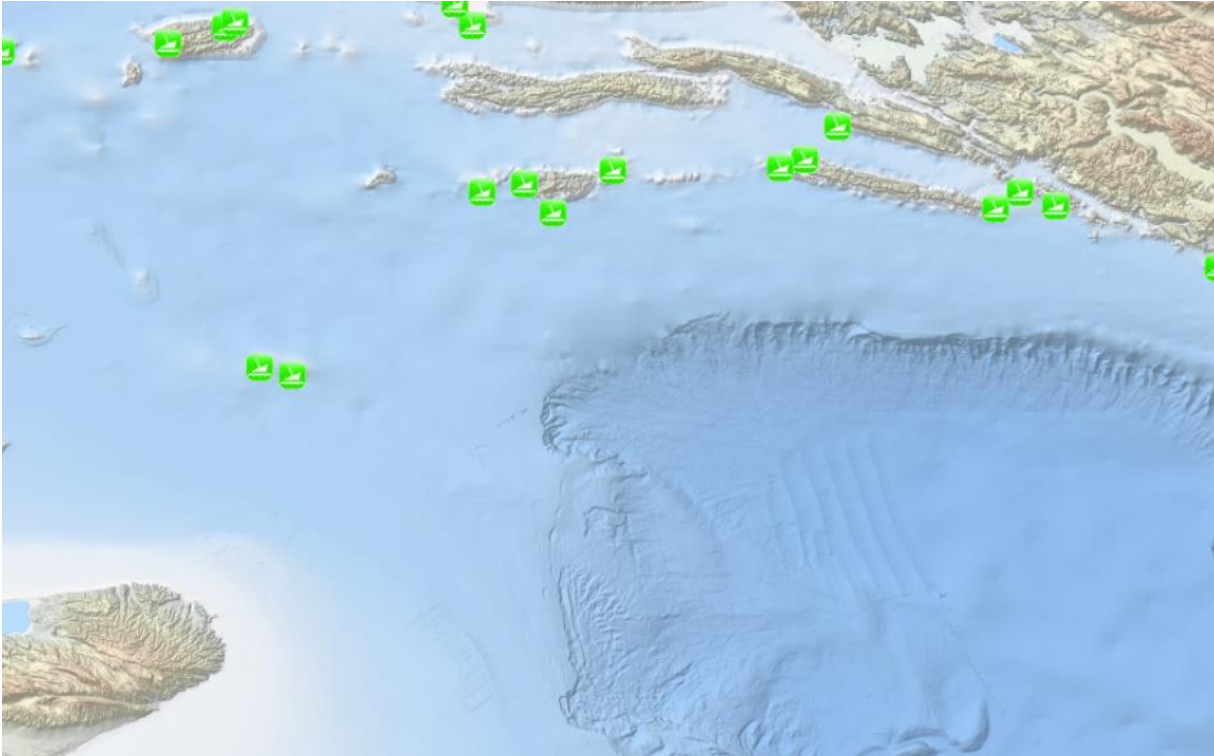


Slika 4-5. Folk 5 klasifikacija morskog dna. Poredano po poželjnosti odabira vrste morskog dna (pjesak je poželjniji od kamena i stijena) (preuzeto iz [18])

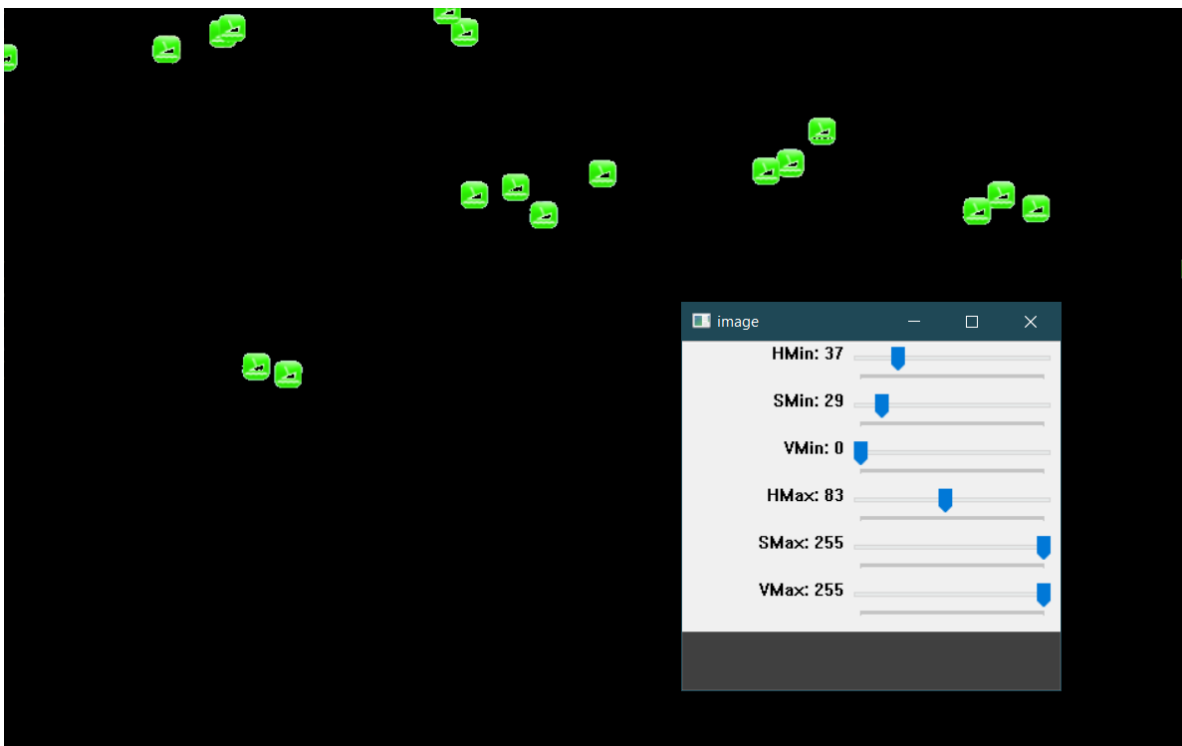
#### 4.4. Priprema podataka

Sve ove podatke o raznim faktorima i ograničenjima potrebno je prebaciti u shapefile format. Shapefile format je geoprostrani vektorski format korišten uglavnom za razne geografske informacijske sustave (engl. *GIS – Geographic Information System*) [28]. Format shapefile omogućuje prostorno opisivanje vektorskih obilježja: točaka, linija i poligona koji će u našem slučaju predstavljati različita područja: bušotina, vjetroelektrana, brodskih olupina, zaštićenih područja, morska klizišta, te vrstu morskog dna.

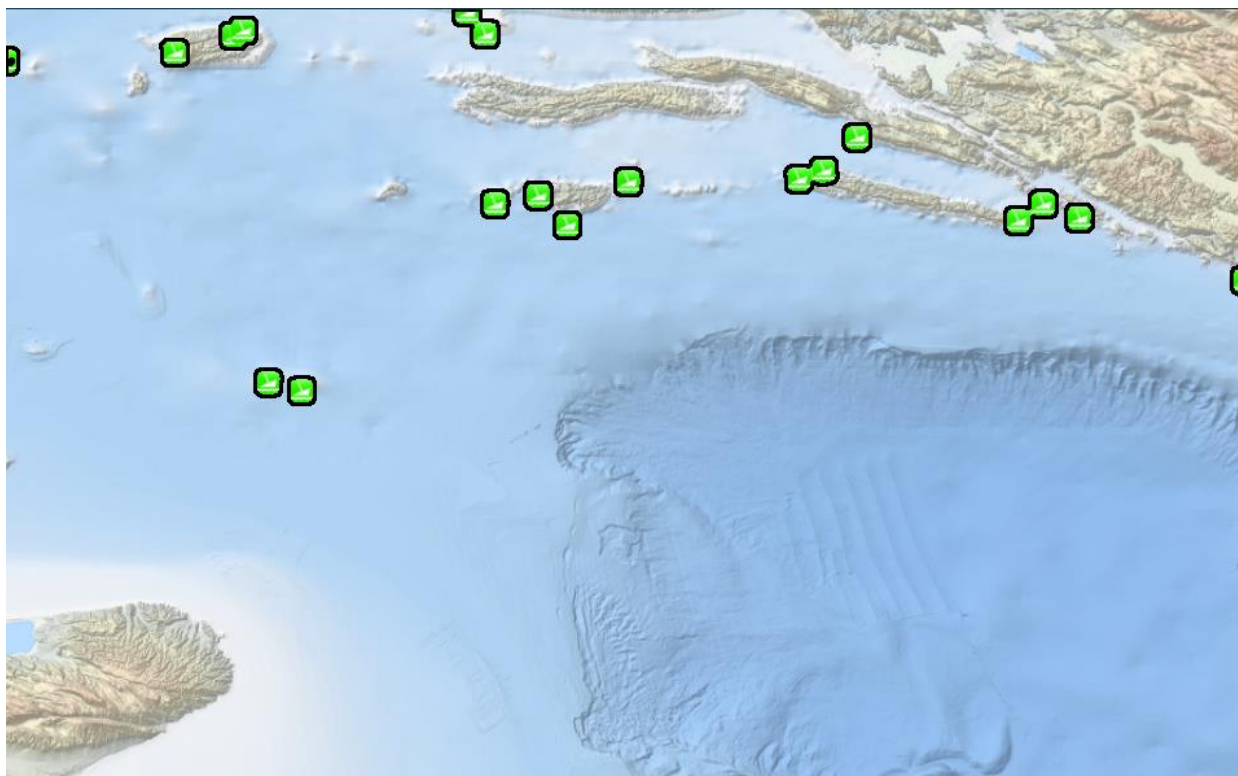
Shapefile-ove ćemo dobiti kroz nekoliko koraka, a prvi od njih je prebacivanje slike u HSV format. Oznaka HSV predstavlja "Hue, Saturation, Value" (hrv. *Nijansa, zasićenje, vrijednost*). HSV format može biti koristan kod manipulacije i prilagodbe boja na slikama, jer nudi različite kontrole nad bojama u odnosu na RGB (engl. *Red, Green, Blue*) format slike. Ako želimo izdvojiti samo jednu boju na odabranoj slici potrebno je odrediti raspon HSV vrijednosti piksela na slici koje opisuju željenu boju na slici. Nakon što pronađemo vrijednosti potrebno je pronaći konture pojedinog obojanog objekta na slici, te mu dati pripadne vrijednosti geografske dužine i širine ovisno o poziciji na slici. Na slikama ispod prikazan je primjer postupaka izrade shapefile-ova s pozicijama brodskih olupina koje su *na slici 4-6*. označene zelenom bojom. Na *slici 4-7*. prikazan je raspon HSV vrijednosti koje opisuju zelene piksele brodskih olupina, H je u rasponu od 37 do 83, S je u rasponu od 29 do 255, V je u rasponu od 0 do 255. Na *slici 4-8*. pronađene su konture brodskih olupina i spremljene su u shapefile format kao poligoni s pozicijama geografske dužine i širine.



*Slika 4-6. Pozicije brodskih olupina (preuzeto iz [18])*



*Slika 4-7. Određivanje HSV vrijednosti piksela potrebnih za pozicioniranje brodskih olupina*

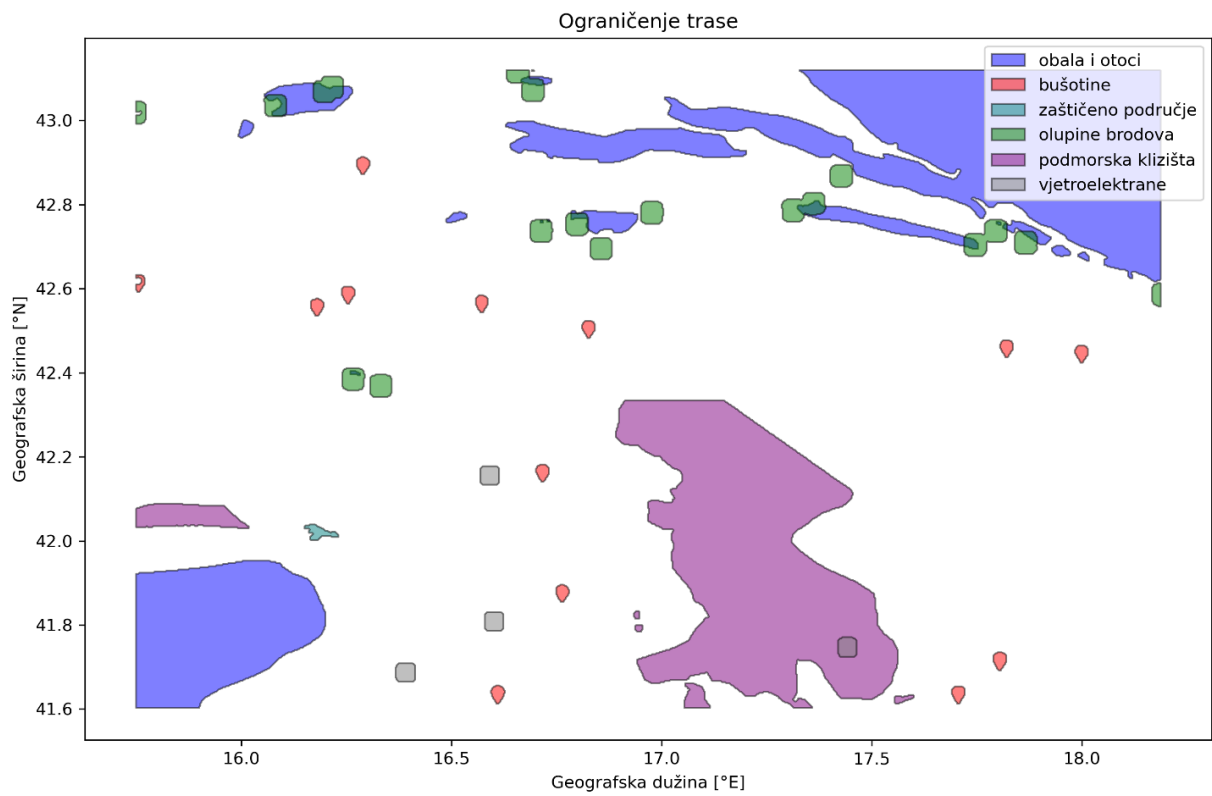


*Slika 4-8. Pronalazak konture brodskih olupina*

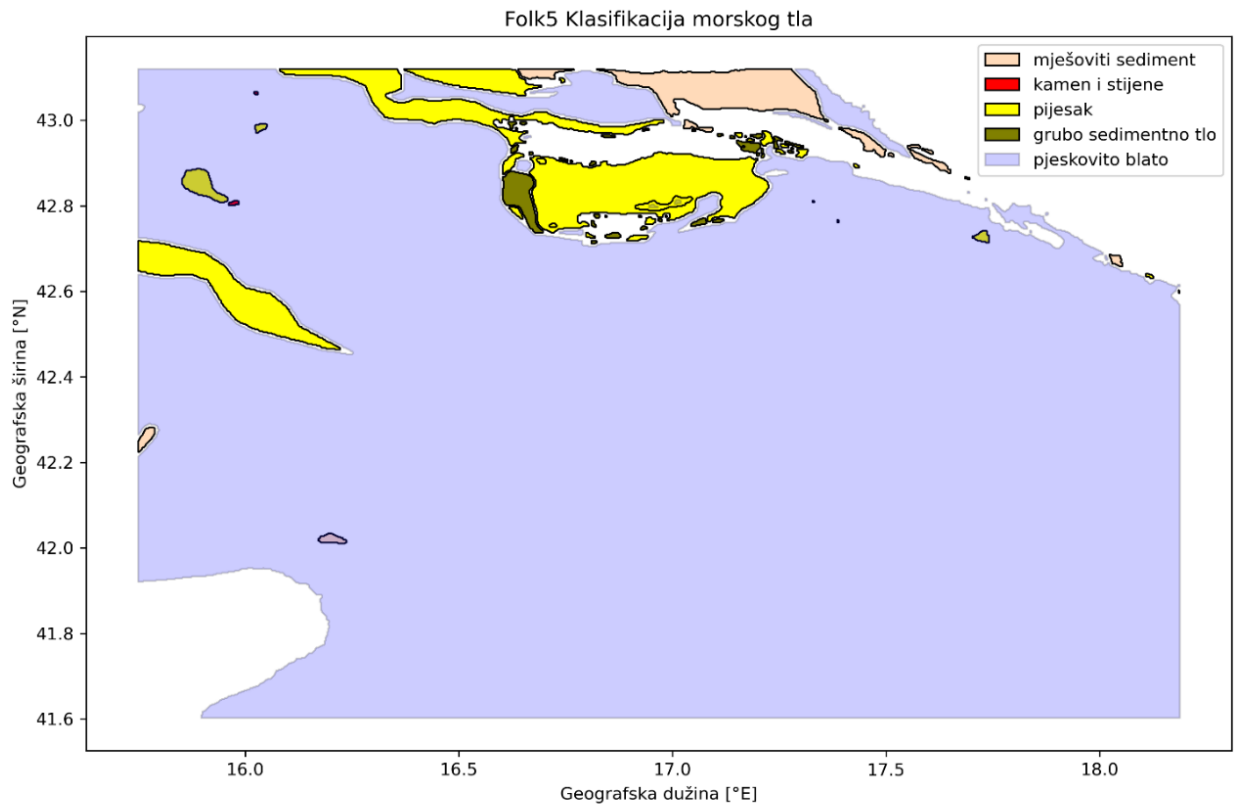
Ovaj postupak potrebno je ponoviti zasebno za svaki od faktora cijene trase i ograničenja potrebnih za optimizaciju podmorske trase cjevovoda i kabela. Nakon prikupljanja shapefile-ova koji sadrže pozicije brodskih olupina, ribarenja, bušotina, zaštićenih područja, podmorskih klizišta, vjetroelektrana, te pozicije svih vrsta morskog dna možemo krenuti s optimizacijom podmorske trase cjevovoda i kabela.

#### 4.4.1. Vizualizacija podataka

Na *slici 4-8.* vizualizirani su shapefile-ovi ograničenja trase koje je potrebno izbjegavati prilikom odabira rute trase podmorskog cjevovoda i kabela, a na *slici 4-10.* vizualizirana su shapefile-ovi područja ovisno o folk5 klasifikaciji morskog dna.



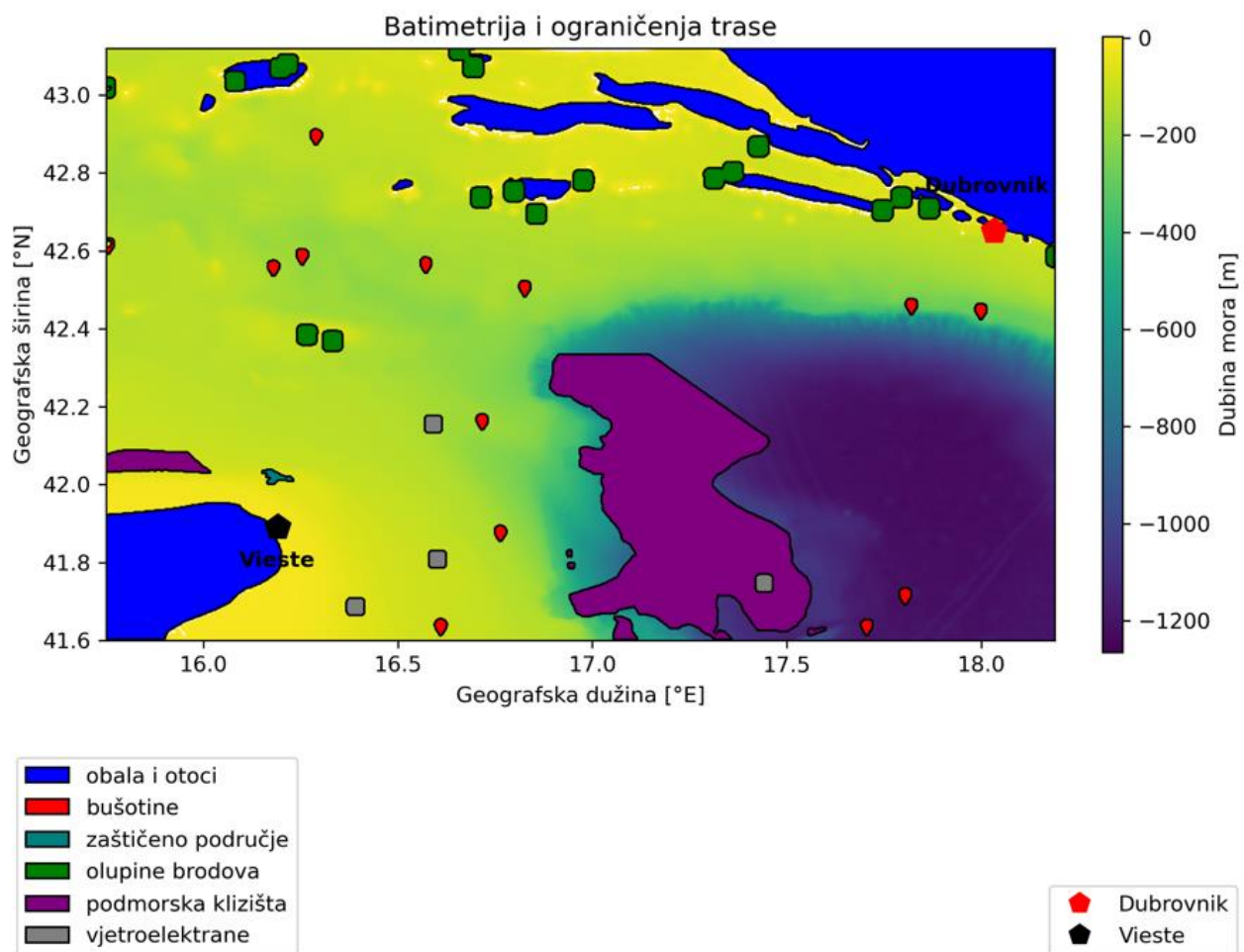
Slika 4-9. Vizualizacija ograničenja trase (shapefile formatu)



*Slika 4-10. Vizualizacija folk5 klasifikacije morskog tla (shapefile formatu)*

Na *slici 4-11.* vizualizirani su podaci o batimetriji, i raznim ograničenjima podmorske trase cjevovoda i kabela, kako bi dobili jasniju sliku o područjima koje je potrebno izbjegavati. Trasa mora strogo zaobići sva područja ograničenja prikazanih *na slici 4-8.* kako bi optimizacija bila zadovoljena. Možemo primjetiti da u desnom donjem kutu *na slici 4-10.* se nalazi područje velike dubine u kojem je velika razlika visine trase izvan i unutra tog područja, te je to područje potrebno zaobići kako bi minimizirali ukupnu vrijednost optimizacije. Velika razlika visine trase dovesti će do značajnog porasta cijene instalacije trase zbog razlike u nagibu, te dovesti do malo većih troškova eksploatacije pri radu podmorskog cjevovoda zbog pojave duljinskih gubitaka u cjevovodu uslijed visinske razlike dionica cjevovoda.





*Slika 4-11. Vizualizacija batimetrije i ograničenja trase (shapefile format)*

## 5. OPTIMIZACIJA PROBLEMA

Optimizacija problema sastoji se od analize odlučivanja s više kriterija MCDA i optimizacije rojem čestica PSO (engl. *Particle swarm optimization*). MCDA analiza implementirana je Python kodom, dok je PSO algoritam implementiran u Python-u korištenjem indago [29] knjižnice koja je izrađena na Tehničkom Fakultetu u Rijeci. MCDA metoda postavlja opcije i ograničenja PSO algoritmu. Svaka čestica predstavlja optimizacijsku varijabla  $V$  koja se sastoji od 180 dionica trase jednake duljine s međusobno različitim kutevima  $\theta_i$ . Duljina dionice trase cjevovoda i kabela PSO algoritam ne može mijenjati, ali može samo mijenjati pojedini kut unutar optimizacijske varijable između svih dionica u rasponu od  $20^\circ$ . Faktori cijene trase utjecati će na cijenu instalacije trase, dok će „visina“ pojedine dionice trase utjecati na cijenu instalacije trase i na troškove eksploatacije trase. S vrijednošću optimizacije ocjenjuje se dobiveno rješenje čestice i jata, dok ograničenja predstavljaju stroge uvijete koje čestica i jato ne smiju prekršiti. Vrijednosti parametra PSO algoritma zadani su prema *tablici 6*.

**Zadatak optimizacije** podmorske trase cjevovoda i kabela je minimizacija varijable  $R$  uz zadovoljavanje svih uvijeta ograničenja na cijeloj dužini trase.

Varijabla  $R$  predstavlja cilj optimizacije i temelji se na zbroju cijene instalacije  $C_I$ , troškovima eksploatacije  $C_E$  i broju ograničenja  $O$  koja se pojavljuju na cijeloj trasi. Za određivanje optimalne pozicije trase potrebno je minimizirati vrijednost  $R$  što bi značilo da manji rezultat predstavlja bolju rutu trase u odnosu na veći rezultat koji predstavlja lošiju rutu trase.

Cilj optimizacije  $R$ :

$$R = C_E + C_I + O \quad (5.1)$$

Gdje su:  $C_E$  troškovi eksploatacije,  $C_I$  cijena instalacije trase,  $O$  ograničenja trase

Optimizacijska varijabla  $V$ :

$$V = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]; n = 180 \quad (5.2)$$

Gdje je  $n$  broj dionica trase.

Kutevi unutar optimizacijske varijable  $\theta_i$ :

$$\theta_i \in [-10^\circ, 10^\circ] \quad (5.3)$$

### 5.1. PSO algoritam

Particle swarm optimization (*hrv. Optimizacija rojem čestica*) je popularan optimizacijski algoritam koji služi za pronalazak optimalnih rješenja traženog optimizacijskog problema. Algoritam je inspiriran ponašanjem jatom ptica i riba, gdje pojedinci koordiniraju svoje kretanje kako bi zajednički pronašli optimalan put [30]. Svaki pojedinac je zapravo čestica koja se kreće kroz prostor pretraživanja predstavljajući jedno moguće rješenje optimizacije. Kretanje čestice utječe na najbolje rješenje i na najbolji rješenje koji je populacija našla. Čestice prilagođavaju svoje rješenje ovisno o vlastitim iskustvu i zajedničkog znanja unutar roja.

Položaj pojedine čestice:

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \quad (5.4)$$

Brzina pojedine čestice:

$$v_{k+1}^i = c_1 v_k^i + c_2 r_2 (p_k^i - x_k^i) + c_3 r_3 (p_k^g - x_k^i) \quad (5.5)$$

Gdje su:  $x_k^i$  položaj čestice,  $v_k^i$  brzina čestice,  $p_k^i$  najbolja „zapamćena“ pozicija pojedine čestice,  $p_k^g$ , najbolja „zapamćena“ pozicija jata,  $c_1$  inercijski parametar,  $c_2$  kognitivni parametar,  $c_3$  socijalni parametar,  $r_2$  i  $r_3$  su nasumični brojevi u rasponu od 1 do 2.

PSO algoritam sastoji se od nekoliko koraka:

- Inicijalizacija → Stvara se populacija čestica s nasumično generiranim vrijednostima položaja i brzine
- Evaluacija → Za svaku česticu pronalazi se vrijednost optimizacije ovisno o njenom položaju
- Prilagodba čestica → Lokalno najbolja čestica i globalno najbolji položaj jata se ažurira prema najboljima rješenjima čestica
- Prilagodba brzine i položaja → Ovisno o najboljem lokalnom i globalnom položaju
- Završavanje optimizacije → Ukoliko se postigne željeni rezultati ili maksimalni broj iteracija ili evaluacija

Tablica 6. Vrijednosti parametara PSO algoritma

Ime parametra	Vrijednost parametra
Veličina jata $n$	30
Inercijski parametar $c_1$	0.8
Kognitivni parametar $c_2$	0.7
Socijalni parametar $c_3$	0.8
Maksimalni broj evaluacija $E_{max}$	10000

## 5.2. Postupak optimizacije

Provesti će se 24 optimizacije traženog problema, 12 optimizacija za pronalazak optimalne trase podmorskog cjevovoda i 12 optimizacija za pronalazak optimalne trase podmorskih kabela, te će se odabrati i vizualizirati najbolje rješenje trase podmorskih cjevovoda i kabela. Optimizacija se provodi u nekoliko koraka, te je potrebno implementirati razne formule i funkcije kako bi mogli dobiti ukupnu cijenu instalacije, eksploatacije i provjeriti ako je koja dionica trase prekršila stroga ograničenja. Prvo je potrebno učitati pripremljene shapefile-ove i batimetriju, te interpolirati podatke o batimetriji kako bi dobili strukturiranu mrežu dubine mora. Nakon toga započinje optimizacija s definiranim parametrima prema *tablici 6.* i za svaku česticu roja generira se ruta trasa koja se sastoji od 180 dionica cjevovoda ili kabela, te započinje u gradu Dubrovniku i završava u gradu Vieste s nasumično generiranim vrijednostima kuteva u rasponu od  $20^\circ$  prikazanom u izrazu (5.3). Za svaku dionicu trase potrebno je napraviti proračun faktora cijene trase poput provjere na kojoj se vrsti morskog dna dionica trase nalazi (*tablica 1.*), provjeru nagiba trase prema (*tablici 2.*), provjeru dubine trase (*tablica 3.*) i potrebu ukopavanja dionica trase (*tablica 4.*). Isto tako potrebno je za svaku dionicu trase provjeriti ukoliko se nalazi u zabranjenim područjima, te provjeriti ako krši stroga ograničenja i bilježiti njihov broj. Ovisno o duljini dionice trase, faktoru cijene trase i jedničnoj cijeni dionice trase dobiva se cijena instalacije i eksploatacije trase. Zbrajanjem cijene instalacije, eksploatacije i brojem prekršenih ograničenja dobiva se vrijednost optimizacije prema izrazu (5.1). Za svaku iteraciju PSO algoritma na svih 30 čestica provodi se ovakav proračun kako bi pronašli česticu s najboljim lokalnim i globalnim položajem, te se prema toj čestici prilagođava brzina i položaj jata. Određivanje broja čestica je empirijski proces, te broj čestica treba biti dovoljno velik da omogući raznolikost pretrage prostora rješenja, ali ne prevelik da bi se ubrzao proces optimizacije. Svaka optimizacija se provodi sve dok se prvo postigne željeni rezultati ili se izvrši 10000 evaluacija čestica.

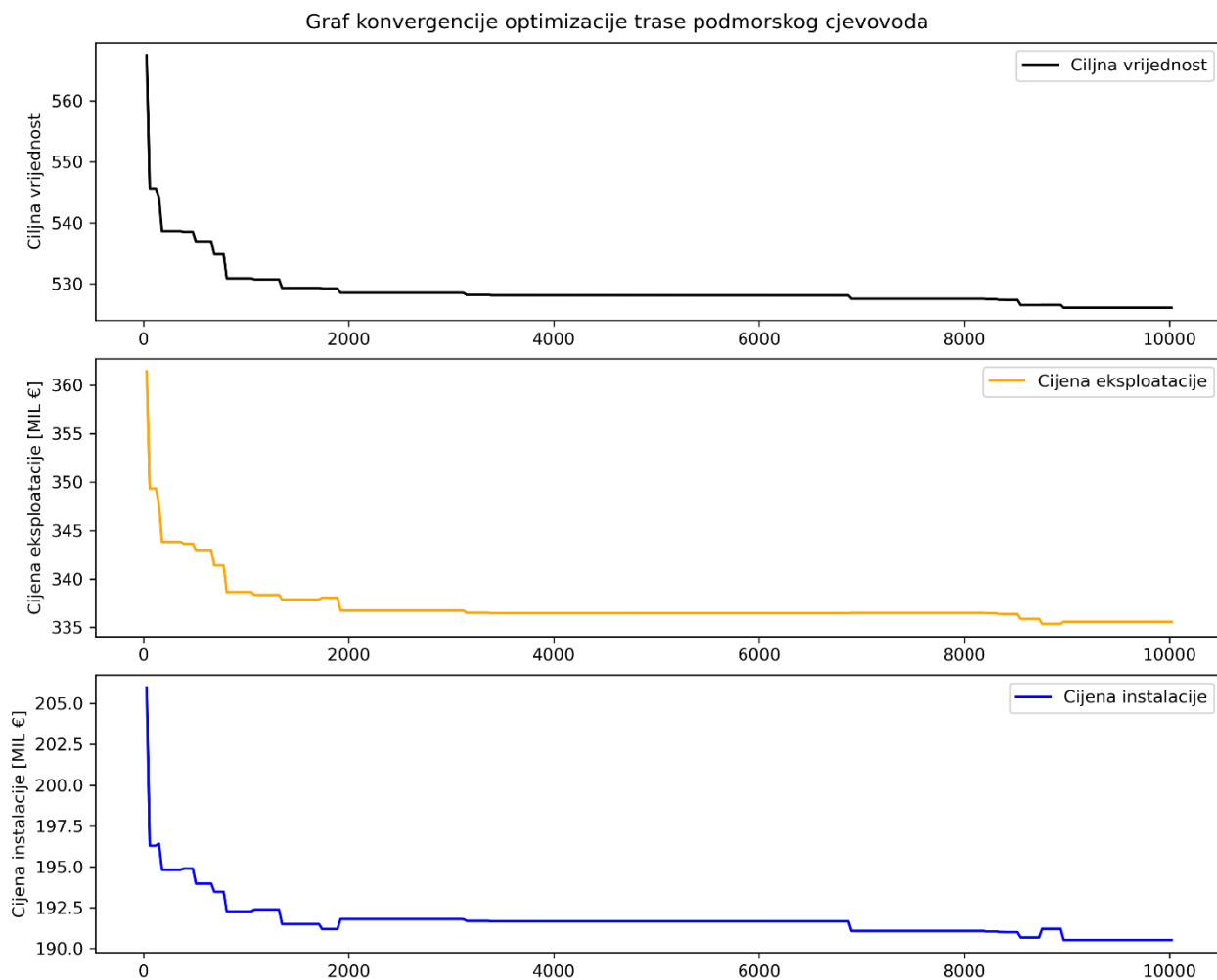
## 6. ANALIZA REZULTATA OPTIMIZACIJE

Graf konvergencije optimizacije rojem čestica prikazan na slikama 6-1. i 6.2. ima ključnu ulogu u praćenju i analizi ponašanja optimizacijskog algoritma. Pomoću grafa konvergencije vizualno je prikazana promjena u vrijednostima ciljne funkcije (*engl. Fitness*) tijekom iteracija i evaluacija algoritma, u ovom slučaju ciljna funkcija mjeri kvalitetu odabrane trase podmorskih cjevovoda i kabela. Na x-osi grafa konvergencije prikazani su brojevi evaluacija. Dobar graf konvergencije treba imati brzu početnu konvergenciju, stabilnu konvergenciju, stabilno najbolje rješenje i malu divergenciju.

- Brza početna konvergencija – ukoliko se vrijednost ciljne funkcije brzo smanjuje na početku optimizacije ukazuje na učinkovito pretraživanje prostora rješenja u ranim fazama optimizacije.
- Stablina konvergencija – pokazuje da se algoritam približava optimalnom rješenju bez velikih oscilacija ili naglih promjena
- Stabilno najbolje rješenje – linija koja prikazuje najbolju pronađenu vrijednost ciljne funkcije trebala bi se stabilizirati u blizini optimalne vrijednosti i ostati tamo
- Mala divergencija – grafički prikaz ne bi trebao pokazivati nagli skok ili oscilacije u vrijednosti ciljne funkcije, nego se treba postepeno smanjivati

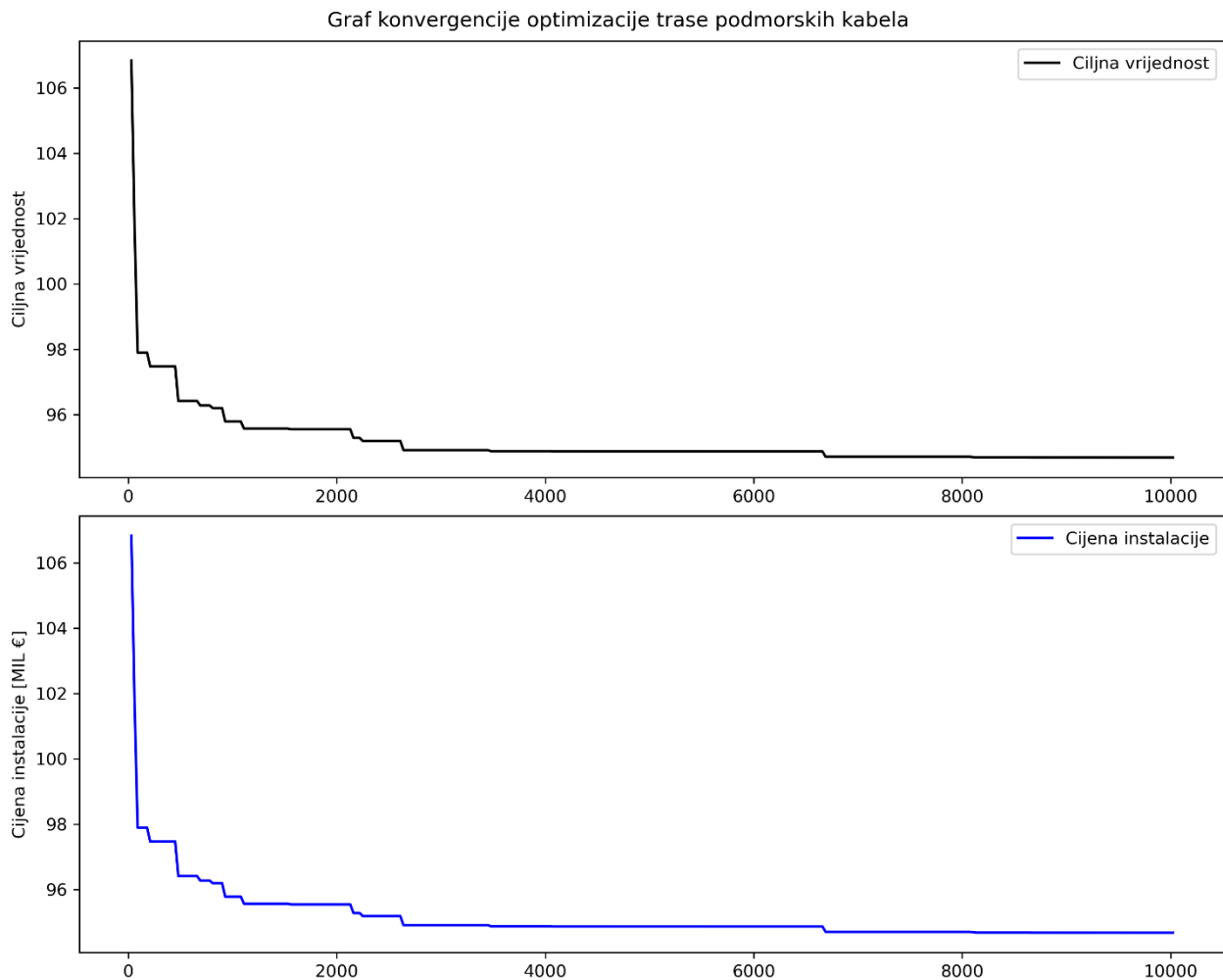
Na grafovima konvergencije prikazani na slikama 6-1. i 6.2. vidljivi su svi elementi koji pokazuju da je optimizacija uspješno odrađena: brza početna konvergencija, stablina konvergencija, stabilno najbolje rješenje i mala divergencija.

Graf konvergencije optimizacije trase podmorskog cjevovoda na *slici 6-1.* sastoji se od 3 manja grafa, na prvom manjem grafu prikazana je ciljna vrijednost, te njeno postupno smanjenje kroz trajanje optimizacije. Drugi graf prikazuje cijena eksploatacije, a treći cijena instalacije.



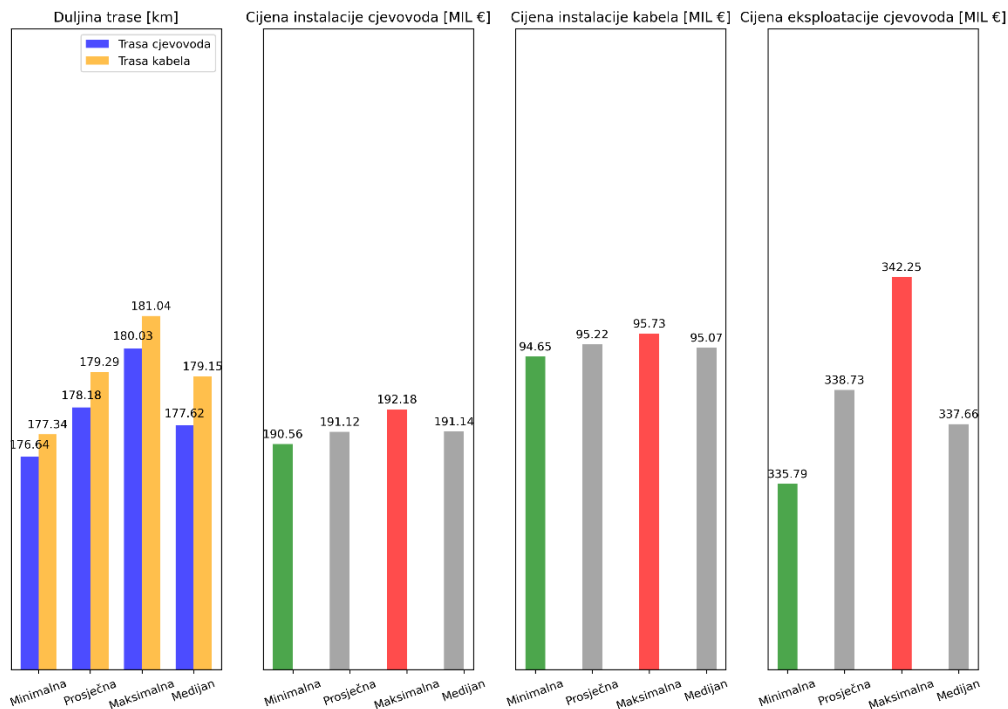
*Slika 6-1. Graf konvergencije pri optimizaciji trase podmorskog cjevovoda*

Graf konvergencije optimizacije trase podmorskih kabela na slici 6-2. sastoji se od 2 manja grafa, identičnog izgleda. Na prvom manjem grafu prikazana je ciljna vrijednost, a na drugom grafu cijena instalacije. Grafovi su identični jer se za dobivanje ciljne vrijednosti koristila samo cijena instalacije u odnosu na graf prikazan na slici 6-1. gdje se zbrajala vrijednost instalacije i eksploatacije.



*Slika 6-2. Graf konvergencije optimizacije trase podmorskih kabela*

Na slici 6-3. prikazan je medijan, minimalna, prosječna i maksimalna vrijednost o podacima dobivenih kroz 24 optimizacije koji opisuju duljinu trase, cijenu instalacije i eksploatacije. Prema podacima iz slike 6-3. može se zaključiti da razlika minimalnih i maksimalnih vrijednosti optimizacije nije značajna, te da su postavke optimizacije prikladno odabrane. Zelenom bojom je označeno odabrano rješenje optimizacije podmorske trase cjevovoda i kabela, a crvenom bojom najgore rješenje.



Slika 6-3. Analiza dobivenih vrijednosti kroz sve optimizacije

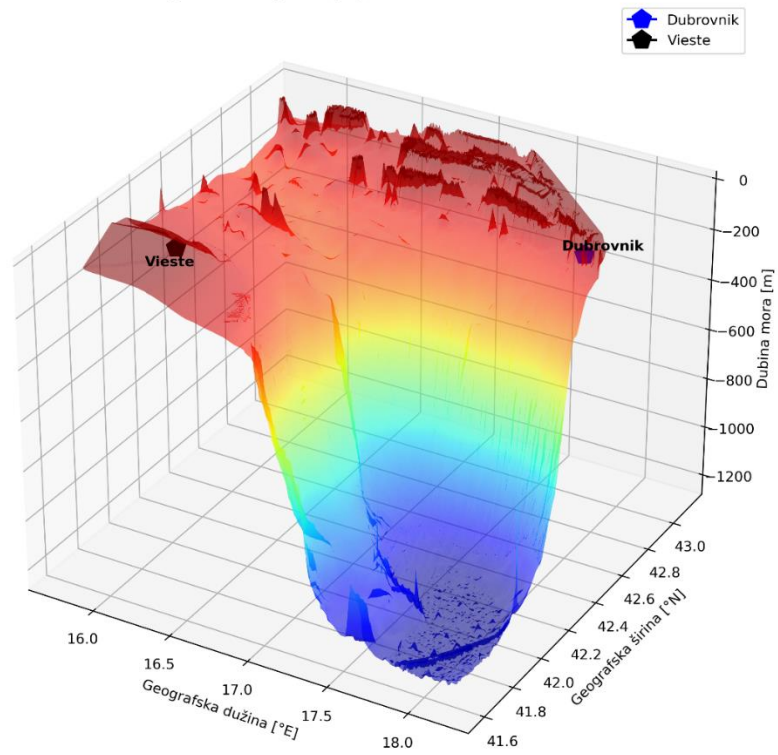
### 6.1. Rezultati optimizacije

U poglavljima (6.1.1) i (6.2.1) prikazani su rezultati optimizacije podmorske trase cjevovoda i kabela na području gradova Dubrovnik-Vieste, točke koje predstavljaju gradove Dubrovnik i Vieste udaljene su 173.5 km ukoliko bi te točke spojili ravnom crtom na razini površine mora.

Na slikama 6.4 i 6.5 prikazan je reljef mora na području gradova Dubrovnik i Vieste iz dva različita kuta. Potrebno je napomenuti da velika udubina na slikama 6.4 i 6.5 izgleda preuveličano zbog velike razlike u skali geografske širine [°N] i geografske dužine [°E] naspram dubine vode.

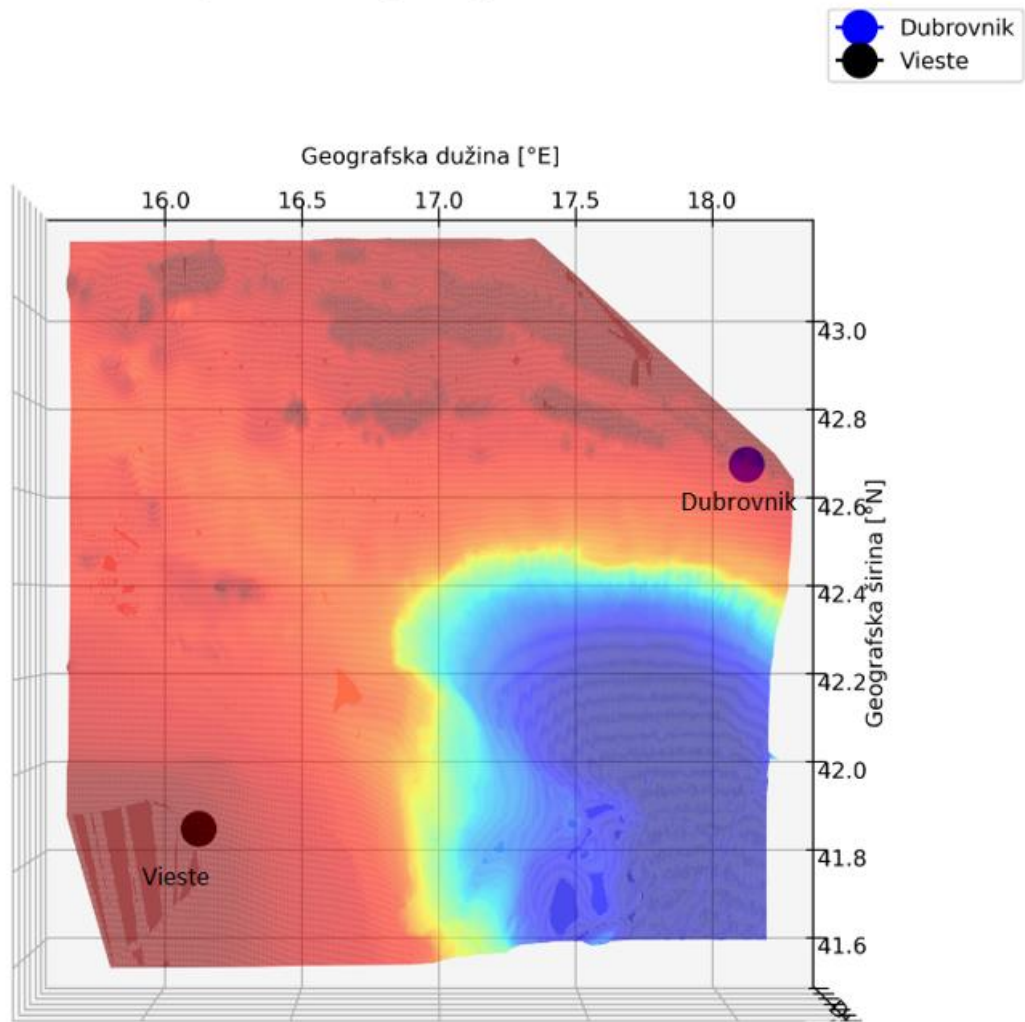


Reljef mora na području gradova Dubrovnik-Vieste



*Slika 6-4. Reljef mora na području gradova Dubrovnik-Vieste – trodimenzionalna (3D) vizualizacija*

## Prikaz reljefa mora na području Dubrovnik-Vieste

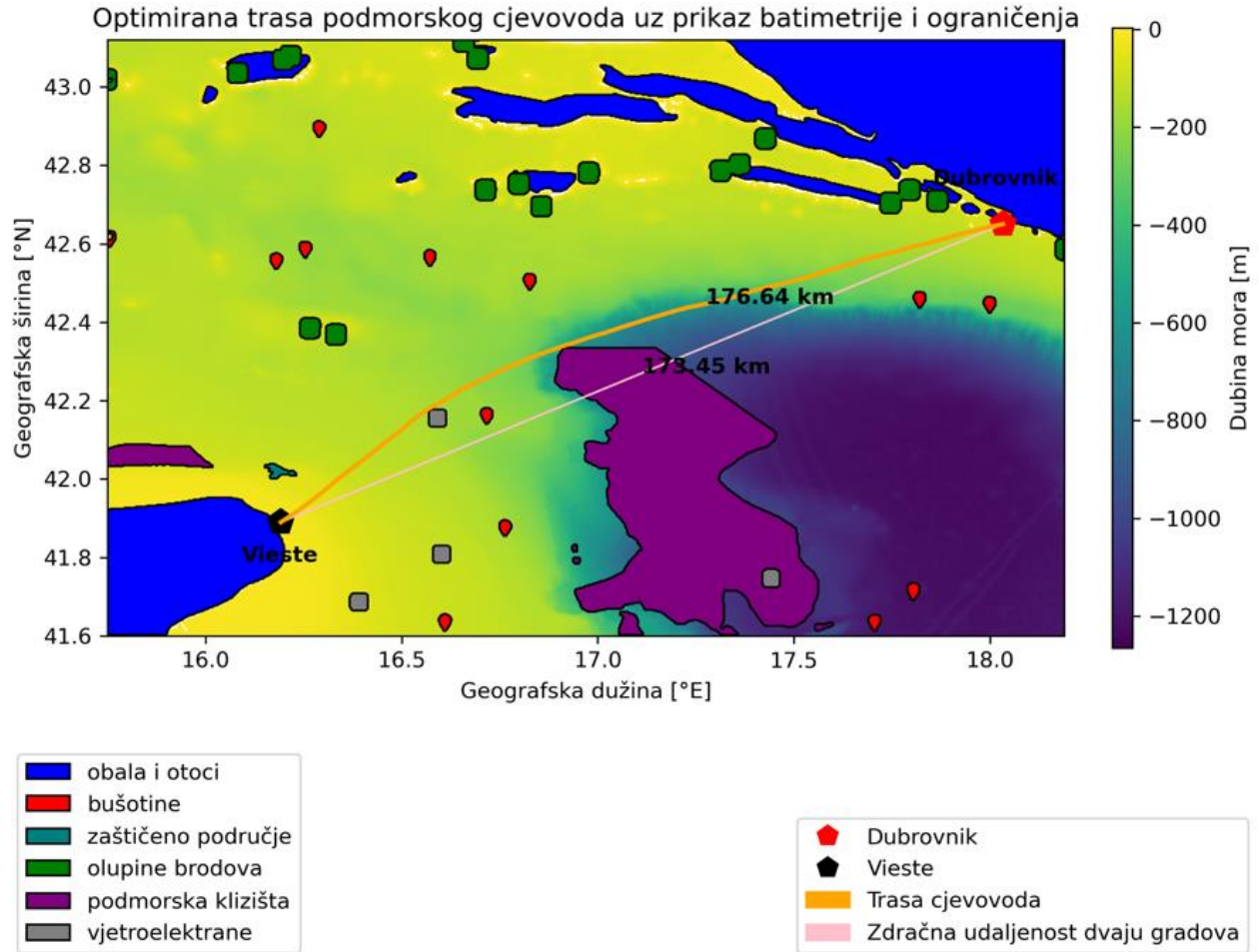


Slika 6-5. Reljef mora na području gradova Dubrovnik-Vieste – pogled odozgo

### 6.1.1. Rezultat optimizacije trase podmorskog cjevovoda

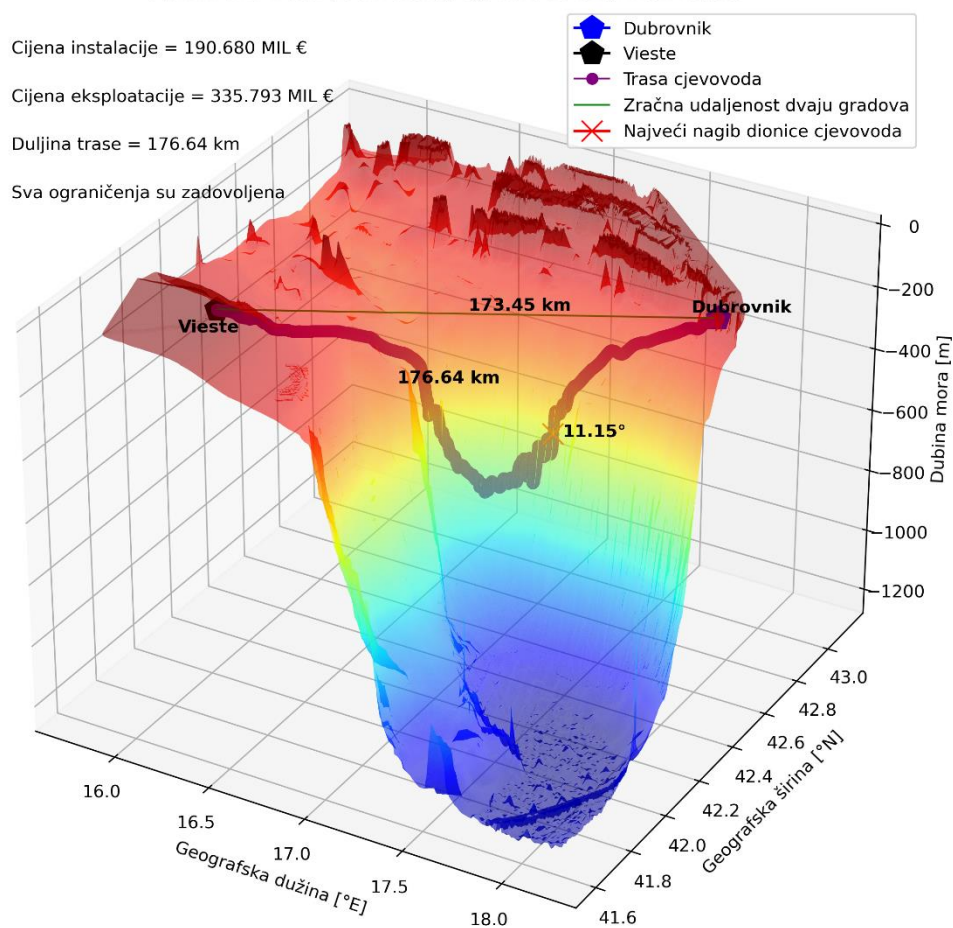
U ovom radu pretpostavljeno je da se trasa podmorskog cjevovoda polaže su u Jadransko more koristeći S-LAY metodu, odabranu zbog prikladne dubine mora i promjera cijevi. Pretpostavlja se da se u prosjeku dnevno može položiti 4.5 km cjevovoda, a dnevni najam broda iznosi 600 000 €. Optimalna trasa podmorskog cjevovoda prikazan je na slikama 6-6, 6.7, 6.8. i 6.9. Podaci o ukupnoj finansijskoj investiciji i specifikacijama trase podmorskog cjevovoda prikazani su u tablici 7. Optimalana trasa cjevovoda je duga 176.64 km, te ukupna finansijska investicija potrebna za instalaciju i eksploataciju trase, te pokrivanje dodatnih troškova iznosi 550.473 milijuna (MIL) €.

Vrijeme potrebno za instalaciju trase podmorskog cjevovoda je 40 dana i potrebna je pumpa jakosti od 9.583 MW kako bi nafta mogla strujati cjevovodom.

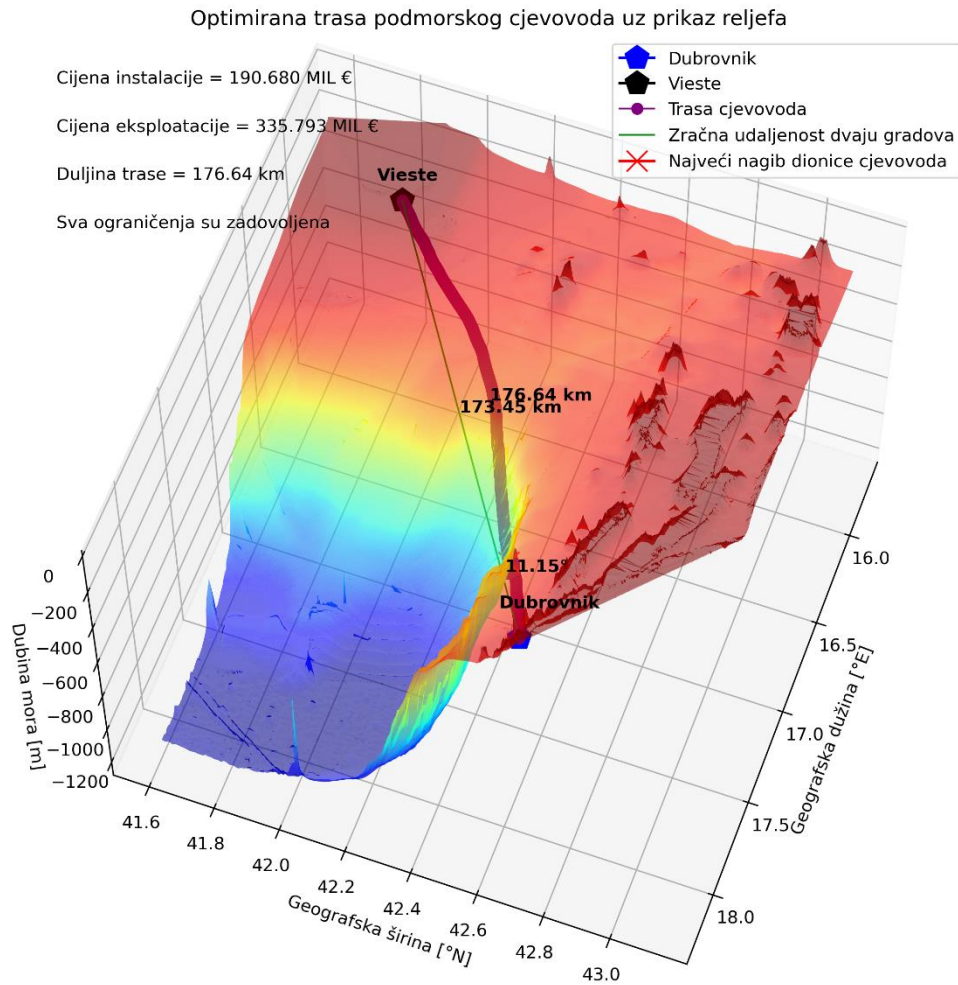


Slika 6-6. Dvodimenzionalni (2D) prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda koja zadovoljava sva navedena ograničenja

### Optimirana trasa podmorskog cjevovoda uz prikaz reljefa



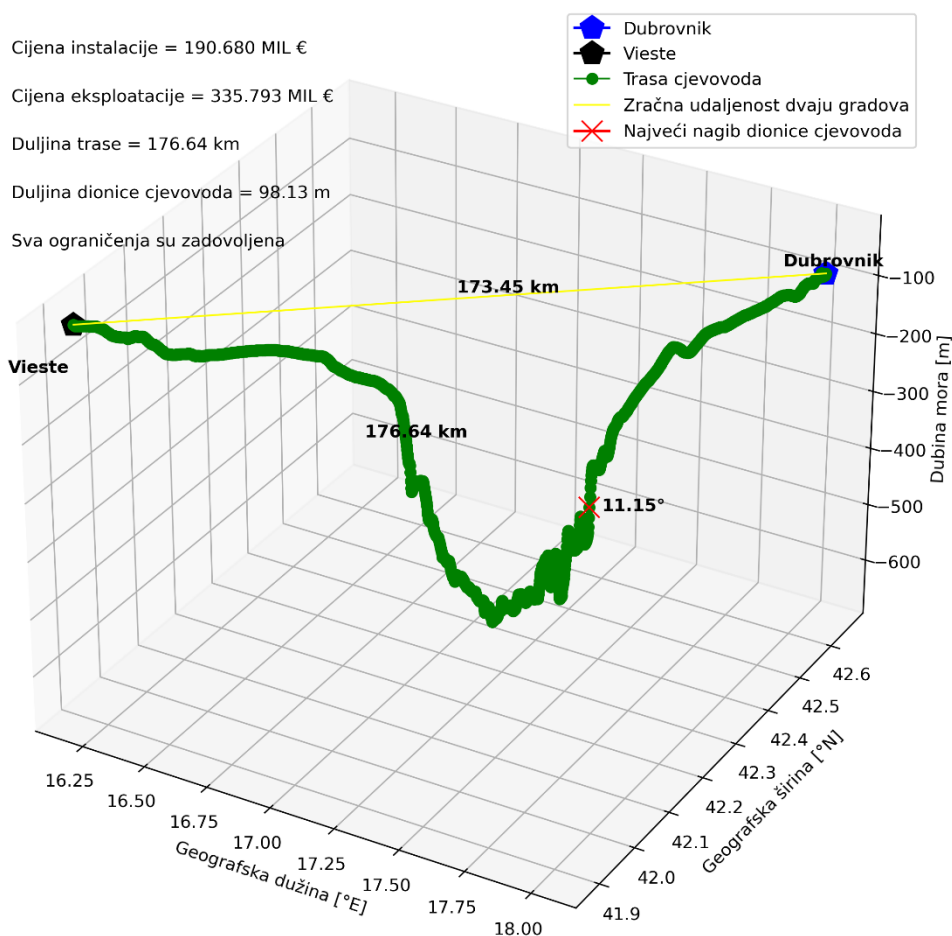
*Slika 6-7. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda uz prikaz reljefa. Duljina trase cjevovoda iznosi 176.64 km, cijena instalacije iznosi 190.68 MIL €, a cijena eksploatacije iznosi 335.793 MIL €*



*Slika 6-8. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda – drugi pogled*

Potrebno je naglasiti da na slici 6-9. izgled nagiba dionica cjevovoda je prikazan preuveličano zbog ogromne razlike veličine skale x i y osi naspram z osi, te u stvarnosti na nijednoj dionici trase nagib cjevovoda nije veći od 11.15°.

### Vizualizacije optimirane trase podmorskog cjevovoda



Slika 6-9. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda.

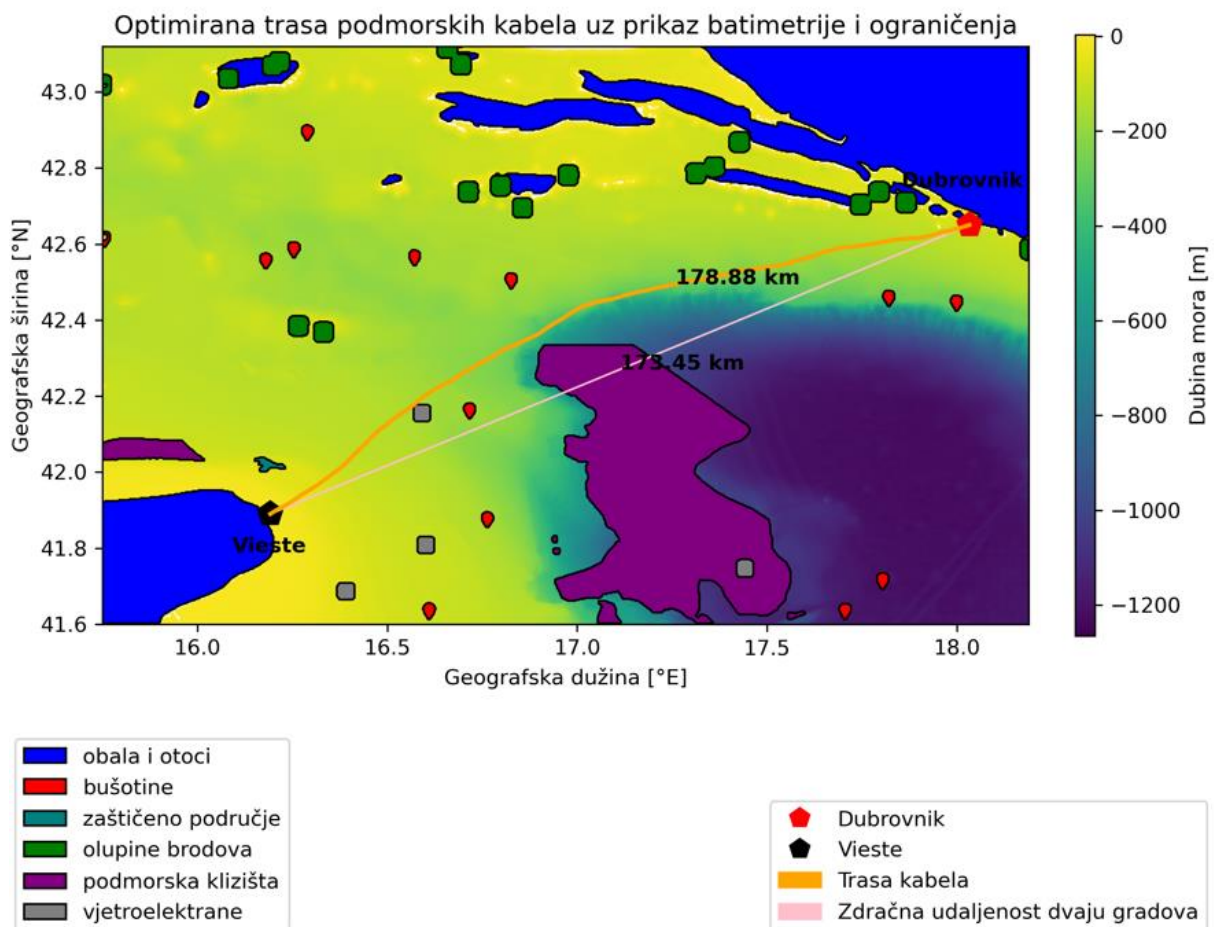
Tablica 7. Financijska investicija i specifikacija trase podmorskog cjevovoda

Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Duljina trase cjevovoda	176.64	km
Duljina dionice cjevovoda	98.13	m
Dnevni limit polaganja	4500	m/dan
Broj dana instalacije	40	dan
Dnevni najam broda	600000	€/dan
Potrebna snaga pumpe	9.583	MW
Cijena instalacije	190.68	MIL €

Cijena eksploatacije	335.793	MIL €
Dodatni troškovi	24	MIL €
Svi troškovi	550.473	MIL €

### 6.1.2. Rezultat optimizacije trase podmorskih kabela

U prosjeku se dnevno polaže 5 km kabela dnevno, a dnevni najam broda iznosi 500 000 €. Optimalna trasa podmorskog kabela prikazan je na slikama 6-10, 6.11, 6.12. i 6.13. Podaci o ukupnoj financijskoj investiciji i specifikacijama trase podmorskih kabela prikazani su u tablici 8. Optimalana trasa kabela je duga 178.88 km, te financijska investicija potrebna za instalaciju trase kabela i pokrivanje dodatnih troškova iznosi 112.647 MIL €. Vrijeme potrebno za instalaciju trase podmorskih kabela je 36 dana.



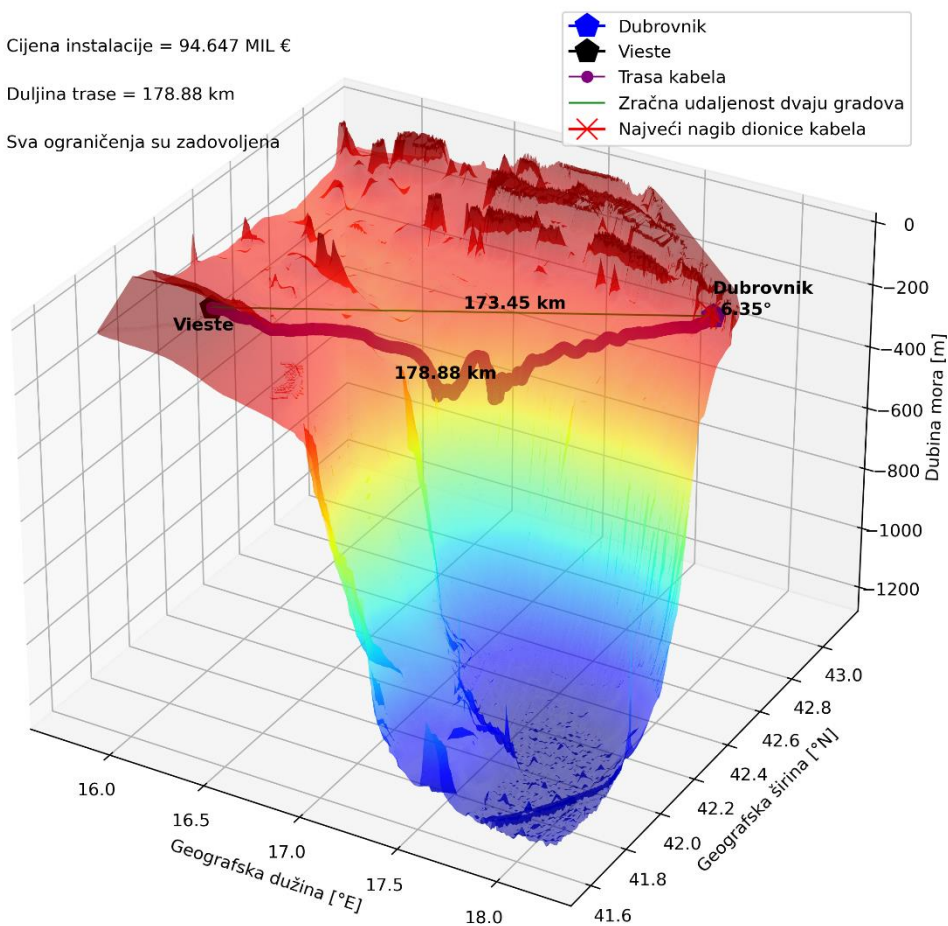
Slika 6-10. 2D prikaz optimalne rute trase podmorskog kabela koja poštuje sva navedena ograničenja

### Optimirana trasa podmorskih kabela uz prikaz reljefa

Cijena instalacije = 94.647 MIL €

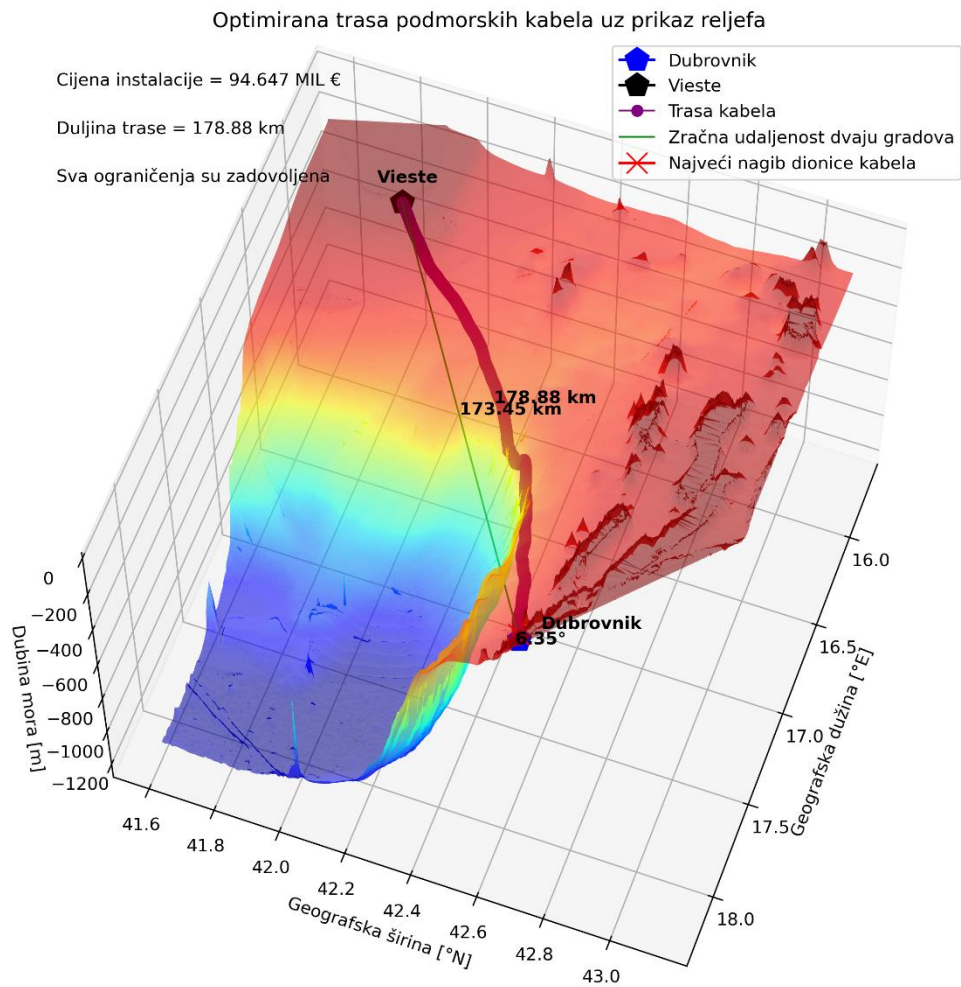
Duljina trase = 178.88 km

Sva ograničenja su zadovoljena



Slika 6-11. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskih kabela uz prikaz reljefa. Duljina trase kabela iznosi 178.88 km, cijena instalacije iznosi 94.647 MIL €

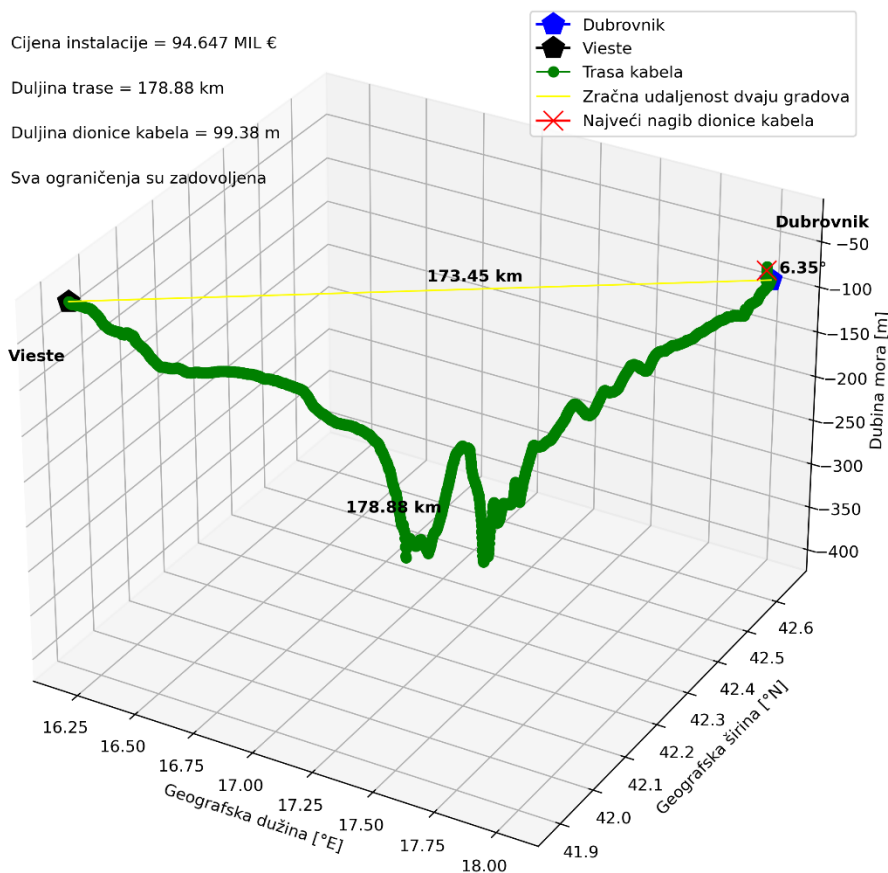




*Slika 6-12. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskih kabela – drugi pogled*

Potrebno je naglasiti da isto kao i na slici 6-9. izgled nagiba dionica kabela na slici 6-13. je prikazan preuveličano zbog ogromne razlike veličie skale x i y osi naspram z osi, te u stvarnosti na nijednoj dionici trase nagib kabela nije veći od 6.35°, nego je uglavnom u rasponu od 0° do 5°.

Vizualizacija optimirane trase podmorskih kabela



Slika 6-13. 3D prikaz optimalne trase podmorskih kabela.

Tablica 8. Financijska investicija i specifikacija trase podmorskih kabela

Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Duljina trase kabela	178.88	km
Duljina dionice kabela	99.31	m
Dnevni limit polaganja	5000	m/dan
Broj dana instalacije	36	dan
Dnevni najam broda	500000	€/dan
Cijena instalacije	94.647	MIL €
Dodatni troškovi	18	MIL €
Svi troškovi	112.647	MIL €

## 7. ZAKLJUČAK

Pronalazak optimalne rute trase, njena instalacija i osiguravanje optimalnog rada veoma je vremenski, financijski i tehnički zahtjevan proces. Ukoliko se pojave oštećenja podmorskog cjevovoda i kabela potrebno je uložiti velika financijska sredstva u pronalazak oštećenja i njihov popravak, te ovisno o dubini na kojoj se oštećenja nalaze popravak može biti skup i kompleksan. Potrebno je paziti na koju se rutu postavlja trasa podmorskih cjevovoda i kabela kako bi osigurali manji rizik od oštećenja nastalih uslijed ljudske aktivnosti ili prirodnih pojava, te bolje uvjete instalacije i eksploatacije trase. Loši uvjeti instalacije i eksploatacije trase imaju veliki utjecaj na potrebnu financijsku investiciju potrebnu za optimalan rad trase zbog mogućeg ulaska pojedinih dionica trase u nedozvoljena područja i/ili povećanja faktora cijene trase koji negativno utječu na cijenu instalacije trase. Iz navednih razloga optimizacija trase je neophodni alat za odabir prikladne rute trase i njeno efikasno postavljanje.

MCDA metoda zajedno sa PSO algoritmom pokazale su se kao ključni alati pri optimizaciji trase podmorskog cjevovoda i kabela, gdje je MCDA metoda postavila razne opcije i ograničenja na koje PSO algoritam treba odgovoriti za uspješnu optimizaciju trase. Optimizaciju trase je potrebno što bolje izvesti jer male razlike u krajnjem rezultatu optimizacije su značajne i mogu povisiti ukupnu cijenu trase na relaciji Dubrovnik-Vieste u iznosu od nekoliko milijuna eura. Korištenjem kombinacije MCDA metode i PSO algoritma može se dobiti optimalno rješenje odabira rute trase koje ovisi o: broju evaluacija modela, broju optimizacijski varijabla, parametrima PSO algoritma, kvaliteti batimetrije, vrijednostima faktorima cijene trase, te broju i poziciji ograničenja. Promjenom vrijednosti faktora cijene trase i pozicijom ograničenja optimizacija drugačije ocijenjuje ciljnu vrijednost, te optimalne trasa treba poprimiti drugu rutu.

Optimirana trasa podmorskog cjevovoda prikazana na *slici 6.6.* duga je 176.64 km i ukupna financijska investicija potrebna za njenu instalaciju i eksploataciju kroz 25 godina s dodatnim troškovima iznosi 550.473 milijuna eura, dok vrijeme trajanja instalacije se pretpostavlja na 40 dana. Optimalna trasa podmorskih kabela prikazana na *slici 6.10.* dužine 178.88 km, te njena cijena instalacije s dodatnim troškovima iznosi 112.647 milijuna eura, a vrijeme trajanja instalacija se pretpostavlja na 36 dana.

Ukoliko se uspoređi optimalna trasa podmorskih kabela s optimalnom trasom podmorskog cjevovoda vidljive su dvije različite rute optimalne trase. Optimalna trasa podmorskih kabela je duža od optimalne trase podmorskog cjevovoda za 1.98 km s manjim maksimalnim nagibom u iznosu od  $4.8^\circ$  i njena optimizacija ovisi samo o troškovima instalacije koji su znatno osjetljiviji na porast nagiba nego od troškova eksploatacije.

U ovom radu korišteni su javno dostupni podaci za optimiranje trase podmorskih cjevovoda i kabela, te batimetrija točnosti prikupljena podataka dubine mora u iznosu od 100 s 100 m. Ukoliko se donese odluka za izgradnju stvarne trase podmorskog cjevovoda i kabela potrebno je napraviti dodatna pouzdana morska istraživanja na željenoj ruti koristeći brodove specijalizirane za morska istraživanja koji su opremljeni s daljinskim upravljanim ronilicama i drugom specijaliziranom opremom. Uzevši sve ovo u za pronalazak pouzdanije optimalne trase potrebno je učitati veću količinu potrebnih podataka, te povećati broj optimizacijski varijabli tako da duljina dionice trase odgovara točnosti prikaza batimetrije, te time zahtjevnost i vrijeme optimizacije znatno raste.

## LITERATURA

- [1] „The first Global Integrated Marine Assessment: World Ocean Assessment“, Chapter 19 – Submarine Cables and Pipelines, United Nations, 2016.
- [2] Rafael d'Amore-Domenech „i dr.“, On the bulk transport of green hydrogen at sea: Comparison between submarine pipeline and compressed and liquefied transport by ship
- [3] Submarine Cables UK, Submarine Power Cables Ensuring the lights stay on!
- [4] A.H. Mousselli, „Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods“, PennWell Publishing Company Tulsa, Oklahoma
- [5] DNV-RP-0360 Subsea power cables in shallow water, March 2016.
- [6] ABC geografija, „Nadalje smo ovisno o podvodnim kablovima“, <https://abcgeografija.com teme/podvodni-kablovi/>, pristupljeno (07.07.2023.)
- [7] OHTA Tsutomu, NISHIYAMA Tomohisa, „Route Design/Cable Laying Technologies for Optical Submarine Cables“
- [8] TDN Energy, „Concrete mattress, <https://tdnenergy.com/concrete-mattress/>, pristupljeno (10.07.2023.)
- [9] National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce, „What is an ROV?“, <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/rov.html>, pristupljeno (12.07.2023.)
- [10] Construction of subsea pipelines, Subsea engineering and training experts Volume one, Jee limited, 2013.
- [11] Offshore Engineering, „4. Pipelaying Methods“, <https://www.offshoreengineering.com/oil-gas-pipelines/pipelaying/>, pristupljeno (13.07.2023.)
- [12] Construction of subsea pipelines, Subsea engineering and training experts Volume two, Jee limited, 2013.

- [13] DrillingFormulas.Com, „Pipeline Towing Method for Pipeline Installation“, <https://www.drillingformulas.com/pipeline-towing-method-for-pipeline-installation/>, pristupljeno (15.07.2023.)
- [14] Construction of subsea pipelines, Subsea engineering and training experts Volume three, Jee limited, 2013.
- [15] EMAS AMC, „Conventional Subsea Pipeline Installation Methodologies, Potential Failure Modes and Considerations for Installation Engineering
- [16] Wikipedia, „Multiple-criteria decision analysis“, [https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-criteria\\_decision\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-criteria_decision_analysis), pristupljeno (17.07.2023.)
- [17] Ronald C. Estoque, University of Tsukuba, „GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis (in Natural Resource Management)
- [18] European Marine Observation and Data Network (EMODnet), EMODnet Map Viewer, <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/>, pristupljeno (07.07.2023.)
- [19] David Long, British Geological Survey, „BGS Detailed explanation of seabed sediment modified folk classification“
- [20] P. Mole, J. Featherstone, S. Winter, SubOptic San Francisco 1997. „Cable Protection – Solutions through new installation and burial approaches”
- [21] Carbon Trust February 2015., „Cable Burial Risk Assessment Methodology – Guidance for the Preparation of Cable Burial Depth of Lowering Specification“
- [22] Trenchlesspedia, „Trenching“, <https://www.trenchlesspedia.com/definition/2571/trenching>, pristupljeno (18.07.2023.)
- [23] Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, „Trenching and Excavation Safety“
- [24] National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce, „What is dredging“, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/dredging.html>, pristupljeno (18.07.2023.)

- [25] Maarten Vanneste i dr., Norewegian Geotehcnical Institute and International Centre for Geohazards, „Submarine landslides and their consequences: What do we know, what can we do?“
- [26] Ivić, S., „Optimizacije u tehnici – Formulacija problema najkraće putanje“
- [27] P. Dauni, Journal of Physics: Conference Series 2019., Implementation of Haversine formula for school location tracking“
- [28] Wikipedia, „Shapefile“, <https://en.wikipedia.org/wiki/Shapefile>, pristupljeno (19.07.2023.)
- [29] Indago, Tehnički Fakultet Rijeka, <https://pypi.org/project/Indago/>, pristupljeno (07.07.2023.)
- [30] Jaco F. Schuttler, EGM 6365 - Structural Optimization Fall 2005., „The Particle Swarm Optimization Algorithm“
- [31] Ivić, Stefan (2014.), „Modeliranje i optimizacija polaganja podmorskih cjevovoda: doktorska disertacija (Doctoral thesis)“
- [32] Ivić, S., Sušanj, A. I Družeta, S. (2013.), Peti susret Hrvatskog društva za mehaniku. Donja Stubica, 6.-7. lipnja 2013. „Optimizacija trase cjevovoda s obzirom na isplativost instalacije i eksploatacije“.
- [33] Ivić, S., Staver, I., Kranjčević, L., Šesti susret Hrvatskog društva za mehaniku. Rijeka, 29-30. svibnja 2014., „PSO optimizacija mreže cjevovoda s obzirom na troškove instalacije i eksploatacije“.
- [34] Ivić, S., „Optimizacija u tehnici - predavanja“
- [35] M.L. Fernandez, Delft Unviersity of Technology, „Tow techniques for marine pipeline installation“
- [36] American Bureau of Shipping, August 2016., „Guidance notes on Subsea Pipeline Route Determination
- [37] RedPenguin, The Crown Estate 2012., Export transmission cables for offshore renewable installations – Principles of cable routeing and spacing

- [38] Mamatsopoulus V., Michailides C., Theotkoglou E., Journal of Marine Science and Engineering, „An Analysis Tool for the installation of Submarine Cables in an S-Lay Configuration Including “In and Out of water“ Cable segments
- [39] Makrakis N., Psarropoulos P., Tsompanakis Y., Journal of applied sciences, „GIS-Based Optimal Route Selection of Submarine Cables Considering Potential Seismic Fault Zones“
- [40] Christine Devine, Fugro, „GIS Techniques to Meet Offshore Pipeline Routing Challenges“
- [41] S. Neelamani, K. Al-Banaa, Kuwait Institute for Scientific Research, „Minimum Safe Burial Depth of Submarine Pipelines in Well Graded and High Hydraulic Conductivity Sand“
- [42] Lionel Carter i dr., UNEP-WCMC Biodiversity Series No. 31. ICPC/UNEP/UNEP-WCMC, „Submarine cables and the oceans: connecting the world“



## POPIS OZNAKA I KRATICA

MCDA - *Multi-Criteria Decision Analysis* (Analiza odlučivanja s više kriterija)

PSO – Particle swarm optimization (Optimizacija rojem čestica)

SWIFT – *Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication* (Društvo za svjetsku

DC – *Direct current* (Istosmjerna struja)

AC – *Alternating current* (Izmjenična struja)

ALARP – *As Low As Reasonably Practicable* (Koliko god je razumno izvedivo)

VIV – *Vortex induced vibration* (Vrtložno potaknutim vibracijama VIV (engl.).

UXO – *Unexploded Ordnance* (Eksplozivna naprava)

ROV – *Remotely operated vehicle* (Daljinski upravljana ronilica)

DP – *Dynamic Positioning* (Dinamičko pozicioniranje)

AHT – *Anchor Handling Tug* (Tegljači za postavljanje sidra)

BPI – *Burial Protection Index* (Indeks ukopa)

CBRA – *Cable Burial Risk Assessment* (Metoda procjene rizika)

EMODnet - *European Marine Observation and Data Network* (Europske mreže za promatranje mora i prikupljanje podataka)

GIS – *Geographic Information System* (Geografski informacijske sustav)

RGB – *Red, Green, Blue* (Crvena, zelena, plava)

HSV – *Hue, Saturation, Value* (Nijansa, zasićenje, vrijednost).

$f_i$  – faktori cijene trase

$\theta$  – nagib dionice

$\theta_{rot}$  – kut rotacije

$l_s$  – omjer skaliranja

$C_I$  – cijena instalacije trase

$L$  – duljine dionice trase

$C$  – cijena dionice trase

$T$  – period eksploatacije cjevovoda

$D$  – promjer cijevi

$C_E$  – cijena eksploatacije

$P$  – snage pumpe

$C_E$  – cijena eksploatacije

$Q$  – protok

$C_E$  – cijena eksploatacije

$h_L$  – duljinski gubici

$Q$  – protok

$eps$  – hrapavost cijevi

$\nu$  – kinematička viskoznost nafte

$\rho_n$  – gustoća nafte

$C_{cijevi}$  – cijena cijevi

$eps$  – hrapavost cijevi

$C_{elek}$  – cijena električne struje

$\eta$  – iskoristivost pumpe

$v$  – brzina strujanja u cijevi

$Re$  – reynoldsov broj

$\mu_{TR}$  – koeficijent trenja

$h_p$  – dobavna visina pumpe

$C_D$  – dodatni troškovi instalacije trase

$C_B$  – cijena dnevnog najma broda

$L_U$  – ukupna dužina trase

$D_L$  – dnevni limit instalacije trase

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Moguće opasnosti koje negativno utječu na sigurnost infrastrukture podmorskog cjevovoda i kabela (preuzeto iz [5]).....	5
Slika 2-2. Betonski madrac (Preuzeto iz [8]).....	6
Slika 2-3. Daljinski upravljana ronilica, ROV (preuzeto iz [9]).....	8
Slika 2-4. J-LAY, S-LAY i Reel-LAY metoda (preuzeto iz [15]) .....	11
Slika 3-1. Vrsta morskog tla prema folk5 klasifikaciji (preuzeto iz [18]).....	14
Slika 4-1. Pojednostavljena parametrizacija putanje (preuzeto iz [26]) .....	19
Slika 4-2. Batimetrija F6 zone .....	25
Slika 4-3. Batimetrija na području Dubrovnik-Vieste .....	26
Slika 4-4. Ograničenja trase koja ruta trase podmorskih cjevovoda i kabela mora zaobići (preuzeto iz [18]).....	27
Slika 4-5. Folk 5 klasifikacija morskog dna. Poredano po poželjnosti odabira vrste morskog dna (pijesak je poželjniji od kamena i stijena) (preuzeto iz [18]).....	27
Slika 4-6. Pozicije brodskih olupina (preuzeto iz [18]) .....	29
Slika 4-7. Određivanje HSV vrijednosti piksela potrebnih za pozicioniranje brodskih olupina ..	29
Slika 4-8. Pronalazak konture brodskih olupina .....	30
Slika 4-9. Vizualizacija ograničenja trase (shapefile formatu).....	31
Slika 4-10. Vizualizacija folk5 klasifikacije morskog tla (shapefile formatu) .....	32
Slika 4-11. Vizualizacija batimetrije i ograničenja trase (shapefile format) .....	33
Slika 6-1. Graf konvergencije pri optimizaciji trase podmorskog cjevovoda .....	38
Slika 6-2. Graf konvergencije optimizacije trase podmorskih kabela .....	39
Slika 6-3. Analiza dobivenih vrijednosti kroz sve optimizacije .....	40
Slika 6-4. Reljef mora na području gradova Dubrovnik-Vieste – trodimenzionalna (3D) vizualizacija .....	41
Slika 6-5. Reljef mora na području gradova Dubrovnik-Vieste – pogled odozgo.....	42
Slika 6-6. Dvodimenzionalni (2D) prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda koja zadovoljava sva navedena ograničenja .....	43
Slika 6-7. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda uz prikaz reljefa. Duljina trase cjevovoda iznosi 176.64 km, cijena instalacije iznosi 190.68 MIL €, a cijena eksploatacije iznosi 335.793 MIL € .....	44
Slika 6-8. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda – drugi pogled.....	45
Slika 6-9. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskog cjevovoda.....	46
Slika 6-10. 2D prikaz optimalne rute trase podmorskog kabela koja poštuje sva navedena ograničenja.....	47
Slika 6-11. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskih kabela uz prikaz reljefa. Duljina trase kabela iznosi 178.88 km, cijena instalacije iznosi 94.647 MIL €.....	48
Slika 6-12. 3D prikaz optimalne rute trase podmorskih kabela – drugi pogled .....	49
Slika 6-13. 3D prikaz optimalne trase podmorskih kabela. ....	50

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Faktori cijene trase ovisno o vrsti morskog tla .....	14
Tablica 2. Koeficijent faktora cijene trase ovisno o nagibu trase .....	15
Tablica 3. Koeficijent faktora cijene trase ovisno o dubino vode.....	15
Tablica 4. Faktori cijene trase ovisno o potrebama ukopavanja trase .....	16
Tablica 5. Vrijednosti potrebne za izračun troškova eksploatacije i instalacije trase cjevovoda .	21
Tablica 6. Vrijednosti parametara PSO algoritma .....	35
Tablica 7. Financijska investicija i specifikacija trase podmorskog cjevovoda .....	46
Tablica 8. Financijska investicija i specifikacija trase podmorskih kabela .....	50

## SAŽETAK

Ovaj rad istražuje ključne aspekte optimizacije trase podmorskih cjevovoda i kabela, s ciljem postizanja maksimalne: sigurnosti, učinkovitosti, ekonomske isplativosti i održivosti. Trasa podmorskih cjevovoda i kabela optimirana je PSO „Particle Swarm Optimization“ (hrv. *Optimizacija rojem čestica*) algoritmom prema raznim uvjetima i ograničenjima koje je postavila analiza odlučivanja s više kriterija MCDA (engl. *Multi-Criteria Decision Analysis*). Cilj optimizacije je smanjenje cijene instalacije i eksploatacije trase podmorskih cjevovoda i kabela uz odabir optimalnih uvjeta, te zadovoljavanje svih ograničenja na cijeloj duljini trase postavljenih MCDA metodom. Optimalni uvjeti uključuju kombinaciju minimalne duljine, nagiba i dubine ukopavanja trase, uz odabir prigodne vrste morskog dna. Ograničenja su jedino zadovoljena ako trase izbjegne sva područja koja bi mogla imati negativan utjecaj na sigurnost trase ili okoliša poput područja gdje se nalaze: bušotine, podmorska klizišta, ribarska aktivnost, olupine brodova, vjetroelektrane i zaštićena područja. U radu je opisan model procjene cijene instalacije, eksploatacije i dodatnih troškova prema odabranoj ruti trase, te način planiranja, postavljanja i korištenja podmorske trase cjevovoda i kabela.

**Ključne riječi:** Optimizacija trase, podmorski cjevovod, podmorski kabeli, optimizacija rojem čestica, analiza odlučivanja s više kriterija, uvjeti, ograničenja, cijena instalacije, cijena eksploatacije

## ABSTRACT

This paper explores the key aspects of optimizing the routes of submarine pipelines and cables, aiming to achieve maximum safety, efficiency, cost-effectiveness, and sustainability. The route of submarine pipelines and cables is optimized using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm based on various conditions and constraints set by the Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) method. The optimization goal is to reduce the installation and operation costs of the submarine pipelines and cables by selecting optimal conditions while satisfying all constraints along the route set by the MCDA method. Optimal conditions involve a combination of minimum length, slope, and burial depth of the route, along with the selection of suitable seabed types. Constraints are only satisfied if the route avoids all areas that could have a negative impact on the safety of the route or the environment, such as areas containing boreholes, submarine landslides, fishing activity, shipwrecks, wind farms, and protected areas. The paper describes a model for assessing the installation and operation costs and additional expenses based on the selected route, as well as the planning, installation, and utilization of the submarine pipeline and cable route.

**Keywords:** Route optimization, submarine pipeline, submarine cables, particle swarm optimization, multi-criteria decision analysis, conditions, constraints, installation cost, operation cost