

# Optimizacija trase cjevovoda na digitalnom modelu terena

---

Janković, Laura

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:190:818831>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**OPTIMIZACIJA TRASE CJEVOVODA NA DIGITALNOM  
MODELU TERENA**

Rijeka, rujan 2022.

Laura Janković  
0069085912

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**OPTIMIZACIJA TRASE CJEVOVODA NA DIGITALNOM  
MODELU TERENA**

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

Komentor: Prof. dr. sc. Siniša Družeta

Rijeka, rujan 2022.

Laura Janković  
0069085912

Rijeka, 14. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**  
Predmet: **Računarske metode**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Laura Janković (0069085912)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Optimizacija trase cjevovoda na digitalnom modelu terena / Optimization of pipeline route on digital terrain model**

### Opis zadatka:

U uvodnom dijelu završnog rada potrebno je predstaviti problem utjecaja trase cjevovoda na troškove instalacije tj. izgradnje te na troškove eksploatacije tj. rada za zadani period eksploatacije. Definirati parametrizaciju trase cjevovoda preko relativnih kutova između ravnih segmenata trase. Implementirati interpolaciju digitalnom modelu terena, reljefa, vrste tla, vegetacije i ostalih prostornih čimbenika koji utječu na cijenu cjevovoda. Formulirati empirijske procjene troškova instalacije cjevovoda te izračun troškova eksploatacije za zadani period a na temelju hidrauličkog proračuna cjevovoda. Odabrati adekvatnu optimizacijsku metodu te provesti optimizacije rute cjevovoda na nekoliko različitih primjera. U zaključnom djelu završnog rada vizualizirati, analizirati te usporediti rezultate dobivene optimizacijom.

Polje znanstvenog područja: **Temeljne tehničke znanosti**

Grana znanstvenog područja: **Mehanika fluida**

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

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

Izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Prof. dr. sc. Siniša Družeta (komentor)

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, ja, Laura Janković samostalno izradila završni rad „Optimizacija trase cjevovoda na digitalnom modelu terena“ prema Uputama za izradu i samoarhiviranje završnog/diplomskog rada pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Stefana Ivića i prof. dr. sc. Siniše Družete.

---

Laura Janković

0069085912



## SADRŽAJ

1	UVOD .....	2
2	PRORAČUN TROŠKOVA TRASE CJEVOVODA .....	3
2.1	Proračun troškova instalacije .....	3
2.2	Proračun troškova eksploatacije .....	7
3	NUMERIČKA OPTIMIZACIJA .....	10
3.1	PSO metoda .....	10
3.2	FWA metoda.....	10
3.3	DE metoda .....	11
3.4	Izrada trase cjevovoda .....	11
3.5	Definiranje terena i obilježja terena.....	13
4	TESTNI SLUČAJ A .....	15
4.1	Opis terena i infrastrukture .....	15
4.2	Optimizacija trase cjevovoda.....	16
5	TESTNI SLUČAJ B .....	22
5.1	Opis terena i infrastrukture .....	22
5.2	Optimizacija trase cjevovoda.....	23
6	TESTNI SLUČAJ C .....	29
6.1	Opis terena i infrastrukture .....	29
6.2	Optimizacije trase cjevovoda.....	30
7	ZAKLJUČAK .....	36
	LITERATURA.....	37
	POPIS SLIKA .....	38
	POPIS TABLICA.....	39
	SAŽETAK.....	40
	ABSTRACT .....	41

# 1 UVOD

Cjevovod predstavlja niz cijevi koje zajedno s potrebnom opremom čine funkcionalnu cjelinu. Cjevovodima je moguće prenositi tekuće, plinovite, tjestaste te zrnate krute tvari. Skupina cjevovoda spojena u funkcionalnu cjelinu čini cjevovodnu mrežu. Cjevovod predstavlja vrlo ekonomičan način za transport tvari.

U ovom radu biti će opisana optimizacija trase cjevovoda na nekoliko digitalnih primjera reljefa. Optimizacija se provodi na temelju troškova instalacije i eksploatacije. Optimizacija trase cjevovoda može biti izuzetno važna u slučaju kada su troškovi cjevovoda izraženi u milijunima, jer tada i malo poboljšanje rezultira velikim uštedama.

Troškovi instalacije predstavljaju niz jednokratnih troškova. U sklopu ovoga rada obrađeni su troškovi kupnje samih cijevi, troškovi iskopavanja i zakopavanja kanala za polaganje cijevi te troškovi prekopavanja prometnica u slučaju da trasa cjevovoda prolazi preko postojeće prometne infrastrukture.

Troškovi eksploatacije predstavljaju dugotrajne troškove rada cjevovoda. Ovi troškovi ovise o konfiguraciji tla na kojem je položena trasa cjevovoda odnosno o visinskoj razlici koju cjevovoda mora savladati, o periodu eksploatacije te o lokalnim i dužinskim hidrauličkim gubicima.

U prvom dijelu rada dan je detaljan opis na koji način i pomoću kojih izraza su izračunati troškovi instalacije i troškovi eksploatacije. U nastavku je dan opis korištenih optimizacijskih metoda te opis postupka parametrizacije putanje prikladan za primjenu optimizacije. Na samom kraju rada opisani su digitalni modeli terena na kojima je provedena optimizacija te rezultati same optimizacije.



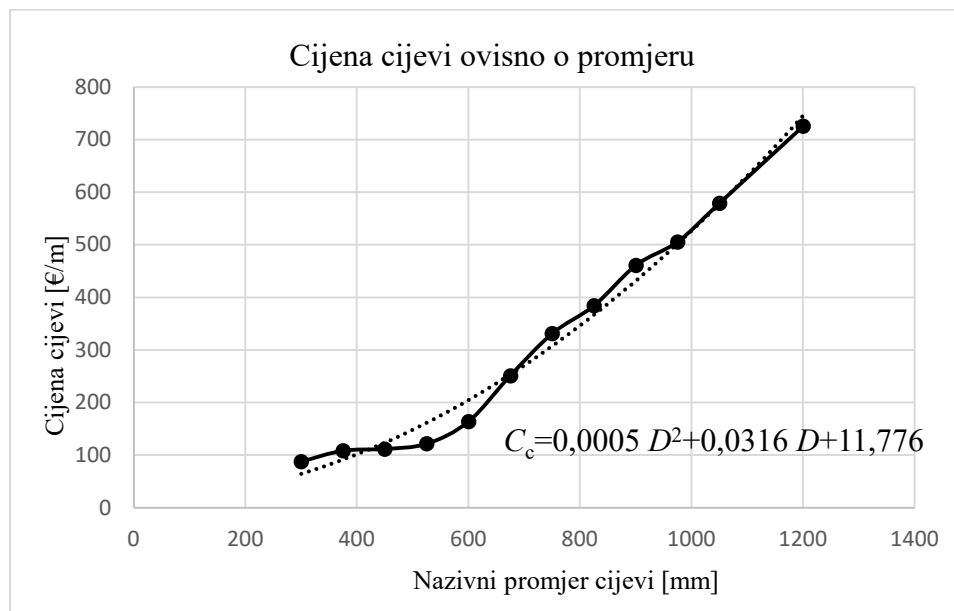
## 2 PRORAČUN TROŠKOVA TRASE CJEVOVODA

Trasu cjevovoda čini niz segmenata koji povezuju zadanu početnu i krajnju točku. U ovom slučaju medij koji cjevovod prenosi je voda. U nastavku razraditi će se troškovi koji se dijele na jednokratne troškove instalacije cjevovoda i na dugoročne troškove eksploatacije cjevovoda. Optimizacijskim postupkom želi se definirati trasa čiji će zbroj troškova instalacije i eksploatacije biti minimalan.

### 2.1 Proračun troškova instalacije

U troškove instalacije cjevovoda ubrajaju se troškovi iskopavanja kanala koji variraju ovisno o vrsti tla, troškovi savladavanja postojeće prometne infrastrukture te trošak kupovine samih cijevi.

Regresijom cijena cijevi različitih nazivnih promjera dobivena je regresijska krivulja kojom se određuje cijena cijevi odabranog nazivnog promjera.



Slika 2.1 Ovisnost cijene cijevi o promjeru [1]

Jednadžba cijene cijevi u ovisnosti o nazivnom promjeru cijevi glasi:

$$C_c = 0,0005 D^2 + 0,0316 D + 11,776 \quad (2.1)$$

gdje je:

$C_c$  – jedinična cijena cijevi

$D$  – nazivni promjer

Trošak kupovine samih cijevi ovisi o duljini cjevovoda, stoga se jedinična cijena cijevi množi sa ukupnom duljinom cjevovoda:

$$C_{c,uk} = C_c \cdot \sum_i l_i \quad (2.2)$$

gdje je:

$C_{c,uk}$  – ukupni trošak kupovine cijevi

$l_i$  – duljina pojedinog segmenta

Trošak iskopavanja kanala za jedan segment cjevovoda računaju se prema izrazu:

$$C_{u,i} = d_k \cdot h_k \cdot l_i \cdot k_{n,i} \cdot C_k \quad (2.3)$$

gdje je:

$d_k$  – širina kanala

$h_k$  – dubina kanala (0,6+D)

$k_{n,i}$  – koeficijent nagiba tla za pojedini segment

$C_k$  – fiksni trošak kopanja

Širina kanala  $\check{s}_k$  koji će se iskopati za postavljanje cijevi ovisi o promjeru cijevi koje se ugrađuju. U tablici 2.1 prikazane su vrijednosti širine kanala u ovisnosti o promjeru cijevi.

Tablica 2.1 Promjeri cijevi i širina kanala [2]

PROMJER CIJEVI D [mm]	ŠIRINA KANALA [m]
do 200	D + 0,4
200 do 400	D + 0,6
400 do 800	D + 0,8
800 do 1500	D + 1,0
od 1500	D + 1,2

Dubina ugradnje cijevi ovisi o vanjskom opterećenju i vanjskom zagrijavanju koje može zagrijati vodu u cijevima te o dubini smrzavanja tla za pojedino područje. U ovom slučaju minimalna potrebna dubina ugradnje je 0,6 m, iz čega slijedi da je dubina kanala  $h_k$  jednaka:

$$h_k = 0,6 + D \quad (2.4)$$

gdje je:

$D$  – promjer cijevi

Trošak iskopavanja kanala ovisi o nagibu terena na kojem se vrši iskopavanje. Taj je nagib izražen koeficijentom nagiba tla, gdje se za svaki segment cjevovoda uzima pripadna srednja vrijednost  $k_{n,i}$  i on glasi:

$$k_{n,i} = -0,0002 \alpha_i^2 + 0,0286 \alpha_i + 1 \quad (2.5)$$

gdje je:

$\alpha$  – kut nagiba tla

Fiksni trošak kopanja  $C_k$  sastoji se od troška kopanja kanala za polaganje cijevi te od troška zatrpavanja preostalog prostora kanala nakon ugradnje cjevovoda materijalom iz iskopa te. U ovom slučaju fiksni trošak kopanja je postavljen na 85 €/m<sup>3</sup>.

Troškovi iskopavanja kanala također ovise o vrsti tla na kojem se vrši iskopavanje. Ako se iskop kanala vrši na čvrstom tlu gdje je potrebno miniranje troškovi iskopavanja rastu za 50%, te se računaju prema izrazu:

$$C_{u,i} = d_k \cdot h_k \cdot k_{n,i} \cdot C_k \cdot (l_i + 0,5 \cdot l_{\text{čvrsto tlo}}) \quad (2.6)$$

gdje je:

$l_{\text{čvrsto tlo}}$  – duljina iskopa koja se vrši kroz čvrsto tlo

Ako se iskop kanala vrši na području guste vegetacije gdje je potrebno djelomično uklanjanje vegetacije radi iskopa kanala troškovi rastu za 60%, te se računaju prema izrazu:

$$C_{u,i} = d_k \cdot h_k \cdot k_{n,i} \cdot C_k \cdot (l_i + 0,60 \cdot l_{vegetacija}) \quad (2.7)$$

gdje je:

$l_{vegetacija}$  – duljina iskopa koja se vrši kroz područje guste vegetacije

Ako se iskop kanala vrši kroz privatni posjed troškovi iskopavanja rastu za 85%, te se računaju prema izrazu:

$$C_{u,i} = d_k \cdot h_k \cdot k_{n,i} \cdot C_k \cdot (l_i + 0,85 \cdot l_{privatni\ posjed}) \quad (2.8)$$

gdje je:

$l_{privatni\ posjed}$  – duljina iskopa koja se vrši kroz privatni posjed

Konačno, troškovi instalacije cjevovoda ovise i o postojećoj prometnoj infrastrukturi. U slučaju da se putanja cjevovoda siječe s nekom od postojećih prometnica trošak instalacije cjevovoda raste. Trošak prekopavanja i sanacije prometnice sastoji se od fiksnog dijela te ovisi o širini kanala, a računa se prema izrazu:

$$C_p = p \cdot d_k \cdot C_{ps} \quad (2.9)$$

gdje je:

$p$  – broj sjecišta cjevovoda i prometnice

$d_k$  – širina kanala

$C_{ps}$  – fiksni trošak prekopavanja i sanacije prometnice

Fiksni trošak prekopavanja i sanacije prometnice se sastoji od troška strojnog zasijecanja, razbijanja i skidanja sloja postojećeg asfalta na prometnoj površini, od troška asfaltiranja nosivo-habajućeg sloja, troška popravka cestovnog rigola i odvodnih jaraka te troška skidanja, dobave i postave novih cestovnih rubnjaka uz cestu. U ovom slučaju postavljen je na 1000 €/m.

Ukupni trošak instalacije cjevovoda  $C_{inst}$  [€] dobije se zbrojem svih pojedinih troškova instalacije:

$$C_{inst} = C_{c,uk} + \sum_{i=1}^n C_{u,i} + C_p \quad (2.10)$$

gdje je:

$C_{inst}$  – ukupni troškovi pri instalaciji cjevovoda

$C_{c,uk}$  – ukupni trošak kupovine cijevi

$C_{u,i}$  – trošak iskopavanja kanala za jedan segment cjevovoda

$n$  – broj segmenta cjevovoda

$C_p$  – ukupni trošak prekopavanja i sanacije prometnice

## 2.2 Proračun troškova eksploatacije

Pod troškovima eksploatacije cjevovoda spadaju troškovi rada pumpe potrebne za pogon fluida cjevovodom, a oni ovise o lokalnim i dužinskim gubitcima o visinskoj razlici koju cjevovod mora savladati te o periodu eksploatacije. U ovom slučaju fluid koji se pogoni je voda. Konstantne vrijednosti koje su korištene u proračunu troškova eksploatacije cjevovoda su sljedeće: koeficijent kinematske viskoznosti  $\nu=10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, visina neravnina na stijenci cijevi  $e=2 \cdot 10^{-4}$  m, ubrzanje sile teže  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>, te korisnost pumpe  $\eta=0,8$ .

Lokalni gubici računaju se samo na koljenima cjevovoda, odnosno na spojevima između ravnih segmenata. Koeficijent lokalnog gubitka ovisi o prostornom kutu između segmenata, koji se računa prema izrazu:

$$\cos \rho = \frac{x_i \cdot x_{i+1} + y_i \cdot y_{i+1} + z_i \cdot z_{i+1}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \cdot \sqrt{x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2}} \quad (2.11)$$

gdje je:

$\rho$  – prostorni kut

$x_i, y_i, z_i$  – koordinate početne točke segmenta

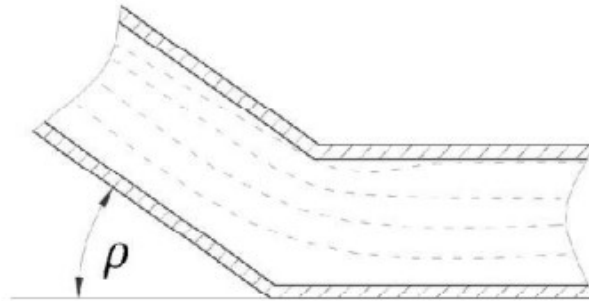
$x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$  – koordinate krajnje točke segmenta

Kad je poznat prostorni kut, koeficijent lokalnog gubitka se računa prema izrazu:

$$k_i = 0,64 \cdot \rho_i^2 \quad (2.12)$$

gdje je:

$k_i$  – koeficijent lokalnog gubitka na  $i$ -tom spoju



Slika 2.2 Kut između segmenata cjevovoda

Ukupni lokalni gubici za cjevovod računaju se prema izrazu:

$$h_l = \left( \sum_i k_i \right) \frac{8Q^2}{D^4 g \pi^2} \quad (2.13)$$

gdje je:

$Q$  – protok u cjevovodu

$D$  – promjer cijevi

$g$  – ubrzanje sile teže

Osim lokalnih gubitaka, javljaju se i dužinski gubici koji ovise o Reynoldsovom broju. Reynoldsov broj je bezdimenzijska značajka koja služi kao kriteriji za određivanje hoće li u danim okolnostima strujanje fluida biti laminarno ili turbulentno, te se računa prema izrazu:

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{D \cdot \pi \cdot \nu} \quad (2.14)$$

gdje je:

$Re$  – Reynoldsov broj

$\nu$  – koeficijent kinematske viskoznosti

Za Reynoldsov broj manji od 2300 strujanje je laminarno, a za Reynoldsov broj veći od 2300 strujanje je turbulentno. U ovom slučaju strujanje je turbulentno, stoga se faktor trenja za dužinske gubitke računa prema izrazu:

$$\lambda = 1,325 \cdot \left( \ln \left( \frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^{-2} \quad (2.15)$$

gdje je:

$\lambda$  – faktor trenja za dužinske gubitke

$e$  – visina neravnina na stijenci cijevi

Ukupni dužinski gubici za cjevovod računaju se prema izrazu:

$$h_d = \left( \sum_i \lambda_i l_i \right) \frac{8 \cdot Q^2}{D^5 \cdot g \cdot \pi^2} \quad (2.16)$$

gdje je:

$l_i$  – duljina pojedinog segmenta cjevovoda

Ukupni gubici u cjevovodu jednaki su zbroju ukupnih dužinskih i lokalnih gubitaka te najvećoj visinskoj razlici koju treba savladati, odnosno:

$$H = h_l + h_d + \Delta z \quad (2.17)$$

Snaga pumpe koja je potrebna za pogon fluida i savladavanje gubitaka računa se prema izrazu:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta} \quad (2.18)$$

gdje je:

$\rho$  – gustoća fluida

$\eta$  – korisnost pumpe

Konačno je moguće izračunati troškove eksploatacije cjevovoda, koji se računaju za određeni period eksploatacije prema izrazu:

$$C_{\text{eksp}} = \frac{c_{\text{kWh}}}{1000} \cdot 24 \cdot 365 \cdot G \cdot P \quad (2.19)$$

gdje je:

$c_{\text{kWh}}$  – cijena za 1 kWh električne energije

$G$  – broj godina eksploatacije cjevovoda

### 3 NUMERIČKA OPTIMIZACIJA

Optimizacija trase cjevovoda vršiti će se pomoću Pythonovog modula Indago koji sadrži sedam optimizacijskih metoda. U ovom radu korištene su *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Fireworks Algorithm* (FWA) te *Differential Evolution* (DA) metoda [3]. U nastavku je dan kratki opis korištenih metoda.

#### 3.1 PSO metoda

PSO metoda je tehnika stohastičke optimizacije razvijena 1995. godine od strane Dr. Eberhart i Dr. Kennedy inspirirana društvenim ponašanjem ptica ili jata riba. PSO inicijalno kreira početno jato sastavljeno od čestica koje predstavljaju moguća rješenja. Čestice se pomiču u prostoru pretraživanja, a njihovo kretanje ovisi o najboljem poznatom vlastitom položaju ali se također vode prema najboljem položaju u prostoru pretraživanja, koji se ažurira kada druge čestice u jatu pronađu bolji položaj. PSO metoda može pretražiti vrlo velike prostore mogućih rješenja, također ne koristi gradijent problema koji se optimizira, što znači da PSO metoda ne koristi derivaciju funkcije cilja [4].

#### 3.2 FWA metoda

Fireworks algoritam je algoritam inteligencije roja koji su objavili Tan i Zhu 2010 godine. Ovaj algoritam inspiriran je eksplozijom vatrometa te je prilično učinkovit u pronalaženju globalne optimalne vrijednosti. Kao pri eksploziji vatrometa, pljusak iskri raspršen je po susjednom području pretraživanja. Te će iskre ponovno eksplodirati i generirati novi pljusak iskri u manjem susjednom području. Postupno, iskre će pretražiti cijeli prostor rješenja u finoj strukturi i fokusirati se na malo područje za pronalaženje optimalnog rješenja [5].



### 3.3 DE metoda

Metodu su izvorno predložili Storn i Price 1995. godine za minimiziranje funkcija koje nisu diferencijalne. Važno je napomenuti da iako je DE evolucijski algoritam, on nema prirodnu paradigmu i nije biološki inspiriran kao većina drugih evolucijskih algoritama. DE pokazuje vrlo dobre performanse u raznim optimizacijskim problemima iz raznih znanstvenih područja. Pripada stohastičkim evolucijskim metodama temeljenim na populaciji te kao i ostali evolucijski algoritmi koristi populaciju kandidata rješenja, a pretraga se vrši na stohastički način primjenom operatora mutacije, križanja i selekcije kako bi se populacija usmjerila prema boljim rješenjima u prostoru pretraživanja. DE optimizira problem iterativnim poboljšanjem kandidata rješenja na temelju evolucijskog procesa. Takvi algoritmi mogu brzo istražiti velika područja pretraživanja [6]. U ovom radu korištena je „*L-SHADE*“ varijanta DE metode koja sadrži algoritam koji prilagođava parametre metode problemu koji se optimizira [7].

### 3.4 Izrada trase cjevovoda

Početna trasa cjevovoda izrađuje se od jediničnih segmenata, te se definira relativni kut između dva segmenta. Svi relativni kutovi između segmenata spremaju se u vektor koji predstavlja optimizacijski parametar. Nakon što su dane koordinate početne i krajnje točke trase (A i B) kao što je prikazano na slici 3.1, odredi se niz nasumičnih relativnih kutova između segmenata, s time da je prvi relativni kut jednak nula stupnjeva. Za odrediti svaku sljedeću točku putanje potrebno je odrediti apsolutne kutove između segmenata i x osi na sljedeći način:

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \theta_i \quad (3.1)$$

gdje je:

$\varphi_i$  – vektor apsolutnih kutova

$\theta_i$  – vektor relativnih kutova

Sada je moguće odrediti koordinate točaka u putanji pomoću sljedećih izraza:

$$x_i = x_{i-1} + l \cdot \cos(\varphi_i) \quad (3.2)$$

$$y_i = y_{i-1} + l \cdot \sin(\varphi_i) \quad (3.3)$$

gdje je:

$x_i$  – x koordinata točke putanje

$x_{i-1}$  – x koordinata prethodne točke putanje

$y_i$  – y koordinata točke putanje

$y_{i-1}$  – y koordinata prethodne točke putanje

$l$  – duljina jediničnog segmenta

Ovako formiranu putanju potrebno je rotirati i skalirati da bi njezina krajnja točka bila u točki B kao što je prikazano na slici 3.1. Kut za koji je potrebno zarotirati putanju jednak je apsolutnoj razlici kutova između pravaca koji sadrže zadanu početnu i krajnju točku putanje te pravca koji sadrži početnu točku i krajnju točku trase cjevovoda. Još je trasu potrebno skalirati, obzirom da su svi segmenti jednako dugi skalira se duljina pojedinog segmenta na slijedeći način:

$$l_i = \frac{\sqrt{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}}{\sqrt{(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2}} \quad (3.4)$$

Gdje je:

$l_i$  – duljina skaliranog segmenta

$B_x$  – x koordinata zadane krajnje točke

$B_y$  – y koordinata zadane krajnje točke

$A_x$  – x koordinata zadane početne točke

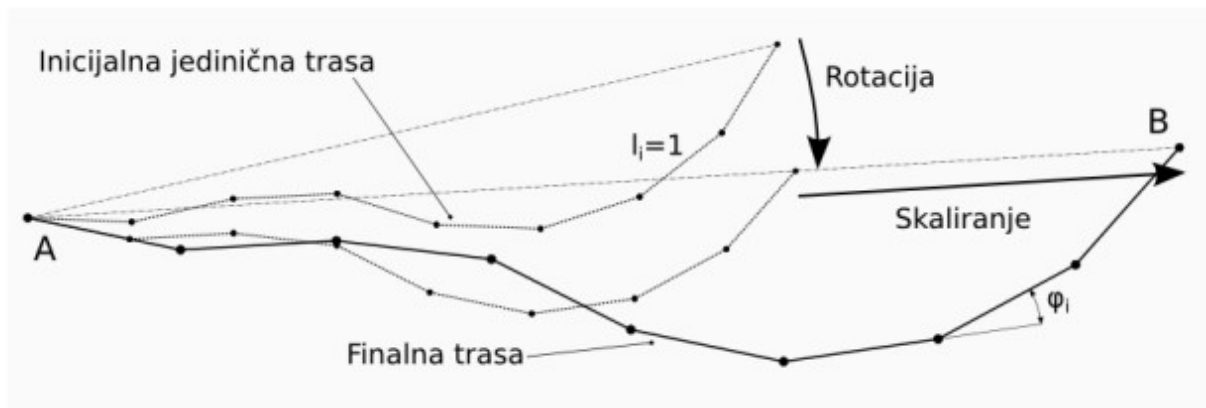
$A_y$  – y koordinata zadane početne točke

$x_n$  – x koordinata krajnje točke neskalinane trase

$x_1$  – x koordinata početne točke neskalinane trase

$y_n$  – y koordinata krajnje točke neskalinane trase

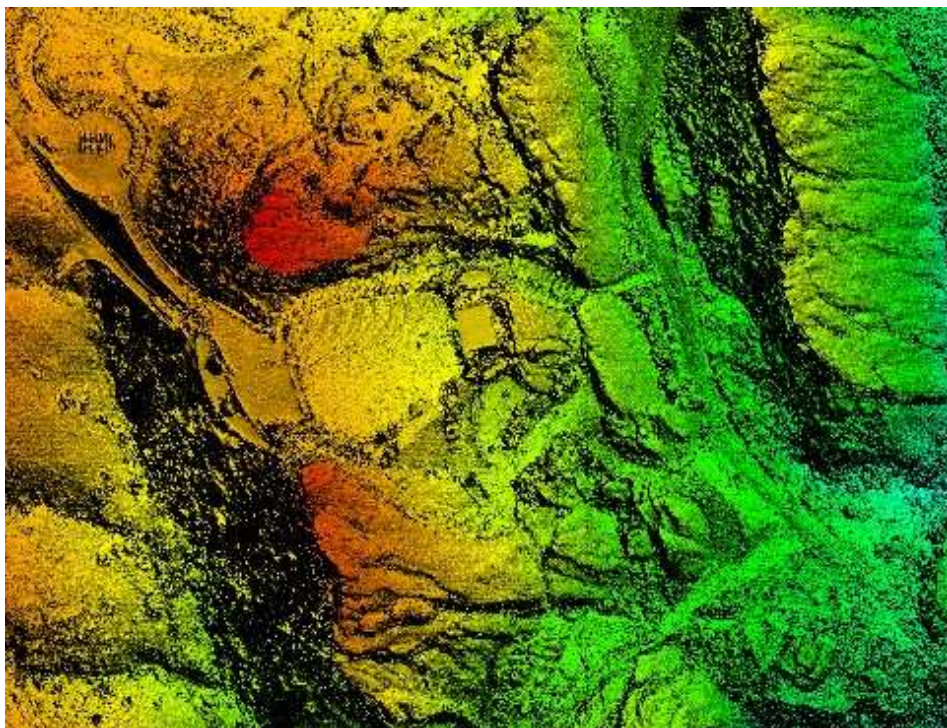
$y_1$  – y koordinata početne točke neskalinane trase



Slika 3.1 Shematski prikaz rotacije i skaliranja trase cjevovoda [8]

### 3.5 Definiranje terena i obilježja terena

Za definiranje terena na kojem će se optimizacija provoditi korištene su DEM datoteke. DEM je kratica za *Digital Elevation Model* koji se sastoji od datoteka koje sadrže ili točke (vektor) ili piksele (raster), pri čemu svaka točka ili piksel ima visinsku vrijednost [9]. DEM datoteke dolaze u raznim formatima, u ovom radu korištena je datoteka sa ekstenzijom „tiff“, a iz njih je moguće izvući mnogo drugih informacija. Za učitavanje i pretvaranje Geotiff datoteke u Numpy matricu korišten je modul Tifffile.



Slika 3.2 DEM datoteka Amfiteatra Red Rocks, Colorado dobivena pomoću bespilotne letjelice [9]

Za ucrtavanje obilježja terena kao što su privatne površine, područja čvrstog tla, površine guste vegetacije i sl., te za ucrtavanje prometne infrastrukture korišten je Pythonov modul Shapely koji se pretežito koristi za ucrtavanje točaka, krivulja i površina na temelju ručno unesenih koordinata [10].

## 4 TESTNI SLUČAJ A

### 4.1 Opis terena i infrastrukture

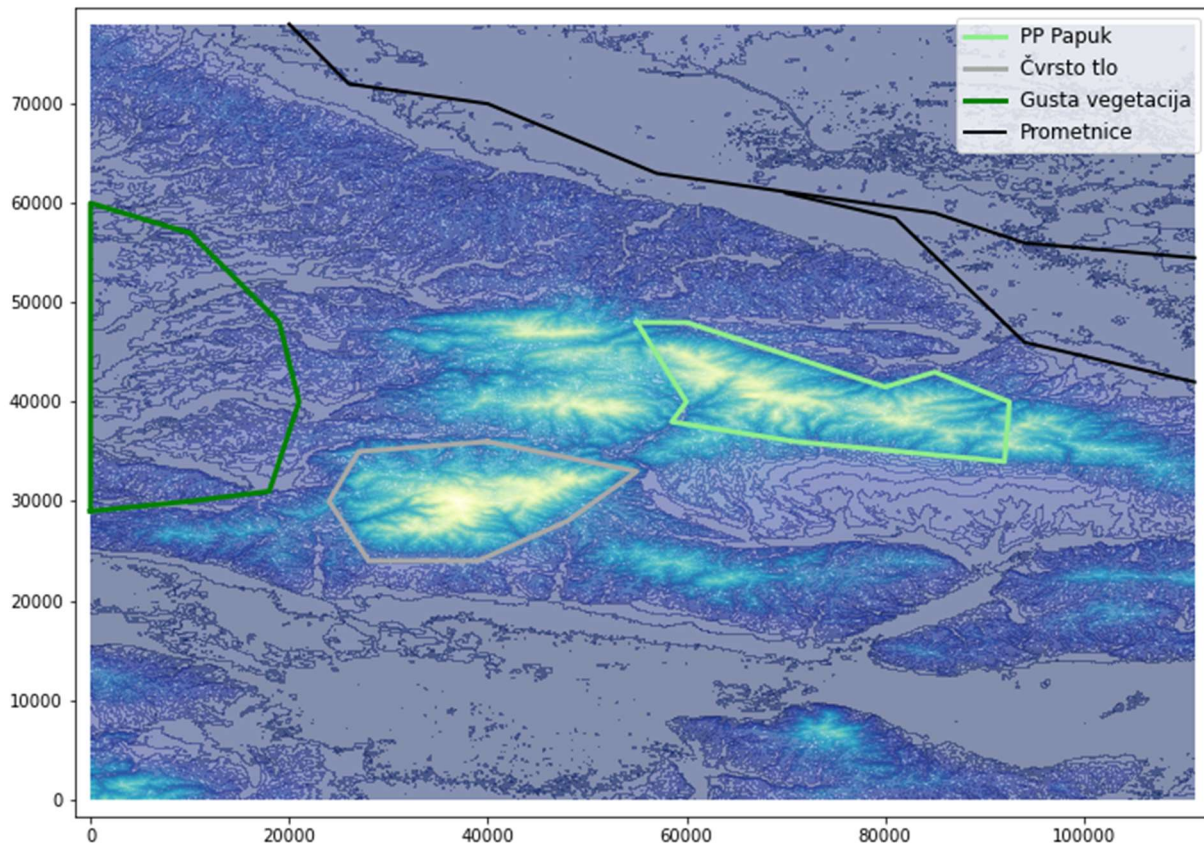
Testni slučaj A podrazumijeva područje od 45. do 46. zemljopisne širine sjeverno, te od 17. do 18. zemljopisne dužine istočno. Na slici 4.1 crvenim pravokutnikom označeno je područje koje je obuhvaćeno testnim slučajem A.



Slika 4.1 Područje obuhvaćeno testnim slučajem A

Na slici 4.2 prikazani su infrastruktura i obilježja terena testnog slučaja A. Tamno zelenom linijom označeno je područje guste vegetacije gdje troškovi iskopavanja rastu za 60%. Područje čvrstog tla, gdje je za iskop kanala potrebno miniranje i troškovi iskopa rastu za 50%, označeno je sivom linijom. Svijetlo zelenom linijom označeno je područje Parka prirode Papuk kroz koji cjevovod ne smije prolaziti. Crnom linijom označena je prometna infrastruktura.

Reljef je prikazan bojama. Tamnije boje prikazuju područja niže nadmorske visine, dok područja koja su prikazana najsvjetlijim bojama predstavljaju najviše lokalitete.



Slika 4.2 Područje testnog slučaja A

## 4.2 Optimizacija trase cjevovoda

Optimizacija testnog slučaja A provedena je u tri postavke: optimizacija na temelju troškova eksploatacije, optimizacija na temelju troškova instalacije te optimizacija na temelju troškova eksploatacije i na temelju troškova instalacije. Za sve tri postavke, optimizacija je provedena pomoću tri optimizacijske metode: PSO metodom, FWA metodom te DE metodom.

U tablici 4.1 dani su ulazni podaci koji su zajednički svim provedenim optimizacijama.

Tablica 4.1 Ulazni podaci testnog slučaja A

Broj dimenzija	50	
Broj evaluacija	100 000	
Relativni kutovi	Donja granica	-30°
	Gornja granica	-30°
Protok [m <sup>3</sup> /s]	0,3	
Nazivni promjer cijevi [mm]	400	
Koordinate početne točke trase	x <sub>1</sub>	18000
	y <sub>1</sub>	22000
Koordinate krajnje točke trase	x <sub>n</sub>	76000
	y <sub>n</sub>	65000
Gustoća vode [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	
Visina neravnina na stijenci cijevi [m]	2·10 <sup>-4</sup>	
Koeficijent kinematske viskoznosti [m <sup>2</sup> /s]	10 <sup>-6</sup>	
Korisnost pumpe	0,8	
Cijena za 1 kWh električne energije [€/kWh]	0,1	
Vrijeme eksploatacije [godine]	3	

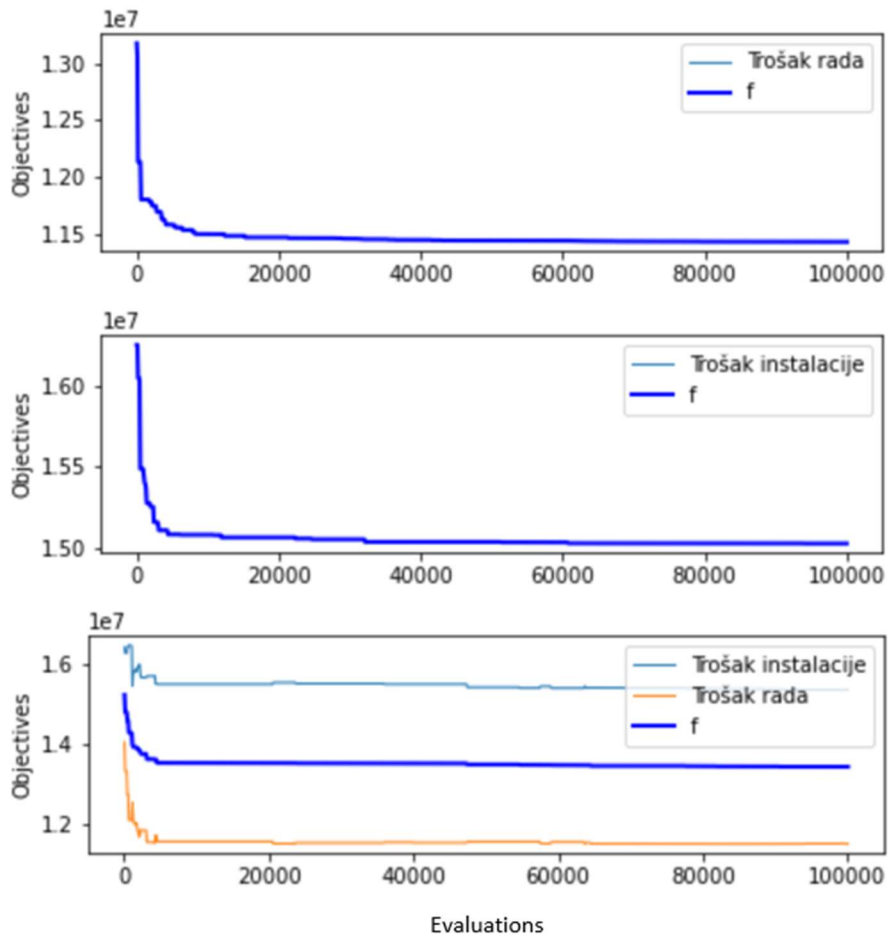
U tablici 4.2 dani su rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju A.

Tablica 4.2 Rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju A

	PSO metoda	FWA metoda	DE metoda
Optimizacija na temelju troškova eksploatacije i na temelju troškova instalacije			
Cijena instalacije, C <sub>i</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	15,5	15,4	15,4
Cijena eksploatacije, C <sub>e</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	11,5	11,5	11,4
Ukupna duljina [km]	77,6	77,5	77,6
Optimizacija na temelju troškova instalacije			
Cijena instalacije, C <sub>i</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	15,1	14,9	14,9
Ukupna duljina:	74	73,3	73,7
Optimizacija na temelju troškova eksploatacije			
Cijena eksploatacije, C <sub>e</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	11,5	11,4	11,4
Ukupna duljina [km]	77,9	77,2	77,1

Za testni slučaj A najboljom se pokazala FWA optimizacijska metoda jer je rezultirala najgladom putanjom te najnižim troškovima.

Na slici 4.3 prikazane su konvergenijske krivulje FWA optimizacijske metode za sve tri postavke provedene optimizacije na testnom slučaju A.



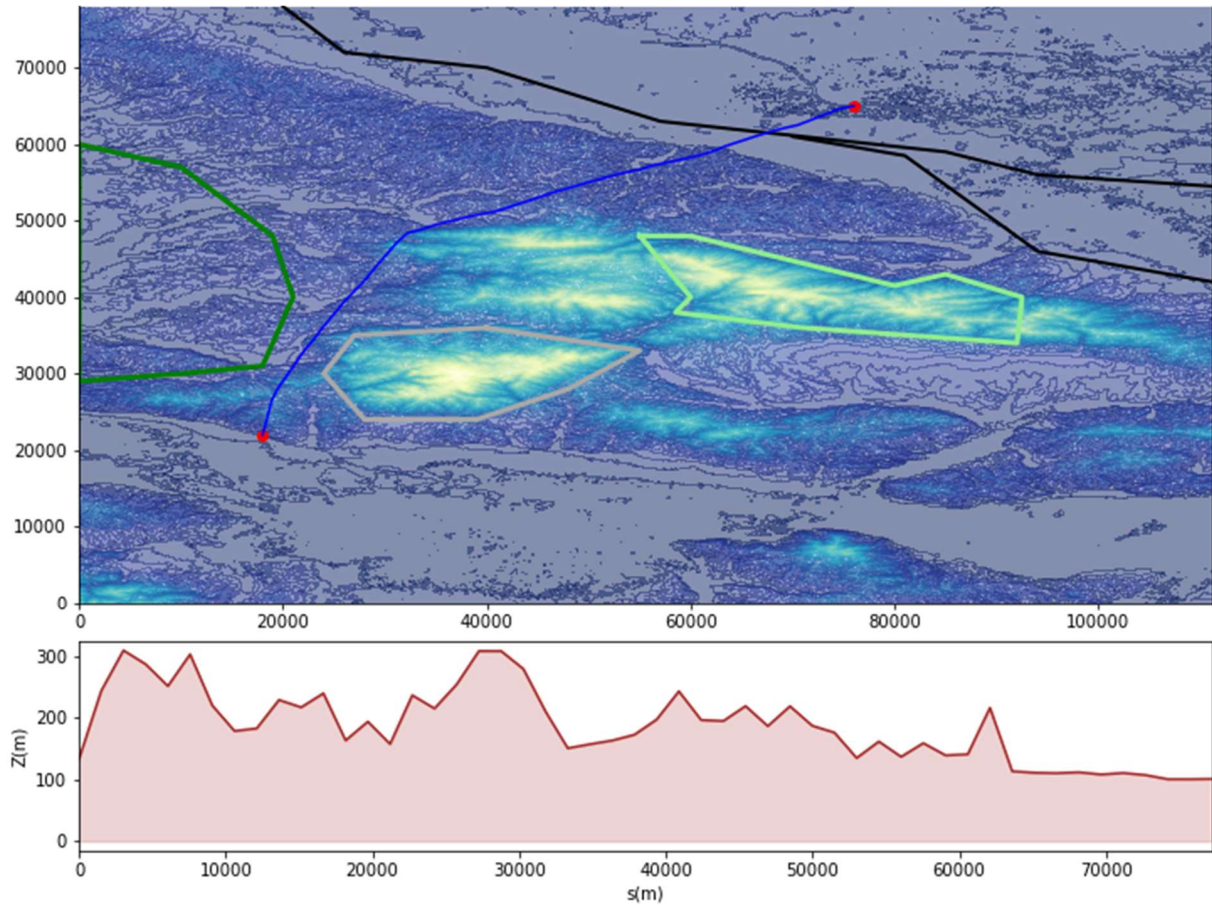
Slika 4.3 Konvergenijske krivulje FWA metode za slučaj A

Primijenjena optimizacijska metoda relativno brzo konvergira u sve tri postavke provedene optimizacije. Optimizacije provedene samo s jednim optimizacijskim ciljem (optimizacija samo na temelju troškova eksploatacije i optimizacija samo na temelju troškova instalacije) nešto brže konvergiraju te već na 40 000 evaluacija dolazi do stagnacije krivulja. Optimizacija provedena s dva optimizacijska cilja konvergira nešto sporije te do stagnacije krivulje dolazi na 60 000 evaluacija.

U nastavku su prezentirani rezultati dobiveni FWA optimizacijskom metodom za sve tri postavke provedene optimizacije.



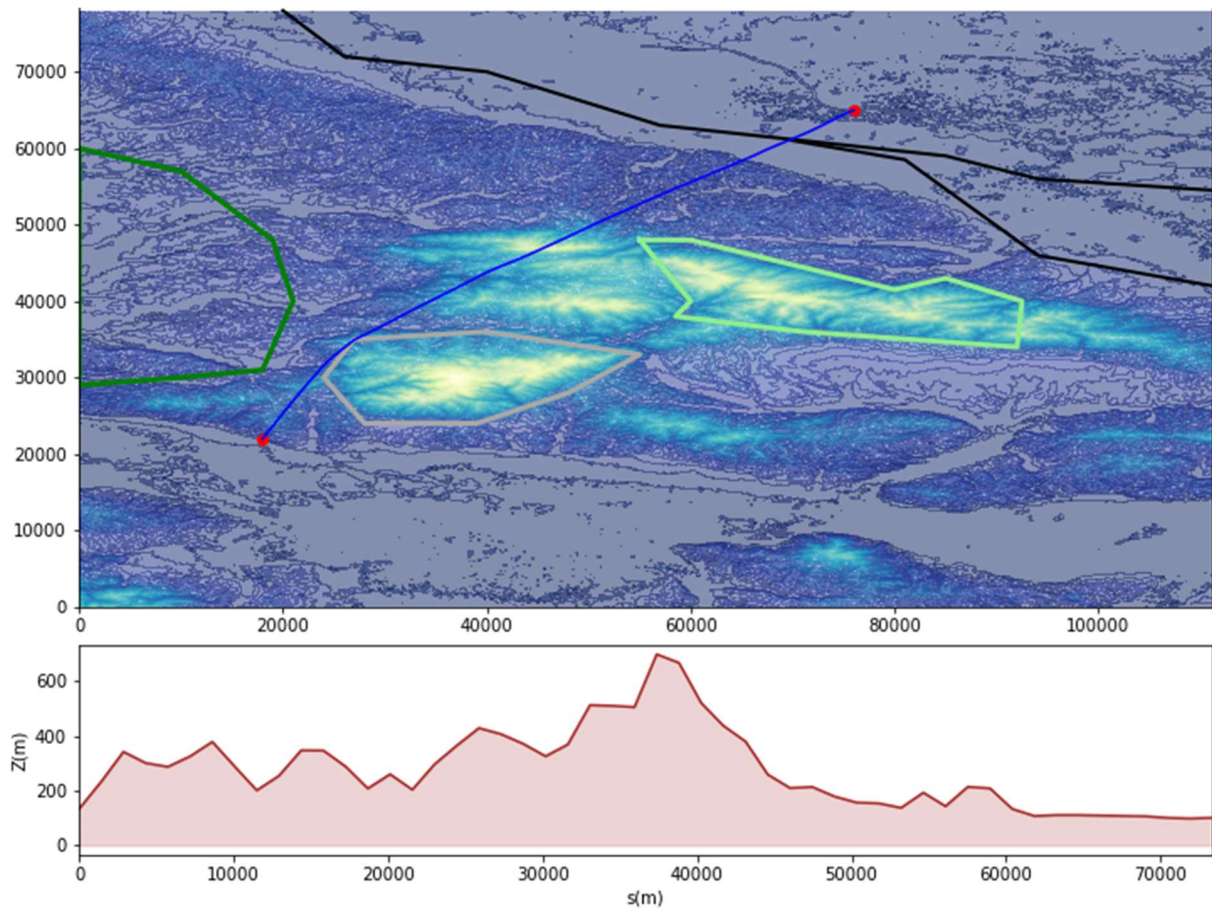
Na slici 4.4 prikazana je trasa cjevovoda dobivena optimizacijom samo na temelju troškova eksploatacije.



Slika 4.4 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova eksploatacije

Ovako dobivena putanja dobro prati reljef, uspješno izbjegava uzvišeni teren te nema naglih promjena u nadmorskoj visini. Duljina trase je nešto veća te ona iznosi 77,2 km, međutim to je opravdano jer se visina terena duž putanju ne mijenja drastično što pridonosi manjoj snazi pumpe jer ne treba savladavati veliku visinsku razliku. Najviša točka putanje se nalazi na visini od 309,24 m a troškovi eksploatacije iznose 11,4 milijuna €.

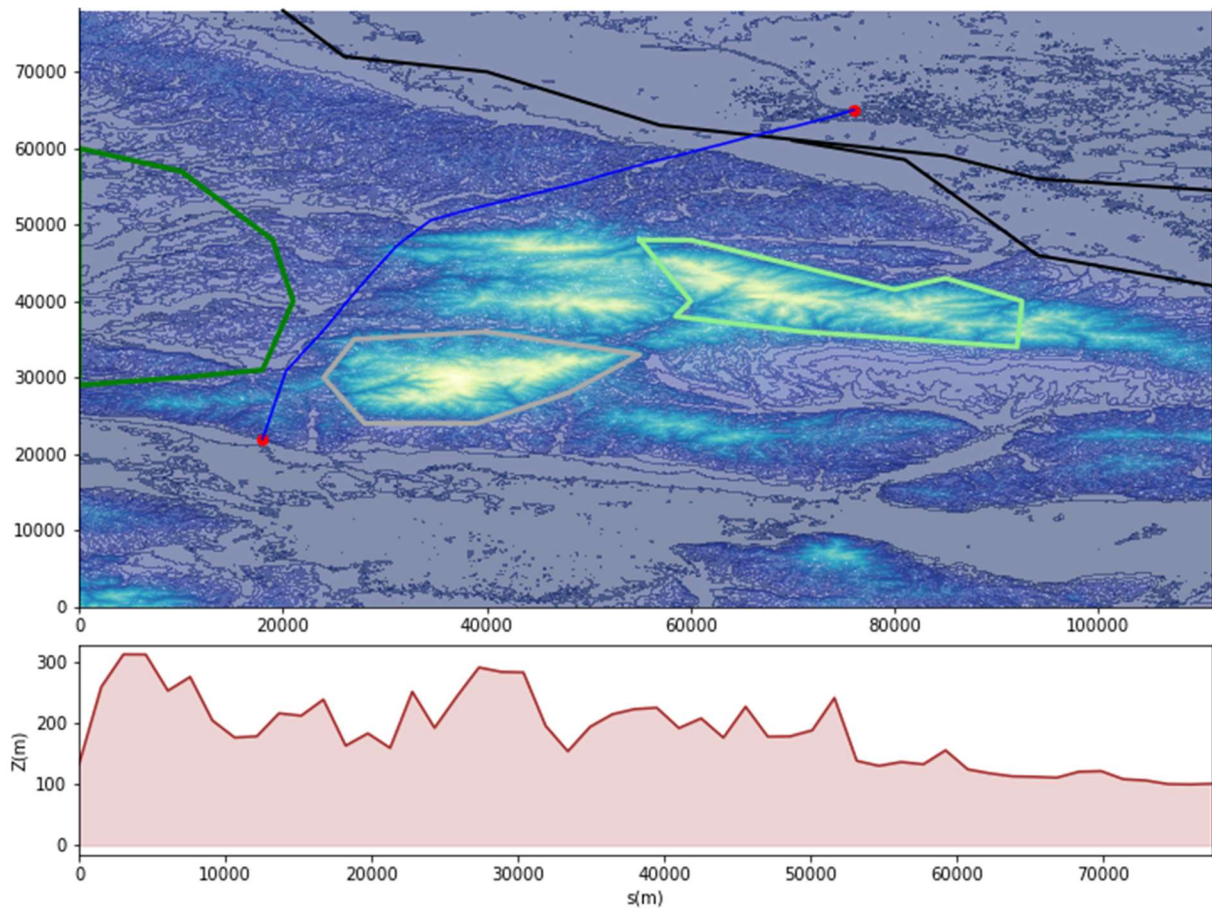
Na slici 4.5 prikazana je trasa cjevovoda dobivena optimizacijom samo na temelju troškova instalacije.



Slika 4.5 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije

Vidljivo je da putanja dobivena na ovaj način uspješno izbjegava skuplje dijelove terena uz minimalnu udaljenost od istih u cilju minimiziranja duljine putanje što značajno smanjuje troškove iskopavanja kanala te troškove nabave cijevi. Duljina ovako dobivene putanje iznosi 73,3 km što je značajno manje od duljine prethodne putanje. Očekivano putanja zanemaruje troškove savladavanja visinske razlike te je prisutan nagli skok u nadmorskoj visini. Najviša točka putanje nalazi se na visini od 700 m što je čak 390,76 m više od najviše točke prethodne putanje. Troškovi instalacije za ovu putanju iznose 14,9 milijun €.

Na slici 4.6 prikazana je trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije.



Slika 4.6 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije

Putanja uspješno prati reljef izbjegavajući uzvišene i skuplje dijelove terena te siječe prometnicu u samo jednoj točki. Putanja je slična putanji dobivenoj optimizacijom samo na temelju troškova eksploatacije ali je ipak nešto zaglađenija što ju čini nešto kraćom. Duljina trase iznosi 77,5 km, međutim ovako dobivena putanja je znatno dulja od putanje dobivene optimizacijom samo na temelju troškova instalacije. To je opravdano jer su jednokratni troškovi instalacije porasli za nešto više od 3% te oni sada iznose 15,4 milijuna €, ali s druge strane ostvarena je značajna dugoročna ušteda jer putanja uspješno izbjegava nagle skokove u nadmorskoj visini koji bi znatno poskupili troškove eksploatacije. Na ovaj način troškovi eksploatacije ostaju gotovo jednaki te iznose 11,5 milijuna €.

## 5 TESTNI SLUČAJ B

### 5.1 Opis terena i infrastrukture

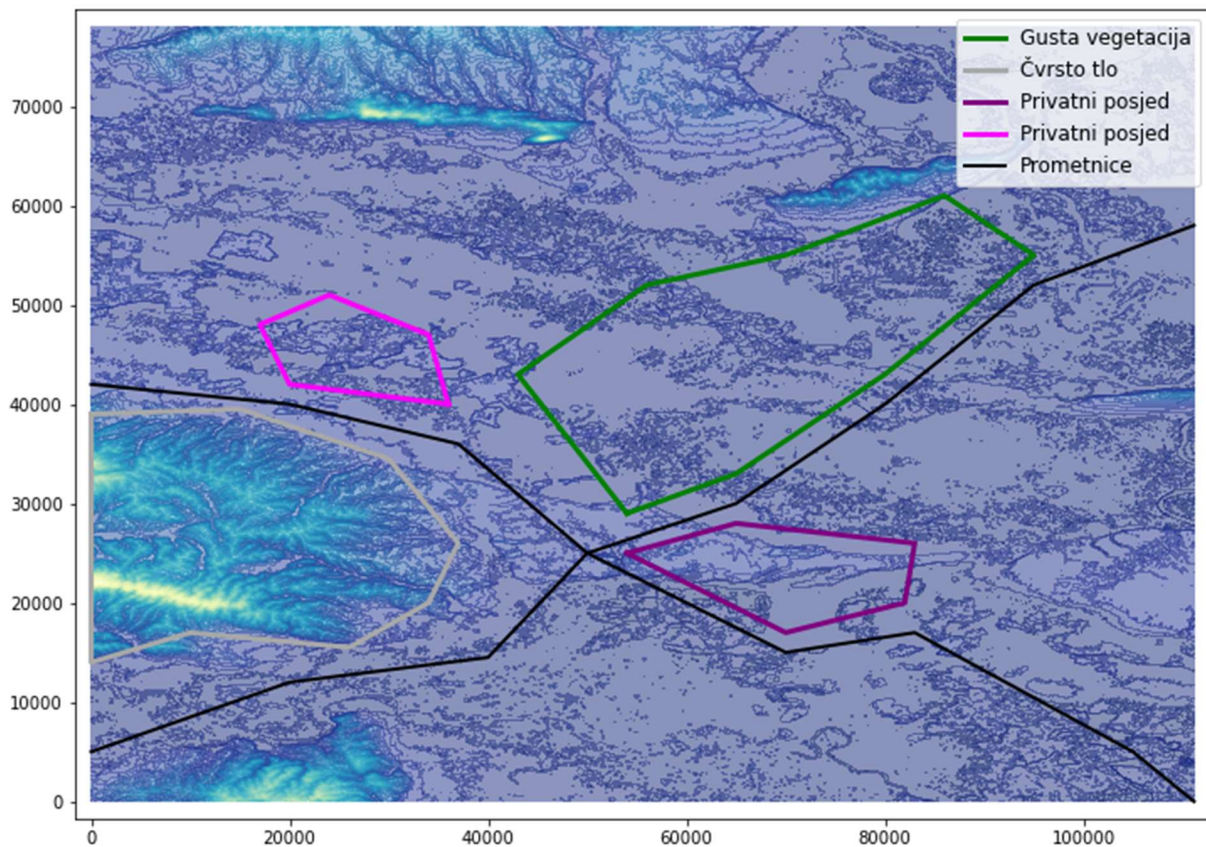
Testni slučaj B podrazumijeva područje od 45. do 46. geografske širine sjeverno, te od 18. do 19. geografske dužine istočno. Na slici 5.1 crvenim pravokutnikom označeno je područje koje je obuhvaćeno testnim slučajem B.



Slika 5.1 Područje obuhvaćeno testnim slučajem B

Na slici 5.2 prikazana je infrastruktura i obilježja terena testnog slučaja B. Na području guste vegetacije, koje je označeno tamno zelenom linijom, troškovi iskopavanja rastu za 60%. Sivom linijom označeno je područje čvrstog tla, gdje je za iskop kanala potrebno miniranje te troškovi iskopa rastu za 50%. Ljubičastom i ružičastom linijom označeni su privatni posjedi, gdje trošak

iskopa raste za čak 85%. Crnom linijom označena je prometna infrastruktura. Kao i u prethodnom slučaju reljef je prikazan bojama. Tamnije boje prikazuju područja niže nadmorske visine, dok područja koja su prikazana najsvjetlijim bojama predstavljaju najviše lokalitete.



Slika 5.2 Područje testnog slučaja B

## 5.2 Optimizacija trase cjevovoda

Optimizacija testnog slučaja B također je provedena u tri postavke: optimizacija na temelju troškova eksploatacije, optimizacija na temelju troškova instalacije te optimizacija na temelju troškova eksploatacije i na temelju troškova instalacije. Za sve tri postavke, optimizacija je provedena pomoću tri optimizacijske metode: PSO metodom, FWA metodom te DE metodom.

U tablici 5.2 dani su ulazni podaci koji su zajednički svim provedenim optimizacijama.

Tablica 5.1 Ulazni podaci testnog slučaja B

Broj dimenzija	50	
Broj evaluacija	200 000	
Relativni kutevi	Donja granica	-30°
	Gornja granica	-30°
Protok [m <sup>3</sup> /s]	0,46	
Nazivni promjer cijevi [mm]	500	
Koordinate početne točke trase	x <sub>1</sub>	20000
	y <sub>1</sub>	55000
Koordinate krajnje točke trase	x <sub>n</sub>	80000
	y <sub>n</sub>	10000
Gustoća vode [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	
Visina neravnina na stijenci cijevi [m]	2·10 <sup>-4</sup>	
Koeficijent kinematske viskoznosti [m <sup>2</sup> /s]	10 <sup>-6</sup>	
Korisnost pumpe	0,8	
Cijena za 1 kWh električne energije [€/kWh]	0,1	
Vrijeme eksploatacije [godine]	5	

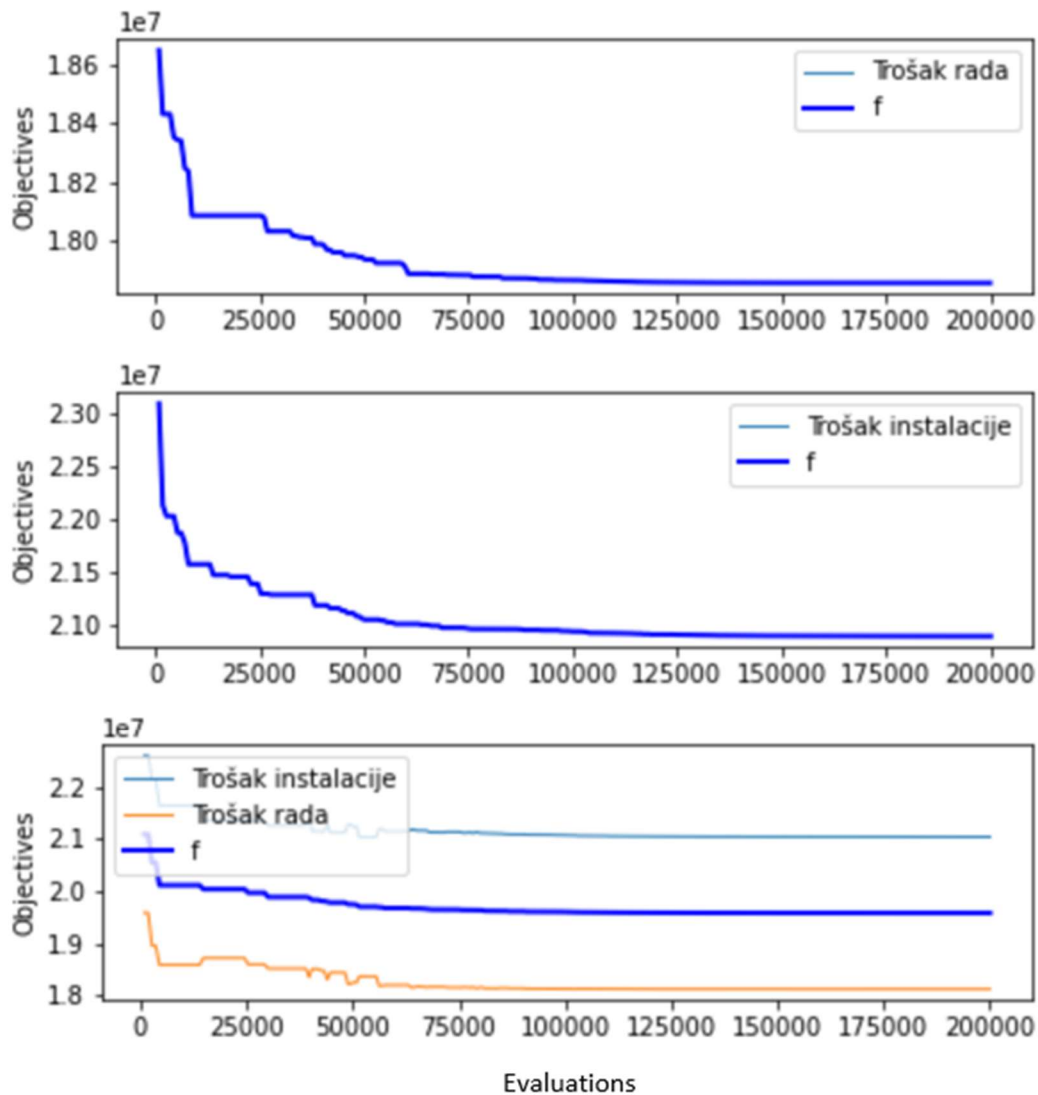
U tablici 5.1 dani su rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju B.

Tablica 5.2 Rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju B

	PSO metoda	FWA metoda	DE metoda
Optimizacija na temelju troškova eksploatacije i na temelju troškova instalacije			
Cijena instalacije, C <sub>i</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	21,2	21	21,1
Cijena eksploatacije, C <sub>e</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	18,27	18,33	18,1
Ukupna duljina [km]	76,9	76,1	76,5
Optimizacija na temelju troškova instalacije			
Cijena instalacije, C <sub>i</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	21,1	21	21
Ukupna duljina:	76,5	76,2	76
Optimizacija na temelju troškova eksploatacije			
Cijena eksploatacije, C <sub>e</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	17,95	17,9	17,9
Ukupna duljina [km]	75,3	75,5	75,5

Za testni slučaj B najboljom se pokazala DE optimizacijska metoda jer nudi vrlo slične troškove instalacije, a najmanje troškove eksploatacije što će rezultirati dugoročnom uštedom.

Na slici 5.3 prikazane su konvergenzijske krivulje DE optimizacijske metode za sve tri postavke provedene optimizacije na testnom slučaju B.



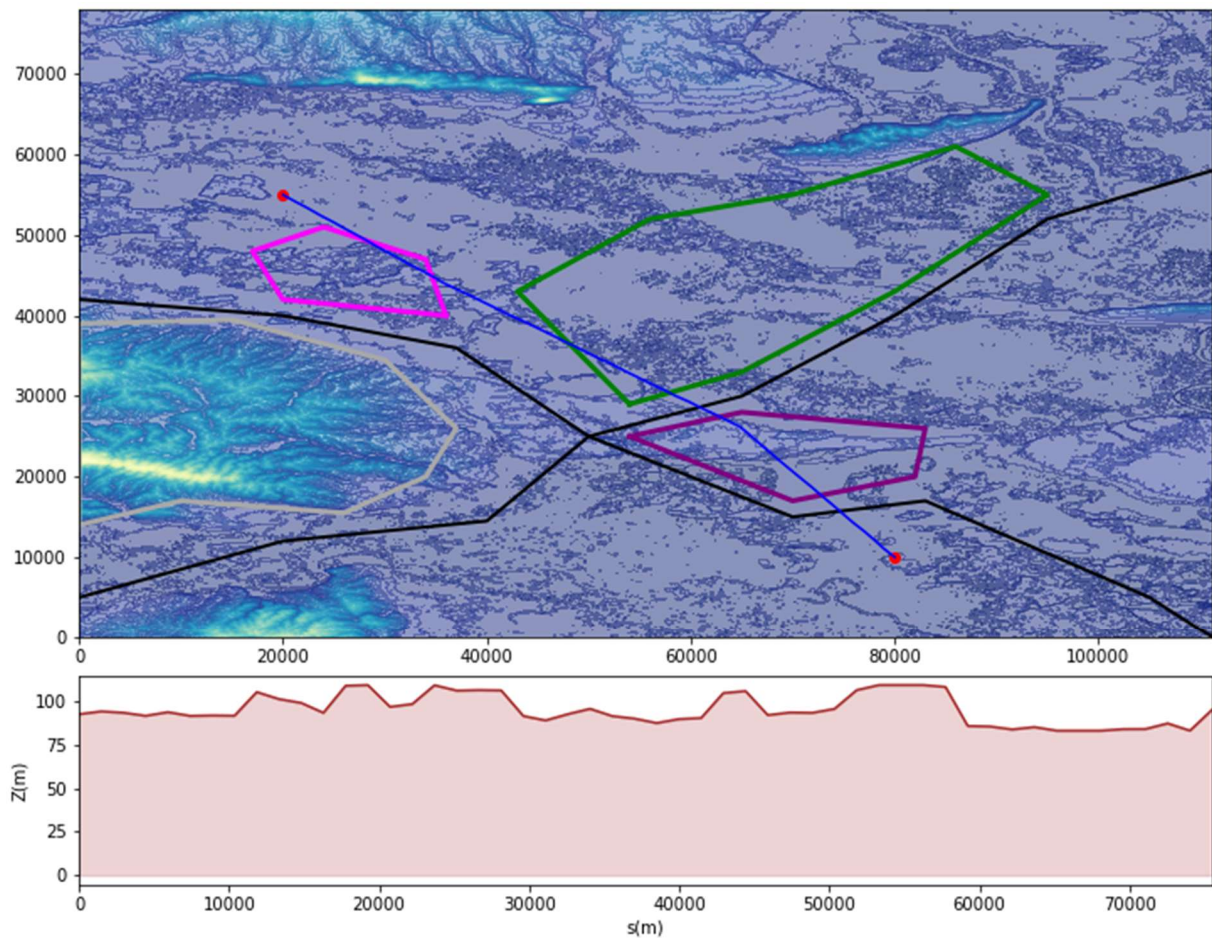
Slika 5.3 Konvergenzijske krivulje DE metode za slučaj B

Do stagnacije konvergenzijskih krivulja, u sve tri postavke optimizacije, dolazi nakon približno 125 000 evaluacija. Kod optimizacije provedene samo na temelju troškova eksploatacije krivulja ima nešto blaži pad te je vrijednost troškova u kojoj dolazi do konvergencije 6% manja od početne vrijednosti. S druge strane kod optimizacije provedene samo na temelju troškova

instalacije krivulja ima prilično strmiji pad a iznos troškova na početku i na kraju optimizacije se razlikuje za gotovo 10%.

U nastavku su prezentirani rezultati dobiveni tom metodom za sve tri postavke provedene optimizacije.

Na slici 5.4 prikazana je trasa cjevovoda dobivena optimizacijom samo na temelju troškova eksploatacije.

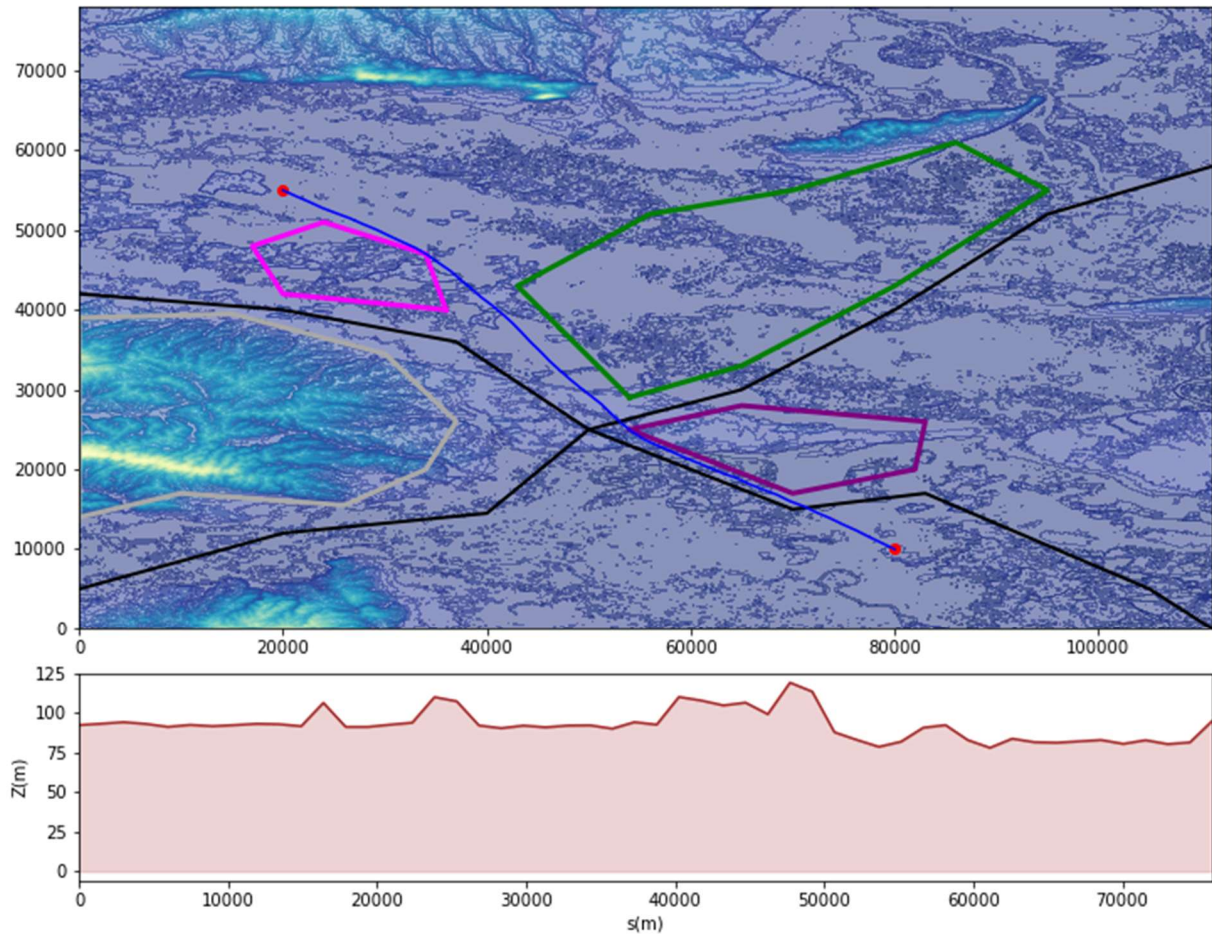


Slika 5.4 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova eksploatacije

Očekivano, ovako dobivena putanja, zanemaruje skuplje dijelove terena. Zbog konfiguracije tla u ovom testnom slučaju, putanja gotovo ravnom linijom povezuje početnu i krajnju točku trase uz samo pokoje izbočenje kojim izbjegava uzvišenim teren. Na taj način minimizirani su troškovi rada zbog manjih lokalnih i dužinskih gubitaka. Duljina trase iznosi 75,5 km a troškovi rada iznose 17,9 milijuna €.



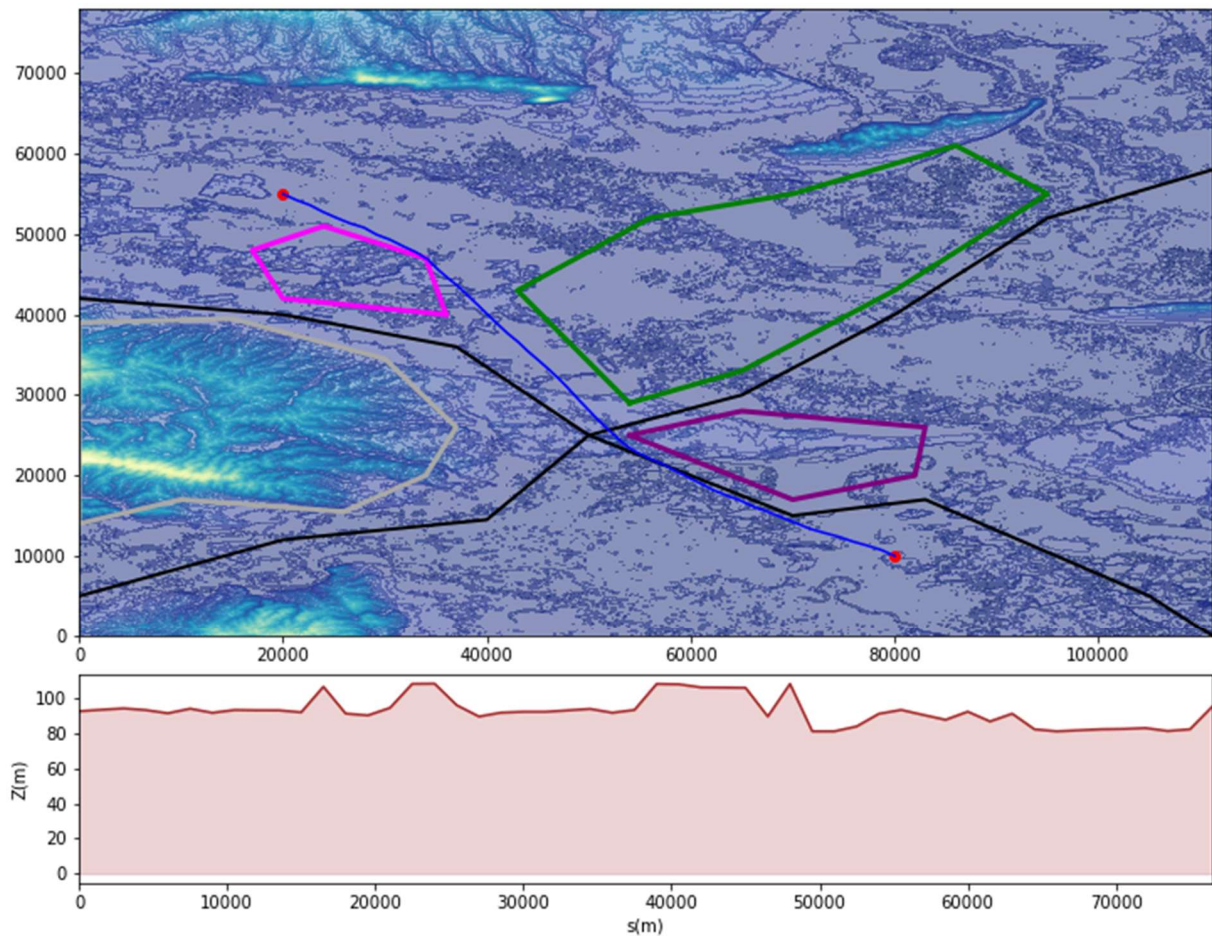
Na slici 5.5 prikazana je trasa cjevovoda dobivena optimizacijom samo na temelju troškova instalacije.



Slika 5.5 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije

Putanja dobivena na ovaj način vrlo uspješno izbjegava skuplje dijelove terena uz minimalnu udaljenost od istih u cilju pronalaska najkraće moguće putanje, ali zanemaruje troškove savladavanja visinske razlike te ne prati najbolje reljef. Najviša točka putanje nalazi na visini od 119,19 m. Usljed izbjegavanja skupljih dijelova terena, ova putanja je nešto duža od prethodne te duljina trase iznosi 76 km. Troškovi instalacije su nešto veći od troškova eksploatacije te iznose 21 milijun €. Putanja siječe prometnicu u dvije točke jer je trošak prekopavanja prometnice manji od troška iskopavanja kanala i nabave cijevi za nešto dužu trasu koja bi prometnicu sjekla u samo jednoj točki.

Na slici 5.6 prikazana je trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije.



Slika 5.6 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije

Zbog konfiguracije tla u ovom testnom slučaju koji ima puno područja zahtjevnog i skupljeg terena te ima malo uzvišenog terena, ova putanja je gotovo identična putanji dobivenoj optimizacijom samo na temelju troškova instalacije, stoga je i taj trošak gotovo jednak te on sada iznosi 21,1 milijuna €. Ova putanja je najdulja, a duljina trase iznosi 76,5 km. Usprkos tome što putanja izgleda gotovo identično kao putanja dobivena optimizacijom samo na temelju troškova instalacije, ova putanja ipak bolje prati reljef te se najviša točka ove putanje nalazi na visini od 108,12 m. Zbog nešto dulje putanje i zbog skretanja putanje da bi izbjegla skuplje dijelove terena porasli su troškovi eksploatacije na 18,1 milijuna € u odnosu na troškove rada putanje dobivene optimizacijom samo na temelju troškova eksploatacije.

## 6 TESTNI SLUČAJ C

### 6.1 Opis terena i infrastrukture

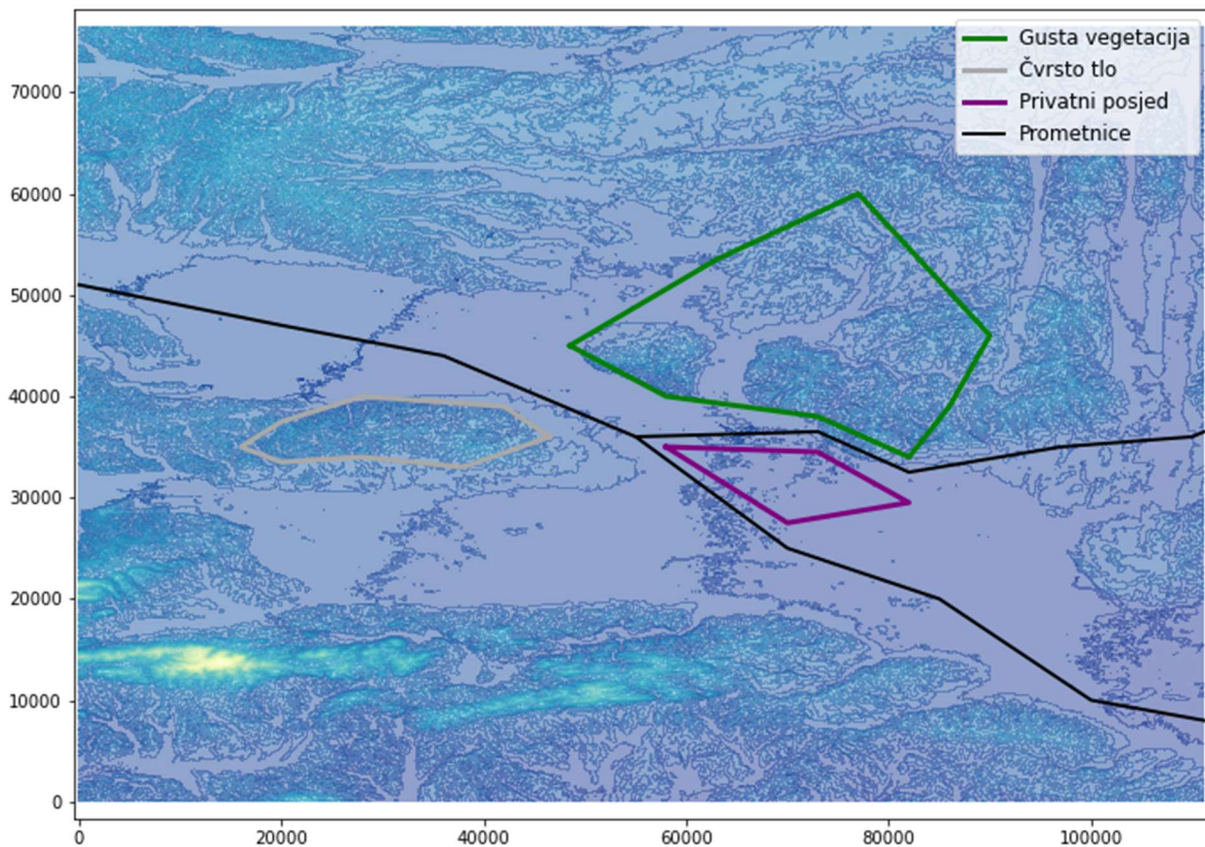
Testni slučaj C podrazumijeva područje od 46. do 47. geografske širine sjeverno, te od 16. do 17. geografske dužine istočno. Na slici 6.1 crvenim pravokutnikom označeno je područje koje je obuhvaćeno testnim slučajem C.



Slika 6.1 Područje obuhvaćeno testnim slučajem C

Na slici 6.2 prikazana je infrastruktura i obilježja terena testnog slučaja C. Kao i u prethodna dva slučaja područje guste vegetacije, gdje troškovi iskopavanja rastu za 60%, označeno je zelenom linijom, dok je područje čvrstog tla, gdje troškovi iskopavanja rastu za 50%, označeno sivom linijom. Isto tako privatni posjed, gdje troškovi iskopavanja rastu za 85%, označen je

ljubičastom linijom. Prometna infrastruktura označene je crnom linijom a reljef je prikazan bojama. Tamnije boje prikazuju područja niže nadmorske visine, dok područja koja su prikazana najsvjetlijim bojama predstavljaju najviše lokalitete.



Slika 6.2 Područje testnog slučaja B

## 6.2 Optimizacije trase cjevovoda

Kao i u prethodna dva slučaja optimizacija testnog slučaja C također je provedena u tri postavke: optimizacija na temelju troškova eksploatacije, optimizacija na temelju troškova instalacije te optimizacija na temelju troškova eksploatacije i na temelju troškova instalacije. Optimizacija je provedena za sve tri postavke pomoću tri optimizacijske metode: PSO metodom, FWA optimizacijom te DE metodom. U tablici 6.1 dani su ulazni podaci koji su zajednički svim provedenim optimizacijama.

Tablica 6.1 Ulazni podaci testnog slučaja C

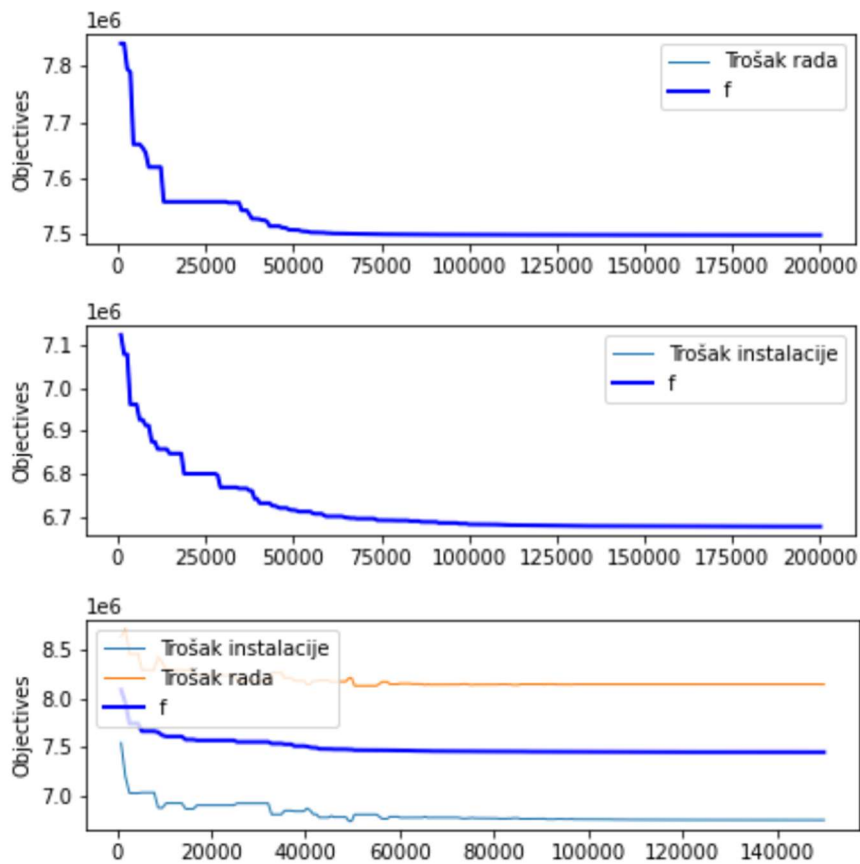
Broj dimenzija	50	
Broj evaluacija	150000	
Relativni kutovi	Donja granica	-30°
	Gornja granica	-30°
Protok [m <sup>3</sup> /s]	0,2	
Nazivni promjer cijevi [mm]	300	
Koordinate početne točke trase	x <sub>1</sub>	53000
	y <sub>1</sub>	60000
Koordinate krajnje točke trase	x <sub>n</sub>	70000
	y <sub>n</sub>	20000
Gustoća vode [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	
Visina neravnina na stijenci cijevi [m]	2·10 <sup>-4</sup>	
Koeficijent kinematske viskoznosti [m <sup>2</sup> /s]	10 <sup>-6</sup>	
Korisnost pumpe	0,8	
Cijena za 1 kWh električne energije [€/kWh]	0,1	
Vrijeme eksploatacije [godine]	3	

U tablici 6.1 dani su rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju C.

Tablica 6.2 Rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju C

	PSO metoda	FWA metoda	DE metoda
Optimizacija na temelju troškova eksploatacije i na temelju troškova instalacije			
Cijena instalacije, C <sub>i</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	6,78	6,76	6,8
Cijena eksploatacije, C <sub>e</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	8,2	8,16	8,14
Ukupna duljina [km]	48,7	48,4	48,3
Optimizacija na temelju troškova instalacije			
Cijena instalacije, C <sub>i</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	6,72	6,7	6,7
Ukupna duljina:	49,1	48,95	48,9
Optimizacija na temelju troškova eksploatacije			
Cijena eksploatacije, C <sub>e</sub> [·10 <sup>6</sup> €]	7,51	7,5	7,5
Ukupna duljina [km]	43,8	43,8	43,8

Za testni slučaj C najboljom se pokazala FWA optimizacijska metoda, s obzirom da su razlike u troškovima dobivenim optimizacijom DE i FWA metodom minimalne, prevagnula je DE metoda zbog bolje konvergencije koja je prikazana na slici 6.3.

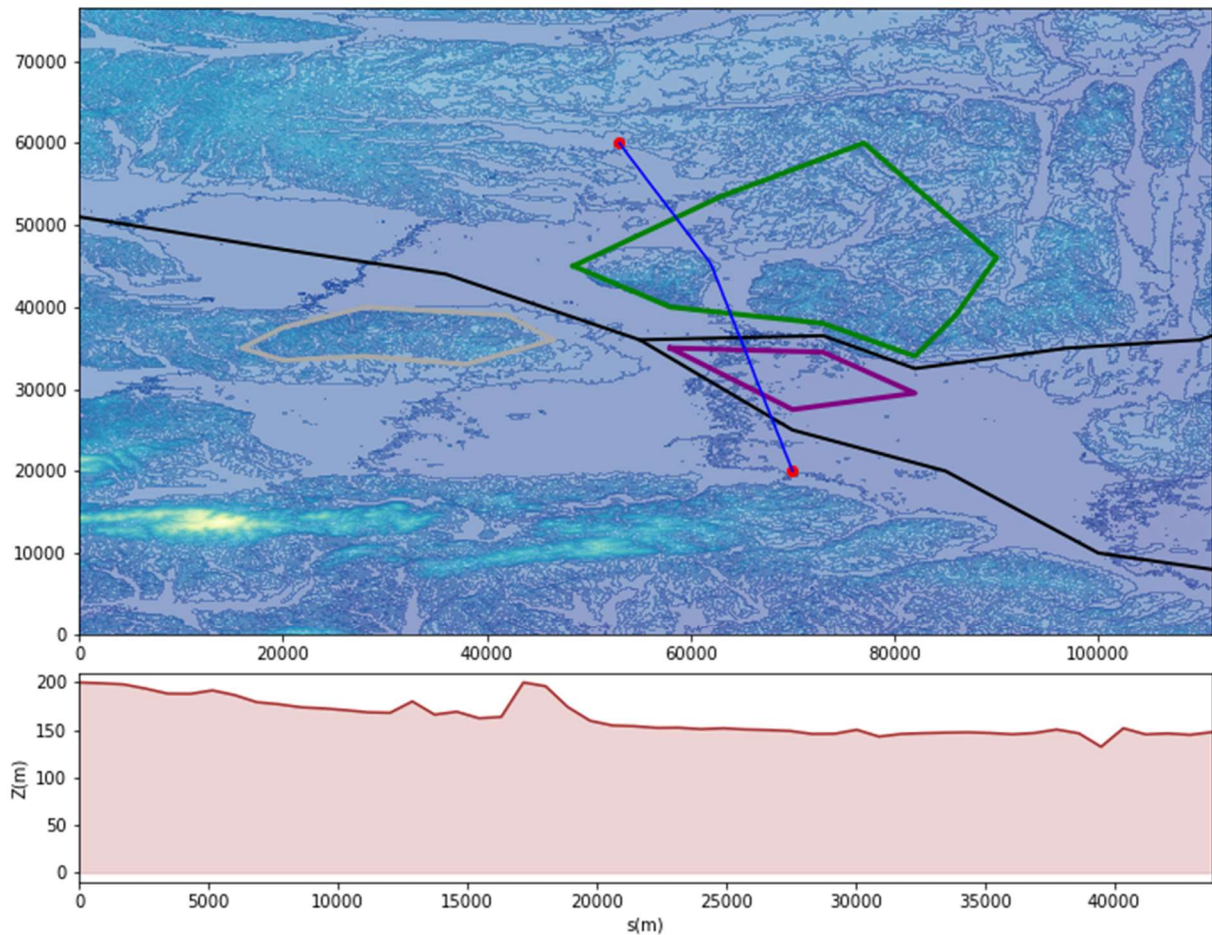


Slika 6.3 Graf konvergencije DE metode testnog slučaja C

U ovom slučaju metoda znatno brže konvergira kod optimizacije samo na temelju troškova eksploatacije te do stagnacije krivulje dolazi već nakon 80 000 evaluacija. Krajnja vrijednost troškova od početne razlikuje se za nepunih 5%. Kod optimizacije samo na temelju troškova instalacije do stagnacije krivulje dolazi tek nakon 115 000 evaluacija, a krajnja vrijednost troškova od početne se razlikuje za gotovo 7%. Nadalje, kod optimizacije na temelju troškova eksploatacije i troškova instalacije također brže konvergira krivulja troškova rada, a do stagnacije za obje krivulje dolazi nakon 100 000 evaluacija.

U nastavku su prezentirani rezultati dobiveni tom metodom za sve tri postavke provedene optimizacije.

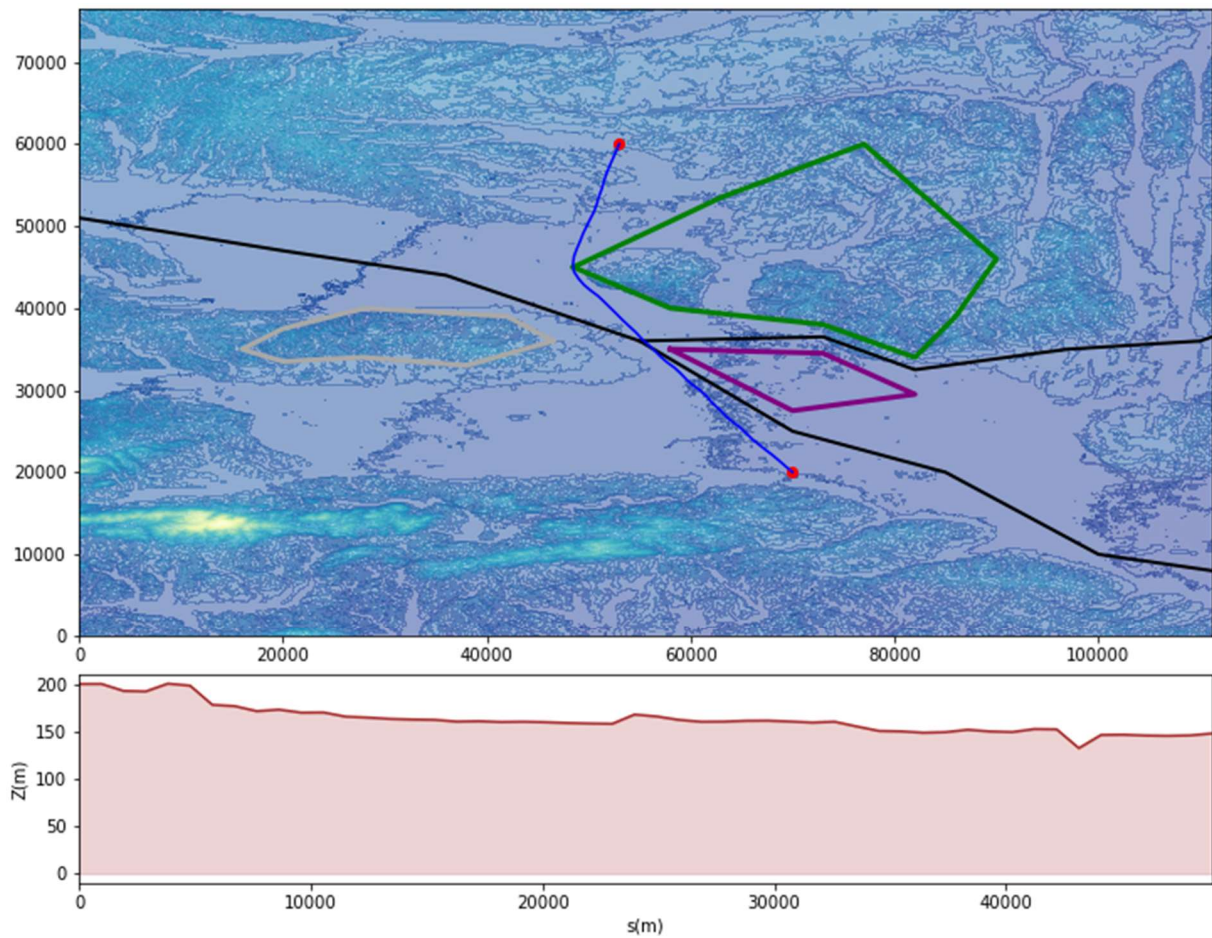
Na slici 6.4 prikazana je trasa cjevovoda dobivena optimizacijom samo na temelju troškova eksploatacije.



*Slika 6.4 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova eksploatacije*

Ovako dobivena putanja uspješno prati reljef, što se da zaključiti i iz činjenice da je visina terena gotovo konstantna duž cijelu trasu, međutim zanemaruje trošak iskopa kroz zahtjevni i skuplji dio terena. Putanja početnu i krajnju točku spaja gotovo ravnom crtom čime je dobivena izuzetno kratka trasa te njena duljina iznosi 43,8 km. Na taj način minimizirani su lokalni i dužinski gubici čime su minimizirani ujedno i troškovi rada koji iznose 7,5 milijuna €.

Na slici 6.5 prikazana je trasa cjevovoda dobivena optimizacijom samo na temelju troškova instalacije.

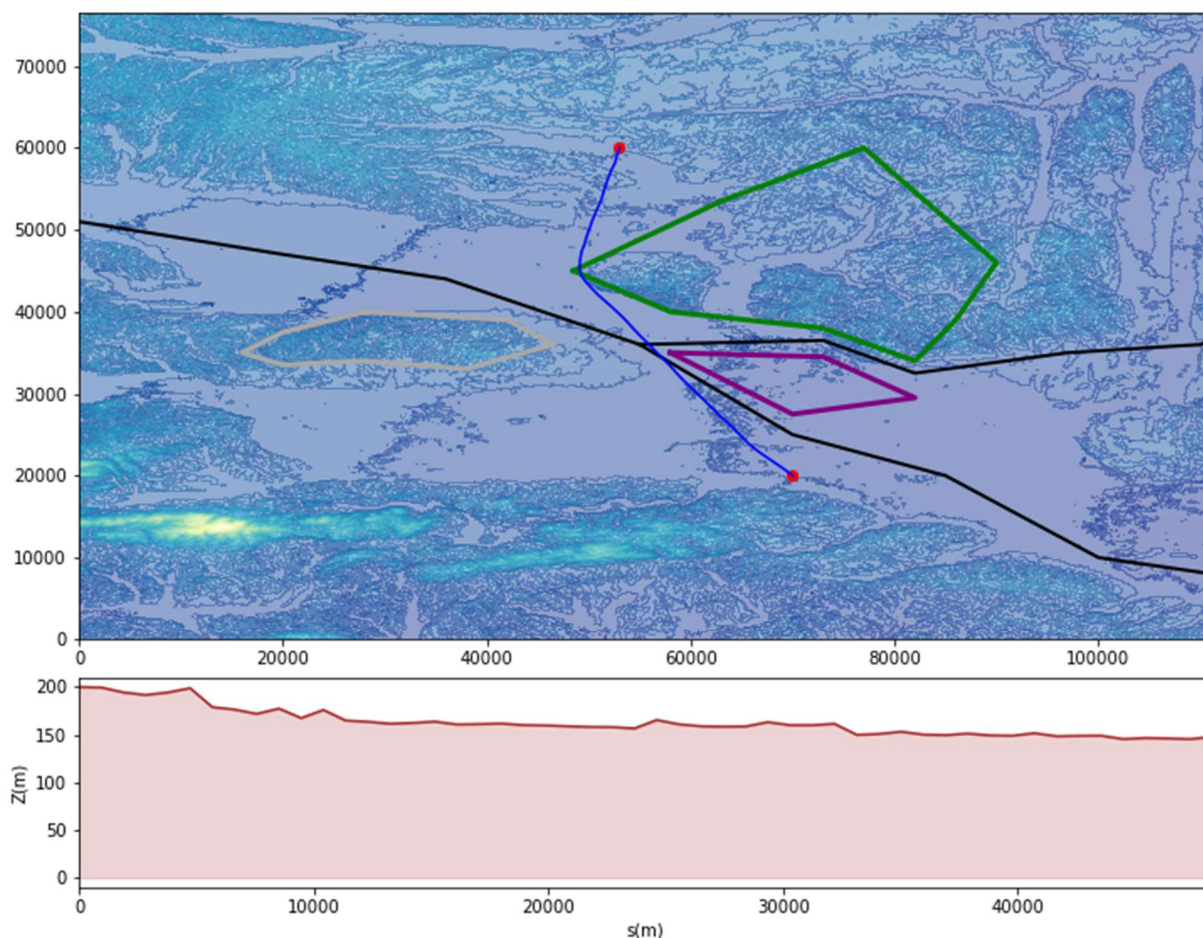


Slika 6.5 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije

Za razliku od prethodne putanje ovako dobivena putanja uspješno izbjegava skuplje i zahtjevne dijelove terena, uz minimalnu udaljenost od istih u cilju minimiziranja duljine putanje, usprkos tome trasa je znatno dulja od prethodne, čak 5,1 km. U cilju smanjenja troškova prekopavanja prometnice putanja prometnicu siječe u samo jednoj točki. Troškovi instalacije ovako dobivene putanje iznose 6,7 milijuna €.

Na slici 6.6 prikazana je trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije.





Slika 6.6 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije

Ovako dobivena putanja relativno uspješno izbjegava zahtjevniji dio terena obzirom da djelom prolazi preko područja guste vegetacije i u dvije točke siječe prometnicu. To je opravdano jer su troškovi instalacije ove putanje porasli za manje od 1% u usporedbi s troškovima instalacije putanje dobivene optimizacijom samo na temelju troškova instalacije, koji iznose 6,8 milijuna €. S druge strane troškovi rada ove putanje su porasli za gotovo 10% u usporedbi s troškovima rada putanje dobivene optimizacijom samo na temelju troškova eksploatacije, te sada iznose 8,14 milijuna €. Ovako dobivena putanja je nešto izravnija i kraća od prethodne te na taj način nastoji smanjiti troškove rada unatoč blagom porastu troškova instalacije zbog prelaska preko skupljeg terena.

## 7 ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada podrazumijevao je numeričku optimizaciju trase cjevovoda na digitalnom modelu terena. Za optimizaciju trase korištene su tri optimizacijske metode: *Particle Swarm Optimization*, *Fireworks Algorithm* te *Differential Evolution*. Provedene su tri inačice optimizacije: optimizacija samo na temelju troškova instalacije, optimizacija samo na temelju troškova eksploatacije te optimizacija na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije.

Proračun troškova instalacije cjevovoda sastoji se od izračuna troška kupnje samih cijevi, izračuna troška iskopavanja i zakopavanja kanala te od troškova prekopavanja postojeće prometne infrastrukture. U izračun troška iskopavanja i zakopavanja kanala uzeta je u obzir i vrsta tla na kojoj se izvodi iskopavanje i zakopavanje kanala te je sukladno tome cijena iskopavanja i zakopavanja kanala rasla odnosno padala.

Proračun troškova eksploatacije podrazumijeva izračun troškova za pogon pumpe koja će imati dovoljno snage da savlada sve lokalne i dužinske hidrauličke gubitke te visinsku razliku. Troškovi eksploatacije također uvelike ovise o periodu eksploatacije cjevovoda.

Putanju cjevovoda potrebno je parametrizirati na način prikladan za provođenje optimizacije. U ovom slučaju putanja je parametrizirana pomoću relativnih kutova između segmenata putanje. Inicijalno se putanja sastoji od nasumičnih kutova i jediničnih segmenata, da bi putanja prolazila kroz zadanu početnu i krajnju točku potrebno ju je rotirati i skalirati.

Optimizacija putanje je provedena na digitalnom modelu terena koji je izrađen pomoću digitalnog elevacijskog modela. Digitalni elevacijski model je prikaz topografske površine golog tla bez drveća, zgrada i bilo kojih drugih površinskih objekata. Takvi modeli dolaze u mnogo formata, u ovom radu korišten je „Geotiff“ format.

Sukladno rezultatima prikazanim u četvrtom, petom i šestom poglavlju vidljivo je da sve tri metode daju vrlo dobre rezultate što se da zaključiti i iz činjenice da sve tri metode daju vrlo slične rezultate te se oni razlikuju tek u nekoliko postotaka. Nadalje, sve tri metode daju vrlo slične putanje a glavna razlika između putanja se očituje u njihovoj zaglađenosti. Najuspješnijom se pokazala *Differential Evolution* metoda optimizacije.

Točnost ovako postavljene optimizacije može se povećati preciznije postavljenim proračunom troškova instalacije i eksploatacije te detaljnijim definiranjem obilježja tla digitalnog modela.

## LITERATURA

- [1] M CON products, „Precast concrete products price list 2021.“, s Interneta, [https://mconproducts.com/wp-content/uploads/2021/03/MCON-Products\\_Ottawa\\_Price-List-20210226-v3\\_web.pdf](https://mconproducts.com/wp-content/uploads/2021/03/MCON-Products_Ottawa_Price-List-20210226-v3_web.pdf), Srpanj 2022.
- [2] Pola, S.: „Izgradnja vodoopskrbnog cjevovoda“, završni rad, Politehnika Pula, Travanj 2022.
- [3] Ivić, S.: „Indago“, s Interneta, <https://pypi.org/project/Indago/>, kolovoz 2022.
- [4] Tam, A: „A Gentle Introduction to Particle Swarm Optimization“, s Interneta, <https://machinelearningmastery.com/a-gentle-introduction-to-particle-swarm-optimization/>, rujan 2022.
- [5] Tan, Y; i dr.: „Introduction to Fireworks Algorithm“, s Interneta, <https://www.cil.pku.edu.cn/docs/IntroducetoFireworksAlgorithm.pdf>, rujan 2022.
- [6] Georgioudakis, M.; Plevris, V.: „A Comparative Study of Differential Evolution Variants in Constrained Structural Optimization“, s Interneta, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2020.00102/full>, rujan 2022.
- [7] Renkavieski, C.; Stubs Parpinelli R.: L-SHADE with Alternative Population Size Reduction for Unconstrained Continuous Optimization, s Interneta, [file:///C:/Users/Laura%20Jankovi%C4%87/Downloads/rdazzi,+202190\\_1\\_OKOK.pdf](file:///C:/Users/Laura%20Jankovi%C4%87/Downloads/rdazzi,+202190_1_OKOK.pdf), rujan 2022.
- [8] Ivić, S.; Družeta, S.: „Pipeline route optimization with regard to installation and exploitation cost effectiveness“, s Interneta, [https://www.researchgate.net/publication/258514048\\_Pipeline\\_route\\_optimization\\_with\\_regard\\_to\\_installation\\_and\\_exploitation\\_cost\\_effectiveness](https://www.researchgate.net/publication/258514048_Pipeline_route_optimization_with_regard_to_installation_and_exploitation_cost_effectiveness), Ožujak 2022.
- [9] USGS: „What is a digital elevation model (DEM)?“, s Interneta, <https://www.usgs.gov/faqs/what-digital-elevation-model-dem>, Travanj 2022.
- [10] Gillies, S.: „The Shapely User Manual“, s Interneta, <https://shapely.readthedocs.io/en/stable/manual.html>, Travanj 2022.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Ovisnost cijene cijevi o promjeru [1].....	3
Slika 2.2 Kut između segmenata cjevovoda.....	8
Slika 3.1 Shematski prikaz rotacije i skaliranja trase cjevovoda [8].....	13
Slika 3.2 DEM datoteka Amfiteatra Red Rocks, Colorado dobivena pomoću bespilotne letjelice [9].....	13
Slika 4.1 Područje obuhvaćeno testnim slučajem A .....	15
Slika 4.2 Područje testnog slučaja A .....	16
Slika 4.3 Konvergenzijske krivulje FWA metode za slučaj A.....	18
Slika 4.4 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova eksploatacije .....	19
Slika 4.5 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije .....	20
Slika 4.6 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije .....	21
Slika 5.1 Područje obuhvaćeno testnim slučajem B .....	22
Slika 5.2 Područje testnog slučaja B .....	23
Slika 5.3 Konvergenzijske krivulje DE metode za slučaj B .....	25
Slika 5.4 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova eksploatacije .....	26
Slika 5.5 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije .....	27
Slika 5.6 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije .....	28
Slika 6.1 Područje obuhvaćeno testnim slučajem C .....	29
Slika 6.2 Područje testnog slučaja B .....	30
Slika 6.3 Graf konvergencije DE metode testnog slučaja C .....	32
Slika 6.4 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova eksploatacije .....	33
Slika 6.5 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije .....	34
Slika 6.6 Trasa cjevovoda nakon optimizacije na temelju troškova instalacije i troškova eksploatacije .....	35

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Promjeri cijevi i širina kanala [2] .....	5
Tablica 4.1 Ulazni podaci testnog slučaja A .....	17
Tablica 4.2 Rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju A .....	17
Tablica 5.1 Ulazni podaci testnog slučaja B .....	24
Tablica 5.2 Rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju B.....	24
Tablica 6.1 Ulazni podaci testnog slučaja C .....	31
Tablica 6.2 Rezultati svih provedenih optimizacija na testnom slučaju C.....	31

## SAŽETAK

Zadatak ovog rada bila je optimizacija trase cjevovoda na temelju troškova instalacije i eksploatacije. Optimizacija trase cjevovoda provedena je na digitalnom modelu terena koji sadrži informacije o vrsti tla i cijeni korištenja te o prisutnoj prometnoj infrastrukturi. Na temelju pojednostavljenog proračuna instalacije izračunavaju se troškovi postavljanja cjevovoda. Trošak eksploatacije cjevovoda se izračunava pomoću stacioniranog hidrauličkog proračuna strujanja fluida u cjevovodu. Trasa cjevovoda ispitana je pomoću tri optimizacijske metode: *Particle Swarm Optimization*, *Fireworks Algorithm* te *Differential Evolution*. Usvojena je trasa cjevovoda koja nudi najniže instalacijske te eksploatacijske troškove kao i najgladū putanju. Zaključeno je da su sve tri primijenjene optimizacijske metode u stanju uspješno optimizirati trasu cjevovoda te da nude vrlo slične rezultate.

**Ključne riječi:** Cjevovod, numerička optimizacija, troškovi instalacije, troškovi eksploatacije, *Particle Swarm Optimization*, *Fireworks Algorithm* te *Differential Evolution*

## **ABSTRACT**

The task of this paper was the optimization of a pipeline route based on installation and exploitation costs. The optimization of the pipeline route was conducted on a digital terrain model that contains information about the type of soil and the cost of use, as well as the existing traffic infrastructure. The costs of installation of the pipeline are calculated based on a simplified installation cost evaluation. The cost of pipeline exploitation is calculated using a static hydraulic calculation of the fluid flow through the pipeline. The pipeline route was optimized using three optimization methods: Particle Swarm Optimization, Fireworks Algorithm and Differential Evolution. The chosen pipeline route offered the lowest installation and exploitation costs, as well as the smoothest path. In conclusion it was found that all the applied optimization methods were able to successfully optimize the route and gave very similar results.

**Key words:** Pipeline, numerical optimization, installation costs, exploitation costs, Particle Swarm Optimization, Fireworks Algorithm and Differential Evolution