

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Stefan Ivić

MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA
POLAGANJA PODMORSKIH
CJEVOVODA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2014.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Stefan Ivić

MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA
POLAGANJA PODMORSKIH
CJEVOVODA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Senka Maćešić

Komentor: prof. dr. Luka Sopta

Rijeka, 2014.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Stefan Ivić

MODELING AND
OPTIMIZATION OF SUBMARINE
PIPE LAYING

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2014.

Mentor disertacije: prof. dr. sc. Senka Maćešić

Komentor disertacije: prof. dr. sc. Luka Sopta

Doktorska disertacija obranjena je dana _____ na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom:

1. doc. dr. sc. Siniša Družeta, predsjednik
2. prof. dr. sc. Senka Maćešić, mentor, član
3. prof. dr. sc. Luka Sopta, komentor, član
4. prof. dr. sc. Marko Čanađija, član
5. prof. dr. sc. Josip Tambača, član, (Matematički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu)

SAŽETAK / ABSTRACT

U doktorskoj disertaciji obrađena je tema modeliranja i optimizacije polaganja podmorskih cjevovoda. Razmatran je model polaganja temeljen na nelinearnom elastičnom modelu grede uz elastične kontaktne interakcije s krutim strukturama valjkastih oslonaca i morskog dna. Osnovni model polaganja podmorskih cjevovoda te proširenja modela implementirani su i rješavani u softveru Abaqus za različite primjere polaganja cjevovoda. Formuliran je optimizacijski problem određivanja parametara polaganja, za koji je razvijena hibridna specijalizirana optimizacijska metoda temeljena na metodi optimizacije rojem čestica. Razvijeni optimizacijski postupak je testiran i analiziran na više različitih slučajeva polaganja podmorskih cjevovoda.

The doctoral thesis deals with the topic of modeling and optimization of the submarine pipe laying. Considered laying model is based on a nonlinear elastic beam model with elastic contact interactions with rigid structures of roller supports and the seabed. The basic model of the submarine pipe laying and its extensions are implemented and solved in the Abaqus software for various pipe laying cases. The optimization problem is formulated to determine the parameters of pipe laying, for which a specialized hybrid optimization method is developed based on a particle swarm optimization method. Developed optimization method was tested and analyzed in several different cases of submarine pipe laying.

KLJUČNE RIJEČI / KEYWORDS

- Polaganje podmorskih cjevovoda
- Nelinearni model grede
- Abaqus
- Višeciljna optimizacija
- Optimizacija rojem čestica

- Submarine pipe laying
- Nonlinear beam model
- Abaqus
- Multiobjective optimization
- Particle swarm optimization

SADRŽAJ

UVOD	1
1 TEHNOLOGIJA POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA	5
1.1 Polaganje podmorskih cjevovoda	6
1.2 S-Lay metoda polaganja cjevovoda	8
1.3 Dosadašnja istraživanja	12
1.3.1 Analitičke aproksimacije	12
1.3.2 Numerički modeli	13
1.3.3 Optimizacije parametara polaganja	14
2 MODELIRANJE POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA	17
2.1 Model napete grede	18
2.2 Varijante modela	23
2.3 Deformabilne i krute strukture	25
2.4 Postavljanje ograničenja i opterećenja	27
2.4.1 Ograničenja	27
2.4.2 Opterećenja	29
2.5 Kontakti	31
2.5.1 Kontaktne interakcije u Abaqusu	31
2.5.2 Kontakti u modelu polaganja	35
2.6 Procedure rješavanja	38
2.6.1 Faze Abaqus simulacije	38
2.6.2 Vanjske procedure	40
2.7 Napredne značajke modela	44
2.7.1 Model plutajućeg stingera	44
2.7.2 Neravno morsko dno	46
2.7.3 Uzgonski tankovi	47
3 VALIDACIJA I PRIMJENA MODELA	49
3.1 Usporedba varijanti modela	50
3.2 Validacija modela	54

3.3	Primjena modela polaganja podmorskih cjevovoda	56
3.3.1	Osnovni primjer polaganja	56
3.3.2	Polaganje s plutajućim stingerom	60
3.3.3	Polaganje na neravno morsko dno	63
3.3.4	Polaganje s uzgonskim tankovima	65
4	FORMULACIJA OPTIMIZACIJSKOG PROBLEMA	67
4.1	Optimizacijske varijable	69
4.2	Ciljevi optimizacije	74
4.3	Ograničenja	77
4.4	Funkcija cilja	80
4.4.1	Ocjena ciljeva optimizacije	81
4.4.2	Pomoćni ciljevi optimizacije	83
4.4.3	Ocjena ograničenja	84
4.5	Analiza osjetljivosti	87
5	OPTIMIZACIJSKI POSTUPAK	89
5.1	Optimizacija rojem čestica	90
5.2	Modificirana optimizacija rojem čestica	94
5.2.1	Dodatni pomak čestica	94
5.2.2	Diskretne varijable	97
5.3	Implementacija optimizacijskog postupka	101
5.4	Pareto optimalnost	102
6	REZULTATI OPTIMIZACIJE PARAMETARA POLAGANJA CJEVOVODA	103
6.1	Primjer A	104
6.1.1	Podaci i postavke	104
6.1.2	Rezultati	107
6.2	Primjer B	113
6.2.1	Rezultati	113
6.3	Primjer C	118
6.3.1	Podaci i postavke	118
6.3.2	Rezultati	121
6.4	Utjecaj dodatnog pomaka	127
	ZAKLJUČAK	128
	BIBLIOGRAFIJA	131
	POPIS SLIKA	137
	POPIS TABLICA	141

KORIŠTENE OZNAKE

Simbol	Jedinica	Opis
B	-	Uzorak uzgonskih tankova
B ₁	N	Najbliža manja vrijednost uzorka uzgonskih tankova
B ₂	N	Najbliža veća vrijednost uzorka uzgonskih tankova
c _c	-	Kognitivni faktor
c _s	-	Socijalni faktor
D	m	Vanjski promjer cijevi
d _i	m	Udaljenost cijevi od valjkastog oslonca
E	Pa	Youngov modul
F	-	Funkcija cilja
\tilde{F}	-	Interpolirana funkcija cilja
F _x	N	Horizontalna sila na rubnoj točki čvoru cjevovoda
F _T	N	Sila trenja
F _N	N	Kontaktna normalna sila
F _G	N	Sila stezanja napinjača
F _n ^p , F _n	N	Aksijalna sila na početku cijevi
F _a , F _b , F _c	N	Horizontalne sile na cijev u koracima <i>regula falsi</i> metode
F _y ^s	N	Sila uzgona plutajućeg <i>stingera</i>
F _x ^k	N	Horizontalna sila na kraju cjevovoda
G _s	N	Težina <i>stingera</i>
G _{wi}	N	Težina vode i-tog balastnog spremnika <i>stingera</i>
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
g	-	Vektor najboljeg položaja susjednih čestica
h _i	m	Visina valjkastog oslonca
I	m ²	Osni moment tromosti
i _{max}	-	Maksimalni broj iteracija <i>regula falsi</i> metode

Simbol	Jedinica	Opis
L_+	m	Dobivena duljina neuronjenog djela cijevi
l_+	m	Postavljena duljina neuronjenog djela cijevi
l_u	m	Udaljenost centra uzgona <i>stingera</i> od zgloba
l_i	m	Udaljenost i-tog centra balastnog spremnika <i>stingera</i> od zgloba
l_m	m	Udaljenost centra mase <i>stingera</i> od zgloba
l_s	m	Ukupna duljina <i>stingera</i>
l_{st}	m	Razmak vrha <i>stingera</i> i morskog dna
$l_{st_{dop}}$	m	Minimalni dopušteni razmak vrha <i>stingera</i> i morskog dna
M	Nm	Moment savijanja cijevi
M_{avg}	Nm	Prosječni moment savijanja cijevi iznad valjkastih oslonaca
M_{dop}^o	Nm	Maksimalni dopušteni moment savijanja u <i>overbendu</i>
M_{max}^o	Nm	Maksimalni apsolutni moment savijanja u <i>overbendu</i>
M_{dop}^s	Nm	Maksimalni dopušteni moment savijanja u <i>sagbendu</i>
M_{max}^s	Nm	Maksimalni apsolutni moment savijanja u <i>sagbendu</i>
M_{n_s}	Nm	Moment savijanja iznad zadnjeg oslonca
M_i	Nm	Moment savijanja cijevi iznad valjkastog oslonca
M_s	N	Moment sile uzgona <i>stingera</i>
M^w	N	Moment uzgona balastnih spremnika <i>stingera</i>
M_{max}^w	N	Maksimalni mogući moment uzgona balastnih spremnika <i>stingera</i>
N	N	Aksijalna sila u cijevi
N_0	N	Aksijalna sila u cijevi na izlazu iz napinjača
n_s	-	Broj valjkastih oslonaca na brodu i <i>stingeru</i>
O	-	Ocjena ciljeva optimizacijskog problema
\bar{O}	-	Interpolirana ocjena ciljeva
o_i	-	Normirana ocjena cilja optimizacijskog problema
o_B	-	Normirana ocjena cilja minimizacije korištenja uzgonskih tankova
o_T	-	Normirana ocjena cilja minimizacije napetosti cijevi
o_{M_o}	-	Normirana ocjena cilja minimizacije momenta savijanja u <i>overbendu</i>
o_{M_s}	-	Normirana ocjena cilja minimizacije momenta savijanja u <i>sagbendu</i>
o_d	-	Normirana ocjena cilja minimizacije udaljenosti valjkastih oslonaca od cijevi
$o_{M_{std}}$	-	Normirana ocjena cilja minimizacije standardna devijacije momenta savijanja iznad oslonaca

Simbol	Jedinica	Opis
σ_{M_z}	-	Normirana ocjena cilja minimizacije momenta savijanja iznad zadnjeg oslonaca
P	-	Ocjena ograničenja optimizacijskog problema
\tilde{P}	-	Interpolirana ocjena ograničenja
p_i	-	Kazna ograničenja i -tog optimizacijskog problema
p_{M_o}	-	Kazna ograničenja maksimalnog momenta savijanja u <i>overbendu</i>
p_{M_s}	-	Kazna ograničenja maksimalnog momenta savijanja u <i>sagbendu</i>
p_{R_i}	-	Kazna ograničenja maksimalne sile reakcije valjkastog oslonca
$p_{l_{st}}$	-	Kazna ograničenja minimalnog razmaka vrha <i>stingera</i> i morskog dna
p_{fs}	-	Kazna ograničenja ostvarivof balastnog plana plutajućeg <i>stingera</i>
\mathbf{p}	-	Vektor najboljeg položaja čestice
Q	N	Poprečna sila na cijev
q	N/m	Kontinuirano poprečno opterećenje
q_y	N/m	Vertikalno kontinuirano opterećenje
q_p	N/m	Jedinična težina cijevi
q_b	N/m	Jedinični uzgon cijevi
q_y^+	N/m	Dodatno kontinuirano opterećenje neuronjenog dijela cijevi
q_y^-	N/m	Kontinuirano opterećenje vlastitom težinom uronjene cijevi
q_y^{+}	N/m	Dodatno kontinuirano opterećenje neuronjenog dijela cijevi
R_i	N	Reakcija valjkastog oslonca
R_i^{dop}	N	Maksimalna dopuštena reakcija valjkastog oslonca
\mathbf{r}	-	Vektor nasumičnih vrijednosti s intervala $[0, 1]$
s	m	Udaljenost duž osi cijevi
s_p	m	Debljina stjenke cijevi
T	N	Sila napinjača
T_{max}	N	Maksimalna sila napinjača
T_1	N	Najbliža manja diskretna sila napinjača
T_2	N	Najbliža veća diskretna sila napinjača
U_s	m	Uzgon <i>stingera</i>
u	m	Pomak, translacija
u_x	m	Horizontalni pomak početnog čvora cijevi
u_y	m	Vertikalni pomak početnog čvora cijevi
u_x^b	m	Horizontalni pomak broda
u_y^b	m	Vertikalni pomak broda

Simbol	Jedinica	Opis
u_x^s	m	Horizontalni pomak <i>stingera</i>
u_y^s	m	Vertikalni pomak <i>stingera</i>
u_x^d	m	Horizontalni pomak morskog dna
u_y^d	m	Vertikalni pomak morskog dna
\mathbf{v}	-	Vektor brzine čestice
w	m	Otklon grede
w_i	-	Težinski faktori ciljeva optimizacijskog problema
w^B	N/m	Prosječni jedinični uzgon uzgonskih tankova
w_{\max}^B	N/m	Najveći prosječni jedinični uzgon uzgonskih tankova
w_p	N/m	Jedinična težina cijevi
w_b	N/m	Jedinični uzgon cijevi
x	m	Koordinate položaja (horizontalna)
x_0	m	Koordinate nedeformiranog položaja (horizontalna)
x_i	-	Optimizacijska varijabla
x_i^{\min}	-	Donja granica optimizacijske varijable
x_i^{\max}	-	Gornja granica optimizacijske varijable
\mathbf{x}	-	Vektor optimizacijskih varijabli
\mathbf{x}^*	-	Vektor rješenja optimizacijskog problema
y	m	Koordinate položaja (vertikalna)
y_0	m	Koordinate nedeformiranog položaja (vertikalna)
y_d	m	Vertikalna koordinata profila morskog dna
α_b	°	Nagib broda
α_s	°	Kut <i>stingera</i>
γ_B	-	Težinski faktori cilja minimizacije korištenja uzgonskih tankova
γ_T	-	Težinski faktori cilja minimizacije napetosti cijevi
γ_{M_o}	-	Težinski faktori cilja minimizacije momenta savijanja u <i>overbendu</i>
γ_{M_s}	-	Težinski faktori cilja minimizacije momenta savijanja u <i>sagbendu</i>
γ_d	-	Težinski faktori cilja minimizacije udaljenosti valjkastih oslonaca od cijevi
$\gamma_{M_{std}}$	-	Težinski faktori cilja minimizacije standardna devijacije momenta savijanja iznad oslonaca
γ_{M_z}	-	Težinski faktori cilja minimizacije momenta savijanja iznad zadnjeg oslonaca
δ	-	Vektor dodatnog pomaka čestice
ΔF_n	N	Razlika postignute i željene napetosti na početku cijevi
ϵ_F	N	Dopuštena greška <i>regula falsi</i> metode

Simbol	Jedinica	Opis
ϵ_d	m	Tolerancija udaljenosti cijevi i morskog dna
θ	°	Nagib cijevi
θ_0	°	Nagib napinjača
λ	-	Prigušenje dodatnog pomaka
μ	-	Statički koeficijent trenja
ρ_p	kg/m ³	Gustoća materijala cijevi
ρ_w	kg/m ³	Gustoća vode
φ	rad	Kutni pomak, rotacija
φ^b	rad	Kutni pomak broda
φ^s	rad	Kutni pomak <i>stingera</i>
φ^d	rad	Kutni pomak morskog dna
ω	-	Faktor inercije

Transport naftnih derivata odavno je prešao kontinentalne okvire i često se velike udaljenosti savladavaju morskim putem, pomoću podmorskih cjevovoda. Podmorski cjevovodi su od ključnog značaja i za povezivanja morskih bušotina s transportnom mrežom cjevovoda i, u konačnici, s kopnenim postrojenjima, spremnicima ili cjevovodima.

Instalacija podmorskih cjevovoda je zahtjevan inženjerski zahvat koji zahtijeva specijaliziranu opremu, a moguće ga je ostvariti upotrebom nekoliko različitih tehnika polaganja. Predmet ovoga rada je polaganje podmorskih cjevovoda S-Lay metodom, koja omogućuje najšire područje primjene s obzirom na promjer cjevovoda i dubinu polaganja. Zbog velike tehničke složenosti operacije polaganja, potrebno je pomno planiranje i analiza kako bi se omogućila sigurna instalacija cijevi na morsko dno. Simulacije polaganja i odabir optimalnih parametara polaganja spada u temeljne zadaće *offshore* inženjera.

Dvije zasebne, ali nadopunjujuće cjeline: modeliranje polaganja cjevovoda te optimizacija parametara polaganja, obrađene su u šest glavnih poglavlja ove disertacije.

U prvom poglavlju dan je pregled tehnologije polaganja podmorskih cjevovoda uz poseban osvrt na S-Lay metodu. Opisana je osnovna terminologija i karakteristike ove metode polaganja. U nastavku prvog poglavlja prezentirana su dosadašnja istraživanja vezana uz temu ovoga rada.

Razrada modela polaganja podmorskih cjevovoda te njegova implementacija u softveru Abaqus opisani su u drugom poglavlju. Predstavljene su dvije osnovne varijante modela koje se razlikuju prema načinu postizanja napetosti cjevovoda pri polaganju. U prvoj varijanti modela, prilagođava se sila napetosti na kraju cjevovoda kojom se postiže željenu napetost cijevi na izlazu iz napinjača. Tarni model napinjača je korišten u drugoj, složenijoj, varijanti modela koja detaljnije modelira stvarne fizikalne pojave koje se

dešavaju u mehanizmu napinjača. Detaljno su objašnjene procedure rješavanja obiju varijanti modela. Uz osnovni model, predstavljena su i proširenja modela za kojima se može pojaviti potreba zbog dodatnih zahtjeva pri simulaciji polaganja. Napredne značajke modela obuhvaćaju modeliranje plutajućeg *stingera*, polaganja na neravno morsko dno te upotreba uzgonskih tankova na cjevovodu tijekom polaganja.

Treće poglavlje sadrži validaciju predstavljenog modela, usporedbu varijanti modela te primjere primjene za različite slučajeve polaganja podmorskih cjevovoda. Međusobno su uspoređeni rezultati dobiveni za obje varijante modela polaganja uz detaljniju analizu ponašanja cjevovoda neposredno na izlazu iz mehanizma napinjača. Rezultati dobiveni predstavljenim modelom su uspoređeni s specijaliziranim i validiranim softverom za simulaciju polaganja cjevovoda OFFPIPE, čime je pokazana adekvatnost, točnost i pouzdanost predstavljenog modela. U nastavku poglavlja prikazani su rezultati simulacija polaganja za različite primjere, uključujući i korištenje svih naprednih značajki modela.

U četvrtom poglavlju razrađen je i formuliran optimizacijski problem određivanja parametara polaganja. Određene su optimizacijske varijable te definirani ciljevi i ograničenja pri projektiranju polaganja podmorskih cjevovoda. Problem je klasificiran kao mješoviti višeciljni multimodalni optimizacijski problem uz nelinearna ograničenja. Definirana je ocjena konfiguracije parametara polaganja, u vidu funkcije cilja, koja obuhvaća sve ciljeve i ograničenja optimizacijskog problema. Na kraju poglavlja, dan je sažetak analize osjetljivosti na temelju koje se mogu utvrditi neke međuzavisnosti optimizacijskih varijabli, postavljenih ciljeva te ograničenja.

Razvijen hibridni optimizacijski postupak, namijenjen i specijaliziran za rješavanje problema određivanja konfiguracije polaganja, opisan je u petom poglavlju. Optimizacijski postupak se temelji na metodi optimizacije rojem čestica (eng. *Particle swarm optimization*) koja je proširena specifičnim značajkama u svrhu uspješnijeg i bržeg rješavanja optimizacije parametara polaganja. Uz navedeno, diskretne optimizacijske varijable se, uz uvođenje interpolacije između diskretnih vrijednosti, tretiraju kao kontinuirane. Opisana je implementacija optimizacijskog postupka, ostvarena pomoću optimizacijskog algoritma implementiranog u programskom jeziku Python koji interaktivno kontrolira izvršavanje Abaqus simulacije polaganja cjevovoda. Na kraju poglavlja definirani su pojmovi Pareto optimalnosti i Pareto fronte za višeciljne optimizacijske probleme koji će se koristiti u analizi rezultata optimizacijskog postupka.

U šestom poglavlju definirano je više različitih primjera polaganja podmorskih cjevovoda za koje su provedene optimizacije parametara polaga-

nja. Primjeri polaganja su osmišljeni kako bi se ispitala i demonstrirala učinkovitost razvijenog optimizacijskog postupka za različite probleme određivanja parametara polaganja i to za različite uvjete polaganja te za različite odabire optimizacijskih parametara. Konvergencija i rezultati su, za svaki primjer, vizualizirani te je analizirana uspješnost optimizacijskog postupka. Za detaljniji uvid u optimizacijski postupak, prikazani su rezultati u prostoru ciljeva optimizacije, te su utvrđene Pareto fronte.

Na kraju disertacije, u zaključku, dan je osvrt na adekvatnost modela polaganja cjevovoda i na uspješnost optimizacijskog postupka određivanja parametara polaganja. Predložene su smjernice za daljnja istraživanja ove teme u vidu proširenja modela polaganja te ideje za dodatna poboljšanja razvijenog optimizacijskog postupka.

TEHNOLOGIJA POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA

Najekonomičniji transport nafte i zemnog plina je transport pomoću cjevovoda (plinovoda i naftovoda). Podmorski cjevovodi, položeni na morsko dno, osnovni su dio transportne mreže između mnogih platformi, obalnih rafinerija i spremnika [2].

Potreba za podmorskim cjevovodima počela se javljati u sredinom 20. stoljeća zbog sve veće potražnje za fosilnim energentima. Ta nezaustavljiva globalna potreba prisilila je naftnu industriju na eksploataciju naftnih derivata u sve udaljenijim i dubljim morima te stvarala nove zahtjeve za polaganje cjevovoda u sve težim okruženjima. Napretkom tehnologije, uvedeno ju i usavršeno više tehnike polaganja cjevovoda koje omogućuju instalaciju cjevovoda u gotovo svim uvjetima.

U ovom poglavlju navedene su i opisane osnovne metode polaganja podmorskih cjevovoda. Detaljnije je dan pregled S-Lay metode, uz osvrt na njene osnovne tehnološke i inženjerske značajke. Iznesena je terminologija, vezana uz polaganje cjevovoda, koja se uobičajeno koristi u *offshore* industriji, a primijenjena je u svim poglavljima ovoga rada.

Na kraju poglavlja, dan je pregled relevantnih znanstvenih radova iz područja modeliranja polaganja podmorskih cjevovoda te optimizacije parametara polaganja.

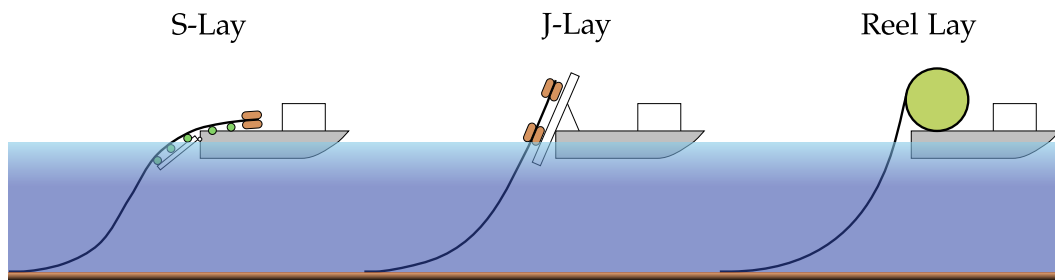
1.1 Polaganje podmorskih cjevovoda

Polaganje cjevovoda na morsko dno je jedan od najzahtjevnijih inženjerskih zahvata uopće te zahtjeva pažljivu i temeljitu pripremu i analizu prije samog polaganja. Napretkom tehnologije i inženjerskih znanja širi se područje primjene tehnika polaganja cjevovoda, prvenstveno u pogledu sve većih promjera cijevi te sve većih dubina u kojima se vrše polaganja [14, 10, 78].

Postoji više metoda polaganja podvodnih cjevovoda, koje koriste posebno dizajnirane specijalne brodove ili plovne objekte te pripadajuću opremu.

Tri su osnovne metode polaganja cjevovoda (Slika 1.1):

- S-Lay,
- J-Lay i
- Reel Lay.



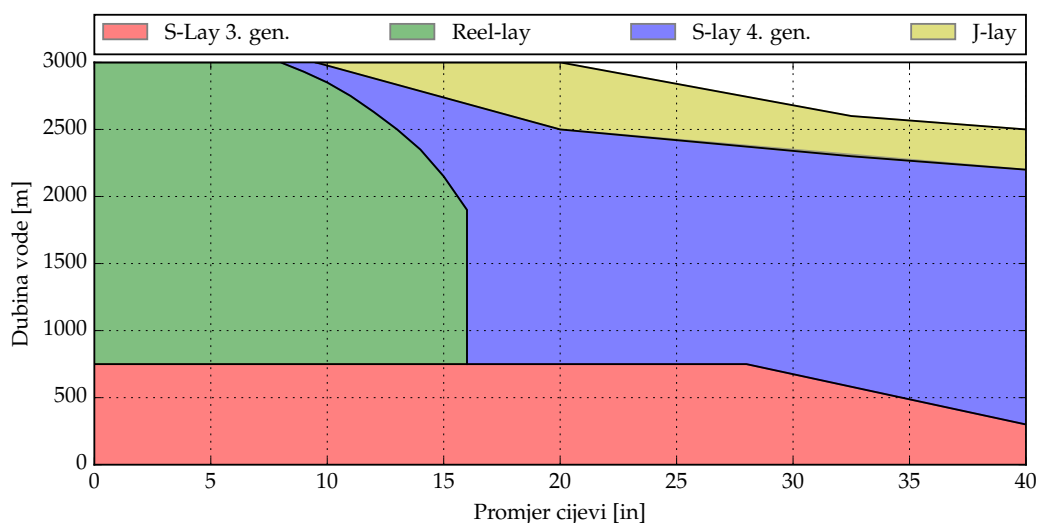
Slika 1.1: Osnovne metode polaganja podmorskih cjevovoda

Svaka od navedenih metoda ima ograničenja, prvenstveno prema veličini cijevi i dubiniorskog dna (Slika 1.2). Dužina dnevno položenog cjevovoda ovisi o metodi polaganja, svojstvima cijevi, dubini vode i vremenskim uvjetima. Najsporija metoda je J-Lay s kojom se polaže oko 1 do 1.5 km na dan, S-Lay može položiti do 5 km dnevno dok se Reel-Lay metodom postiže brzina polaganja do 14 km cjevovoda na dan.

Ključne razlike u tehnikama polaganja, sa stanovišta strukturalne analize cijevi tijekom polaganja, su načini na koji se cjevovod spušta s plovila.

Reel Lay se koristi samo kod vrlo tankih cijevi, najčešće za pomoćne cjevovode, kablove ili fleksibilne cijevi. Na brodu polagaču se nalazi veliki bubanj s namotanim cjevima ili kablovima, koji se polako odmata i spušta cjevovod u more. Pošto su cijevi već spojene u namotaju, polaganje se odvija kontinuirano pa je najveća prednost ove metode brzina polaganja.

Kod S-Lay i J-Lay načina polaganja, cjevovod se formira zavarivanjem segmenata cijevi (eng. *pipe joints*), nakon čega slijedi ispitivanje zavora, nanošenje obloge na zavar te spuštanje cijevi na morsko dno. Cijeli proces



Slika 1.2: Mogućnost polaganja ovisi o dubini vode i veličini cijevi

spajanja cijevi je vremenski zahtjevan pa su ove metode sporije od Reel Lay metode.

J-Lay je najskuplja i najsporija metoda polaganja, no to je jedini način polaganja podvodnih cjevovoda na ekstremnim dubinama. Stavljanjem cijevi na gotovo vertikalnu rampu (toranj) izbjegava se savijanje cijevi na brodu, ali se usporava proces zavarivanja i polaganja.

S-Lay metoda polaganja ima najšire područje djelovanja, može polagati gotovo sve debljine cijevi od najplićih do vrlo dubokih voda. Zbog tih osobina najčešće je korištena metoda polaganja podvodnih cjevovoda. Naziv "S-Lay" dan je zbog oblika savijanja cijevi – nalik slovu S.

1.2 S-Lay metoda polaganja cjevovoda

Proces S-Lay (Slike 1.3 i 1.4) polaganja započinje procesom zavarivanja segmenata cijevi (eng. *pipe joint*) na kraj cjevovoda koji se polaže. Duljina segmenata cijevi je standardizirana i iznosi 12.2 metara. Segmenti se nalaze u skladišnom prostoru broda cjevopolagača koji se konstantno opskrbljuje cijevima preko drugih pomoćnih plovila.



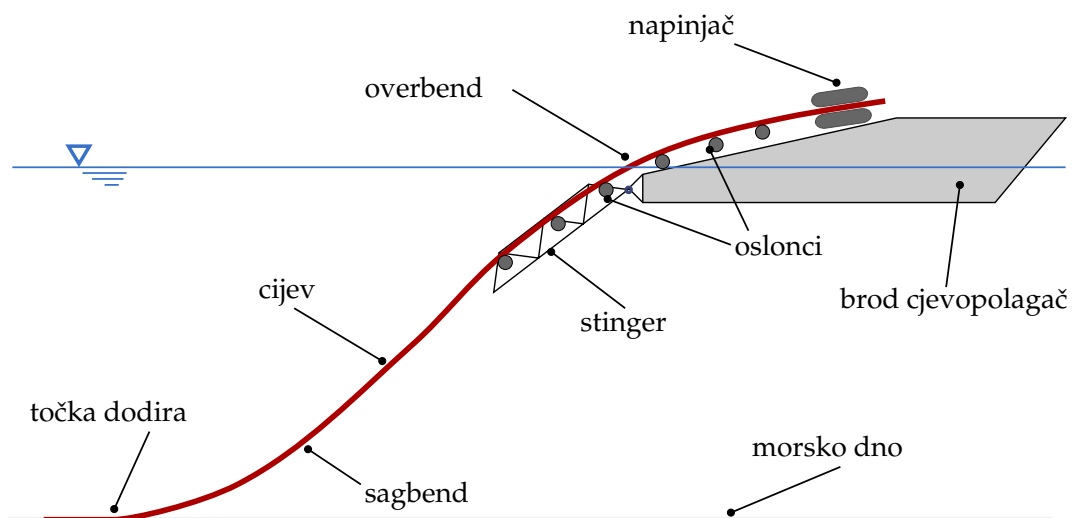
Slika 1.3: Polaganje podmorskih cjevovoda S-Lay metodom

Izvor: Saipem Mediteran Usluge D.O.O.

Segmenti cijevi se spajaju višeprolaznim unutarnjim i vanjskim zavarivanjem, nakon čega se zavar provjerava nekom od nerazornih metoda ispitivanja (uobičajeno ultrazvučna kontrola) [29]. U slučaju otkrivanja grešaka u zavaru, vrši se čišćenje zavara i ponovno zavarivanje.

Nakon uspješnog zavarivanja segmenata cijevi, zavari se zaštićuju oblogom (eng. *coating*). Obloge služe za antikorozivnu zaštitu, toplinsku izolaciju i mehaničku zaštitu zavara. Jedinice za zavarivanje, ispitivanje i nanošenje zaštite su obično smještene u horizontalnom zatvorenom postrojenju koje se naziva *firing line*.

Kako bi se omogućilo zavarivanje ali i polaganje, cjevovod je uhvaćen uređajem (ili više njih) koji se naziva napinjač (eng. *tensioner*). Uređaj se sastoji od para gusjenica obloženih gumom ili sličnim materijalom koje



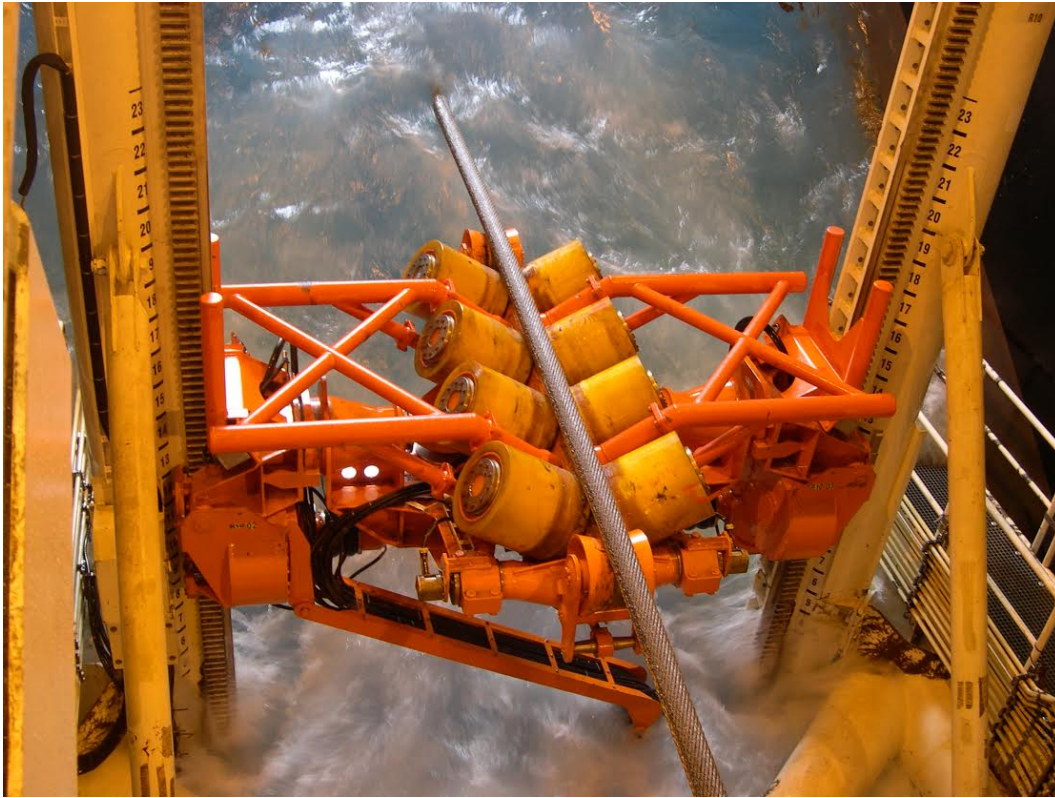
Slika 1.4: Osnovno nazivlje u S-Lay metodi polaganja cjevovoda

obuhvaćaju i stišću cijev (Slika 1.5). Napinjač omogućuje regulaciju sile napetosti cijevi te kontrolu uzdužnog pomaka cijevi prilikom polaganja.



Slika 1.5: Cijev u napinjaču

Nakon izlaska iz napinjača, napeta cijev se spušta do morskog dna. Cijevi su dodatno podržane valjkastim osloncima (eng. *rollers*) kako bi se smanjio moment savijanja, a time i naprezanja u cijevima (Slika 1.6). Postoje različite



Slika 1.6: Valjkasti oslonac
Izvor: Saipem Mediteran Usluge D.O.O.

varijante konstrukcije valjkastih oslonaca: za vertikalno oslanjanje, horizontalno oslanjanje ili kombinirano horizontalno i vertikalno oslanjanje cijevi. Oslonci se obično sastoje od seta više valjaka, povezanih na rotirajući oslonac, kako bi se postiglo oslanjanje ravnomjerno cijevi u što većoj dužini. Valjkasti oslonci su vertikalno podesivi kako bi se njihovom konfiguracijom moglo postići bolje podupiranje različitih cijevi pri različitim uvjetima polaganja.

Uobičajeno je, kod S-Lay metode polaganja, da brod cjevopolagač ima pomični nastavak koji se naziva *stinger* (hrv. žalac). *Stinger* se može smatrati kao pomoćna vodilica koja dodatno podupire cijev i sprječava njeno savijanje. Kao i na samom brodu, cijevi su poduprte valjkastim osloncima koji su smješteni u rešetkastoj strukturi samog *stingera*. Postoji više različitih izvedbi *stingera*:

- plutajući *stinger*,
- čvrsti nepomični *stinger* i
- čvrsti pomični *stinger*.

Plutajući *stinger* zglobno (eng. *hinge*) je vezan za brod, a podupiranje cijevi se ostvaruje pomoću uzgonskih spremnika na *stingeru*. Čvrsti nepo-

mični *stinger* kruto je konzolno vezan na brod i na taj način podupire cijev tijekom polaganja. Obično postoji nekoliko mogućih kuteva pod kojim se može pozicionirati fiksni *stinger* i taj se kut ne može mijenjati tijekom polaganja. Pomični fiksni *stinger* koristi hidrauličke cilindre kako bi mogao mijenjati položaj.

Cijev se djeli na dva područja s obzirom na zakrivljenost S krivulje:

- *Overbend* područje je područje konveksno savijene cijevi (uključuje područje barže i stingera).
- *Sagbend* područje je dio konkavno savijene cijevi u području bliže morskom dnu.

Prilikom polaganja cjevovoda, cijev se savija i dolazi do naprezanja u njenim stjenkama. Zbog tih razloga potrebno je provesti detaljnu strukturalnu analizu cijevi tijekom polaganja kako bi se ispravno dimenzionirala cijev i postavio mehanizam polaganja. Zbog složenosti problema nemoguće je provesti strukturalnu analizu analitičkim metodama, pa je nužna numerička strukturalna analiza.

Granica područja *sagbenda* i *overbenda* je točka infleksije, koja se nalazi u sredini S krivulje. Ako se ovu podjelu aplicira na J-Lay, uočava se da J-Lay ima samo područje *sagbenda* (Slika 1.1), što uvelike pojednostavljuje problem strukturalnih (uvjeti čvrstoće i krutosti) ograničenja prilikom polaganja.

1.3 Dosadašnja istraživanja

Iako je se već desetljećima polažu podmorski cjevovodi i strukturalne analize cijevi tijekom polaganja su standard u *offshore* industriji, relativno je malo znanstvenih radova koji razmatraju ovu tematiku. Pregledni radovi Gaggiottija [31] i Langhelle [44] detaljno opisuje tehnologiju i fizikalne pojave koje se dešavaju uslijed polaganja cjevovoda.

1.3.1 Analitičke aproksimacije

Prvi modeli koji opisuju elastičnu deformaciju cijevi prilikom polaganja bili su pojednostavljeni analitički modeli. Prednost analitičkih modela je mogućnost znatno bržeg izračuna, što je ključna prednost u nedostatku računalnih resursa. Upotreba analitičkih aproksimacija prisutna je i danas, u doba modernih računala i naprednih numeričkih metoda, te se najčešće koristi kao pomoćni model za brze proračune koji ne zahtijevaju veliku točnost.

Jednostavne aproksimacije savijanja cijevi tijekom polaganja temeljene na Euler-Bernoullijevom modelu grede dane su u radu Simmondsa [69]. Iako temeljena na opravdanom modelu, analitička rješenja dana su samo za najjednostavnije pojednostavljene slučajeve i u realnim primjenama gotovo nisu upotrebljiva.

Reinstra [66] opisuje dva analitička modela za aproksimaciju elastičnosti cijevi prilikom polaganja: model krute lančanice (eng. *catenary*) te model temeljen na linearizaciji modela grede. Pod djelovanjem napetosti i težine cijevi, cjevovod je podložan velikom otklonu od svog nedeformiranog stanja. Zakrivljenost cjevovoda u *sagbendu*, prvenstveno je pod utjecajem aksijalne sile tj. aksijalne napetosti. Najjednostavniji model za izračun odnosa između napetosti i zakrivljenosti u području *sagbenda* je model lančanice. Model lančanice ignorira fleksijsku krutost cjevovoda, što omogućuje adekvatnu aproksimaciju u području *sagbenda* gdje je aksijalno opterećenje često dominantno u odnosu na savijanje.

Guarracino i Mallardo [32] analiziraju elastični otklon cjevovoda prilikom polaganja uzimajući u obzir ukupne učinke ovalizacije poprečnog presjeka cijevi. Analiza je provedena pomoću tehnike singularne perturbacije i dobivena analitička rješenja pokazuju različite prednosti u odnosu na metodu konačnih elemenata.

Analitički modeli J-Lay metode polaganja vrlo su korisni i kod analize S-Lay metode polaganja jer vrijedi analogija savijanja cijevi u *sagbendu*. Analitička aproksimacija J-Lay elastične linije [13] može se iskoristiti za pro-

cjenu lokacije točke dodira cijevi s morskim dnom (eng. *touchdown point*) i korištena je kao inicijalni uvjet za numeričko rješavanje modela J-Lay polaganja. Nekoliko jednostavnih analitičkih modela J-Lay metode polaganja je opisano u radu Lencija i Callegarija [47] koji su temeljeni na modelu lančanice, ali su obogaćeni s više značajki kako bi se minimalizirali nedostaci osnovnog modela.

1.3.2 Numerički modeli

Aproksimacija elastične linije cijevi tijekom polaganja opisana u radu [49] temelji se na kombinaciji modela ukrućene lančanice te analitičkih relacija zasnovanih na teoriji greda. Rješenje modela ostvareno je pomoću metode konačnih razlika i dobro aproksimira "S" krivulju, posebice u području *sagbenda*.

Malahy [50] u svom radu predstavlja numeričko rješavanje trodimenzionalnog statičkog i dinamičkog modela polaganja cijevi pomoću metode konačnih elemenata. Geometrijski nelinearni gredni elementi i elastični bilinearni oslonci korišteni su za modeliranje cijevi, stingera, oslonaca i morskog dna. Predstavljeni model, uz savijanje cijevi, obuhvaća torzijske i aksijalne deformacije te omogućuje korištenje različitih fizikalnih svojstava u svakom od glavnih pravaca. Interakcija cijevi s osloncima je modelirana linearnim kontaktima gdje je sila reakcije oslonca linearno proporcionalna sa deformacijom opružnog elementa oslonca. Napinjač je modeliran kao specijalna varijanta oslonaca koji ograničava uzdužni pomak cijevi. Aksijalna sila u cijevi na izlazu iz tensionera postiže se aksijalnim opružnim elementom, koji definira linearnu vezu uzdužnog pomaka i sile napetosti.

Inkrementni algoritam temeljen na metodi konačnih elemenata, predstavljen u radu [5], uspješno rješava problem geometrijske nelinearnosti u modelu polaganja cjevovoda. Kinematička kondenzacija je korištena zajedno s geometrijskim ograničenjima kako bi se formuliralo kondenzacijski problem iz kojeg se mogu dobiti reakcijske sile kontakata.

Nelinearni statički i dinamički model Euler-Bernoullijeve grede razmatran je u radu [18] kako bi se simulirale deformacije i gibanja cjevovoda tijekom polaganja. U radu je postavljena nelinearna diferencijalna jednadžba koja definira statičku elastičnu liniju cjevovoda koja se, u dinamičkom modelu, nadopunjuje s dinamičkim pomakom. Za interakciju cijevi i morskog dna korišten je Winklerov model s linearnom zavisnosti pritiska i progiba dna te prigušenjem u dinamičkom modelu. Valjkasti oslonci aproksimirani su konstantnim radijusom zakrivljenosti cijevi i njihov se utjecaj ne razmatra detaljnije.

Trodimenzionalni dinamički model S-Lay polaganja cjevovoda [45] razmatra napredniji model tensionera te interakcije cijevi i oslonaca. Kruti model kontakta cijevi i oslonaca, koji ne dopušta preklapanje deformabilnog tijela cijevi i krutog tijela oslonaca, pruža bitne informacije vezane uz posljedice interakcije cijevi i oslonaca. Predloženi model napinjača uključuje kašnjenje između trenutka kada je napinjač aktiviran i trenutka kada napinjač počinje učinkovito raditi. U predloženom modelu napinjača uzeto je u obzir koliko brzo napinjač može postići željenu silu napetost cijevi.

U poglavljima rada koji obuhvaća širu tematiku polaganja cjevovoda [34], opisana je nelinearna metoda konačnih elemenata za rješavanje statičkih i dinamičkih modela S-Lay polaganja cjevovoda. Opisano je nekoliko tehnika rješavanja nelinearnog problema: inkrementalne procedure, iterativne procedure te kombinirane inkrementalno-iterativne procedure.

Hvidsten [36] se u svom radu fokusira na usporedbu rezultata dobivenih numeričkom analizom s eksperimentalnim rezultatima.

Razvijeni numerički model temeljen na metodi konačnih elemenata objašnjen je u radu Jensena [38] te je uspoređen s komercijalnim alatima za analizu polaganja podmorskih cjevovoda. Predstavljeni nelinearni model obuhvaća sve bitnije karakteristike problema polaganja cjevovoda: geometrijsku nelinearnost, kontaktne probleme ali i dinamičku elastičnost cijevi te mogućnost simulacije i kontrole operacije polaganja s dinamičkim pozicioniranjem.

Simulacija polaganja podmorskog cjevovoda na neravno morsko dno je osnovna tema obrađena u radu Leepipatpaiboon [46]. Osim opisa modela interakcije cijevi s morskim dnom, u radu je prezentirano i uspoređeno više komercijalnih specijaliziranih softverskih rješenja za simulacije polaganja cjevovoda.

U znanstvenom istraživanju koje je prethodilo izradi ove disertacije objavljen je rad [37] u kojem se koristi računalni alat Abaqus za rješavanje nelinearnog modela savijanja cijevi uz korištenje tarnog modela napinjača. Predstavljene su napredne značajke modela kao što su plutajući *stinger*, uzgonski tankovi i polaganje na neravno morsko dno, a rezultati su validirani usporedbom sa standardiziranim alatom za simulaciju polaganja podmorskih cjevovoda. Navedeni model polaganja i tehnike rješavanja djelomično su iskorištene i u ovom radu.

1.3.3 Optimizacije parametara polaganja

Određivanje parametara polaganja podmorskih cjevovoda je standardni inženjerski zadatak u *offshore* industriji, međutim relativno je slabo popraćen

znanstvenim publikacijama. Većina dostupnih publikacija djelomično razmatra optimizacijski problem polaganja, ne uključujući sve značajke modela, optimizacijske varijable, ciljeve i ograničenja koje omogućuju sveobuhvatni proces određivanja optimalne konfiguracije polaganja.

Bhavikatti i Ravichandran [6] u svom su radu opisali optimizacijsku metodu kojoj je cilj minimizacija maksimalnog momenta savijanja cjevovoda u polaganju varirajući silu napinjača te duljinu slobodnog raspona. Korištena je metoda sekvencijalnog linearnog programiranja koja linearizira funkciju cilja i ograničenja u okolini trenutne točke u prostoru pretraživanja te određuje novu točku rješavanjem problema linearnog programiranja.

Analiza utjecaja raznih uvjeta polaganja (kao što su dubina vode, promjer cijevi, debljina stjenke cijevi, duljina *stingera* itd.) na konfiguraciju polaganja prezentirana je u [49]. Rezultati demonstriraju različite utjecaje uvjeta polaganja na glavne rezultate polaganja cjevovoda.

Optimizacija balastnog plana plutajućeg segmentnog *stingera* predstavljena je u radu Zhua i Cheunga [82], a temelji se na pojednostavljenoj aproksimaciji modela polaganja. Kontaktne interakcije cijevi i valjkastih oslonaca nisu uzete u obzir, a cijev je u području *stingera* tretirana kao zakrivljena greda s obzirom na postavljeni radijus zakrivljenosti valjkastih oslonaca.

Optimalna konstrukcija plutajućeg *stingera* opisana je u radu [56]. Izložena razmatranja nisu vezna uz sam proces polaganja cjevovoda, ali pružaju dobar uvid u utjecaj *stingera* i napinjača na cjevovod u polaganju.

Rad Karabaića [39] jedini šire obuhvaća problem optimizacije polaganja. Simulacija polaganja temelji se na rješavanju nelinearnog modela grede pomoću metode konačnih elemenata, te obuhvaća nelinearnost materijala, mogućnost simulacije polaganja s plutajućim *stingerom*, korištenje uzgonskih tankova i druge napredne značajke modela. Predstavljeno je nekoliko varijanti optimizacijskog postupka koje se temelje na genetičkom algoritmu. Sve optimizacijske varijable su tretirane kao diskretne, uz mogućnost fleksibilne diskretizacije. Ciljevi i ograničenja optimizacije obuhvaćaju gotovo sve važnije industrijske standarde i inženjerska iskustva u polaganju podmorskih cjevovoda.

MODELIRANJE POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA

Da bi se osigurao što točniji model polaganja podmorskih cjevovoda, svi relevantni fizikalni fenomeni trebaju biti uzeti u obzir. U ovom je poglavlju opisan model savijanja cijevi tijekom polaganja temeljen na jednodimenzionalnom pojednostavljenju elastičnog tijela cjevovoda - modelu grede. Promatra se ravninski progib cijevi u kojem su zanemarena opterećenja i deformacije cjevovoda u poprečnom horizontalnom smjeru.

Iako je, naizgled, model jednostavan, temelji se na složenoj interakciji cijevi s ostalim strukturama u modelu. Uz problem interakcije, model savijanja cijevi je izrazito geometrijski nelinearan, posebice za veće dubine polaganja.

Opisane su dvije varijante modela koje koriste istu aproksimaciju elastičnosti grede ali razlikuju se po načinu postizanja željene sile napetosti cjevovoda.

Rješavanje modela ostvareno je pomoću FEM alata Abaqus Standard te je detaljno opisan postupak rješavanje obje varijante modela.

U poglavljima 2.3 do 2.6 predstavljen je osnovni model polaganja, a naprednije značajke modela opisane u poglavlju 2.7:

- plutajući *stinger*,
- neravno morsko dno,
- primjena uzgonskih spremnika.

2.1 Model napete grede

Euler-Bernoullijeva greda je najjednostavniji model savijanja grede opterećene kontinuiranim opterećenjem i za ravninski slučaj opisana je diferencijalnom jednačinom

$$\frac{d}{ds^2} \left(E \cdot I(s) \frac{d^2 w}{ds^2} \right) = q(s) \quad (2.1)$$

gdje je $w(s)$ poprečni otklon (progib) od nedeformiranog stanja, s je položaj na uzdužnoj osi grede, E je Youngov modul, $I(s)$ je aksijalni moment inercije poprečnog presjeka, a q poprečno kontinuirano opterećenje grede. Ovaj općeniti model obuhvaća promjenjivi moment inercije $I(s)$ duž osi grede tj. promjenjiv poprečni presjek cijevi. U slučaju konstantnog poprečnog presjeka cijevi izraz (2.1) se može zapisati kao

$$EI \frac{d^4 w}{ds^4} = q(s). \quad (2.2)$$

Prema teoriji elastičnosti grede, može se definirati veza progiba i momenta savijanja duž grede s diferencijalnom jednačinom

$$\frac{d^2 w}{ds^2} = -\frac{M(s)}{EI} \quad (2.3)$$

te veza između poprečne sile i progiba

$$\frac{d^3 w}{ds^3} = -\frac{Q(s)}{EI} \quad (2.4)$$

gdje je $M(s)$ moment savijanja duž cijevi, a $Q(s)$ poprečna sila duž cijevi. Ove zakonitosti omogućuju zadavanje opterećenja na rubovima grede poprečnim silama ili momentima preko zadavanja rubnih uvjeta diferencijalne jednačine (zadavanje vrijednosti druge i treće derivacije u rubnim točkama).

Ukoliko na gredu uz poprečno opterećenje djeluje i aksijalna sila tj. napetost, što je slučaj kod polaganja cjevovoda, progib grede definiran je diferencijalnom jednačinom

$$EI \frac{d^4 w}{ds^4} - N(s) \frac{d^2 w}{ds^2} = q \quad (2.5)$$

gdje je $N(s)$ aksijalna sila u gredi.

Model savijanja napete grede uniformnog (duž grede) poprečnog presjeka uslijed opterećenja aksijalnom silom te kontinuiranim poprečnim opterećenjem definiran jednačinom (2.5) vrijedi za male pomake i rotacije

deformirane grede. Horizontalni položaj točaka cijevi ostaje nepromijenjen što ne zadovoljava modeliranje polaganja cjevovoda gdje dolazi do značajnih otklona i nagiba cijevi koji rezultiraju i horizontalnim pomakom cjevovoda. Kako bi se mogli promatrati pomaci deformirane cijevi u $x - y$ ravnini (Slika 2.1), uvodi se supstitucija

$$\theta = \frac{dw}{ds} \quad (2.6)$$

pa se diferencijalna jednačba (2.5) može svesti na

$$EI \frac{d^3\theta}{ds^3} - N(s) \frac{d\theta}{ds} = q \quad (2.7)$$

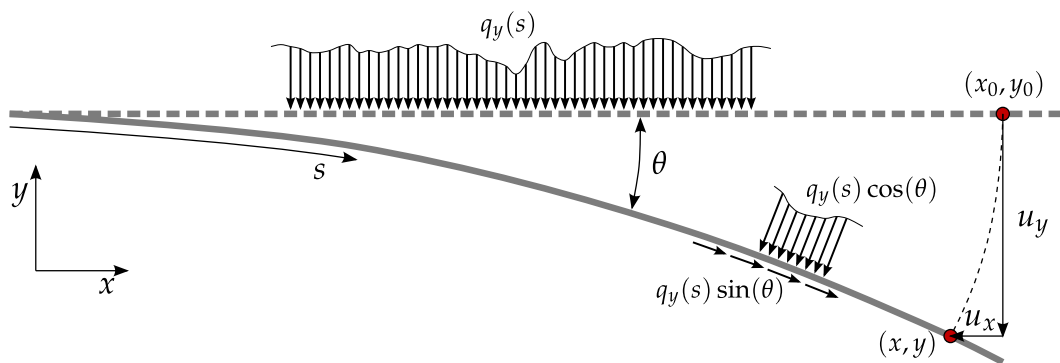
gdje je θ nagib cijevi.

Duž cijevi postoje vertikalna kontinuirana opterećenja (težina i uzgon cijevi) koja na cijev djeluju ovisno o nagibu cijevi: vertikalna opterećenja djeluju poprečno na horizontalni položaj cijevi, a aksijalno prilikom većeg nagiba cijevi (bliže vertikalnom položaju) (Slika 2.1). Vertikalno opterećenje q_y se može jednostavno rastaviti na uzdužnu i poprečnu komponentu $q_y \cdot \sin \theta$ i $q_y \cdot \cos \theta$. Poprečna komponenta vertikalnog opterećenja uključena je u osnovnu diferencijalnu jednačbu modela:

$$EI \frac{d^3\theta}{ds^3} - N(s) \frac{d\theta}{ds} = q_y \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

dok uzdužna komponenta težine doprinosi napetosti cijevi što se može definirati jednačbom:

$$\frac{dN}{ds} = q_y \cdot \sin \theta. \quad (2.9)$$



Slika 2.1: Model grede

Aksijalna sila N_{bc} na početnoj ili krajnjoj točki cijevi je rubni uvjet za diferencijalnu jednačbu (2.9):

$$N(s_{bc}) = N_{bc} \quad (2.10)$$

gdje je s_{bc} početna ($s_{bc} = 0$) ili krajnja ($s_{bc} = L$) točka cjevovoda. Prilikom postavljanja rubnog uvjeta (2.10) treba voditi računa da je omogućen aksijalni pomak točke ukoliko se na toj poziciji postavlja aksijalna sila N_{bc} .

Rješavanjem jednadžbe (2.8) dobiva se rješenje u obliku nagiba cijevi $\theta(s)$ (lokalni koordinatni sustav $s - \theta$) iz kojeg se može dobiti horizontalna i vertikalna komponenta pomaka deformirane cijevi (globalni koordinatni sustav $x - y$) na temelju jednadžbe

$$u_x(s) = \int_0^s 1 - \cos \theta ds \quad (2.11)$$

i

$$u_y(s) = \int_0^s \sin \theta ds \quad (2.12)$$

gdje je u_x horizontalni, a u_y vertikalni pomak cijevi.

Položaj deformirane cijevi u globalnom koordinatnom sustavu određuje se pomoću pomaka u odnosu na inicijalni horizontalni položaj:

$$x(s) = x_0(s) + u_x(s) \quad (2.13)$$

i

$$y(s) = y_0(s) + u_y(s) \quad (2.14)$$

gdje su x_0 i y_0 koordinate početnog nedeformiranog položaja cjevovoda, a x i y su koordinate deformiranog položaja tj. elastična linija cjevovoda.

Uz diferencijalnu jednadžbu (2.7), kako bi model bio potpuno definiran potrebno je definirati i rubne uvjete te ograničenja progiba s obzirom na valjkaste oslonce i morsko dno.

Rubne uvjete se može svesti na nekoliko osnovnih fizikalnih ograničenja, koji se postavljaju na rubne točke cijevi $s_{bc} = 0$ ili $s_{bc} = L$, a definirani su tablici 2.1.

Omogućavanjem veće rotacije cijevi te horizontalnih pomaka, potrebno je omogućiti ograničenja u globalnom koordinatnom sustavu. U modelu polaganja cjevovoda korištena su ograničenja sprječavanja horizontalnog i vertikalnog pomaka

$$u_x(s_{bc}) = 0 \quad (2.15)$$

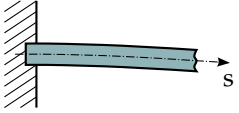
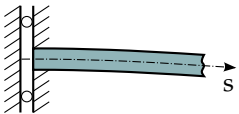
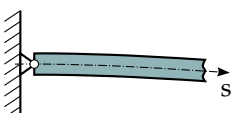
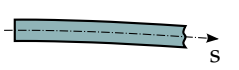
i

$$u_y(s_{bc}) = 0 \quad (2.16)$$

te horizontalna sila na rubu cjevovoda

$$F_x(s_{bc}) = F_{x_{bc}}. \quad (2.17)$$

gdje je $F_{x_{bc}}$ intenzitet horizontalne sile.

Skica	Progib, nagib	Sila, moment
	$w(s_{bc}) = w_{bc}$ $\theta(s_{bc}) = \theta_{bc}$	-
	$\theta(s_{bc}) = \theta_{bc}$	$Q_e(s_{bc}) = Q_{bc}$
	$w(s_{bc}) = w_{bc}$	$M_e(s_{bc}) = M_{bc}$
	-	$M_e(s_{bc}) = M_{bc}$ $Q_e(s_{bc}) = Q_{bc}$

Tablica 2.1: Mogući rubni uvjeti za osnovni model grede

U modelu polaganja podmorskih cjevovoda korišteno je više različitih kombinacija opisanih rubnih uvjeta koji su opisani u poglavlju 2.4.

Da bi se modelirao kontakt cijevi s morskim dnom i valjkastim osloncima, potrebno je ograničiti vertikalni pomak cijevi prema izrazu:

$$y(s) \geq y_d(x(s)) \quad (2.18)$$

gdje je $y_d(x)$ funkcija visine prepreke, tj. morskog dna i valjkastih nosača, ovisno o horizontalnoj udaljenosti od izlaza iz napinjača. U interakciji cijevi s preprekama, na cijev se prenosi kontaktna sila, a u ovom modelu samo je normalna komponenta sile uzeta u obzir. Modeliranje kontakata je detaljnije opisano u poglavlju 2.5.

Timoshenkov model je proširenje Euler-Bernulijevog modela grede, koji u obzir uzima smične deformacije grede zbog čega više ne vrijedi pretpostavka da je poprečni presjek grede uvijek okomit na elastičnu liniju. Smična deformacija smanjuje krutost grede što rezultira većim progibom grede. Diferencijalna jednačnja kojom je definiran Timoshenkov model grede glasi:

$$EI \frac{d^4 u}{ds^4} + N \frac{d^2 u}{ds^2} = q - \frac{EI}{\kappa AG} \frac{d^2 q}{ds^2} \quad (2.19)$$

gdje je G posmični modul (modul smicanja), a κ je Timoshenkov smični koeficijent.

U slučaju zanemarivanja posljednjeg člana jednadžbe (2.19), Timoshenkov model grede je ekvivalentan Euler-Bernoullijevom modelu (2.5). Takva aproksimacija je valjana u slučaju kada vrijedi

$$\frac{EI}{\kappa L^2 AG} \ll 1 \quad (2.20)$$

gdje je L duljina grede. Uvjet (2.20) vrijedi za polaganje cjevovoda, zbog velike duljine cijevi (naspram promjeru), pa je razlika između Euler-Bernoullijevog modela i Timoshenkovog modela gotovo zanemariva.

2.2 Varijante modela

U radu su korištene dvije varijante modela polaganja podmorskog cjevovoda koje se prvenstveno razlikuju po načinu postizanja željene sile napetosti na početku cijevi. Osim modeliranja bitno drukčijih fizikalnih pojava u mehanizmu napinjača, predstavljene varijante modela zahtijevaju i različitu proceduru rješavanja. Za rješavanje obje varijante upotrebljen je Abaqus Standard (Student Edition) - alat koji koristi metodu konačnih elemenata za računalnu strukturalnu analizu [22].

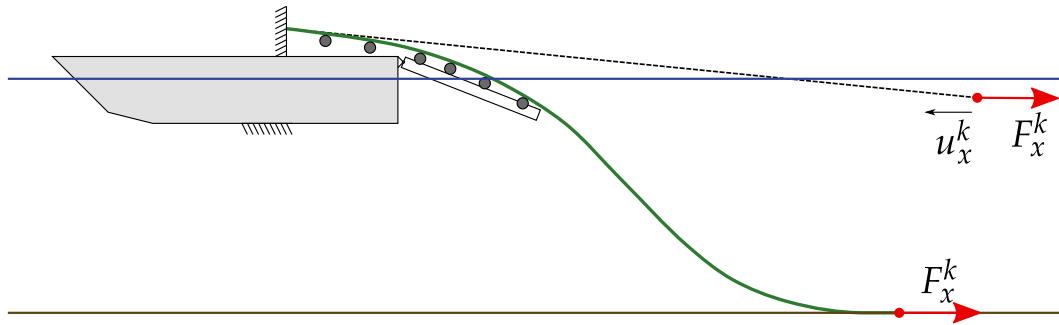
Zbog velikog progiba cijevi prilikom polaganja, što uzrokuje geometrijsku nelinearnost modela, nemoguće je unaprijed predvidjeti i postaviti opterećenja na cijev. To se prvenstveno odnosi na silu napetosti koja se postiže napinjačem na samom početku cjevovoda koji je vezan za konstrukciju broda cjevopolagača. Za početnu točku cjevovoda, koji se nalazi na izlazu iz napinjača, poznata je sila napetosti koju se treba postići tj. aksijalna sila u cjevovodu, ali i njen položaj u odnosu na brod. Nametanje rubnog uvjeta pomaka i opterećenja bi uzrokovalo preodređenost uvjeta u početnoj točki cjevovoda, pa je za postizanja željenih uvjeta potrebno primijeniti druge tehnike.

Za drugo opterećenje, silu uzgona koju je potrebno aplicirati na uronjeni dio cijevi, ne može se *a priori* odrediti na koji dio cijevi je treba primijeniti jer prije simulacije nije poznata točna elastična linija cjevovoda.

Prvi pristup (u daljnjem tekstu A varijanta modela) je postavljanje aksijalne sile na kraj cjevovoda koji se nalazi na morskom dnu (Slika 2.2). A varijanta modela temeljena je na radu [37]. Fizikalno, aksijalna sila na kraju cijevi predstavlja reakciju već položenog cjevovoda na dio koji se polaže i koji se promatra ovim modelom. U ovom slučaju kraj cijevi je slobodan i nema ograničenja, dok je brod nepomičan. Aksijalna sila na morskom dnu nije poznata, pa ju je potrebno iterativno odrediti sa ciljem postizanja željene sile napetosti na početku cjevovoda. U istoj iterativnoj proceduri određuje se i točka uranjanja cjevovoda te na temelju toga i područje postavljanja uzgonske sile.

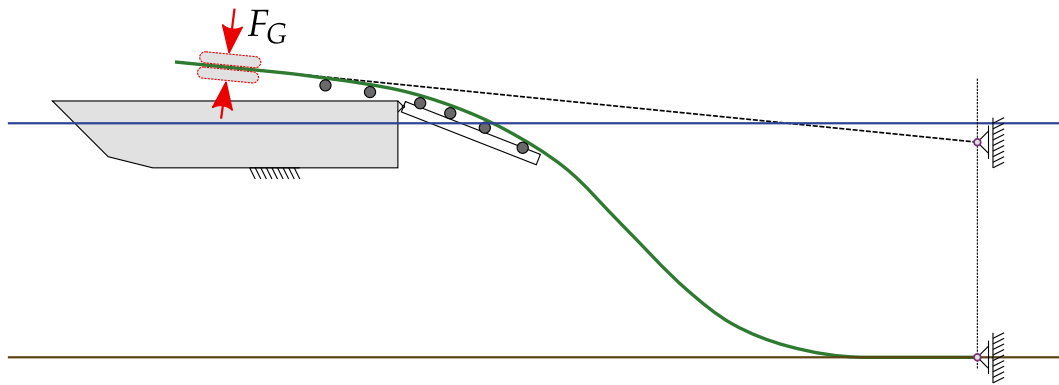
A varijanta modela koristi iterativnu proceduru za rješavanje koja je detaljno opisana u poglavlju 2.6.2.

Uspostavljanje željene sile napetosti u drugoj varijanti modela (u daljnjem tekstu B varijanta modela) zasniva se na tarnim kontaktima cijevi i napinjača (Slika 2.3). U ovom pristupu ograničen je horizontalni pomak kraja cijevi, a struktura broda je potpuno nepomična. Cijev klizi kroz kontakt s donjom i gornjom krutom strukturom napinjača čime se modelira realni kontakt s gusjenicama napinjača. U kontaktu se, stiskanjem cijevi



Slika 2.2: A varijanta modela

pomoću struktura napinjača manifestira sila trenja. Cijev klizi kroz napinjač dok se ne uspostavi željena sila napetosti tj. dok se aksijalna sila u cijevi ne izjednači sa silom trenja u napinjaču.



Slika 2.3: C varijanta modela

Opisane tehnike modeliranja polaganja su različite, ali većina značajki modela je ista za oba pristupa. Varijanta A modela omogućuje relativno brzo rješavanje te je pogodnija za optimizacijski postupak određivanja parametra polaganja cjevovoda, dok varijanta B preciznije modelira interakciju cijevi i napinjača. Upravo zbog složnijeg tarnog modela napinjača, simulacija polaganja temeljena na B varijanti modela iziskuje značajno računsko vrijeme, a time čini optimizaciju temeljenu na ovoj varijanti praktički neupotrebljivom.

U nastavku ovog poglavlja biti će detaljno opisane sve značajke koje su uključene u model uz naglasak na razlike u varijantama modela polaganja.

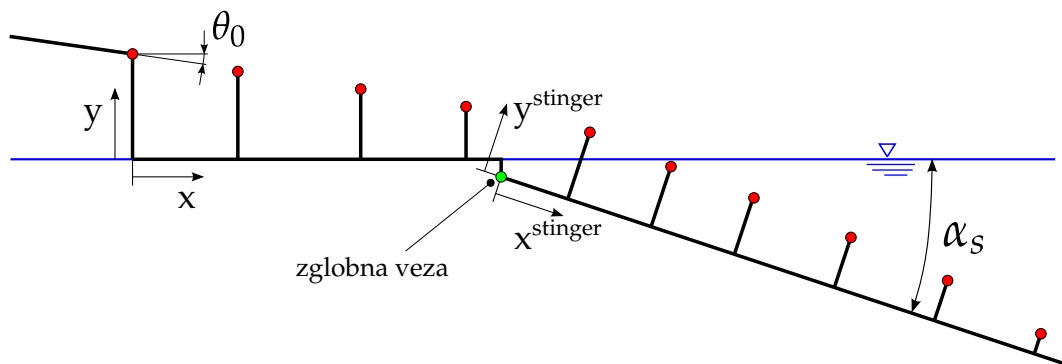
2.3 Deformabilne i krute strukture

Koordinatni sustav plovila cjevopolagača, referenciran površinom morske vode i izlaznom točkom napinjača, je uzet kao glavni (globalni) koordinatni sustav za numerički model polaganja cjevovoda. Dodatno je uveden koordinatni sustav *stingera* za lakše definiranje geometrije i položaja *stingera*. Glavni koordinatni sustav modela je postavljen na način da je koordinata prve točke promatranog dijela cjevovoda $x = 0$ dok se ostatak cjevovoda nalazi u pozitivnom smjeru osi x . Orijentacija modela je suprotna u odnosu na skicu prikazanu na slici 1.4 radi lakše i preglednije interpretacije rješenja.

Plovilo i *stinger* su definirani kao krute strukture te nisu podložni deformacijama. Geometrija broda i *stingera* je pojednostavljena (Slika 2.4) te uključuje samo dijelove broda i *stingera* koji su u interakciji sa cjevovodom (napinjač i oslonci) ili one geometrijske značajke koje direktno utječu na kinematiku gibanja *stingera* (zglob na brodu i *stingeru*).

Položaj *stingera* definiran je lokacijom zgloba na strukturi broda te kutom *stingera* α_s . Pozicija zgloba strukture broda i *stingera* je ujedno i ishodište koordinatnog sustava *stingera* koje je rotirano u odnosu na glavni sustav za kut α_s .

Podaci o brodovima cjevopolagačima i *stingerima* prikazani su u svakom primjeru simulacije i optimizacije polaganja koji su izloženi u ovom radu.



Slika 2.4: Pojednostavljena geometrija krutih struktura broda i *stingera*

Morsko dno je također modelirano kao kruta struktura i u radu se koristi ravno horizontalno morsko dno te neravno morsko dno. U slučaju ravnog morskog dna, za sve točke krute strukture vrijedi:

$$y_d = -H \quad (2.21)$$

gdje je H dubina mora (apsolutna vrijednost) dok je neravno morsko dno aproksimirano polilinijom (vidi poglavlje 2.7.2).

Deformabilna struktura cjevovoda i navedne nedeformabilne strukture diskretizirane su, uz adekvatnu gustoću numeričkih čvorova, te tvore numeričku mrežu prikladnu za rješavanje modela pomoću metode konačnih elemenata implementiranu us softveru Abaqusa.

Sve krute strukture (brod, stinger i morsko dno) su omrežene s R2D2 diskretnim krutim elementima [24]. Ovi elementi su ravninske (2D) linearne krute veze definirane pomoću dva čvora. Cjevopolagač i *stinger* su omreženi s po jednim elementom po linijskom segmentu geometrije (Slika 2.4), ravno morsko dno je omreženo uniformno sa 40 elemenata dok je neravno morsko dno omreženo s po jednim R2D2 elementom po segmentu polilinijske kojom je definirano. U poglavlju 2.7.2 detaljnije je opisano modeliranje neravnog morskog dna.

Za elastičnu strukturu cjevovoda odabran je Timošenkov model grede koji je implementiran u B21 grednom elementu dostupnom u Abaqus Standard rješavaču. B21 gredni elementi koriste linearnu interpolacijsku funkciju stanja, dopuštaju poprečnu posmičnu deformaciju što podrazumijeva da poprečni presjek ne ostaje nužno normalan na os grede. B21 gredni elementi su pogodni za statičke modele koje uključuje kontakte [24, 21].

Cijev je definirana vanjskim promjerom i debljinom stijenke te svojstvima materijala cijevi, a prostorno je definirana dužnom koja predstavlja os cijevi. Cjevovod je inicijalno postavljen na izlazu i u osi mehanizma napinjača. U B varijanti modela, cjevovod je dodatno produžen da bi se omogućilo klizanje kroz napinjač što je detaljnije opisano u sljedećim poglavljima.

Duljina promatranog dijela cijevi ovisi o svojstvima cijevi, te parametrima i uvjetima polaganja, prvenstveno o dubini polaganja H . Za različite slučajeve polaganja korištene su cijevi različitih svojstava te različite duljine, a ti podaci su priloženi uz primjere simulacije i optimizacija polaganja. Ovisno o dužini promatranog dijela cijevi te o specifičnostima uvjeta polaganja korištena je različita gustoća numeričke mreže cijevi.

2.4 Postavljanje ograničenja i opterećenja

Osnovni predmet analize polaganja je savijanje cjevovoda prema opisanom modelu i rubnim uvjetima koji su definirani u nastavku ovog poglavlja. Međutim, za uspješno rješavanje modela pomoću Abaqusa, potrebno je postaviti ograničenja i eventualna opterećenja i na krute strukture koje su uključene u model.

2.4.1 Ograničenja

Zbog značajno veće mase i volumena broda cjevopolagača u odnosu na cjevovod, promjena broskog gaza i uzdužnog nagiba broda zbog interakcije sa cjevovodom je zanemarena.

Ograničenja pomaka i rotacije postavljena na krutim strukturama ne razlikuju se s obzirom na varijantu modela, ali struktura *stingera* ima stupanj slobode rotacije oko zgloba u simulaciji polaganja s plutajućim *stingerom*.

Prilikom postizanja napetosti cijevi, pomoću aksijalne sile na kraju cijevi i preko tarnog kontakta napinjača, struktura broda je nepomična. Vertikalni pomak i rotacija broda zanemareni su zbog hidrostatičkog ekvilibrija, dok je horizontalan pomak spriječen sidrima ili kontroliran propulzijom broda.

Na temelju navedenih pretpostavki mogu se postaviti ograničenja pomaka strukture broda:

$$u_x^b = 0, \quad u_y^b = 0, \quad \varphi^b = 0 \quad (2.22)$$

gdje je u_x^b horizontalni pomak, u_y^b je vertikalni pomak i φ^b je kutni pomak uzdužnog nagiba broda (eng. *trim*).

Kod osnovne statičke analize, promatra se fiksni *stinger* koji je vezan za brod cjevopolagač i nepomičan je u odnosu na brod. *Stinger* je zglobno vezan (eng. *pinned connection*) za brod koji je nepomičan, pa nema pomaka zglobnog čvora *stingera*.

Zglobna veza definirana je pomoću uvjeta:

$$u_x^s = 0, \quad u_y^s = 0 \quad (2.23)$$

gdje je u_x^s horizontalni a u_y^s vertikalni pomak zglobnog čvora (eng. *hinge*) *stingera*.

Pošto ograničenja (2.23) nisu dovoljna za potpuno ograničenje fiksnog *stingera*, potrebno je spriječiti i rotaciju *stingera* pomoću dodatnog ograničenja:

$$\varphi^s = 0 \quad (2.24)$$

gdje je φ^s kutni pomak, tj. rotacija *stingera* propisana u zglobnom čvoru *stingera*.

Rotacija *stingera* je omogućena kod analize polaganja s plutajućim *stingerom* što je opisano u poglavlju 2.7.1.

Kruta struktura morskog dna potpuno je nepomična što se postiže ograničenjima pomaka translacije i rotacije:

$$u_x^d = 0, \quad u_y^d = 0, \quad \varphi^d = 0 \quad (2.25)$$

gdje je u_x^d horizontalni pomak, u_y^d je vertikalni pomak i φ^d je kutni pomak nedeformabilne strukture morskog dna. Uvjet (2.25) vrijedi u slučaju ravnog i u slučaju neravnog morskog dna opisanog u poglavlju 2.7.2.

S obzirom na varijantu modela, različita ograničenja su postavljena na elastičnu strukturu cijevi.

U A varijanti modela polaganja cjevovoda, kod postizanja napetosti cijevi pomoću sile na kraju cijevi, početak cijevi je vezan za strukturu broda tj. za čvor koji predstavlja izlaz iz napinjača i nepomičan je. Za prvi čvor cjevovoda vrijede rubni uvjeti:

$$u_x(0) = 0, \quad u_y(0) = 0 \quad (2.26)$$

gdje je u_x horizontalni pomak, a u_y^p je vertikalni pomak prvog čvora deformabilne strukture cjevovoda.

Cijev je stisnuta u napinjaču te je smatrano da je idealno uklještena, pa je početni čvor cijevi pod istim nagibom kao i napinjač te mu je spriječena rotacija, a nagib početne točke cjevovoda definiran je rubnim uvjetom:

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (2.27)$$

gdje je θ_0 nagib napinjača.

Kraj cjevovoda, u varijanti A modela, je slobodan i nema ograničenja pomaka ili rotacije.

Modeliranje napinjača pomoću tarnog kontakta zahtjeva drukčija ograničenja na rubovima cijevi. Početak cijevi je u kontaktima s donjom i gornjom strukturom napinjača koja, preko kontaktne interakcije, reguliraju pomak cijevi te ne zahtjeva nikakva dodatna ograničenja. Model napinjača i interakcija napinjača sa cjevovodom su opisani u poglavlju 2.5.

Kraj cjevovoda vezan je za virtualnu vertikalnu vodilicu koja dozvoljava vertikalni pomak kako bi cijev pala na dno. Rotaciju je dozvoljena u krajnjem čvoru cijevi. Utjecaj već položenog cjevovoda na dio cjevovoda koji se polaže postignut je sprječavanjem horizontalnog pomaka zadnjeg čvora cijevi. Na zadnji čvor cjevovoda nametnut je rubni uvjet

$$u_x(L) = 0 \quad (2.28)$$

koji sprječava horizontalni pomak dok su vertikalni pomak i rotacija dopušteni.

2.4.2 Opterećenja

Na cijev izravno djeluju dva glavna opterećenja:

- vertikalna kontinuirana opterećenja težine cijevi i uzgona te
- jedna od sila koje omogućuje napinjanje cijevi (aksijalna sila na kraju cjevovoda ili sila stezanja u tarnom modelu napinjača).

Jedinična težina cijevi može se izračunati iz gustoće materijala cijevi i dimenzija poprečnog presjeka:

$$q_p = \frac{(D^2 - (D - 2 \cdot s_p)^2) \cdot \pi}{4} \cdot \rho_p \cdot g \quad (2.29)$$

gdje je D vanjski promjer cijevi, s debljina stjenke cijevi, ρ_p je gustoća materijala cijevi i g je ubrzanje sile teže.

S obzirom na uzgon, dva dijela cjevovoda trebaju biti uzeta u obzir: neuronjeni dio cjevovoda i uronjeni dio cjevovoda. Samo uronjeni dio cjevovoda je pod utjecajem uzgona. Jedinični uzgon cijevi iznosi:

$$q_b = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_w \cdot g \quad (2.30)$$

gdje je ρ_w gustoća vode.

Zbog nemogućnosti da se granica uranjanja cijevi odredi prije rješavanja modela, opterećenja na cijev (koje predstavljaju težinu cijevi i uzgon) potrebno je postepeno uvoditi tijekom simulacije i to s obzirom na položaj deformirane cijevi u odnosu na morsku površinu. Određivanje područja aplikacije uzgona može se odvijati tijekom inkrementalnog postupka unutar Abaqus simulacije ili tijekom vanjskog iterativnog postupka koji izvršava više jednostavnijih Abaqus statičkih simulacija polaganja. Inkrementalne i iterativne procedure za rješavanje modela polaganja detaljno su opisane u poglavlju 2.6.

Zbog jednostavnosti, jedinična težina cijevi i jedinični uzgon na cijev se uvode preko dva vertikalna kontinuirana opterećenja koja omogućuju lakše rješavanje modela. Prvo kontinuirano opterećenje, u daljnjem tekstu opterećenja na neuronjeni dio cjevovoda, predstavlja jediničnu težinu cijevi olakšanu za jedinični uzgon na cijev:

$$q_y^- = -q_p + q_b \quad (2.31)$$

i primijenjena je na cijelu dužinu cjevovoda.

Dodatno opterećenje na neuronjeni dio cjevovoda ($y \geq 0$)

$$q_y^+ = -q_b \quad (2.32)$$

uvodi se s obzirom na deformaciju cjevovoda i njegov položaj s obzirom na površinu morske vode. Na temelju izraza (2.31) i (2.32), na neuronjeni dio cjevovoda ukupno djeluje kontinuirano opterećenje magnitude jedinične težine cijevi q_p . Postupak određivanja granice uronjenog i neuronjenog dijela cjevovoda opisan je u poglavlju 2.6.

Osim navedenih opterećenja na cjevovod (2.31) i (2.32) koja uzrokuju progib cijevi te njeno spuštanje do morskog dna, potrebno je uvesti opterećenja koja će postići napetost cijevi. Različite tehnike postizanja napetosti cjevovoda su temeljne razlike u dvije predstavljene varijante modela, pa je logično da je primjena opterećenja koja prouzrokuju napetost cijevi različita za svaku varijantu modela.

U A varijanti modela, napetost cijevi se postiže horizontalnom silom F_x^k postavljenom na zadnjem čvoru cjevovoda, čime se implicitno regulira aksijalna sila na početku cjevovoda $N(0)$. Točna magnituda sile F_x^k nije *a priori* poznata i određuje se u iterativnoj proceduri rješavanja ovog modela. T je ciljana sila napetosti na početku cjevovoda, koja se, u većini slučajeva, postiže za $F_x^k = 0.8T$ do $0.9T$. Iterativni postupak procedure u kojoj se, između ostalog, određuje sila F_x^k detaljno je opisana u poglavlju 2.6.

Varijanta B modela se oslanja na tarni kontakt za postizanje napetosti cjevovoda. U tom pristupu, napetost se postiže indirektno pomoću sile stezanja napinjača koja se preko trenja prenosi na cijev. Pošto je sila stezanja napinjača vezana za tarni kontakt u model napinjača, uvođenje tog opterećenja objašnjeno je u poglavlju 2.5.

2.5 Kontakti

Problem kontakta je prisutan u interakciji cijevi s valjkastim osloncima na brodu i *stingeru* te u interakciji cijevi s morskim dnom. Dodatno, u B varijanti modela, postoji kontakt cijevi i struktura napinjača. Rješavanje nazgled jednostavnih kontaktnih problema prisutnih u simulaciji polaganja podmorskih cjevovoda zahtjeva precizno i adekvatno modeliranje svih prisutnih interakcija.

Mehanika kontakta je disciplina koja se bavi promatranjem elastičnih tijela uslijed statičkog ili dinamičkog dodira s drugim elastičnim ili krutim tijelom. U ovom slučaju, kod modeliranja polaganja podmorskih cjevovoda, problem kontakta se svodi na statičku interakciju elastičnog i više krutih tijela.

2.5.1 Kontaktne interakcije u Abaqusu

Abaqus pruža više načina modeliranja kontakta koji omogućuju primjenu kontakata na elastična i kruta tijela u statičkim i dinamičkim strukturalnim analizama [20]. Svaka formulacija kontakta se temelji na odabiru diskretizacije kontakta, način praćenja kontakta i dodjeljivanje *master* i *slave* uloga kontaktnih kontura. Kontaktne konture su granice struktura koje sudjeluju u kontaktu, a to su površine kod kontakata tijela i ljuski i rubovi kod kontakata linijskih struktura ili ravninskih dvodimenzionalnih struktura.

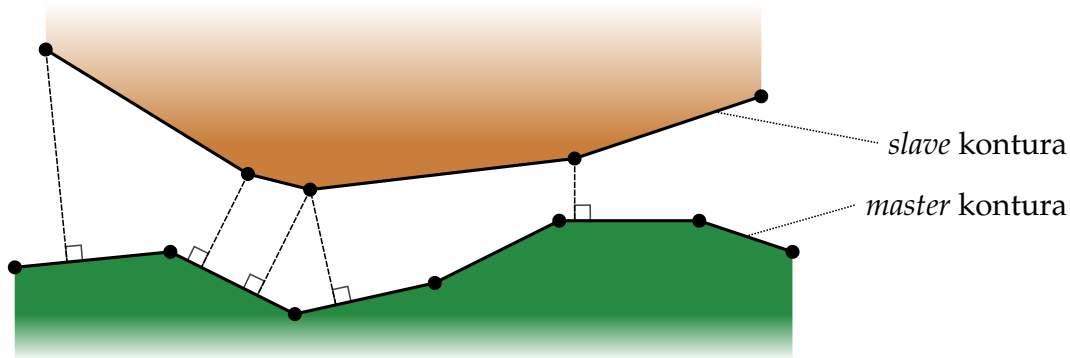
U interakciji dva tijela dodir se ostvaruje preko kontura tih tijela (eng. *contact surface*). U definiciji kontaktne interakcije potrebno je konturama dodijeliti *master* i *slave* uloge. Odabir uloga kontaktnih kontura u kontaktu definira različit tretman tijela u kontaktu, što se prvenstveno odnosi na penetraciju čvorova i kontura jednog tijela u drugo. U nastavku poglavlja su detaljnije opisane razlike *master* i *slave* uloga kontura u kontaktnim interakcijama.

Abaqus Standard postavlja uvjetna ograničenja na različitim položajima na kontaktnim površinama kako bi se simuliralo uvjete kontakta. Položaj i uvjeti navedenih ograničenja ovise o diskretizaciji kontakta korištenoj u formulaciji kontakta. Dva načina diskretizacije kontakta su dostupna u Abaqusu:

- *node-to-surface* diskretizacija i
- *surface-to-surface* diskretizacija.

Kod *node-to-surface* diskretizacije kontakta uvjeti kontakta su uspostavljeni na način da je svaki *slave* čvor s jedne strane dodirne granice u efek-

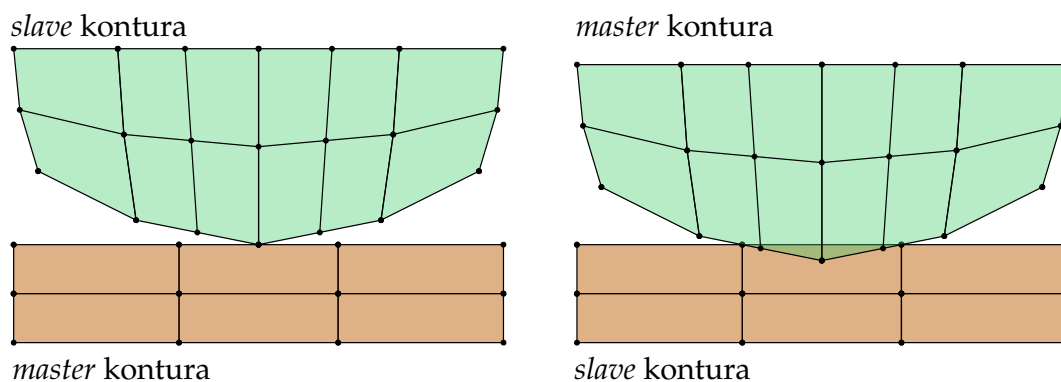
tivnoj interakciji sa svojom točkom projekcije na *master* konturu na suprotnoj strani dodirne granice (Slika 2.5). Svaki kontaktni uvjet uključuje jedan *slave* čvor te grupu *master* čvorova u svojoj okolini iz kojih su vrijednosti interpolirane na projiciranu točku.



Slika 2.5: *Node-to-surface* diskretizacija kontakta

Node-to-surface diskretizacija kontakta ima sljedeće osobine:

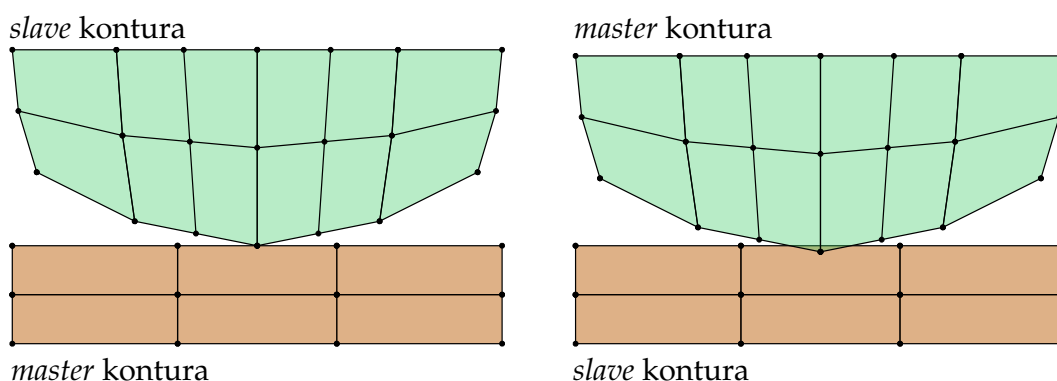
- *Slave* čvorovi ne mogu penetrirati u *master* konturu, dok čvorovi *master* konture, u načelu, penetriraju kroz *slave* konturu (Slika 2.6).
- Smjer kontakta je određen normalom *master* konture.
- Jedina informacija koja je potrebna *slave* konturi je lokacija i površina konture asociirana sa svakim čvorom. Smjer i zakrivljenost *slave* konture nisu bitni. *Slave* kontura može biti definirana kao grupa čvorova (*node-based surface*).
- *Node-to-surface* diskretizacija kontakta može biti korištena i u slučaju da se ne koriste *slave* konture bazirane samo na čvorovima.



Slika 2.6: Prodiranje čvorova kontaktne konture kod *node-to-surface* diskretizacije kontakta

Za razliku od *node-to-surface* diskretizacije kontakta, prilikom uspostavljanja ograničenja kontakta *surface-to-surface* diskretizacija uzima se u obzir oblik i *master* i *slave* kontura. Karakteristike *surface-to-surface* diskretizacije kontakta su:

- Uspostavljanje uvjeta kontakta, kod *surface-to-surface* diskretizacije, vrši se na području u okolini *slave* čvorova, a na samo u *slave* čvorovima. Kontakt se uspostavlja usrednjavanjem na području približno centriranom na *slave* čvorove na način da će ograničenja kontakta biti dominantno pod utjecajem jednog čvora, ali i pod slabijim utjecajem susjednih čvorova. Prilikom ove diskretizacije se, u principu, ne dešava prodiranje *master* čvorova kroz *slave* konturu iako su minimalni prodori ipak mogući (Slika 2.7).
- Smjer kontaktnih sila je određen prosječnim smjerom normale *slave* konture u području u okolini *slave* čvora.
- Prilikom definicije kontaktnog para s konturom definiranom grupom čvorova nije moguće koristiti *surface-to-surface* diskretizaciju kontakta.



Slika 2.7: Prodiranje čvorova kontaktne konture kod *surface-to-surface* diskretizacije kontakta

Interakcija dviju kontaktnih ploha ili rubova te njihovo relativno gibanje znatno je pod utjecajem izbora načina praćenja kontakta. Abaqus nudi dva načina praćenja kontaktne interakcije:

- konačno klizanje (eng. *finite sliding*) i
- kratko klizanje (eng. *small sliding*).

Konačno klizanje dozvoljava proizvoljno gibanje kontaktnih površina dok je za mala međusobna klizanja dva tijela u kontaktu, bez obzira na eventualne velike pomake tih tijela, namijenjeno kratko klizanje. Iako ograničeno

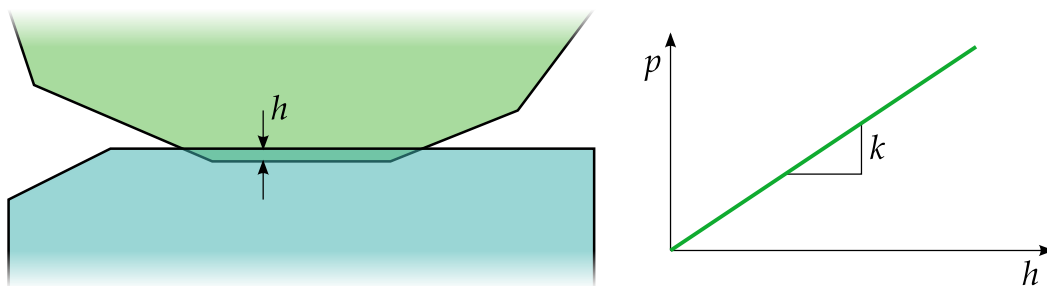
s obzirom na područje primjene, kratko klizanje pruža brži proračun i veću robustnost simulacije u odnosu na konačno klizanje. Izbor vrste praćenja kontakta nema nikakvih zahtjeva na vrstu diskretizacije kontakta.

U Abaqus simulaciji, dodirne interakcije mogu imati definirana razna svojstva koja definiraju utjecaj jednog tijela u kontaktu na drugo. Prema fizikalnim interaktivnim pojavama koje je moguće modelirati, svojstva dodirnih interakcija se može grupirati:

- svojstva mehaničkih kontakata,
- svojstva termodinamičkih kontakata,
- svojstva električnih kontakata i
- svojstva poroznih fluidnih kontakata.

Svaka dodirna interakcija, ovisno o fizikalnom modelu, može imati više svojstava kontakata. Za potrebe modela polaganja podmorskog cjevovoda samo mehanička svojstva kontakata su uzeta u obzir.

U svim varijantama modela korištene su dodirne interakcije koje u obzir uzimaju kontaktne sile normalne na konture u kontaktu. Korišteni su elastični kontakti s linearnom vezom pritiska kontakta i prodiranja (eng. *linear pressure-overclosure*). Kod linearno elastičnog kontakta, kontaktne konture prenose pritisak kada je prodiranje, mjereno u smjeru normale kontakta, veće od nule (Slika 2.8).



Slika 2.8: Ponašanje linearno elastičnog kontakta

Linearni elastični kontakt definiran je vezom

$$p = k \cdot h \quad (2.33)$$

gdje je p_n kontaktni pritisak, h je duljina prodiranja, a k je koeficijent elastičnosti kontakta. Pritisak p se raspoređuje na duljinu konture u dodiru te se na taj način producira kontaktna sila F_N .

Odabir elastičnog svojstva kontakta je opravdano jer uključuje elastičnost cijevi, oslonaca i morskog dna i time se realnije modelira dodirne interakcije u modelu. Za razliku od tvrdog kontakta (eng. *hard contact*), elastični kontakt omogućuje lakše numeričko rješavanje modela jer se lakše uspostavljaju i rješavaju kontaktni uvjeti.

Kod B varijante modela u obzir je uzeto i ponašanje kontakta u tangencijalnom smjeru na kontaktne konture. To je ponašanje definirano kao tarni kontakt u kojem se uspostavlja sila trenja između dva tijela u dodiru.

Sila trenja producirana u kontaktu definirana je Coulombovim zakonom:

$$F_T = F_N \cdot \mu \quad (2.34)$$

gdje je F_N kontaktna sila u smjeru normale kontaktne konture, μ je statički koeficijent trenja, a F_T je sila trenja koja djeluje tangencijalno na kontaktnu konturu.

Tarni se kontakt koristi za modeliranje napinjača u B varijanti modela što je detaljnije opisano u poglavlju 2.5.2.

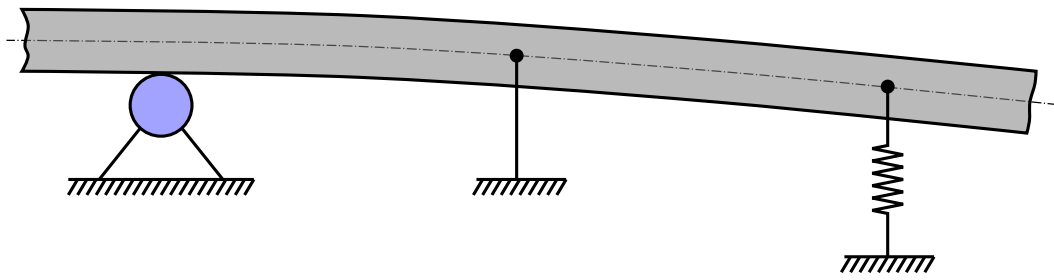
2.5.2 Kontakti u modelu polaganja

Dodirne interakcije prilikom modeliranja polaganja cjevovoda se mogu podijeliti u tri skupine:

- kontakt cijevi i valjkastog oslonca,
- kontak cijevi i morskog dna te
- kontakt cijevi i struktura napinjača (prisutan samo u B varijanti modela).

Kontakt između cijevi i svakog valjkastog oslonca se uspostavlja u točki zbog geometrijske reprezentacije valjkastog oslonca kao jednog čvora (Slika 2.9). Diskretizacija kontakta mora biti *node-to-surface* pošto je kontaktna kontura valjkastih oslonaca definirana pomoću skupine čvorova bez rubova. Donja kontura cijevi ima *master* ulogu u kontaktu dok čvorovi valjkastih oslonaca imaju *slave* ulogu. Ovim odabirom diskretizacije kontakta i uloga kontaktnih kontura onemogućava se prodor čvorova oslonaca u konturu cijevi (Slika 2.6). Zbog mogućeg značajnog klizanja strukture cijevi preko oslonaca, što je posebno naglašeno u B varijanti modela, u obzir je uzeto konačno klizanje prilikom praćenja interakcije kontaktnih kontura.

Kontakt cijevi i valjkastih oslonaca je linearno elastičan, što se može interpretirati kao oslonac na oprugama sa zadanom krutosti (Slika 2.9).



Slika 2.9: Kontakt cijevi i valjkastih oslonaca: realni, idealizirani kruti i idealizirani elastični kontakt

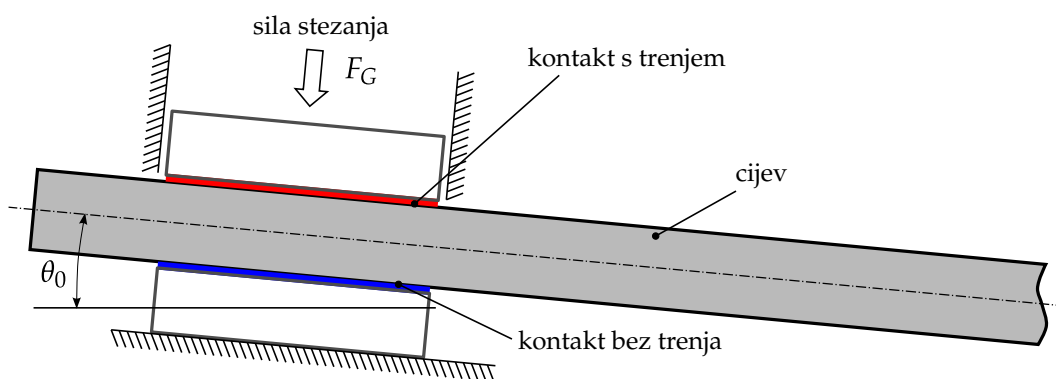
Za razliku od valjkastih oslonaca, struktura morskog dna je definirana kao linijska kruta struktura kod koje su bitni rubovi koji povezuju čvorove, pa se diskretizacija kontakta vrši *surface-to-surface* formulacijom. Uspostavljanje dodira te interakcija cijevi i morskog dna osigurava se izborom konačnog klizanja kao metode praćenja kontakta. Kontura cijevi ima *slave* ulogu, a kontura morskog dna ima *master* ulogu u kontaktu. Ponašanje cjevovoda uslijed kontakta s morskim dnom detaljnije je objašnjeno u [63, 46].

Prilikom dodira cjevovoda s valjkastim osloncima i morskim dnom samo normalna komponenta sila interakcija je uzeta u obzir. Dodirni pritisak i prodiranje su u linearnoj vezi koja je definirana pomoću krutosti kontakta koja iznosi 50 MN/m za kontakt cijevi i valjkastih oslonaca i 40 MN/m za kontakt cijevi i morskog dna.

U B varijanti modela, dodatno se prati i interakcija cijevi s dvije krute strukture napinjača. Gusjenice napinjača pojednostavljeno su definirane kao dvije ravne krute strukture kroz koje cijev klizi uspostavljajući normalnu i tangencijalnu interakciju koja se manifestira preko sile trenja. U modelu napinjača (Slika 2.10) prisutne su dvije interakcije: interakcija cijevi i donje strukture napinjača te interakcija cijevi i gornje strukture napinjača. U obje interakcije praćenje kontakta se vrši formulacijom konačnog klizanja zbog očekivano značajnog klizanja cijevi kroz strukture napinjača, a zbog postizanja što konzistentnije interakcije odabrana je *surface-to-surface* diskretizacija kontakata. Konture napinjača imaju *master*, a konture cijevi *slave* ulogu u dodirnim interakcijama tarnog modela napinjača.

Iako je moguće simulirati tarni kontakt cijevi s obje strukture napinjača, uspostavljanje sile trenja se dešava samo u kontaktu cijevi s gornjom strukturom napinjača (Slika 2.10). Takav pristup omogućuje jednostavniji model, a ne utječe na konačni rezultat simulacije.

U modelu C, sila napetosti cijevi na izlazu iz napinjača postiže se pomoću sile trenja sa strukturom napinjača koja je protu-sila težini cijevi koja je u slobodnom rasponu do morskog dna. Sila trenja se ostvaruje silom stezanja napinjača kroz tarni kontakt između cijevi i gornje strukture napinjača. Za



Slika 2.10: Skica modela napinjača

pretvorbu sile stezanja u silu trenja korišten je jednostavni model trenja temeljen na Coulombovom zakonu trenja:

$$T = F_T \leq \mu \cdot F_G \quad (2.35)$$

gdje je $T = N(0)$ sila napetosti cijevi na izlazu iz napinjača, F_T je sila trenja, F_G je sila stezanja, a μ je statički koeficijent trenja. Radi prikladnosti i jednostavnosti, vrijednost koeficijenta trenja μ je postavljena na 1 kako bi postignuta sila napetosti bila jednaka primijenjenoj sili stezanja napinjača. Treba napomenuti da postignuta sila napetosti u cjevovodu može biti manja od ciljane, ako je sila stezanja prekomjerna za danu težinu cijevi.

Za razliku od tangencijalne reakcije u dodiru, koja se promatra samo u interakciji cijevi s gornjom strukturom napinjača, normalna reakcija kontakta uzeta je u obzir u obje interakcije cijevi i struktura napinjača. Utjecaj obje strukture napinjača, poprečno na cijev, definiran je s krutošću kontakta koja iznosi 50 MN/m.

Prezentirani model napinjača ne reproducira stvarnu mehaniku i ponašanje napinjača, međutim, uzima u obzir sve značajne utjecaje napinjača na cijev: cijev je stegnuta u napinjaču i aksijalna sila je pomoću trenja uniformno uvedena na cijev duž kontakta s napinjačem.

2.6 Procedure rješavanja

Zbog složenosti predstavljenog modela, posebno glede određivanja opterećenja te područja postavljanja opterećenja, rješavanje modela potrebno je podijeliti u više koraka u kojima se mogu iskoristiti prethodno dobiveni rezultati. U ovom radu predstavljena su dva pristupa rješavanja:

- korištenje inkrementalne Abaqus simulacije i
- korištenje vanjske iterativne procedure.

Oba navedena pristupa ili njihova kombinacija korišteni su za rješavanje predloženih varijanti Abaqus modela polaganja podmorskih cjevovoda. U nastavku ovoga poglavlja detaljno su opisani navedeni postupci.

2.6.1 Faze Abaqus simulacije

Rješavanje statičkih simulacija u Abaqusu Standard može se izvršiti u nekoliko faza tijekom kojih se opterećenja, rubni uvjeti i interakcije mogu omogućiti, onemogućiti ili mijenjati [23]. U svakoj fazi analize se vrši inkrementalno uvođenje opterećenja.

Inkrementalna procedura automatski određuje udio opterećenja koje se uvodi u svakom inkrementu faze na temelju greške linearne aproksimacije nelinearnog elastičnog modela. Veliki pomaci i uspostavljanje dodirnih interakcija dominantno utječu na nelinearnost modela. Abaqus inkrementalna procedura rješavanja može se interpretirati kao kvazi-dinamička simulacija u kojoj se opterećenja postepeno uvode tijekom vremena simulacije.

Uvedeni su termini “veličina inkrementa” koji definiraju udio opterećenja koje se uvodi u svakom inkrementu te “napredak uvođenja opterećenja” koji predstavlja ukupni napredak izračunatih faza.

Podjela cjelokupne simulacije polaganja podmorskih cjevovoda u faze simulacije se prvenstveno odnosi na rješavanje modela polaganja s tarnim kontaktom između cijevi i struktura napinjača (B varijanta modela). I rješavanje A varijante modela također se djelomično može raščlaniti u faze, međutim takva procedura rješavanja nema bitne koristi jer ti modeli ionako zahtijevaju vanjske iteracijske procedure (poglavlje 2.6.2) unutar kojih se mogu određivati dijelovi uronjenog i neuronjenog cjevovoda te na njih aplicirati odgovarajuća opterećenja. Rješavanje A varijante modela, iako ne zahtjeva raščlambu simulacije u više faza, podrazumijeva inkrementalno uvođenje opterećenja zbog nelinearnosti modela.

Simulacija osnovnog polaganja cjevovoda, bez uključenih dodatnih značajki modela (poglavlje 2.7), modeliranog B varijantom modela, vrši se u tri općenite statičke faze Abaqus simulacije. Te se faze razlikuju samo u apliciranim opterećenjima te u parametrima inkrementalnog procesa pojedine faze. Geometrijska nelinearnost uzeta je u obzir u sve tri faze Abaqus simulacije.

Rješavanje B varijante modela vrši se automatskim inkrementalnim uvođenjem opterećenja u svakoj fazi simulacije. Parametri inkrementacije te redoslijed uvođenja opterećenja dani su u Tablici 2.2.

	Faza 1	Faza 2	Faza 3
Sila stezanja	Uvođenje	Uvedena	Uvedena
Težina uronjene cijevi		Uvođenje	Uvedena
Dodatna težina neuronjene cijevi			Uvođenje
Maksimalni broj koraka inkrementacije	10	1000	100
Početni korak inkrementacije	1	10^{-4}	1
Minimalni korak inkrementacije	0.1	10^{-5}	0.01
Maksimalni korak inkrementacije	1	0.1	1

Tablica 2.2: Faze Abaqus simulacije

U prvoj fazi simulacije uvodi se sila stezanja F_G te se uspostavlja dodirna interakcija cijevi s gornjim i donjim strukturama napinjača koja uključuje i uspostavljanje tarnog kontakta. Kontinuirano opterećenje q_y^- (2.31) uvodi se u drugoj fazi što prouzrokuje progib cjevovoda te proklizavanje cjevovoda kroz zahvat napinjača. Proklizavanje kroz strukture napinjača dešava se dok je sila trenja između cijevi i napinjača manja od aksijalne sile uzrokovane težinom cjevovoda. Tijekom druge faze simulacije uspostavljaju se kontakti cijevi i valjkastih oslonaca te kontakti cijevi i morskog dna. U posljednjoj, trećoj, fazi simulacije na neuronjeni dio cjevovoda postavlja se dodatno kontinuirano opterećenje q_y^+ (2.32).

Uvođenje dodatnog opterećenja na neuronjeni dio cijevi može prouzročiti značajnije proklizavanje cijevi kroz zahvat napinjača. Pretjerano se proklizavanje može desiti prilikom simulacije polaganja gdje se veći dio cijevi nalazi iznad razine mora ili kod simulacija sa cijevima koje imaju relativno veliki uzgon u odnosu na težinu cijevi. Proklizavanje cijevi je mjerljivo preko razlike pomaka prvog čvora cijevi između druge i treće faze simulacije. Ukoliko je proklizavanje prekomjerno, potrebno je ponoviti posljednju fazu simulacije kako bi se neuronjeni dio cijevi redefinirao te se na njega postavilo dodatno opterećenje. Ako se može predvidjeti prekomjerno proklizavanje, poželjno je da se dodatno opterećenje na neuronjeni

dio cijevi uvodi postepeno kroz nekoliko završnih faza simulacije, a ne cjelokupnim intenzitetom u trećoj fazi.

Iako se strukturalna analiza cjevovoda tijekom polaganja treba temeljiti na rezultatima završne faze simulacije, rezultati svake faze ali i rezultati svakog inkrementalnog koraka pojedine faze su veoma korisni za razumijevanje predloženog modela polaganja podmorskih cjevovoda.

2.6.2 Vanjske procedure

U svrhu bržeg i stabilnijeg rješavanja modela koriste se vanjske procedure koje iterativno izvršavaju Abaqus simulacije s različitim postavkama koje se određuju unutar samog iteracijskog postupka. Glavni razlog korištenja vanjskih procedura je nemogućnost *a priori* određivanja horizontalne sile F_x^k u predstavljenoj A varijanti modela. Za rješavanje A varijante modela koristi se iterativni postupak koji pokušava odrediti nepoznatu silu F_x^k uzimajući u obzir vrijednost aksijalne sile na početku cjevovoda $N(0)$.

Glavna zadaća vanjske iterativne procedure je rješavanje nelinearne jednadžbe:

$$N_0(F_x^k) = T \quad (2.36)$$

gdje je $N_0 = N(0)$ aksijalna sila u prvom čvoru cjevovoda (funkcija horizontalne sile F_x^k aplicirane na zadnji čvor cijevi), a T je ciljana napetost na početku cjevovoda. Funkcija $N_0(F_x^k)$ zapravo predstavlja jednu cijelu Abaqus simulaciju koja za zadanu silu F_x^k računa aksijalnu silu na početku cjevovoda.

Za rješavanje nelinearne jednadžbe (2.36) koristi se numerička metoda regula falsi (metoda pogrešnog položaja). Metoda regula falsi je iterativna metoda koja se bazira na ograđivanju (eng. *bracketing*) kao i metoda bisekcije, ali koristi bolje određivanje sljedeće točke iterativnog postupka. Osim rješavanja nelinearne jednadžbe, u implementiranoj iterativnoj proceduri se istovremeno određuje i granica između uronjenog i neuronjenog dijela cjevovoda, što nije standardni algoritam regula falsi metode, pa je cijeli postupak detaljnije opisan u nastavku poglavlja.

Zbog preglednosti jednadžbi u daljnjem opisu vanjskih procedura koristiti će se oznake F za silu F_x^k i N_0 za aksijalnu silu na početku cjevovoda (F_n^p) te se uvodi pomoćna funkcija

$$\Delta N_0(F) = N_0(F) - T \quad (2.37)$$

koja izračunava razliku postignute i željene napetosti na početku cjevovoda.

S obzirom da se želi postići sila napetosti N_0 jednaka željenoj sili napetosti T , tj. da je ΔN_0 jednak nuli, potrebno je odrediti silu F koja će biti rješenje jednadžbe

$$\Delta N_0(F) = 0 \quad (2.38)$$

odnosno, potrebno je odrediti nul-točku funkcije $\Delta N_0(F)$.

Kao i sve slične metode koje koriste ograđivanje, metoda regula falsi određuje nul-točku nelinearne funkcije na određenom intervalu.

Odabir intervala na kojem se traži rješenje F funkcije $\Delta N_0(F)$ temelji se na fizikalnim ograničenjima sile F . Sila F ne može biti negativna, pošto bi to uzrokovalo tlačno aksijalno opterećenje cijevi, a postignuta sila napetosti $N_0(F)$ bi bila negativna. Maksimalni intenzitet koju može poprimiti sila F je jednak ciljanoj sili napetosti T i taj se intenzitet može postići samo u slučaju da na cijelom rasponu cjevovoda na cijev ne djeluje niti jedna horizontalna sila, uključujući i kontaktne sile u interakciji cijevi s valjkastim osloncima ili s morskim dnom.

Zbog navedenog vrijedi da je $F \in [0, T]$, pa je $[0, T]$ odabrani interval za traženje nul-točka funkcije ΔN_0 . Za većinu slučajeva početni interval regula falsi metode može se smanjiti, jer se pouzdano može tvrditi da će postojati horizontalne kontaktne sile i da će postojati vlačna aksijalna sila u cjevovodu. Međutim, smanjivanje početnog intervala ne donosi znatniju preciznost ili brzinu metode, pa je za potrebe ovog rada uvijek korišten interval $[0, T]$.

Ukoliko je funkcija ΔN_0 neprekidna na intervalu $[0, T]$ te ako vrijedi da je

$$\Delta N_0(0) \cdot \Delta N_0(T) \leq 0 \quad (2.39)$$

onda funkcija ΔN_0 ima barem jednu nul-točku na intervalu $[0, T]$. Na temelju niza provedenih simulacija polaganja podmorskih cjevovoda tijekom ovog istraživanja, na više primjera s različitom geometrijom broda i *stingera* te s različitim cijevima, može se zaključiti da navedeni uvjeti vrijede te da funkcija ΔN_0 uvijek ima nul-točku na intervalu $[0, T]$.

U daljnjem tekstu granice intervala, koje se mijenjaju tijekom iterativnog postupka regula falsi metode, su označene sa F_a i F_b .

Mijenjanje granica intervala ili ograđivanje vrši se izračunom točke dijeljenja F_c unutar intervala koja zamjenjuje jednu od granica F_a ili F_b i na taj način smanjuje širinu intervala $[F_a, F_b]$. Aproksimacijom funkcije $\Delta N_0(F)$ pravcem kroz točke $(F_a, \Delta N_0(F_a))$ i $(F_b, \Delta N_0(F_b))$, može se jednostavno iz-

računati za koju vrijednost F će aproksimacija funkcije F_n biti jednaka nuli:

$$F_c^i = F_b^i - \frac{\Delta N_0(F_b^i) \cdot (F_b^i - F_a^i)}{\Delta N_0(F_b^i) - \Delta N_0(F_a^i)} \quad (2.40)$$

gdje je i indeks koraka iteracijskog postupka.

Na temelju izračunate sile F_c te vrijednosti funkcije za tu silu $F_n(F_c)$ određuju se nove granice za sljedeći iterativni korak:

$$F_a^{i+1} = \begin{cases} F_c^i & \text{ako je } \Delta N_0(F_a^i) \cdot \Delta N_0(F_c^i) \geq 0 \\ F_a^i & \text{inače} \end{cases} \quad (2.41)$$

i

$$F_b^{i+1} = \begin{cases} F_b^i & \text{ako je } \Delta N_0(F_a^i) \cdot \Delta N_0(F_c^i) \geq 0 \\ F_c^i & \text{inače.} \end{cases} \quad (2.42)$$

Metoda regula falsi za pronalaženje sile F se sastoji od ponavljanje jednostavnog izračuna temeljenog na izrazima (2.40), (2.41) i (2.42) uz povećavanje indeksa koraka i .

Iako je određivanje potrebnih horizontalnih sila za postizanje napetosti cijevi primarni cilj vanjske procedure, iterativni postupak regula falsi metode može se iskoristiti i za određivanje granice između neuronjenog i urođenog dijela cjevovoda te za postavljanje adekvatnih opterećenja (2.31) i (2.32) na te dijelove cijevi.

Na početku procedure duljina l_+ neuronjenog dijela cjevovoda se pretpostavlja na temelju geometrije broda i *stingera* i ta se duljina uzima u obzir prilikom provođenja Abaqus simulacije za početne granice intervala F_a^0 i F_b^0 regula falsi metode. Nakon provedenih simulacija, iz rezultata se određuju točne postignute duljine neuronjenih djelova cjevovoda L_{a+}^0 i L_{b+}^0 . U daljnjem razmatranje varijabla l_+ predstavlja postavljenu duljinu neuronjenog dijela prije Abaqus simulacije, a L_+ je duljina neuronjenog dijela cjevovoda dobivena iz rezultata simulacije.

Za prvi korak iterativne metode duljina neuronjenog dijela cjevovoda aproksimirana je aritmetičkim usrednjenjem duljina na graničnim točkama:

$$l_+^1 = \frac{L_{a+}^0 + L_{b+}^0}{2} \quad (2.43)$$

a za svaki sljedeći korak duljina neuronjenog dijela cjevovoda se pretpostavlja ne temelju rezultata iz prethodnog koraka:

$$l_+^{i+1} = L_+^i \quad (2.44)$$

gdje je i indeks iteracijskog koraka.

Implementirana su dva uvjeta zaustavljanja regula falsi metode koji se provjeravaju u svakom koraku metode:

- kontrola apsolutne pogreške i
- maksimalni broj iteracija metode.

Kontrola apsolutne pogreške, temeljena na izrazu

$$\left| \Delta N_0(F_c^i) \right| = \left| F_n(F_c^i) - T \right| < \epsilon_F \quad (2.45)$$

ispituje odstupanje (2.37) postignute aksijalne sile F_n na početku cjevovoda od ciljanje sile T . Za sve simulacije u ovom radu korištena je dopuštena pogreška $\epsilon_F = 10$ N.

Uvjet maksimalnog broja koraka iteracijskog postupka definiran je jednostavnim izrazom

$$i \leq i_{\max} \quad (2.46)$$

gdje je i_{\max} maksimalni dozvoljeni broj koraka regula falsi metode.

Zbog relativno jednostavnog numeričkog rješavanja jednadžbe (2.37) pokazalo se je da metoda u većini slučajeva zadovolji uvjet (2.45) u svega 3 do 6 koraka, pa je za maksimalni broj iteracija odabran $i_{\max} = 10$.

2.7 Napredne značajke modela

U pripremi polaganja podmorskih cjevovoda često je potrebno provesti analize koje obuhvaćaju detaljnije simulacije polaganja, a temelje se na proširenjima osnovnog modela polaganja. Proširenja modela obuhvaćaju dodatne tehnološke promjene prilikom polaganja, kao što je upotreba plutajućeg *stingera* ili upotreba uzgonskih tankova, te detaljniju analizu polaganja kao što je modeliranje interakcije cijevi i neravnog morskog dna.

Proširenja modela koja su opisane u ovom poglavlju mogu se, prema potrebi, slobodno kombinirati u simulaciji polaganja.

Osim proširenja koja su obuhvaćena u ovom poglavlju, osnovni model omogućuje i druga proširenja kao što je simulacija prekidanja i nastavljanja polaganja [81] u kojima se, u modelu, dio cjevovoda zamjenjuje čeličnom užadi kojom se cijev spušta odnosno podiže sa morskog dna.

2.7.1 Model plutajućeg stingera

Plutajući *stinger* je *stinger* koji tijekom procesa polaganja može rotirati oko zglobne veze s brodom a cjevovod koji se polaže podržava vlastitim uzgonom. Položaj *stingera* tj. kut *stingera* ovisi o kontaktnim silama u čvorovima valjkastih oslonaca te se ne može odrediti prije provođenja simulacije polaganja.

Plutajući *stinger* je modeliran slično kao i u slučaju fiksnog *stingera* uz omogućenu rotaciju krute strukture *stingera* oko zglobne veze s brodom te s postavljenom rezultatnom silom težine *stingera*, uzgona *stingera* i težine balastne vode (Slika 2.11). *Stinger* će postići položaj (kut) u kojem je zadovoljen ekvilibrij momenata oko zgloba za navedene poznate sile te sile na valjkaste oslonce uzrokovane zbog kontakta sa cjevovodom.

U slučaju plutajućeg *stingera* ne vrijedi ograničenje (2.24) koje sprječava rotaciju fiksnog *stingera* oko zgloba. Za plutajući *stinger* postavljeno je samo ograničenje pomaka na zglobni čvor *stingera*:

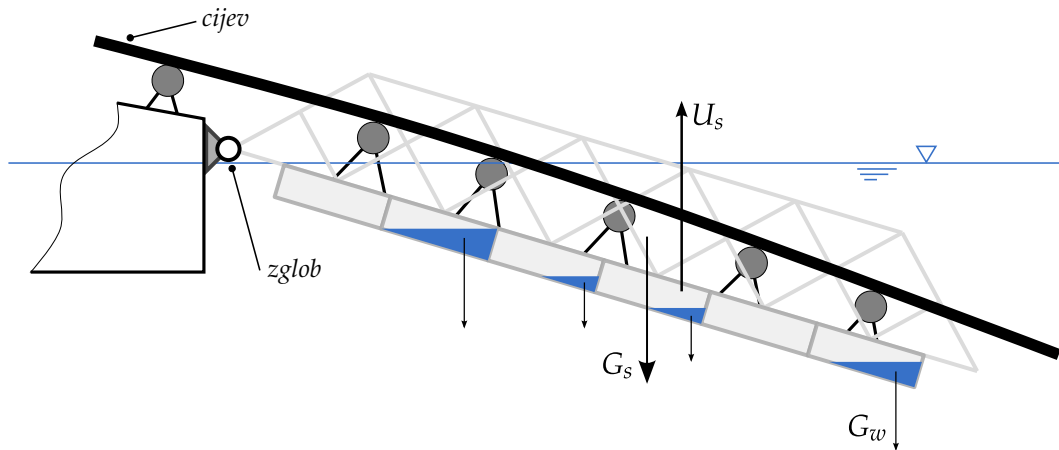
$$u_x^s = 0, \quad u_y^s = 0 \quad (2.47)$$

dok je rotacija *stingera* omogućena.

Na plutajući *stinger* djeluju poznate sile (Slika 2.11) koje u horizontalnom položaju *stingera* ($\alpha_s = 0$) stvaraju moment oko zgloba:

$$M^s = l_u \cdot U_s - l_m \cdot G_s + \sum_i l_i \cdot G_{wi} \quad (2.48)$$

gdje je l_u udaljenost centra uzgona od zgloba, U_s je sila uzgona strukture *stingera*, l_m je udaljenost centra mase od zgloba, G_s je težina *stingera*, l_i je

Slika 2.11: Poznate sile na plutajući *stinger*

udaljenost centra i -tog balastnog spremnika od zgloba, a G_{wi} je težina vode u i -tom balastnom spremniku.

Na temelju momenta M iz izraza (2.48) može se izračunati vertikalna sila

$$F_y^s = \frac{M^s}{l_s} \quad (2.49)$$

koja se postavlja na zadnji čvor *stingera* (na duljinu l_s od zgloba), a zamjenjuje sve poznate sile prikazane na slici 2.11. Uobičajeno je da se zglob na konstrukciji broda cjevopolagača nalazi vrlo blizu morske razine pa je utjecaj nedostatka uzgona na neuronjenom djelu *stingera* zanemariv u odnosu na ukupan uzgon *stingera* te je izraz (2.49) dobra aproksimacija svih hidrostatičkih sila na *stinger*. Vertikalna sila F_y^s se postavlja na krajnju točku *stingera* te se moment koji ona stvara oko zgloba mijenja s promjenom kuta *stingera*, što čini ovakav uzgon plutajućeg *stingera* primjenjivim za sve položaje (kuteve) *stingera*.

Rješavanje svih varijanti modela s plutajućim *stingerom* zahtjeva dodatnu fazu Abaqus simulacije nakon faze u kojoj se uvodi kontinuirano opterećenje koje predstavlja težinu cijevi. Prilikom uvođenja opterećenja (2.32), kao i u mogućim prethodećim fazama, *stinger* je fiksni i zadovoljava ograničenja (2.23) i (2.24). Postavljanje vrijednosti inicijalnog fiksnog kuta *stingera* ovisi o varijantama osnovnog modela i opisano je u nastavku ovog poglavlja.

U dodatnoj fazi simulacije uvodi se rezultatna sila (2.49) na *stinger* te se omogućuje rotacija *stingera*. Tijekom inkrementalnog rješavanja ove faze simulacije struktura *stingera* se miče i postiže stanje ravnoteže u interakciji sa cjevovodom. U svim sljedećim fazama postavljena ograničenja te sila uzgona na plutajući *stinger* ostaju nepromijenjena.

U obje varijante modela polaganja podmorskih cjevovoda bitno je da je početni fiksni kut *stingera* što bliži finalnom kutu kako bi se smanjio broj

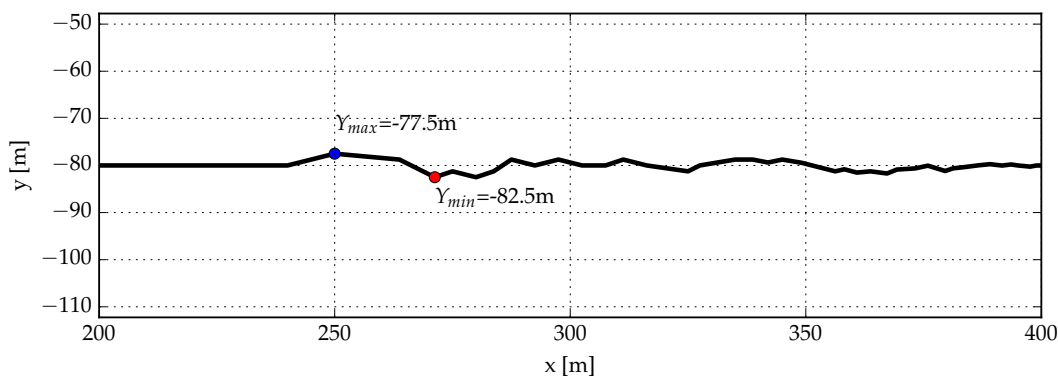
potrebnih iteracija vanjske procedure u kojim se postignuti kut plutajućeg *stingera* uzima kao inicijalni fiksni kuta za sljedeću iteraciju metode regula falsi.

Treba napomenuti da kod B varijante modela početni kut *stingera* (koji je fiksiran u prvih nekoliko faza simulacije) mora biti manji od finalnog kuta plutajućeg *stingera* jer se klizanje cijevi kroz strukture napinjača ne može odvijati u suprotnom smjeru zbog prevelikog trenja.

2.7.2 Neravno morsko dno

Strukturalna analiza cjevovoda tijekom polaganja na neravno morsko dno zahtjeva promjene u geometriji i numeričkoj mreži morskog dna. Neravno morsko dno najprikladnije je definirati kao skup ravnih segmenata koji formiraju poliliniju (Slika 2.12).

Zbog formulacije dodirnih interakcija cijevi i morskog dna, opisanih u poglavlju 2.5.1, te relativno malih segmenata polilinije morskog dna dovoljno je koristiti numeričku mrežu sa samo jednim elementom po segmentu polilinije.



Slika 2.12: Profil neravnog morskog dna

Proširenje osnovnog modela polaganja podmorskog cjevovoda s neravnim profilom morskog dna omogućuje detaljnije promatranje naprezanja i deformacija cijevi položene na morsko dno. Za razliku od osnovnog modela, kontakt cijevi i morskog dna nije kontinuiran te se formiraju tzv. slobodni rasponi (eng. *free span*) - nepodržani dijelovi cjevovoda koji se protežu preko "udolina" morskog dna.

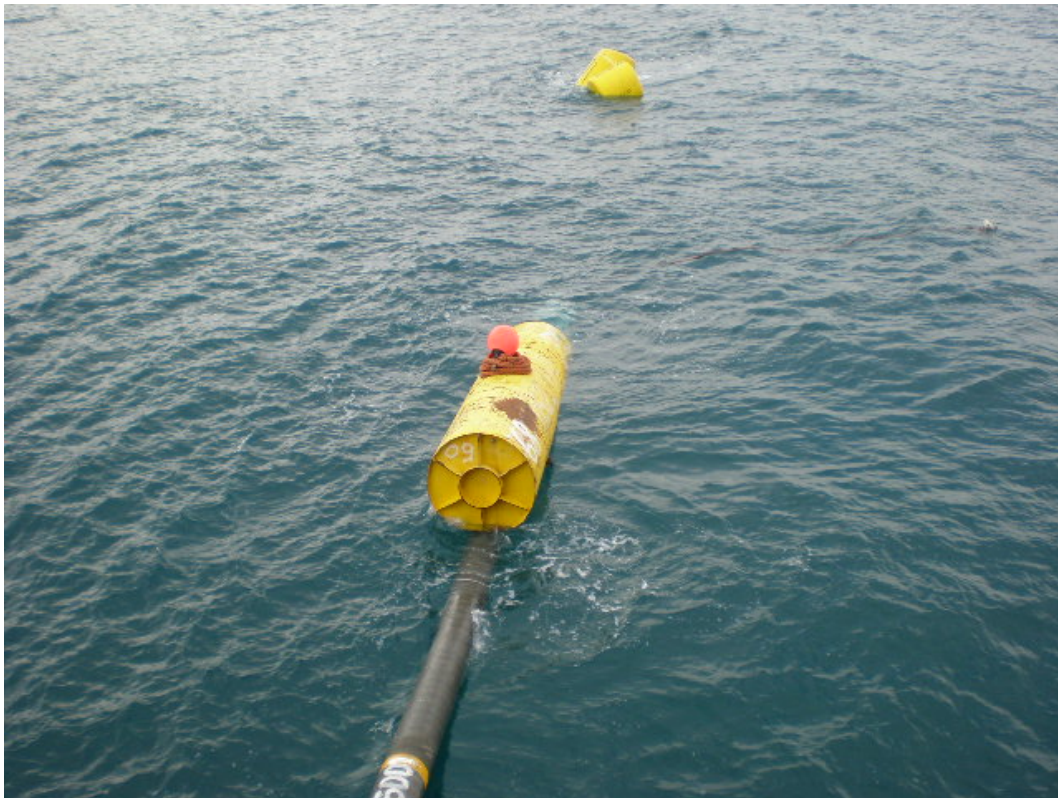
Za razliku od osnovnog modela, zbog isprekidanog kontakta cjevovoda i morskog dna, savijanje cijevi se dešava i nakon prve točke dodira cijevi i morskog dna (eng. *touchdown point*).

Savijanja cijevi u interakciji s morskim dnom je detaljnije obrađeno u radovima Hvidstena [36] i Leepipatpaiboon [46].

2.7.3 Uzgonski tankovi

Kod polaganja teških cjevovoda, kako bi se spriječilo prekomjerno savijanje cijevi, na cjevovod koji se polaže moguće je postaviti uzgonske spremnike (eng. *buoyancy tanks*) koji dodatno podupiru cjevovod duž cijele duljine do morskog dna. Uzgonski spremnici se postavljaju na cjevovod na brodu polagaču, a uklanjaju se na morskome dnu. Koriste se uzgonski tankovi standardizirane veličine i obično se raspoređuju duž cijevi jednoliko ili prema jednostavnom uzorku (Slika 2.13).

Utjecaj uzgonskih tankova u modelu je ostvaren pomoću koncentriranih sila na cijev koje su postavljene na čvorove cijevi prema propisanom razmaku uzgonskih spremnika ili prema zadanom uzorku postavljanja.



Slika 2.13: Upotreba uznoskih spremnika prilikom polaganja

Izvor: Saipem Mediteran Usluge D.O.O.

VALIDACIJA I PRIMJENA MODELA

U ovom poglavlju napravljena je usporedba predloženih varijanti modela polaganja podmorskih cjevovoda (poglavlje 2.2). Usporedba varijanti pokazuje neke suštinske razlike u pristupu modeliranju i rješavanju modela, ali i produciranje istih krajnjih rezultata bez obzira na korišteni pristup.

Pošto se pokazalo da obje varijante modela daju iste rezultate, za validaciju modela korištena je samo B varijanta modela. Rezultati dobiveni Abaqus simulacijom uspoređeni su s OFFPIPE-om - vodećim svjetskim alatom za strukturalnu analizu cjevovoda prilikom polaganja. Usporedbom je pokazano praktički savršeno podudaranje rezultata dobivenim rješavanjem Abaqus modela te onima produciranim OFFPIPE-om.

Detaljnije analize cjevovoda prilikom polaganja, uz uključivanje dodatnih značajki modela, dane su u završnom dijelu poglavlja.

3.1 Usporedba varijanti modela

Varijante modela predstavljene u poglavlju 2 razlikuju se po načinu postizanja napetosti cjevovoda. Iako se na osnovu opisanih značajki modela može zaključiti da će se rješenja svih varijanti podudarati, potrebno je napraviti usporedbu rezultata za sve pristupe kako bi se pokazalo da sve tri izvedbe modela pružaju adekvatnu točnost.

Za usporedbu predstavljenih varijanti modela osmišljen je slučaj polaganja cjevovoda na kojem će se provesti simulacije elastične deformacije cijevi tijekom polaganja.

Na palubi broda nalazi se napinjač pod kutom od 4.65° , a izlaz iz napinjača se nalazi na 5.80 m iznad razine mora. Za podupiranje cijevi, postavljena su 3 valjkasta oslonca koji su međusobno jednoliko razmaknuti. Korišten je *stinger* duljine 65 m na kojem se nalazi 6 valjkastih oslonaca.

Geometrija broda cjevopolagača i *stingera* je definirana prema pojednostavljenom linijskom modelu opisanom u poglavlju 2.3. U Tablici 3.1 definirani su položaji napinjača, valjkastih oslonaca broda i *stingera* te položaji zglobova. U B varijanti modela, duljina tarnih površina napinjača iznosi 5 m. Stinger je postavljen pod kutom od 22° .

Krute strukture broda i *stingera* su omrežene s po jednim elementom po linijskom segmentu (Slika 2.4).

Cijev se polaže na ravno horizontalno morsko dno dubine 80 m. Kruta struktura morskog dna je omrežena uniformno sa 40 elemenata.

Brod	x [m]	y [m]
Napinjač	0.0	5.80
Valjkasti oslonac 1	11.0	4.79
Valjkasti oslonac 2	22.0	3.33
Valjkasti oslonac 3	33.0	1.16
Zglob broda	36.0	-2.00
<i>Stinger</i>	x [m]	y [m]
Zglob <i>stingera</i>	0.0	0.00
Valjkasti oslonac 1	8.0	3.23
Valjkasti oslonac 2	19.0	3.86
Valjkasti oslonac 3	30.0	3.92
Valjkasti oslonac 4	41.0	3.44
Valjkasti oslonac 5	52.0	2.40
Valjkasti oslonac 6	62.0	1.20
Vrh <i>stingera</i>	65.0	0.00

Tablica 3.1: Osnovna geometrija broda i *stingera* za testni primjer

Cijev korištena u testnom slučaju je 14-inčna čelična cijev. Geometrija cijevi i svojstva materijala su dani u Tablici 3.2. Početni položaj cijevi je definiran na način da se os cijevi podudara s osi napinjača. Početak cijevi je postavljen na čvor izlaza iz napinjača, a u B varijanti modela cijev je produžena za dodatnih 20 m od izlaza iz napinjača prema pramcu broda. Cijev je uniformno omrežena s elementima duljine 1 m.

Veličina	Vrijednost
Youngov modul, E	207 GPa
Poissonov broj, μ	0.3
Vanjski promjer cijevi, D	355.6 mm
Debljina stijenke cijevi, s_p	20 mm
Duljina cijevi, l	400 m (+20 m)
Duljina elementa, l_e	1 m
Jedinična težina uronjene cijevi, q_y^-	625.0 N/m
Dodatna jedinična težina neuronjene cijevi, q_y^+	998.0 N/m
Dubina mora, H	80.0 m

Tablica 3.2: Svojstva cijevi za testni primjer

Potrebna sila napetosti na izlazu iz napinjača je $T = 245.17\text{kN}$, koja se, u B varijanti modela, postiže sa silom stezanja $F_G = T$. Zadana sila napetosti je dovoljno mala i uvijek može biti postignuta u svim pristupima modeliranja za dana svojstva cijevi i dubinu vode.

Na temelju svojstava cijevi danih u Tablici 3.2 izračunata su kontinuirana vertikalna opterećenja na cijev: $q_y^- = -625\text{ N/m}$ i $q_y^+ = -998\text{ N/m}$

Za opisani slučaj polaganja podmorskih cjevovoda provedene su simulacije s obje varijante modela. U tablici 3.3 prikazani su numerički i računalni zahtjevi rješavanja. Vidljivo je da je ukupno vrijeme računanja osjetno manje kod jednostavnije varijante modela iako se pri njenom rješavanju koristio veći broj zasebnih Abaqus simulacija.

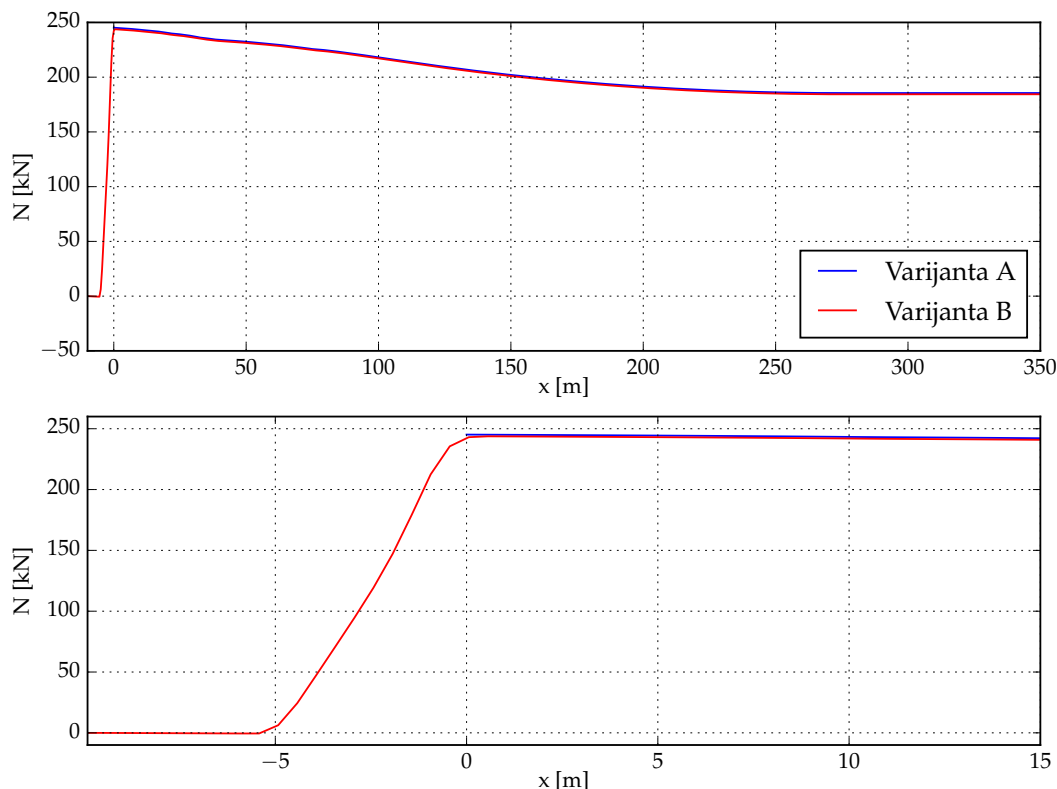
	Varijanta A	Varijanta B
Ukupan broj iteracija	4	2*
Faze rješavanja	2	3
Ukupan broj inkremenata	21 + 20 + 20 + 20	36 + 36
Ukupno vrijeme računanja (sekundi)**	79.88	108.06

*zbog određivanja neuronjene duljine cjevovoda

**na Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.40GHz

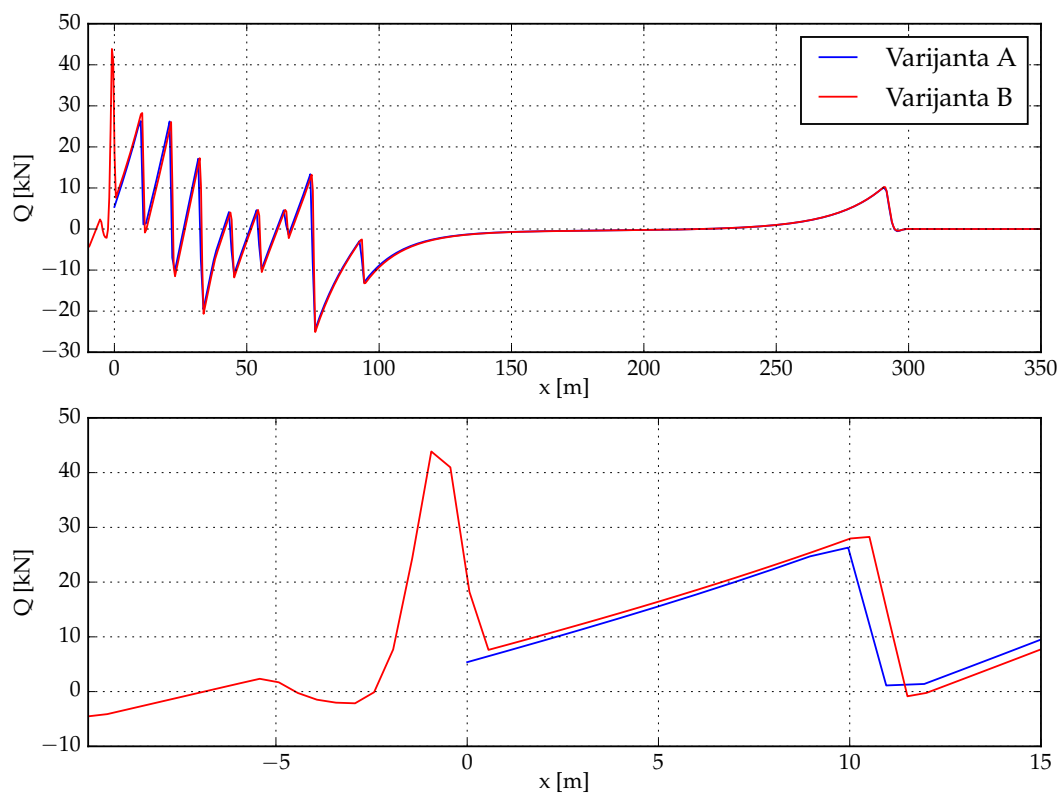
Tablica 3.3: Usporedba varijanti modela

Promatranjem dijagrama uzdužnih sila (Slika 3.1) može se utvrditi da su oba pristupa adekvatna što se tiče postizanja željene sile napetosti u cijevi na izlazu iz napinjača. Očita je razlika u kontinuiranom postizanju sile napetosti kroz tarni kontakt cijevi i napinjača u varijanti A u odnosu na varijantu B u kojoj je sila napetosti na početku cjevovoda zapravo sila reakcije uklještenja cijevi i nepomične točke izlaza napinjača. Ostatak cijevi ima gotovo idealno podudaranje aksijalne sile u rješenjima obje varijante modela.

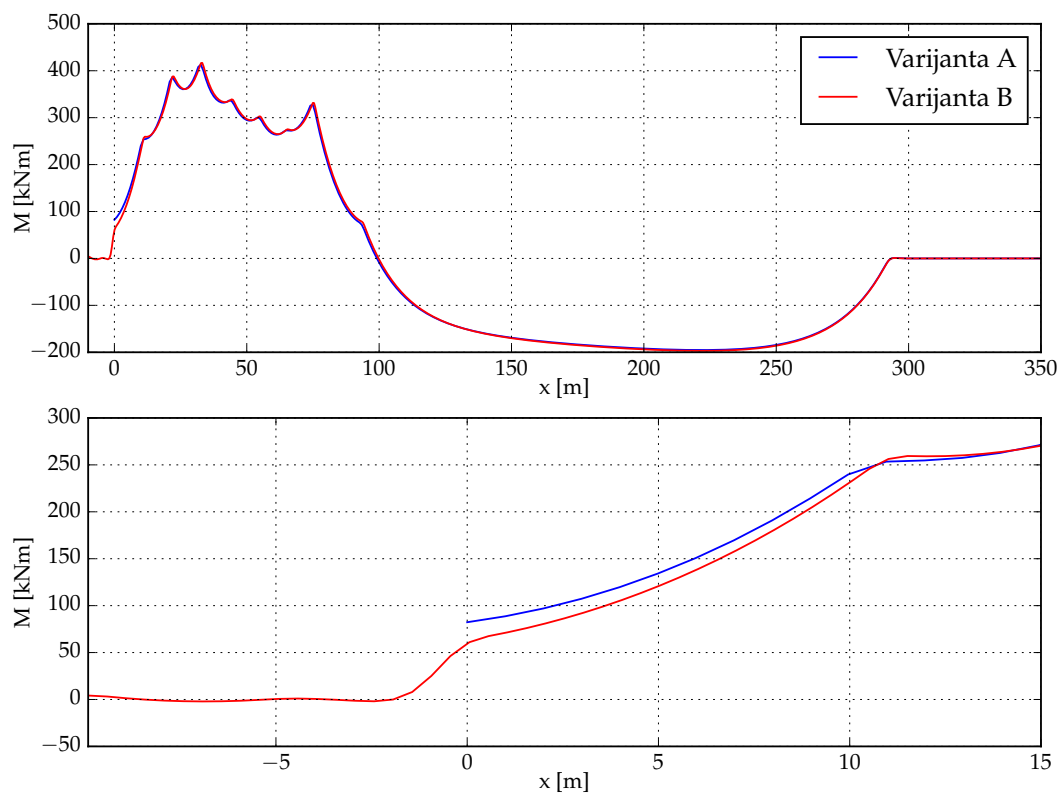


Slika 3.1: Usporedba varijanti modela: aksijalna sila

Razlike u poprečnoj sili (Slika 3.2) i momentu savijanja (Slika 3.3) cijevi mogu se uočiti na izlazu iz mehanizma napinjača. Ova razlika je očekivana zbog temeljno drukčijeg modela napinjača u predstavljanim varijantama modela. Kontaktna interakcija napinjača i cijevi, zbog elastičnosti kontakta, blaže preuzima moment savijanja od uklještenja u varijanti A modela. Oba rješenja, osim na izlazu iz napinjača gdje postoji mala razlika u poprečnoj sili i momentu savijanja, daju jednake momente savijanja duž ostatka cijevi.



Slika 3.2: Usporedba varijanti modela: poprečna sila



Slika 3.3: Usporedba varijanti modela: moment savijanja

3.2 Validacija modela

Validacija modela i provjera rješenja provedena je na testnom slučaju polaganja cjevovoda danom u [51]. Radi se o slučaju statičke strukturalne analize polaganja s fisknim *stingerom*.

Položaji valjkastih oslonaca broda polagača su definirani koristeći konstantni radijus zakrivljenosti: visine oslonaca su postavljene na način da se svi oslonci nalaze na kružnom luku. Kružni luk je tangencijalan na os napinjača koji je smješten 24.442 m iznad površine mora s nagibom napinjača od 0.6° . Nakon napinjača, pet valjkastih oslonaca smješteno je na palubi broda i ravnomjerno su razmaknuti uz međusobnu udaljenost od 12.192 m. Visina valjkastih oslonaca je određena na način da su svi oslonci pozicionirani na polumjeru od 219.456 m.

Osim oslonaca na brodu polagaču i položaji valjkastih oslonaca na *stingeru* su određeni koristeći kružni luk. Kružni luk nad *stingerom* je tangencijalan na kružni luk nad brodom i njegov polumjer iznosi 195.072 m. Valjkasti oslonci na *stingeru* su jednoliko razmaknuti za 9.144 m.

Cijev korištena u ovom slučaju je 16-inčna čelična cijev s vanjskim promjerom od 0.406 m i debljinom stjenke od 12.7 mm. Modul elastičnosti materijala cijevi iznosi 196.5 GPa. Kontinuirano opterećenje za neuronjeni dio cjevovoda iznosi 1359 N/m uz dodatno opterećenje od 2092.26 N/m na neuronjeni dio cjevovoda. Napinjačem je postignuta sila napetosti cijevi od 444.8 kN. Morsko dno je ravno i nalazi se na dubini od 91.44 m.

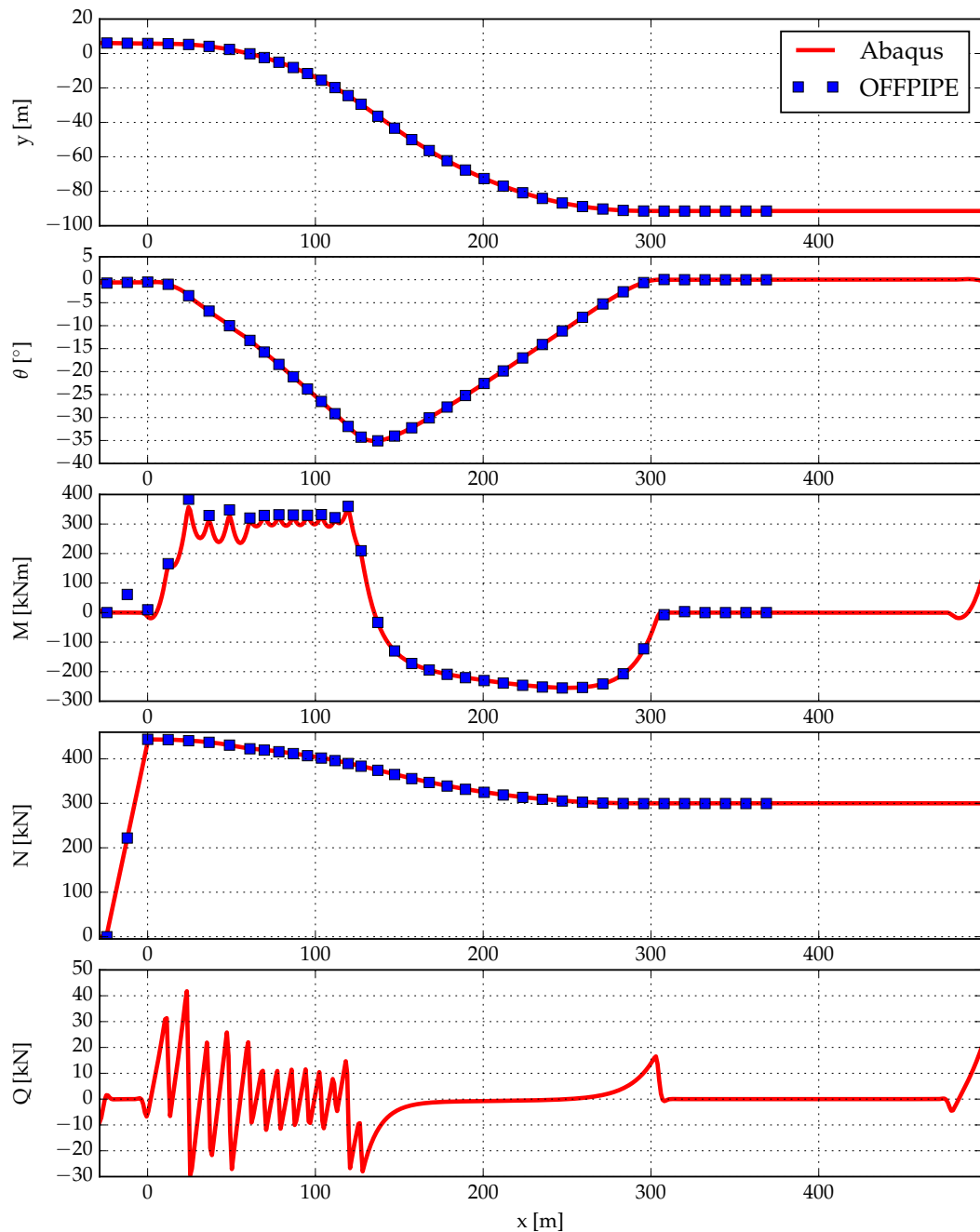
Rezultati za opisani slučaj polaganja cjevovoda su prezentirani u [51], a dobiveni su s OFFPIPE-om. OFFPIPE je jedan od vodećih softverskih rješenja za numeričku simulaciju polaganja podmorskih cjevovoda i često je korišten u *offshore* industriji, stoga je prikladan kandidat za validaciju i usporedbu predloženog modela polaganja cjevovoda.

U OFFPIPE-u, napinjač je modeliran kao opružni element [50] što je suštinski drukčiji pristup od obje predložene varijante modela.

Gore opisani slučaj polaganja modeliran je u Abaqusu koristeći B varijantu modela, kao što je opisano u poglavlju 2, a dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima prezentiranim u [51]. Validacija je provedena samo za B varijantu modela jer je u prethodnom poglavlju (3.1) pokazano da obje varijante modela polaganja podmorskih cjevovoda daju iste rezultate, a razlikuju se samo po načinu postizanja sile napetosti. Sila napetosti je postignuta pomoću tarnog kontakta cijevi i struktura napinjača u duljini od 25 m.

Kao što je vidljivo na slici 3.4, rezultati dobiveni rješavanjem modela s tarnim kontaktom u interakciji cijevi i napinjača gotovo savršeno se podu-

dara s rezultatima OFFPIPE-a. Očito je da je isti model grede korišten u oba slučaja. Razlika u uspoređenim modelima je metoda korištena za postizanje željene aksijalne sile na početku cjevovoda. Na temelju grafa efektivne aksijalne sile na slici 3.4, može se zaključiti da model napinjača temeljen na tarnom kontaktu osigurava postizanje ciljane napetosti cijevi koristeći potpuno drukčiji pristup modeliranju samog napinjača.



Slika 3.4: Usporedba rezultata dobivenih modelom napinjača temeljenim na tarnom kontaktu i rezultata dobivenih OFFPIPE-om

3.3 Primjena modela polaganja podmorskih cjevovoda

Zbog međusobne ekvivalentnosti obje varijante modela, što je potvrđeno rezultatima i usporedbom u poglavlju 3.1, za primjenu i detaljniju analizu rezultata korištena je samo B varijanta modela polaganja. Za razliku od A varijante modela, B varijanta je složenija, preciznije modelira interakciju cijevi u napinjaču te omogućuje praćenje zanimljivih efekata tijekom svih faza simulacije.

Kao testni primjer odabrana je konfiguracija polaganja korištena i opisana u poglavlju 3.1. Zbog primjene naprednijih značajki modela, osnovna konfiguracija polaganja je proširena ili izmijenjena što je opisano u pripadajućim poglavljima u kojima se analiziraju rezultati modela s naprednijim značajkama.

Rezultati u ovom poglavlju prezentirani su preko inženjerskih veličina zanimljivih sa stajališta *offshore* inženjerstva [26, 70, 72, 7, 30]. *Offshore* standardi propisuju kriterije konstruiranja i instalacije podmorskih cjevovoda na temelju momenata savijanja, aksijalnih sila te deformacija.

Oznake korištene u vizualizaciji rješenja strukturalne analize su:

- M za moment savijanja,
- Q za poprečne sile,
- N za aksijalne sile.

Maksimalna deformacija u poprečnom presjeku promatrana je samo u slučaju korištenja nelinearnog materijala, pošto su naprezanje i deformacija proporcionalni s momentom savijanja za linearno elastičan materijal i za cijevi konstantnog poprečnog presjeka.

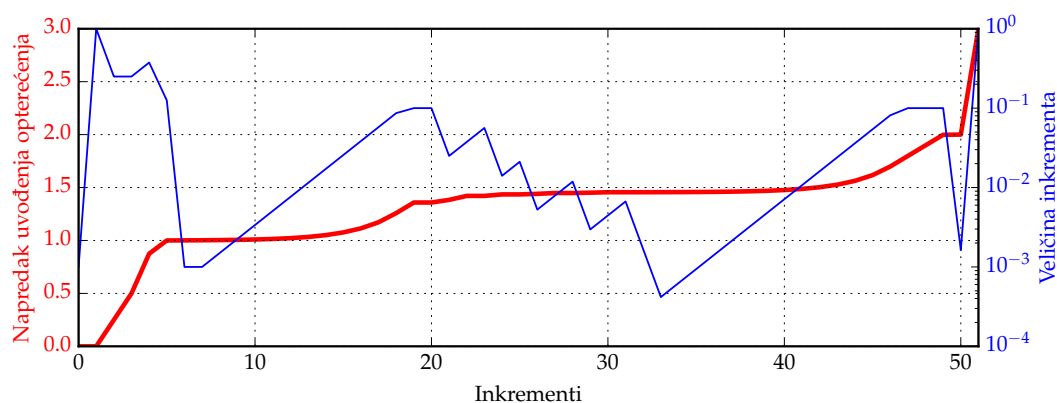
Iako su za strukturalnu analizu relevantni samo rezultati završne faze simulacije, gdje su sva opterećenja uvedena, rezultati u nekim prijašnjim fazama su prikazani kako bi se lakše uočili zanimljivi efekti koji se dešavaju tijekom postupka simulacije.

3.3.1 Osnovni primjer polaganja

Osnovni primjer modela temelji se na slučaju polaganja opisanog u poglavlju 3.1, a pritom je korištena B varijanta modela polaganja kako je predstavljena u poglavlju 2.

Rješavanje B varijante modela temelji se na jednoj Abaqus simulaciji koja se provodi kroz više faza simulacije. Rješavanje pojedine općenite statičke

faze simulacije u Abaqusu se izvodi inkrementalnim uvođenjem opterećenja. Rješenje osnovnog primjera polaganja cjevovoda dobiveno je konvergencijom postignutom u 51 inkrementu simulacije (Slika 3.5) tijekom kojih su uvedena sva vanjska opterećenja.



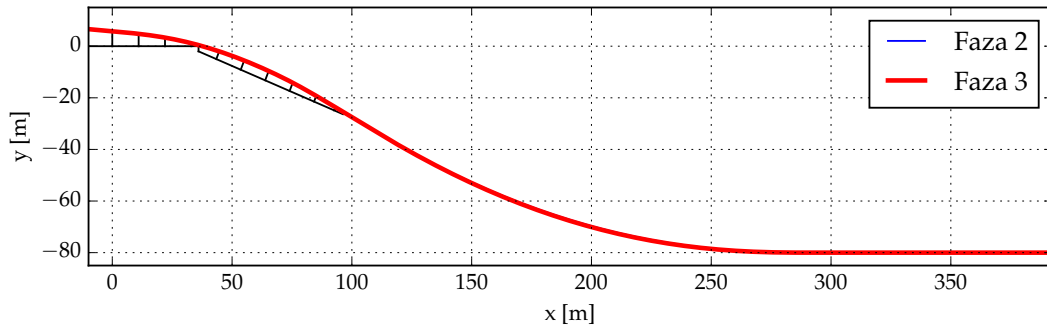
Slika 3.5: Inkrementacija u fazama Abaqus simulacije

Većina izvršenih koraka potrebna je za rješavanje druge faze simulacije u kojoj se cijev opterećuje vlastitom težinom uzrokujući velike pomake i značajnu geometrijsku nelinearnost. Tijekom druge faze simulacije uspostavljaju se i dodirne interakcije cijevi s valjkastim osloncima broda i *stingera* te dodirne interakcije cijevi i morskog dna. Veličina inkrementa se automatski varira, a tijekom druge faze veličina inkrementa je najmanja i učestalo se adaptira zbog uspostavljanja kontaktnih interakcija.

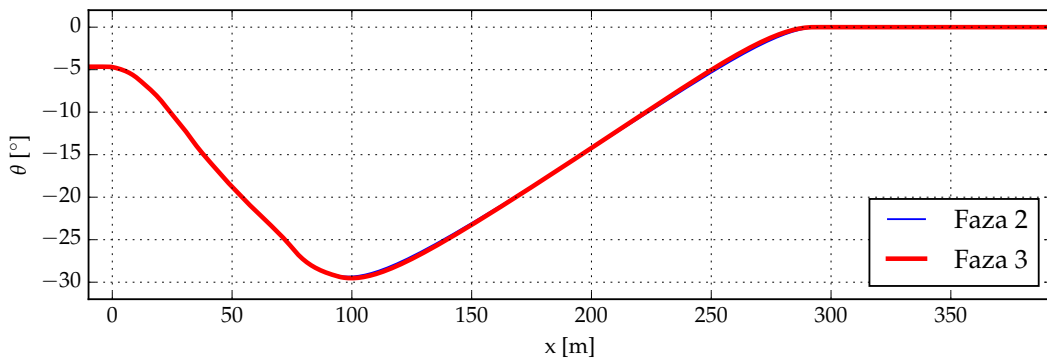
Cjevovod je deformiran uslijed opterećenja vlastitom težinom i formira se tipična "S" krivulja (Slika 3.6). Cijev klizi kroz kontakt sa strukturama napinjača dok se ne uspostavi ravnoteža aksijalne sile u cijevi i sile trenja. Pomak prvog čvora cijevi duž osi napinjača iznosi 14.92 m na kraju druge faze simulacije i 15.01 m nakon treće faze simulacije. U ovom slučaju nema potrebe za dodatnim fazama simulacije jer nema značajne promjene u položaju deformirane cijevi u drugoj i trećoj fazi simulacije, pa bi korekcija područja (neuronjeni dio cjevovoda) postavljanja dodatnog opterećenja izazvala zanemarivu promjenu rezultata.

Vezano uz položaj deformiranog cjevovoda, dodatno se može promatrati i nagib cijevi (Slika 3.7) iz čega se može odrediti točka infleksije koja se nalazi na ekstremu (minimumu) krivulje nagiba.

Moment savijanja je najčešće korišten kriterij u strukturalnoj analizi cjevovoda tijekom polaganja [33]. Iz dijagrama momenata savijanja (Slika 3.8) i dijagrama poprečnih sila (Slika 3.9) vidljivo je da su te veličine za cjevovod pod izravnim utjecajem kontaktnih sila u interakcijama s valjkastim osloncima. Sile reakcija u dodiru s valjkastim osloncima manifestiraju se kao maksimumi u oba dijagrama.

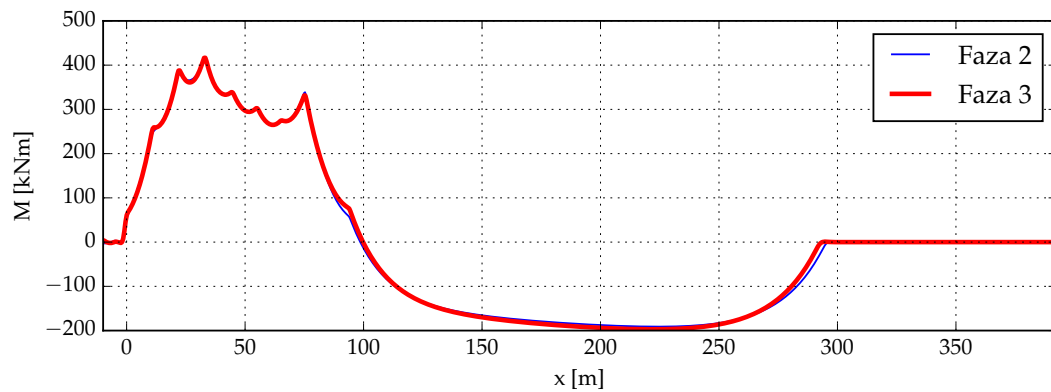


Slika 3.6: Položaj deformiranog cjevovoda



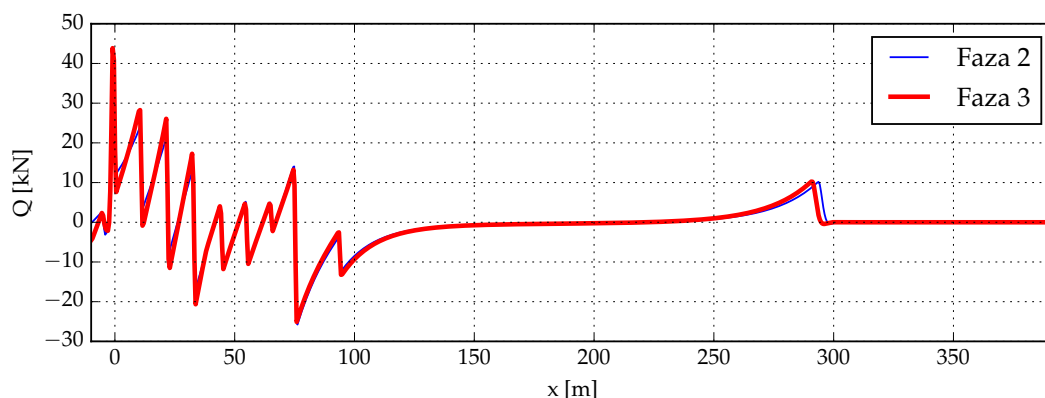
Slika 3.7: Nagib cijevi

Predznak momenta savijanja se mijenja duž cijevi: pozitivan predznak u *overbend* području i negativan u *sagbend* području. Predznak momenta savijanja mijenja se u točki infleksije uočenoj na slici 3.7. Za razliku od položaja deformirane cijevi i pomaka, u trećoj fazi momenti savijanja i poprečne sile se uočljivije mijenjaju zbog uvođenja dodatnog opterećenja na cijev.



Slika 3.8: Dijagram momenta savijanja

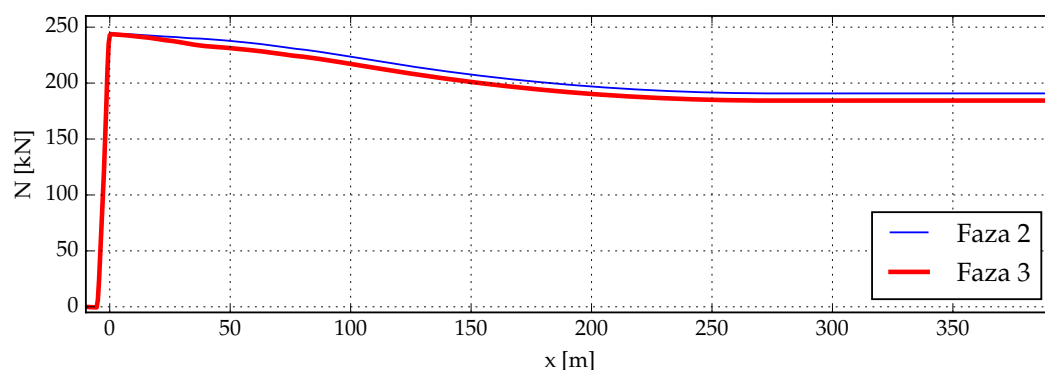
Aksijalna sila je osnovni rezultat potreban za izračun kriterija za instalaciju cjevovoda temeljenog na efektivnoj aksijalnoj sili (eng. *Effective Axial*



Slika 3.9: Dijagram poprečne sile

Force) [30, 74]. Efektivna aksijalna sila, osim aksijalne sile u obzir uzima vanjsko te unutarnje tlačno opterećenje cijevi.

Dijagram uzdužne sile (Slika 3.10) pokazuje da je aksijalna sila na izlazu iz napinjača jednaka 243.75 kN što je praktički jednako ciljanoj sili napetosti, što dokazuje da kontaktni model napinjača radi kao što je pretpostavljeno. Mala zanemariva razlika između aksijalne sile u cijevi na izlazu iz napinjača i ciljane sile napetosti uzrokovana je težinom dijela cjevovoda koji se nalazi ispred napinjača i nije ušao u tarni kontakt.

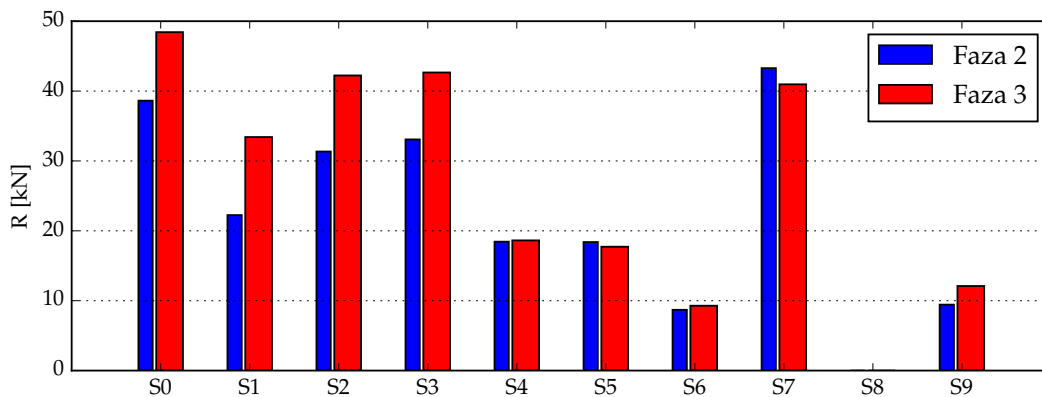


Slika 3.10: Dijagram aksijalne sile

Pošto tangentne kontaktne sile u valjkastim osloncima nisu uzete u obzir, aksijalna sila u cijevi je samo pod utjecajem napinjača i težine cijevi. Zbog uniformno distribuirane težine cijevi, krivulja aksijalne sile je glatka nakon izlaska iz napinjača. Aksijalna sila u cijevi koja je položena na morsko dno je važna za druge inženjerske analize kao što je analiza slobodnih raspona (eng. *free span analysis*).

Na slici 3.11 prikazane su reakcije valjkastih oslonaca za Fazu 2 i Fazu 3 simulacije polaganja. Tri valjkasta oslonca na brodu cijevopolagaču nalaze

se iznad razine mora, pa je i njihova sila reakcije povećana nakon uvođenja dodatnog opterećenja.



Slika 3.11: Sile reakcija valjkastih oslonaca

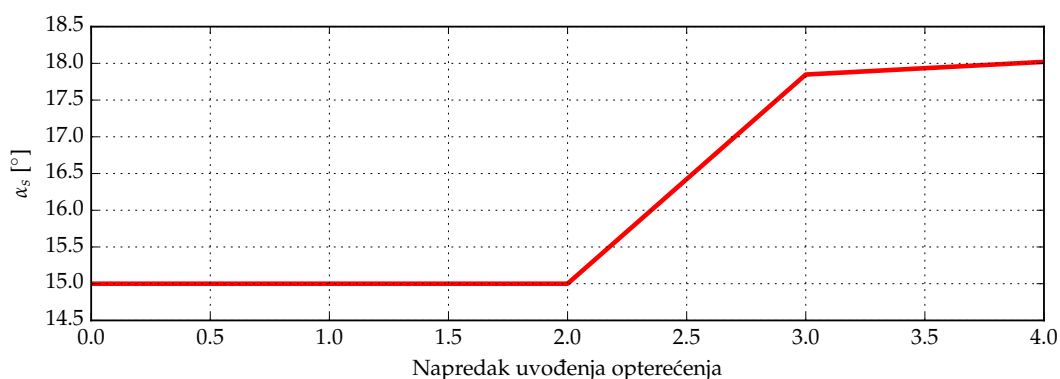
3.3.2 Polaganje s plutajućim stingerom

Za primjer analize polaganja s plutajućim *stingerom* odabrana je ista konfiguracija polaganja kao i kod primjera osnovnog modela (poglavlje 3.3.1) uz razliku da je rotacija *stingera* omogućena i na *stinger* djeluje sila uzgona. Primjer polaganja s plutajućim *stingerom* je modeliran prema opisu modela u poglavlju 2.7.1.

Vertikalna sila $F_y^s = 79$ kN postavljena je na krajnji čvor *stingera* na udaljenosti $l_s = 65$ m od zgloba *stingera*. Takvo opterećenje odgovara momentu od 5135 kNm oko zgloba koji se postiže za stvarni efektivni uzgon od 115 kN na kraku od 44.65 m. Inicijalni kut *stingera*, korišten u prve dvije faze simulacije u kojima je *stinger* nepomičan, iznosi 15° .

Najvažnija karakteristika analize polaganja s plutajućim *stingerom* je postizanje položaja *stingera* (Slika 3.12) koji zadovoljava statičku ravnotežu sila. Nakon dozvoljavanja rotacije *stingera* i uvođenja vertikalne sile F_y^s , u trećoj fazi simulacije, kruta struktura *stingera* postiže ravnotežno stanje za danu silu uzgona i postignute kontaktne sile u čvorovima valjkastih oslonaca. Dodatno opterećenje na neuronjeni dio cijevi, uveden u četvrtoj fazi simulacije, znatno utječe na ravnotežu sila na *stinger* i na njegov krajnji položaj. Postignuti kut *stingera* nakon treće faze iznosi 17.85° , a nakon četvrte faze 18.02° .

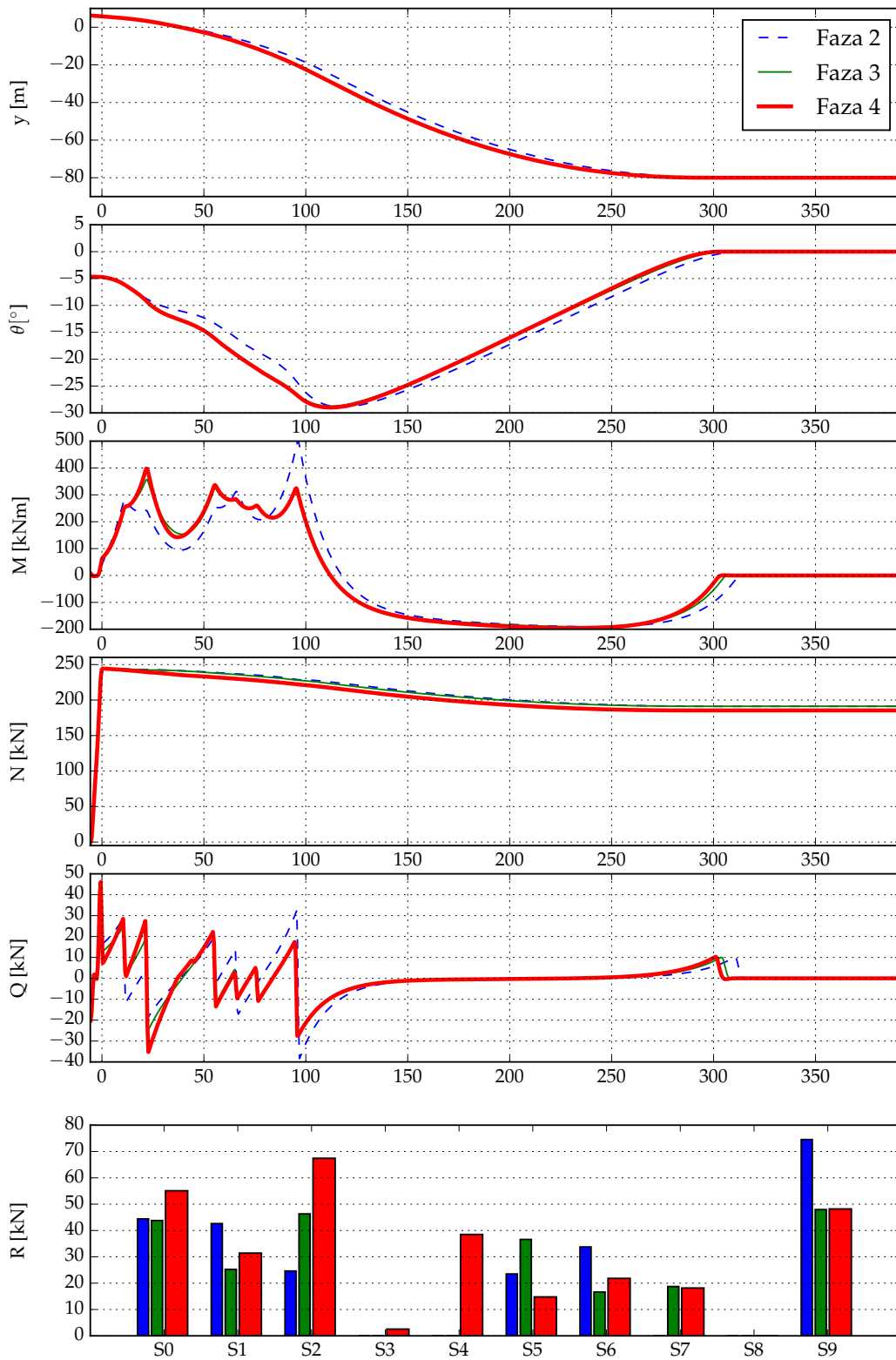
Pomak prvog čvora cjevovoda je promatran kako bi se odredila duljina klizanja cijevi kroz napinjač zbog promjene kuta *stingera*. Cijev je proklizala kroz napinjač i postigla pomak od inicijalnog položaja u iznosu od 14.06 m, 14.27 m i 14.42 m redom nakon druge, treće i četvrte faze simulacije.

Slika 3.12: Kut *stingera* tijekom inkrementacije

Rezultati nakon svake faze simulacije polaganja s plutajućim *stingerom* su uspoređeni na Slici 3.13. Razlike u rezultatima su uglavnom uzrokovane rotacijom *stingera* i opterećenjem na neuronjeni dio cjevovoda koji su uvedeni u trećoj i četvrtoj fazi simulacije. Promjenom kuta *stingera* i uvođenjem novog opterećenja, dešavaju se promjene u uspostavljenim kontaktnim interakcijama između cijevi i valjkastih oslonaca što prouzrokuje značajne razlike u rezultatima, posebice u dijagramu momenata savijanja i dijagramu poprečnih sila.

Usporedbu postignute sile napetosti, uočljive preko aksijalne sile u cijevi na izlazu iz napinjača, sa ciljanom silom napetosti treba raditi tek nakon završne faze simulacije polaganja s plutajućim *stingerom*.

Aksijalna sila u cijevi na izlazu iz napinjača jednaka je ciljanoj u sve tri promatrane faze simulacije. Eventualno podizanje *stingera* umanjilo bi aksijalnu silu u cijevi zbog nemogućnosti da cijev proklizi nazad kroz napinjač. U tom slučaju, promatrani zasebno, rezultati nakon treće faze simulacije ne bi bili valjani, ali bili bi legitimni unutar cijele simulacije ako bi se efekt smanjenja napetosti cijevi uslijed podizanja *stingera* potpuno poništio u četvrtoj fazi simulacije pod utjecajem dodatnog opterećenja na neuronjeni dio cjevovoda.



Slika 3.13: Rezultati modela polaganja s plutajućim *stingerom*

3.3.3 Polaganje na neravno morsko dno

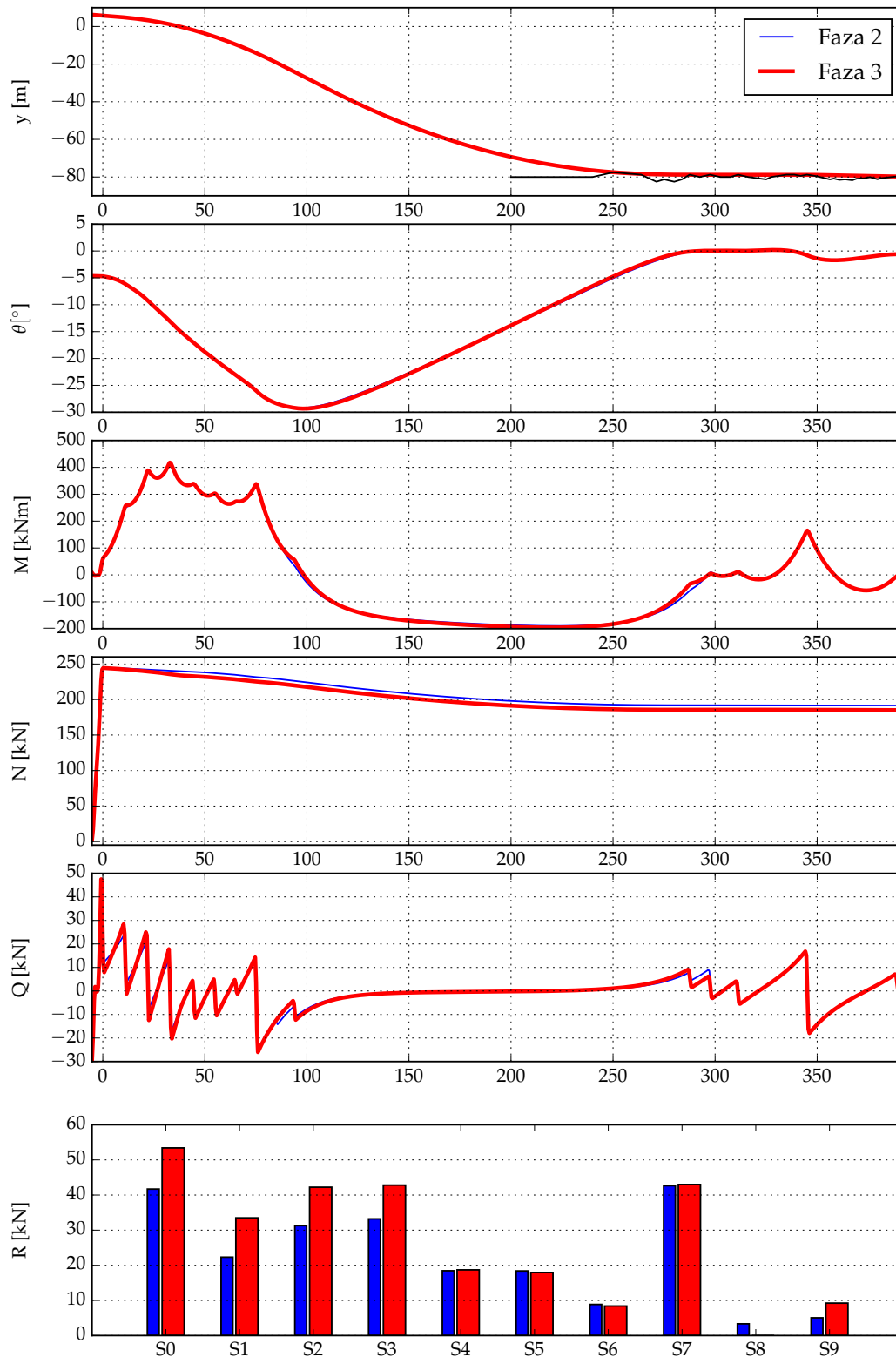
Primjer polaganja na neravno morsko dno temelji se na osnovnom primjeru polaganja definiranom u poglavlju 3.1 uz izmijenjenu krutu strukturu morskog dna prema podacima danima u Tablici 3.4.

x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
200.00	-80.00	283.75	-81.25	358.18	-80.81
205.00	-80.00	287.50	-78.75	360.84	-81.51
210.00	-80.00	292.50	-80.00	363.75	-81.25
215.00	-80.00	297.50	-78.75	367.25	-81.71
220.00	-80.00	302.50	-80.00	369.33	-80.88
225.00	-80.00	307.50	-80.00	373.21	-80.63
230.00	-80.00	311.25	-78.75	375.92	-80.05
235.00	-80.00	316.25	-80.00	379.59	-81.18
240.00	-80.00	320.62	-80.62	381.27	-80.61
245.00	-78.75	325.00	-81.25	383.53	-80.37
250.00	-77.50	327.50	-80.00	386.65	-79.97
254.58	-77.92	331.25	-79.38	389.10	-79.73
259.17	-78.33	335.00	-78.75	391.69	-80.02
263.75	-78.75	338.75	-78.75	393.59	-79.79
267.50	-80.62	341.98	-79.38	395.00	-80.00
271.25	-82.50	345.00	-78.75	397.63	-80.25
275.00	-81.25	349.08	-79.43	398.95	-80.01
280.00	-82.50	356.25	-81.25	400.00	-80.00

Tablica 3.4: Koordinate profila neravnog morskog dna

Strukturalna analiza cijevi tijekom polaganja na neravno morsko dno omogućuje korisne informacije o kontaktnoj interakciji cjevovoda i morskog dna (Slika 3.14). Neravnine na morskom dnu uglavnom utječu na *sagbend* područje cijevi te, naravno, na dio cijevi koji je položen na morsko dno. Pomak početnog čvora nije značajno promijenjen nakon uvođenja dodatnog opterećenja na neuronjeni dio cjevovoda (14.59 m nakon druge faze simulacije i 14.71 m nakon treće faze simulacije). Zbog zanemarivog pomaka nema razloga za dodatnim fazama simulacije za uvođenje dodatnog kontinuiranog opterećenja na neuronjeni dio cjevovoda. Neuniformni kontakt cjevovoda i neravnog morskog dna prouzročuje šiljke u dijagramu poprečnih sila i posljedično u dijagramu momenata savijanja. Deformirana cijev stvara slobodne raspone između uzvisina na morskom dnu. Pošto

je kontakt cijevi i morskog dna modeliran kao kontakt bez tangencijalnog ponašanja, nema utjecaja profila morskog dna na dijagram uzdužnih sila.



Slika 3.14: Rezultati modela polaganja na neravno morsko dno

3.3.4 Polaganje s uzgonskim tankovima

Uzgonski tankovi su modelirani kao koncentrirane sile koje djeluju izravno na cijev i na taj način smanjuju savijanje cijevi uslijed vlastite težine. Pošto je cijev korištena u osnovnom primjeru polaganja (poglavlje 3.3.1) prelagana za primjenu uzgonskih tankova, cijev veće relativne težine (težina umanjena za uzgon) je korištena za primjer modela polaganja s uzgonskim tankovima.

Svojstva cijevi dana su u Tablici 3.5, a za ona svojstva koja nisu prikazna korištene su vrijednosti iz osnovnog primjera polaganja.

Svojstvo	Vrijednost
Vanjski promjer cijevi	254 mm
Debljina stjenke cijevi	24 mm
Jedinična težina uronjene cijevi	825.66 N/m
Jedinična težina neuronjene cijevi	1335 N/m

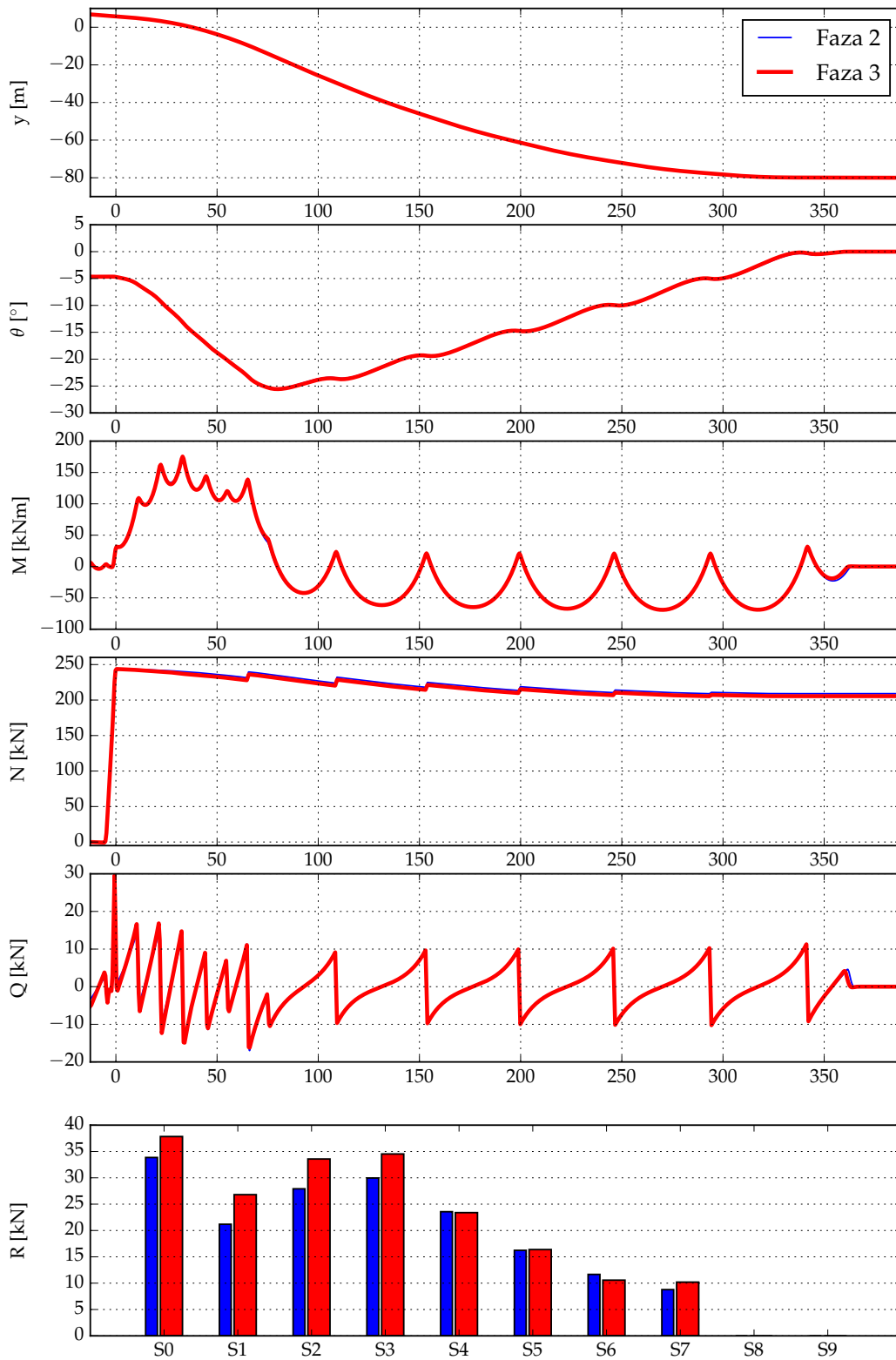
Tablica 3.5: Svojstva cijevi za primjer polaganja s uzgonskim tankovima

Na cjevovod su postavljeni uzgonski tankovi međusobno razmaknuti za 48 metara (duljina dva *jointa* cijevi) i svaki tank daje uzgon od 21.575 kN (ekvivalentno 2.2 tone). Sedam uzgonskih tankova je aplicirano na cjevovod, od čega se njih šest nalazi nakon zadnjeg valjkastog oslonca na *stingeru* tj. u slobodnom rasponu cijevi od *stingera* do morskog dna.

Rješavanje modela s uzgonskim tankovima provedeno je u tri faze Abaqus simulacije. Pomak prvog čvora cijevi iznosi 12.24 m nakon druge faze simulacije i 12.32 m nakon treće faze simulacije.

Primjena uzgonskih tankova na cijev znatno utječe na rezultate simulacije cjevovoda tijekom polaganja (Slika 3.15). Pošto su uzgonski tankovi modelirani kao koncentrirane sile, aplicirane u čvoru numeričke mreže cijevi, njihova primjena uzrokuje lokalne utjecaje manifestirane kao skokove u svim promatranim rezultatima.

Zbog vertikalnog djelovanja sila uzgonskih tankova, njihov utjecaj na aksijanu silu u cijevi može biti uočen, posebice u području većeg nagiba cijevi.



Slika 3.15: Rezultati simulacije polaganja cjevovoda uz korištenje uzgonskih tankova

FORMULACIJA OPTIMIZACIJSKOG PROBLEMA

Polaganje podmorskih cjevovoda je vrlo složena i skupa operacija te zahtijeva detaljno planiranje kako bi se postiglo njeno sigurno i ekonomično izvođenje. Inženjerski je zadatak određivanje parametara tj. konfiguracije polaganja za koje se može ostvariti sigurno i što je moguće ekonomičnije polaganje cjevovoda.

Određivanje konfiguracije polaganja može se smatrati optimizacijskim problemom, čijim se rješavanjem postiže optimalna konfiguracija polaganja. Matematički gledano, optimizacija je minimizacija ili maksimizacija funkcije uz zadovoljavanje propisanih kriterija [64, 16], što se u praktičnim primjenama najčešće postiže numeričkim optimizacijskim metodama [59].

Kako bi se pristupilo rješavanju optimizacijskog problema određivanja parametara polaganja cjevovoda, potrebno je formulirati optimizacijski problem da što točnije obuhvati inženjerske zahtjeve koji su prisutni pri planiranju polaganja. Definiranje optimizacijskog problema [48] se svodi na utvrđivanje:

- optimizacijskih varijabli,
- ciljeva i
- ograničenja optimizacije.

Navedeni čimbenici optimizacijskog problema, svojstveni za optimizaciju polaganja podmorskih cjevovoda, detaljnije su opisani i pojašnjeni u daljnjim naslovima ovoga poglavlja.

Uvodi se pojam “izvedivo rješenje” koje predstavlja konfiguraciju polaganja koja zadovoljava sva ograničenja i kojom je moguće provesti polaganje. Izvedivo rješenje ne mora biti i optimalno rješenje tj. rješenje optimizacijskog problema.

Prema karakteristikama, problem određivanja parametara polaganja podmorskih cjevovoda može se klasificirati kao:

- mješoviti problem (eng. *mixed problem*) jer optimizacijski vektor sadrži i kontinuirane i diskretne varijable,
- višeciljni problem (eng. *multiobjective*) s različitim prioritetima ciljeva,
- multimodalni problem tj. problem koji ima više lokalnih optimuma.

Detaljnija teorijska razmatranja glede formulacije optimizacijskog problema i funkcije cilja, kao i praktični aspekti vezani uz problem optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda biti će objašnjeni kroz sljedeće naslove ovog poglavlja.

4.1 Optimizacijske varijable

Prilikom polaganja podmorskih cjevovoda potrebno je odrediti konfiguraciju parametara broda polagača, parametara *stingera* i ostalih parametara polaganja. Upravo su ti parametri predmet optimizacijskog problema i zadatak je pronaći njihove vrijednosti kojima se postižu optimalni uvjeti polaganja.

Optimizacijske varijable (eng. *optimization variables, design variables*) generalno definiraju svako potencijalno moguće rješenje optimizacijskog problema unutar definiranog prostora pretraživanja [64]. Optimizacijske varijable definiraju n -dimenzionalni optimizacijski vektor (eng. *design vector*) kojim je moguće definirati bilo koju točku u prostoru pretraživanja:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

gdje je n broj optimizacijskih varijabli tj. broj dimenzija optimizacijskog problema i prostora pretraživanja.

S obzirom na tip, optimizacijske varijable se može podijeliti na:

- kontinuirane i
- diskretne.

Kontinuirane varijable su one optimizacijske varijable koje mogu poprimiti bilo koju realnu vrijednost iz ograničenog ili neograničenog prostora pretraživanja. Sve kontinuirane optimizacijske varijable u problemu polaganja podmorskih cjevovoda su ograničene granicama

$$x_i \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \quad (4.2)$$

gdje je x_i^{\min} donja, a x_i^{\max} gornja granica varijable x_i . Omeđivanje optimizacijskih varijabli (4.2) je najjednostavnije ograničenje optimizacijskog problema.

Diskretne varijable mogu poprimiti samo neku vrijednost iz skupa dostupnih realnih (ili prirodnih ili cijelih) brojeva.

$$x_i \in \mathbf{D}_i \quad (4.3)$$

gdje je \mathbf{D}_i skup realnih vrijednosti koje diskretna varijabla x_i može poprimiti. U principu, svaka se kontinuirana varijabla može diskretizirati, uz rjeđu ili gušću diskretizaciju, nakon čega se je može tretirati kao diskretnom.

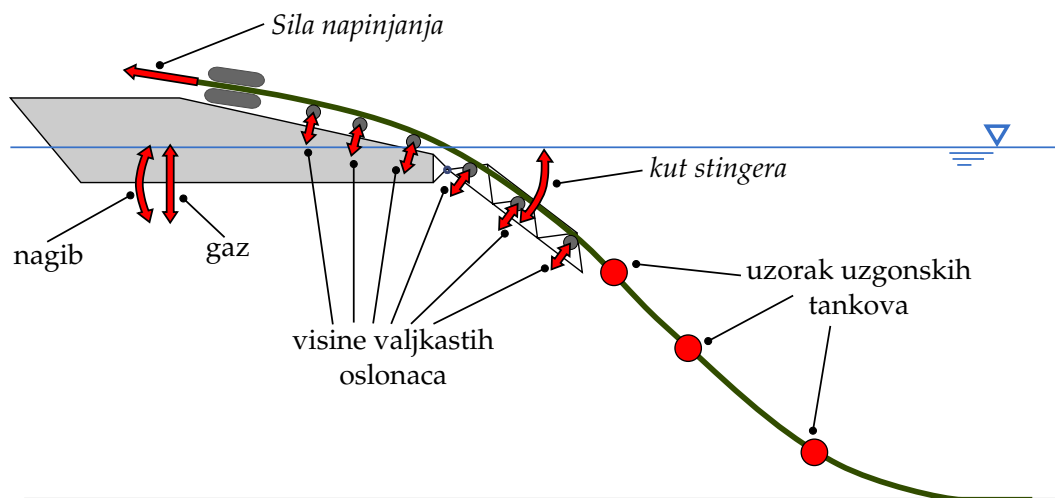
Optimizacijski problem koji sadrži bar jednu diskretnu varijablu klasificira se kao kombinatorni problem koji zahtijeva upotrebu adekvatne

optimizacijske metode kao što su genetički ili drugi evolucijski algoritmi [1, 71, 12], simulirano kaljenje [42, 58], *cross entropy* metoda [67, 25] i mnoge druge metode [53, 28, 43].

Broj optimizacijskih varijabli i njihov raspon definira prostor pretraživanja i time bitno utječe na težinu rješavanja optimizacijskog problema, ali bilo bi pogrešno ocijeniti težinu optimizacijskog problema samo na temelju broja varijabli bez da se u obzir uzme oblik funkcije cilja.

Optimizacijske varijable kod problema optimizacije konfiguracije polaganja podmorskih cjevovoda su (Slika 4.1):

- napetost cjevovoda postignuta napinjačem,
- gaz i nagib broda,
- visine valjkastih oslonaca na brodu,
- kut *stingera*,
- visine valjkastih oslonaca na *stingeru* i
- uzorak postavljanja uzgonskih tankova.



Slika 4.1: Fleksibilni parametri polaganja podmorskih cjevovoda.

Zbog tehničkih ograničenja, u praksi su svi parametri polaganja podmorskih cjevovoda diskretne varijable (Tablica 4.1). Gaz i nagib broda, visine valjkastih oslonaca te kut *stingera* ograničene su s preciznošću kojom se mogu postaviti. Međutim, tehnički ostvariva preciznost postavljanja tih parametara je dovoljno malena da promjena parametara unutar dane preciznosti nema bitan utjecaj na kriterije i ciljeve optimizacijskog problema, pa se te varijable u optimizacijskom postupku mogu smatrati kontinuiranim.

Varijabla	Očekivani raspon	Preciznost	Tip
Napetost	50 kN - 1000 kN	50 kN	Diskretna
Gaz broda	0 m - 5 m	0.1 m	Kontinuirana
Nagib broda	0° - 1°	0.1°	Kontinuirana
Kut <i>stingera</i>	0° - 50°	0.001°	Kontinuirana
Visina valjkastih oslonaca	0 m - 5 m	0.001 m	Kontinuirana
Uzorak uzgonskih tankova	0 - 12	1	Diskretna

Tablica 4.1: Raspon i preciznost optimizacijskih varijabli

Sila napetosti cjevovoda te uzorak postavljanja uzgonskih spremnika su diskretne varijable i bitno utječu na ciljeve i kriterije optimizacijskog problema. Navedene diskretne varijable su, sa stajališta optimizacijskog postupka, ipak smatrane kontinuiranima ali su određene interpolacijom između njihovih diskretnih vrijednosti kao što je opisano u poglavlju 5.

Sila napetosti, kao diskretna varijabla, definirana je tehničkim karakteristikama mehanizma napinjača. U realnim slučajevima polaganja cjevovoda vrijednost sile napinjanja se često zadaje s preciznošću od 5 metričkih tona, u ovom radu je iz praktičnih razloga korištena preciznost od 50 kN. Ova razlika u diskretizaciji sile napetosti nema utjecaj na optimizacijski postupak i može se smatrati zadanim parametrom koji prema potrebi može poprimiti veću ili manju vrijednost.

Uzgonski tankovi se postavljaju na cjevovod i to na spojeve *jointova* cijevi prema propisanom uzorku (Tablica 4.2). Kapaciteti uzgonskih tankova se smatraju zadanim (npr. koriste se uzgonski tankovi koji su trenutno na raspolaganju), a uobičajenim veličinama tankova postižu se uzgon od 22, 33, 44 i 55 kN te drugi uzgoni ovisno o dizajnu tankova.

Optimizacijska varijabla kojom se definira gustoća postavljanja uzgonskih tankova diskretna je varijabla koja može poprimiti vrijednosti 0, 1, ..., 11 koje predstavljaju jedan od uzorka iz Tablice 4.2.

B	Uzorak	Prosječni razmak tankova [m]	Jedinični uzgon* [kN/m]
0		-	0.00
1		73.2	0.58
2		67.1	0.64
3		61.0	0.70
4		54.9	0.78
5		48.8	0.88
6		42.7	1.01
7		36.6	1.18
8		30.5	1.42
9		24.4	1.77
10		18.3	2.36
11		12.2	3.54

*Jedinični uzgon za tankove od 43.2 kN (4.4 tone).

Tablica 4.2: Uzorci rasporeda uzgonskih tankova

Za problem optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda može se definirati vektor optimizacijskih varijabli:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} B \\ T \\ u_y^b \\ \alpha_b \\ \alpha_s \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{n_s} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

gdje je

- B uzorak uzgonskih tankova,
- T sila napetosti cijevi na izlazu iz napinjača,
- u_y^b promjena gaza broda,
- α_b nagib broda,

- α_s kut *stingera* i
- h_1, \dots, h_{n_s} visine valjkastih oslonaca na brodu i *stingeru*.

Ovisno o uvjetima polaganja (promjer i težina cijevi, dubina mora itd.) prilikom simulacije polaganja i određivanja parametara polaganja ne uzimaju se uvijek u obzir svi navedeni parametri. Uzorak uzgonskih tankova, odnosno općenito njihova upotreba, te promjena gaza i nagiba broda su parametri koji se ne variraju ako se manipulacijom ostalih parametara može postići izvedivo rješenje. Razlog za izostavljanje uzgonskih tankova je ekonomske naravi, zbog velikih troškova postavljanja i micanja tankova, te relativno mali utjecaj na savijanje i naprezanje cijevi kod varijacije gaza i nagiba broda.

Vektor optimizacijskih varijabli (4.4) predstavlja najopćenitiji slučaj u kojem su svi parametri polaganja uzeti u obzir. U realnim primjerima često će pojedine varijable biti izostavljene.

4.2 Ciljevi optimizacije

Određivanje konfiguracije parametara polaganja temeljeno je na nekoliko osnovnih ciljeva koji obuhvaćaju inženjerske zahtjeve koji su fizikalne, tehnološke ili ekonomske naravi. Ciljevi pri određivanju konfiguracije polaganja su različitih prioriteta tj. neki ciljevi su od većeg značaja od drugih.

Ciljevi prilikom određivanja optimalne konfiguracije parametara polaganja podmorskih cjevovoda, prema važnosti, su:

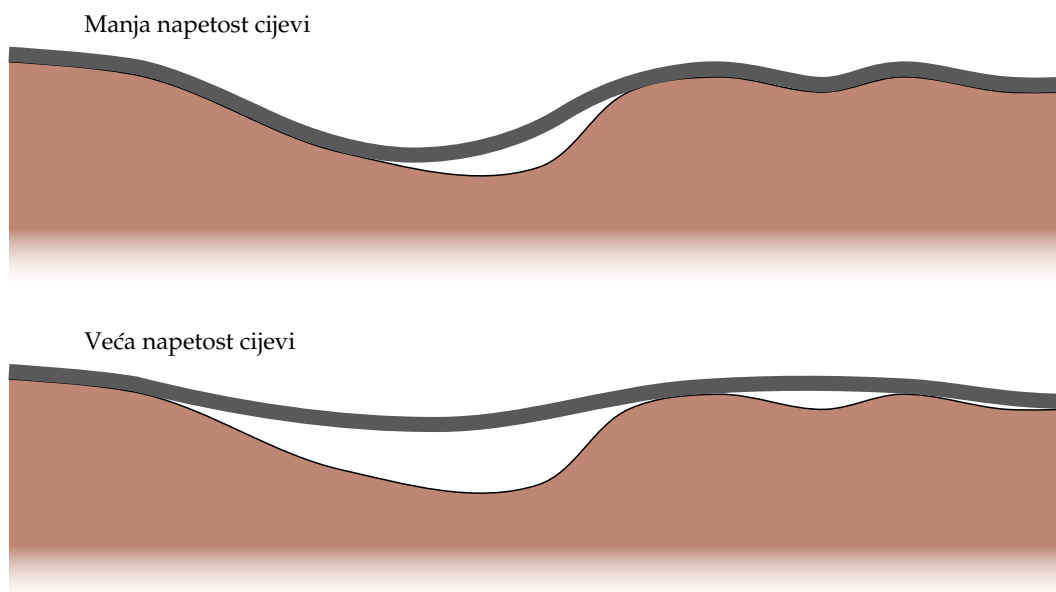
- minimalna upotreba uzgonskih tankova,
- minimalna sila napetosti u cijevi i
- minimalni momenti savijanja ili drugi propisani kriteriji u *overbend* i *sagbend* području.

Upotreba uzgonskih tankova zahtijeva dodatne operacije dobave i transporta tankova, postavljanje tankova na cjevovod te skidanje tankova sa cjevovoda na morskom dnu što značajno utječe na brzinu i cijenu cjelokupnog procesa polaganja podmorskih cjevovoda. U planiranju polaganja treba voditi računa o što manjoj gustoći postavljanja uzgonskih tankova ili, ako je moguće, potpuno izbjeći korištenje uzgonskih tankova.

Napetost cjevovoda koja se postiže napinjačem direktno utječe na savijanje cijevi tijekom polaganja. Veća napetost cjevovoda, tj. aksijalna sila, smanjuje savijanje cijevi što je posebno bitno u području *sagbenda* gdje se cijev ne može poduprti valjkastim osloncima nego eventualno skupim postavljanjem uzgonskih tankova. Povećanje sile napetosti se može postići indirektno, preko minimizacije kriterija propisanih u području *sagbenda* (opisano u poglavlju 4.3). Manja sila napinjača omogućuje manju potrošnju goriva broda polagača te mogućnost polaganja cjevovoda s manjim radijusima zakrivljenosti, gledano u horizontalnoj ravnini, što smanjuje potrebu za pripremu morskog dna [38].

Osim tijekom polaganja cjevovoda, sila napinjanja ima i utjecaj na cjevovod nakon polaganja. Zaostala napetost cijevi (eng. *residual tension*) tj. napetost cijevi nakon polaganja utječe na deformaciju i stabilnost položenog cjevovoda. Premala napetost može pogodovati izvijanju (eng. *buckling*) cjevovoda [76, 17].

Iako ponekad neizbježna, pretjerana aksijalna sila u položenom cjevovodu je nepoželjna. Minimizacijom sile napetosti cijevi tijekom polaganja smanjuju se slobodni rasponi (eng. *free span*) koji se pojavljuju na neravnom morskom dnu [15, 75, 3] (Slika 4.2).

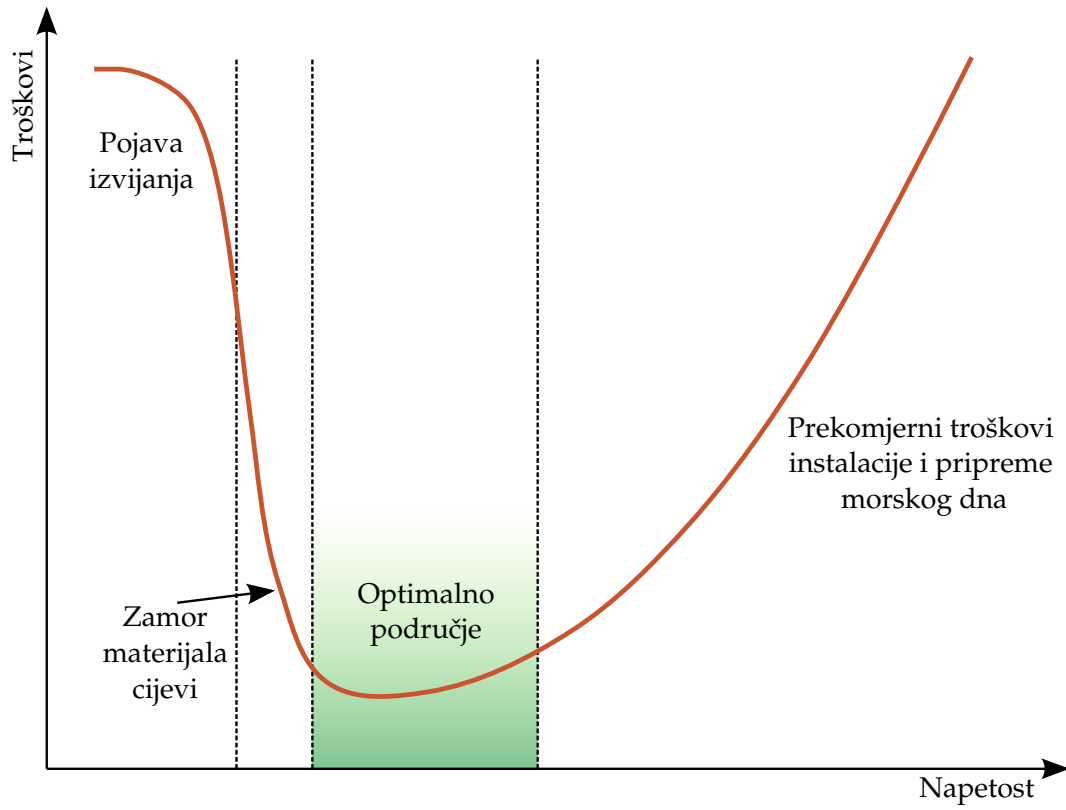


Slika 4.2: Pojava slobodnih raspona (eng. *freespan*) pri različitim napetostima cjevovoda

Izbor optimalne napetosti ovisi o svojstvima cijevi i uvjetima polaganja te o rezultatima detaljnijih analiza ponašanja cjevovoda tijekom i nakon polaganja (Slika 4.3). Zbog nemogućnosti preciznijeg određivanja optimalne sile napetosti na temelju strukturalne analize polaganja, zanemariti će se negativni utjecaji premale napetosti, što zadovoljava većinu realnih slučajeva polaganja podmorskih cjevovoda. S obzirom na navedeno, poželjno je da aksijalnu silu u položenom cjevovodu bude što manja [38] što se postiže minimizacijom sile napinjanja u napinjaču T.

Kriterij savijanja cijevi, koji se propisuje za područje *overbenda* i *sagbenda* preko maksimalnog dopuštenog momenta savijanja, je prvenstveno ograničenje ovog optimizacijskog problema. Ipak, poželjno je, ukoliko to ne narušava ostale ciljeve i ograničenja optimizacije, da je savijanje cijevi što manje. Minimizacija maksimalnog momenta savijanja u područje *overbenda* te u području *sagbenda* su ciljevi optimizacije, ali uz niski prioritet u odnosu na dva prethodno navedena cilja.

U optimizacijskom postupku svi su ciljevi uzeti u obzir, a njihovo objedinjavanje te način implementacije prioriteta definirano je funkcijom cilja (poglavlje 4.4).



Slika 4.3: Optimalna napetost cijevi [38]

4.3 Ograničenja

Opterećenja kojima je cjevovod izložen tijekom polaganja su jednokratna pojava koja zahtijeva prilagodbu parametara polaganja kako bi se osiguralo sigurno polaganje i normalan rad cjevovoda.

Prilikom polaganja treba voditi računa o sigurnosti cijevi te o sigurnosti opreme kojom se polaže. Uobičajeni kriteriji za cijev, temeljeni na čvrstoći cijevi tijekom polaganja, obično se propisuju posebno za dio cjevovoda u području *overbenda* te za dio u području *sagbenda*. Za zaštitu broda polagača i sve opreme koja je na njemu instalirana propisuju se ograničenja koja su definirana samim dizajnom broda tj. opreme. Kao najvažniji kriteriji, sa staništa sigurnosti opreme, izdvojeni su dopušteno opterećenja na valjkaste oslonce te minimalna zračnost između vrha *stingera* i morskog dna.

Kriteriji tijekom polaganja propisani su standardima *offshore* industrije, kao što su *DNV Offshore standard OS F-101 – Submarine Pipeline Systems* [27], *British Standard – BS8010 Part 3 – Pipelines subsea* [9] i *DNV Rules for Submarine Pipeline Systems – 1981* [77].

Prema navedenim standardima, propisuju se kriteriji na različitim dijelovima cijevi u polaganju i to na temelju maksimalnih naprezanja, maksimalne deformacije [62, 83], maksimalnog sigurnosnog faktora [79], maksimalnog momenta savijanja i sl.

Svi navedeni kriteriji su u međusobnim korelacijama definiranim osnovnim jednadžbama teorije elastičnosti. Zbog pojednostavljenja, u ovom radu su svi kriteriji vezani uz čvrstoću cijevi svedeni na dopušteni moment savijanja cijevi [33].

Kriterij dozvoljenog savijanja cijevi u području *overbenda* definiran je izrazom

$$M_{\max}^o \leq M_{\text{dop}}^o \quad (4.5)$$

a u području *sagbenda*:

$$M_{\max}^s \leq M_{\text{dop}}^s \quad (4.6)$$

gdje je M_{\max}^o maksimalni apsolutni moment savijanja cijevi u području *overbenda*, M_{dop}^o maksimalni dopušteni moment savijanja cijevi u području *overbenda*, M_{\max}^s maksimalni apsolutni moment savijanja cijevi u području *sagbenda* i M_{dop}^s maksimalni dopušteni moment savijanja cijevi u području *sagbenda*.

Iako je teoretski granica *overbenda* i *sagbenda* precizno definirana, u praksi se prilikom projektiranja polaganja cjevovoda *overbend* i *sagbend* kriteriji (4.5) i (4.6) često propisuju na posebno definiranim područjima cjevovoda

u polaganju. Tako se, npr., *sagbend* kriteriji često propisuje do zadnjeg valjkastog oslonca na *stingeru* ili do zadnjeg valjkastog oslonca na brodu cjevopolagaču. Često se propisuju i zasebni kriteriji kao što je moment na vrhu *stingera* (zadnji oslonac) [36].

Kako bi se omogućilo fleksibilnije i preciznije definiranje kriterija savijanja cjevovoda pri polaganju, definiran je kriterij dopuštenog momenta savijanja koji se propisuje u područjima cijevi iznad svakog valjkastog oslonca. Kriteriji je definiran za svaki i -ti oslonac izrazom:

$$M_i \leq M_{\text{dop}}^i \quad (4.7)$$

gdje je M_i moment savijanja cijevi iznad i -tog valjkastog oslonca, a M_{dop}^i je maksimalni dozvoljeni moment savijanja propisan za područje cijevi u području i -tog oslonca. Osim za oslonce, izraz (4.7) definira i kriterij savijanja na izlazu iz napinjača i označen je s $i = 0$. Definirano je ukupno $n_s + 1$ kriterija (4.7) za n_s valjkastih oslonaca te za točku izlaza iz napinjača.

Konstrukcija ležajeva valjkastih oslonaca i njihovih nosača određuje njihovu nosivost. Pritisak cijevi na valjkasti oslonac tj. kontaktna sila između deformabilne strukture cijevi i čvora oslonca čvrste strukture broda ili *stingera* ne smije prijeći dozvoljenu vrijednost. Kriterij dopuštenih reakcija oslonaca definiran je izrazom

$$R_i < R_i^{\text{dop}} \quad (4.8)$$

gdje je R_i reakcija i -tog valjkastog oslonca, a R_i^{dop} je najveća dopuštena reakcija oslonca i . Kao i za kriterije temeljene na izraz (4.7), kriterij dopuštenih reakcija oslonaca (4.8) je definiran za n_s oslonaca te za izlaz iz napinjača ($i = 0$).

Kod polaganja cjevovoda u plitkim vodama treba voditi računa o poziciji vrha *stingera* u odnosu na morsko dno. Propisuje se minimalni dozvoljeni razmak između vrha *stingera* te morskog dna. Uobičajeno je da propisani minimalni razmak iznosi 2 m.

Optimizacija parametara polaganja uz korištenje plutajućeg *stingera* vrši se preko simulacija polaganja s fiksnim *stingerom* uz provjeru da li je takva konfiguracija ostvariva balastnim planom *stingera*.

Zbog statičke ravnoteže, ukupni moment oko zgloba, kojeg čine sve sile koje djeluju na *stinger* (Slika 2.11), mora biti jednak nuli:

$$l_u U_s \cos \alpha_s - l_m G_s \cos \alpha_s - \sum_i^{n_w} l_i G_{wi} \cos \alpha_s - \sum_j^{n_s} \bar{R}_j l_j = 0 \quad (4.9)$$

gdje je α_s kut *stingera*, l_u udaljenost centra uzgona od zgloba, U_s je sila uzgona strukture *stingera*, l_m je udaljenost centra mase od zgloba, G_s je

težina *stingera*, l_i je udaljenost centra i -tog balastnog spremnika od zgloba, a G_{wi} je težina vode u i -tom balastnom spremniku, \bar{R}_j je komponenta sile reakcije j -tog oslonaca okomita na os *stingera* a l_j je udaljenost baze oslonca od zgloba. n_s je broj valjkastih oslonaca a n_w broj balastnih spremnika.

Iz izraza (4.9) može se dobiti potreban moment balastne vode koji zadovoljava statičku ravnotežu:

$$M_w = \sum_i^{n_w} l_i G_{wi} \cos(\alpha_s) \quad (4.10)$$

$$= l_u U_s \cos(\alpha_s) - l_m G_s \cos(\alpha_s) - \sum_j^{n_s} \bar{R}_j l_j \quad (4.11)$$

Potrebni moment uzgona balastnih tankova mora biti manji od maksimalnog mogućeg uzgona *stingera* za dani kut, a koji se postiže u slučaju da su svi balastni spremnici *stingera* potpuno prazni.

Za dani kut *stingera* α , moment oko zgloba koji stvara težina *stingera* i reakcije oslonca R_i mora zadovoljavati uvjet:

$$M^w(\alpha, R_i) < M_{\max}^w(\alpha) \quad (4.12)$$

i

$$M^w(\alpha, R_i) > 0 \quad (4.13)$$

gdje je $M_{\max}^w(\alpha)$ maksimalni moment uzgonskih sila praznog *stingera* za kut α .

Zbog mogućnosti postizanja konfiguracije s velikom silom napetosti te gustim uzorkom uzgonskih tankova, moguće je da se desi da kraj cijevi ne dotakne morsko dno. Takvo rješenje nije valjano te ga je potrebno isključiti iz razmatranja. Da bi se izbjegla takva rješenja, uvodi se ograničenje kojim se promatra da li cijev dira morsko dno:

$$y(x) - y_d(x) \leq \epsilon_d \quad (4.14)$$

gdje je ϵ_d tolerancija koja dopušta numeričku grešku ili grešku preciznosti zapisa i iznosi 0.1 metar. Kriterij (4.14) mora vrijediti bar za jedan čvor diskretizirane elastične linije cjevovoda.

Sva ograničenja navedena u ovom poglavlju uzeta su u obzir u optimizacijskom postupku te su implementirana u funkciju cilja pomoću metode kažnjavanja (eng. *penalty method*), što je detaljno opisano u poglavlju 4.4.3.

4.4 Funkcija cilja

Funkcija cilja evaluira ciljeve i ograničenja optimizacijskog problema te daje ukupnu ocjenu potencijalnog rješenja optimizacijskog problema definiranog vektorom optimizacijskih varijabli. Ocjena rješenja se, u kontekstu heurističkih optimizacijskih metoda, često naziva pogodnost, prikladnost ili dobrota (eng. *fitness*).

Kod višeciljnog optimizacijskog problema u ocjenu rješenja potrebno je uključiti sve ciljeve optimizacije. Formiranje funkcije cilja bitno je određeno definicijom ciljeva optimizacije tj. ciljevima koje je potrebno minimizirati, te onima koje je potrebno maksimizirati.

Provjeravanje da li potencijalna rješenja optimizacijskog problema zadovoljavaju sva ograničenja (Poglavlje 4.3) moguće je napraviti na nivou optimizacijske metode, ako to metoda dozvoljava i ukoliko su ograničenja dovoljno jednostavna za njihovu implementaciju u optimizacijsku metodu. Zbog kompleksnosti ograničenja, u realnim optimizacijskim problemima uglavnom je nemoguće ograničenja obuhvatiti optimizacijskim algoritmom, pa ih je potrebno uključiti u funkciju cilja. Uključivanje ograničenja u funkciju cilja napravljeno je tzv. metodom kažnjavanja (eng. *penalty method*) [48, 80], koja u slučaju kršenja ograničenja znatno narušava (kažnjava) vrijednost funkcije cilja.

Većina ciljeva i ograničenja problema optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda je prikladna za minimizaciju, zbog čega je funkcija cilja definirana na način da je problem optimizacije polaganja sveden na minimizacijski problem. Potrebno je odrediti minimum funkcije cilja, koja je definirana izrazom:

$$F(\mathbf{x}) = O(\mathbf{x}) + P(\mathbf{x}) \quad (4.15)$$

gdje je F funkcija cilja, O ukupna ocjena postignutih ciljeva, P ukupna ocjena ograničenja, a \mathbf{x} je vektor optimizacijskih varijabli.

Ukupna ocjena ciljeva O osim ocjena ciljeva definiranih u poglavlju 4.2 obuhvaća i pomoćne ciljeve koji olakšavaju i ubrzavaju optimizacijski postupak, a opisani su u poglavlju 4.4.2.

Funkcija cilja (4.15) vrijedi za optimizacijski vektor \mathbf{x} koji sadrži diskretnu varijablu uzorka uzgonskih tankova B dok sila napinjanja može biti kontinuirana i poprimiti bilo koju realnu vrijednost iz propisanog raspona sile napinjača. F nije finalna funkcija cilja koja se koristi u optimizacijskom postupku koji pretpostavlja da su sve optimizacijske varijable kontinuirane. U poglavlju 5.2.2 opisana je funkcija cilja za kontinuirane varijable sile napinjanja te uzorka uzgonskih tankova koja vrši interpolaciju temeljenu na funkciji F izračunatoj u najbližim diskretnim vrijednostima varijabli T i B .

Ukupna ocjena postignutih ciljeva je težinska suma normiranih ocjena svih ciljeva:

$$O(\mathbf{x}) = \sum_i^{n_o} \gamma_i \cdot o_i(\mathbf{x}) \quad (4.16)$$

gdje je γ_i težinski faktor i -tog cilja, o_i normirana ocjena i -tog cilja, a n_o je broj ciljeva optimizacije.

Težinski faktori γ_i su parametri funkcije cilja, a postavljanje njihovih vrijednosti ovisi o zadanim parametrima polaganja kao što su parametri i geometrija broda cjevopolagača i *stingera*, dimenzije i svojstva materijala cijevi, dubina polaganja i dr. Za odabrane vrijednosti težinskih faktora mora vrijediti

$$\sum_i^{n_o} \gamma_i = 1. \quad (4.17)$$

Normirane ocjene ciljeva o_i definirane su na način da se postiže

$$o_i(\mathbf{x}) < 1, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, n_o \quad (4.18)$$

za sve optimizacijske vektore \mathbf{x} za koje se smatra da su optimizacijski ciljevi u području prihvatljivog, tj. (4.18) vrijedi za svako izvedivo rješenje.

Na temelju izraza (4.16), uzevši u obzir (4.17) i (4.18), vrijedi

$$O(\mathbf{x}) < 1 \quad (4.19)$$

za svaki \mathbf{x} koji, s obzirom na ciljeve optimizacije, predstavlja prihvatljivu, ali ne nužno i optimalnu, konfiguraciju parametara polaganja.

Osim ciljeva funkcija cilja uključuje i vrijednosti kazne u slučaju kršenja nekih propisanih kriterija. Ukupna kazna (penal) iznosi:

$$P(\mathbf{x}) = \sum_i^{n_c} p_i(\mathbf{x}) \quad (4.20)$$

gdje je p_i kazna i -tog ograničenja, a n_c broj ograničenja. Za ograničenja koja su zadovoljena vrijedi $p_i = 0$, dok je za nezadovoljena ograničenja poželjno da vrijednost kazne bude $p_i > 1$ kako bi kazna u funkciji cilja dominirala u odnosu na ocjene ciljeva optimizacije.

4.4.1 Ocjena ciljeva optimizacije

Za svaki od ciljeva specificiranih u poglavlju 4.2 potrebno je definirati normiranu ocjenu.

Upotrebu tj. gustoću postavljanja uzgonskih tankova potrebno je minimizirati, pa je u skladu s time potrebno odrediti normiranu ocjenu koja će imati manju vrijednost za rjeđe raspoređene tankove, a veću za gušće raspoređene uzgonske tankove. Međusobni razmak uzgonskih tankova nije linearno proporcionalan olakšanju cijevi uslijed uzgona tankova, pa je stoga bolje koristiti prosječni jedinični uzgon tankova za ocjenu ovog optimizacijskog cilja.

Prosječni jedinični (po jedinici duljine) uzgon određen je izrazom:

$$w^B = \frac{U_B}{l_B} \quad (4.21)$$

gdje je w^B prosječni jedinični uzgon, U_B je uzgonski kapacitet jednog uzgorskog spremnika, a l_B je prosječni razmak između uzgonskih tankova. U_B je zadana vrijednost definirana dostupnim tipom uzgonskih tankova, a l_B je definiranom uzorkom postavljanja uzgonskih spremnika (Tablica 4.2). U slučaju polaganja cjevovoda bez korištenja uzgonskih tankova vrijedi $l_B = \infty$ odnosno $w^B = 0$.

Na temelju prosječnog jediničnog uzgona može se definirati normirana ocjena:

$$o_B(\mathbf{x}) = \frac{w^B(\mathbf{x})}{w_{\max}^B} \quad (4.22)$$

gdje je o_B normirana ocjena upotrebe uzgonskih tankova, a w_{\max}^B je jedinični uzgon najgušćeg uzorka postavljanja tankova (svakih 12.2 m).

Minimizacija sile napetosti cjevovoda u polaganju se postiže minimizacijom normirane ocjene sile napetosti. Ocjena je normirana s obzirom na maksimalnu napetost koju napinjač može postići i ovisi o svojstvima broda polagača tj. napinjača. Sila napetosti je normirana prema izrazu:

$$o_T = \frac{T}{T_{\max}} \quad (4.23)$$

gdje je o_T normirana ocjena sile napetosti, T sila napetosti na izlazu iz napinjača i T_{\max} maksimalna sila napetosti koju može postići napinjač.

Normirana ocjena za propisane kriterije u području *overbenda* i području *sagbenda* računa se s obzirom na njihove maksimalne dozvoljene vrijednosti. Za ocjenu najvećeg momenta savijanja u području *overbenda* koristi se izraz

$$o_{M_o} = \frac{M_{\max}^o}{M_{\text{dop}}^o} \quad (4.24)$$

a u području *sagbenda*

$$o_{M_s} = \frac{M_{\max}^s}{M_{\text{dop}}^s} \quad (4.25)$$

gdje je o_{M_o} normirana ocjena momenta savijanja u području *overbenda*, o_{M_s} normirana ocjena momenta savijanja u području *sagbenda*, M_{\max}^o maksimalni apsolutni moment savijanja u području *overbenda*, M_{\max}^s maksimalni apsolutni moment savijanja u području *sagbenda*, M_{dop}^o maksimalni dopušteni moment savijanja u području *overbenda* i M_{dop}^s maksimalni dopušteni moment savijanja u području *sagbenda*.

Ocjene kriterija dopuštenog momenta savijanja, za razliku od ostalih kriterija, mogu biti veće od 1, ali u tom slučaju ti kriteriji nisu zadovoljeni te je pripadajuća konfiguracija parametara polaganja neizvediva.

4.4.2 Pomoćni ciljevi optimizacije

U svrhu učinkovitijeg optimizacijskog procesa, uvedeni su pomoćni ciljevi optimizacije. Pomoćni ciljevi mijenjaju funkciju cilja sastavljenu samo od ocjene propisanih ciljeva optimizacije na način da omogućuju:

- postizanje gradijenta na inače konstantnim dijelovima funkcije cilja tj. aktiviranjem pasivnih optimizacijskih varijabli,
- blaži prijelaz iz jednog lokalnog optimuma u drugi i
- smanjenje gradijenta funkcije cilja u svrhu postizanja kontrolirane konvergencije optimizacijske metode.

Uzimajući u obzir samo propisane ciljeve optimizacije polaganja, variranje visine valjkastog oslonca koji nije u kontaktu sa cjevovodom ne prouzrokuje promjenu u vrijednosti funkcije cilja sve dok oslonac ne dotakne cijev. U tom slučaju, optimizacijsku varijablu visine valjkastog oslonca može se smatrati pasivnom. Minimizacija udaljenosti valjkastih oslonaca od cijevi je pomoćni cilj koji omogućuje aktiviranje varijable visine valjkastog oslonca koji nije u kontaktu sa cjevovodom.

Pomoćni cilj minimizacije udaljenosti oslonaca od cijevi o_d je definiran izrazom

$$o_d = \frac{\sum_i^{n_s} d_i}{n_s} \quad (4.26)$$

gdje je d_i udaljenost čvora oslonca od cijevi, a n_s broj oslonaca.

Promatrajući moment savijanja u području *overbenda*, posebno u dijelu gdje je cijev podržana s valjkastim osloncima, dolazi se do zaključka da će maksimalni moment savijanja biti manji ako su momenti savijanja iznad oslonaca ujednačeniji. Drugim riječima, maksimalno savijanje cijevi se može smanjiti ako se savijanje ravnomjerno raspodijeli po osloncima.

Kako bi se olakšala minimizacija maksimalnog momenta savijanja u području *overbenda*, uvodi se dodatni pomoćni cilj koji pokušava postići jednoliku raspodjelu momenata savijanja po osloncima. Za ocjenu ovog cilja koristi se standardna devijacija momenata savijanja na područjima oslonaca

$$o_{M_{std}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_i^{n_s} (M_i - M_{avg})^2}}{M_{avg}} \quad (4.27)$$

gdje je M_i moment savijanja cijevi iznad i -tog oslonca, n_s je broj oslonaca, a M_{avg} je prosječni moment savijanja iznad oslonaca koji je definiran izrazom:

$$M_{avg} = \frac{1}{n_s} \sum_i^{n_s} M_i. \quad (4.28)$$

Moment savijanja na zadnjem valjkastom osloncu je vrlo osjetljiv na promjenu sile napetosti, više nego momenti savijanja iznad ostalih oslonaca. Prilikom smanjivanja napetosti cjevovoda, zadnji oslonac preuzima veće opterećenje što uzrokuje povećanje momenta savijanja iznad tog oslonca. U suprotnom slučaju, kod povećanja napetosti cjevovoda, reakcija zadnjeg oslonca se smanjuje ili čak potpuno gubi te se smanjuje moment savijanja iznad oslonca.

Kako bi se olakšala varijacija sile napetosti, a da pri tome moment savijanja iznad zadnjeg oslonca ostane manji od maksimalnog dozvoljenog momenta, uvodi se pomoćni cilj kojim se postiže da moment savijanja iznad zadnjeg oslonca bude manji od prosjeka. Ocjena ovog pomoćnog cilja definirana je izrazom

$$o_{M_z} = \max\left(\frac{M_{n_s}}{M_{avg}} - 0.8, 0\right) \quad (4.29)$$

gdje je M_{n_s} moment savijanja iznad zadnjeg valjkastog oslonca, a M_{avg} prosječni moment savijanja iznad svih oslonaca (4.28). Ocjena pomoćnog cilja, dana izrazom (4.29), jednaka je nuli ukoliko je moment savijanja iznad zadnjeg oslonca manji od 0.8 prosječnog momenta iznad svih oslonaca.

4.4.3 Ocjena ograničenja

Ocjena ograničenja vrši se metodom kažnjavanja (*penalty method*) [48, 80], kojom se producira dodatna vrijednost funkcije cilja (koju je potrebno minimizirati). Za svaki kriteriji opisan u poglavlju 4.3 definiran je izračun vrijednosti kazne u slučaju kršenja tog kriterija.

Za kriteriji maksimalnog momenta savijanja u području *overbenda*, definiranog izrazom (4.5), određuje se kazna na temelju izraza

$$p_{M_o} = \begin{cases} \frac{M_{\max}^o}{M_{\text{dop}}^o} & \text{ako je } M_{\max}^o > M_{\text{dop}}^o \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (4.30)$$

gdje je p_{M_o} kazna za kršenje kriterija momenta savijanja u području *overbenda*, M_{\max}^o je maksimalni apsolutni moment savijanja, a M_{dop}^o maksimalni dopušteni moment savijanja u području *overbenda*.

Analogno se određuje kazna za kršenje kriterija momenta savijanja u području *sagbenda* p_{M_s} :

$$p_{M_s} = \begin{cases} \frac{M_{\max}^s}{M_{\text{dop}}^s} & \text{ako je } M_{\max}^s > M_{\text{dop}}^s \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (4.31)$$

gdje je M_{\max}^s je maksimalni apsolutni moment savijanja, a M_{dop}^s maksimalni dopušteni moment savijanja u području *sagbenda*.

Kriterij dopuštene sile reakcije oslonaca se provjerava za svaki valjkasti oslonac, a kazna se izračunava izrazom:

$$p_{R_i} = \begin{cases} \frac{R_i}{R_{\text{dop}}} & \text{ako je } R_i > R_{\text{dop}}, \quad i = 1, \dots, n_s \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (4.32)$$

gdje je p_{R_i} kazna za prekoračenje sile reakcije i -tog valjkastog oslonca, R_i je reakcija i -tog oslonca, a R_{dop} je maksimalna dopuštena reakcija i -tog oslonca.

Osiguravanje potrebnog razmaka vrha *stingera* i morskog dna postiže se penaliziranjem nedovoljnog razmaka prema izrazu

$$p_{l_{st}} = \begin{cases} \frac{l_{\text{st,dop}}}{l_{st}} & \text{ako je } l_{st} > l_{\text{st,dop}} \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (4.33)$$

gdje je $p_{l_{st}}$ penal nedovoljnog razmaka vrha *stingera* i morskog dna, l_{st} je postignuti razmak, a $l_{\text{st,dop}}$ minimalni dopušteni razmak vrha *stingera* i morskog dna.

Kako bi se postiglo rješenje koja je moguće ostvariti s plutajućim *stingrom*, potrebno je zadovoljiti uvjete balastnog plana plutajućeg *stingera* (4.12)

i (4.13). Uvodi se penaliziranje konfiguracija za koje nije moguće postići dani kut *stingera*:

$$p_{fs} = \begin{cases} \frac{M^w}{M_{\max}^w(\alpha_s)} & \text{ako je } M^w > M_{\max}^w(\alpha_s) \\ \frac{M_{\max}^w(\alpha_s) - M^w}{M_{\max}^w(\alpha_s)} & \text{ako je } M^w < 0 \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (4.34)$$

gdje je M^w potrebni moment a $M_{\max}^w(\alpha_s)$ maksimalni ostvarivi moment balastne vode *stingera* za kut *stingera* (α_s).

Kriterij valjanosti analize, propisan izrazom (4.14), najstroži je kriterij koji provjerava da li je rezultat simulacije polaganja uopće fizikalan. Ocjena ovog kriterija je definirana kao:

$$p_{fs} = \begin{cases} 0 & \text{ako je } y(x_i) - y_d(x_i) \leq \epsilon_d \text{ za bar jedan } i \\ 10 & \text{inače} \end{cases} \quad (4.35)$$

gdje je i indeks čvora numeričke mreže cjevovoda. Za razliku od ostalih ograničenja, kazna za nevaljan rezultat analize je znatno veća, jer je interpretacija rezultata takve konfiguracije potpuno pogrešna.

4.5 Analiza osjetljivosti

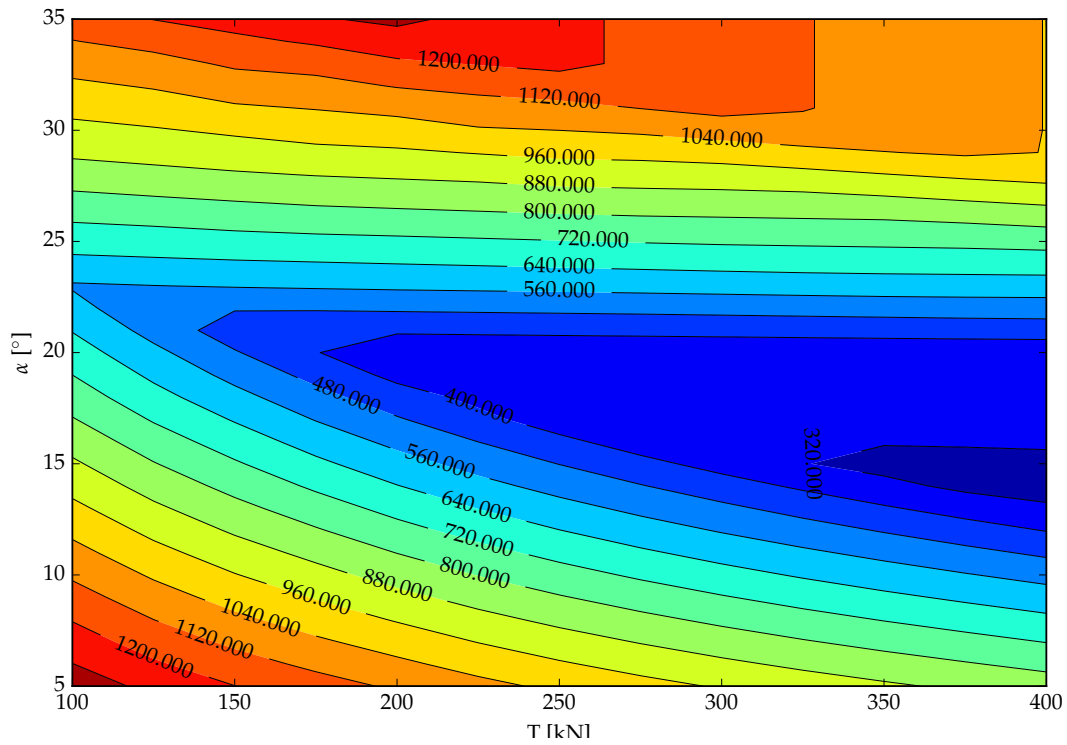
Tijekom istraživanja koje je prethodilo izradi ove disertacije, provedeno je mnogo analiza i testiranja modela polaganja na osnovu čega je formirana funkcija cilja. Saznanja dobivena navedenim analizama korištena su i u razvoju hibridne optimizacijske metode opisane u poglavlju 5. U ovom poglavlju izdvojeni su samo najzanimljiviji rezultati koji su imali direktan utjecaj u osmišljavanju cjelokupnog optimizacijskog postupka.

Aksijalna sila u cjevovodu, koja se postiže napinjačem umanjuje efekt savijanja cijevi što se posebno manifestira u području *sagbenda*. Iz tog razloga, provedena je analiza utjecaja sile napinjača na moment savijanja cijevi. Osim sile napinjača, bitan utjecaj na deformaciju cijevi ima i kut *stingera*, kojim se direktno ostvaruje pomak svih valjkastih oslonaca koji se nalaze na *stingeru*.

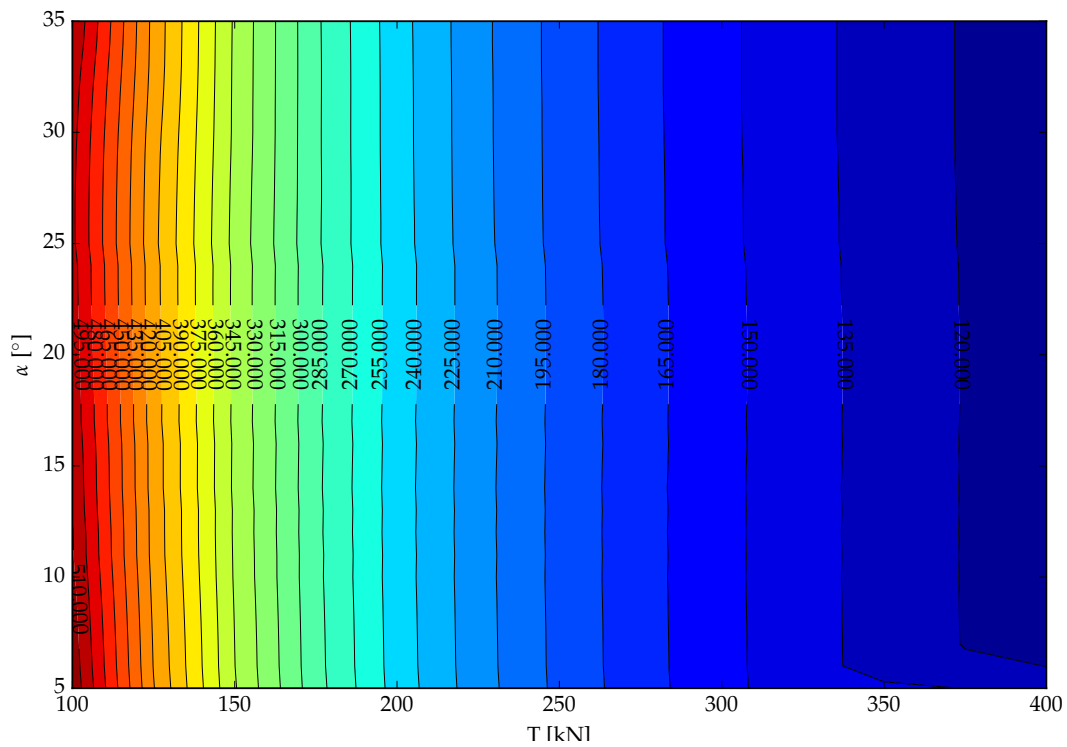
Na slikama 4.4 i 4.5 prikazana je ovisnost maksimalnog momenta savijanja o sili napinjača T i kutu *stingera* α_s . Rezultati su temeljeni na simulacijama provedenima za konfiguraciju polaganja korištenu i opisanu u poglavlju 3.1.

Na slici 4.4 valja uočiti da se na temelju područja najmanjeg momenta savijanja u području *overbenda* može ustanoviti da postoji zavisnost sile napinjača T i kuta *stingera* kojom se postiže konfiguracija minimalnog momenta savijanja u *overbendu*. Smanjenjem sile napetosti cjevovoda potrebno je povećati kut *stingera* kako bi se minimizirao moment savijanja cijevi u *overbendu*. Ovo zapažanje se može uočiti i na svim drugim primjerima polaganja koji su analizirani tijekom izrade ovog rada.

Promatrajući sliku 4.5 nameće se zaključak da je moment savijanja u području *sagbenda* pod gotovo isključivim utjecajem samo sile napinjača T .



Slika 4.4: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području *overbenda* s obzirom na silu napinjača T i kut *stingera* α_s .



Slika 4.5: Maksimalni apsolutni momenta savijanja u području *sagbenda* s obzirom na silu napinjača T i kut *stingera* α_s .

OPTIMIZACIJSKI POSTUPAK

Za rješavanje optimizacijskog problema određivanja parametara polaganja cjevovoda, formuliranog u poglavlju 4, potrebno je odabrati adekvatnu optimizacijsku metodu. Pri odabiru metode u obzir treba uzeti karakteristike optimizacijskog problema kako bi odabrana metoda, prije svega, bila u mogućnosti mogućnost rješavati ovaj problema, ali i kako bi pružila što bolje performanse tj. omogućila što brže, točnije i pouzdanije rješavanje.

Odabrana je metoda optimizacije rojem čestica (eng. *Particle Swarm Optimization*, PSO) koja se pokazala uspješna na nizu primjera rješavanja inženjerskih optimizacijskih problema.

Izvorna PSO metoda je modificirana kako bi se pospješilo rješavanje problema optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda te kako bi se omogućilo korištenje diskretnih optimizacijskih varijabli.

PSO metoda i njene modifikacije opisane su naslovima ovog poglavlja, kao i računalna implementacija optimizacijskog postupka te funkcije cilja.

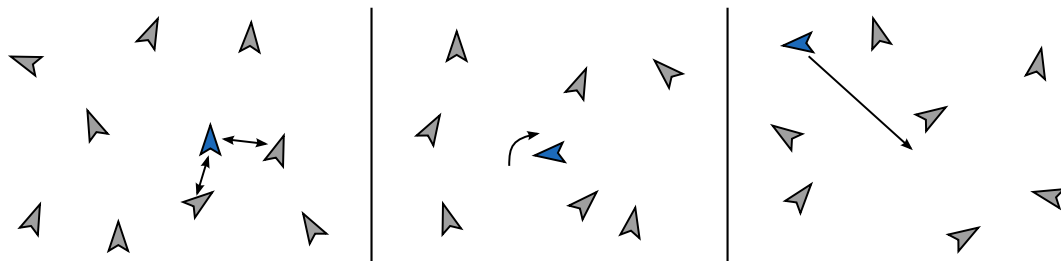
Pojmovi Pareto optimalnosti i Pareto fronte objašnjeni su u posljednjem naslovu ovog poglavlja te će se koristiti pri analizi rezultata optimizacijskog postupka.

5.1 Optimizacija rojem čestica

Optimizacija rojem čestica (eng. *Particle Swarm Optimization*, PSO) je stohastička optimizacijska metoda temeljena na idejama kretanja jata i rojeva. PSO rješava optimizacijski problem gibanjem skupa čestica u prostoru pretraživanja. Gibanje svake čestice definirano je jednostavnim zakonom koja privlači česticu ka njenoj najboljoj poziciji tijekom gibanja i najboljoj poziciji svih čestica. Ovakvo jednostavno gibanje svake čestice omogućuje inteligentno pretraživanje i gibanje cijelog jata prema optimumu.

Reynolds [65] je 1987. godine predložio model ponašanja jata, prema kojem se svaki član jata ponaša prema sljedećim pravilima (Slika 5.1):

- Držanje razmaka - svaki član jata se pokušava udaljiti od susjednih ako su mu oni preblizu,
- Prilagođavanje smjera - svaki član jata giba se u usrednjenom smjeru kretanja svojih susjeda,
- Kohezija - svaki član jata ostaje blizu svojih susjeda tj. ostaje u jatu.



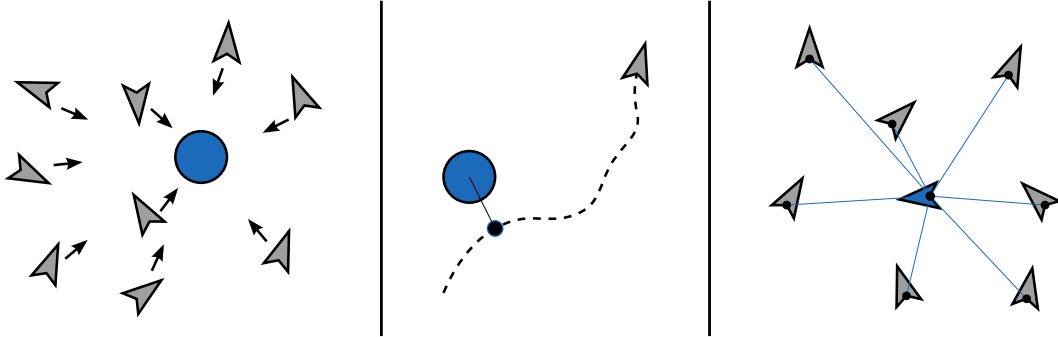
Slika 5.1: Ponašanje jedinki u Reynoldsovom modelu: *Odvajanje, usmjeravanje i kohezija*

Kennedy i Eberhart [40] su dodali 'gnijezdo' u pojednostavljenu simulaciju temeljenu na Reynoldsovom modelu. Simulacija je obuhvaćala sljedeće utjecaje gnijezda na jedinke jata (Slika 5.2):

- gnijezdo privlači svaku jedinku,
- svaka jedinka pamti položaj u kojem je bila najbliže gnijezdu,
- svaka jedinka razmjenjuje informacije sa susjedima o lokaciji najbližoj gnijezdu.

Predloženi model gibanja roja s gnijezdom dovodi čestice sve bliže gnijezdu, a nakon dovoljnog vremena simulacije sve se čestice nalaze na položaju gnijezda. Ovaj fenomen se dešava i u slučaju da je gnijezdo po-

mično. Ukoliko položaj gnijezda predstavlja položaj trenutno najbolje poznate točke u prostoru pretraživanja, ovakva se simulacija gibanja može primijeniti kao optimizacijska metoda.



Slika 5.2: Utjecaj gnijezda na jedinke jata

Promjena položaja i -te čestice definirana je izrazom

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \quad (5.1)$$

gdje su $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ vektor položaja u n -dimenzionalnom prostoru pretraživanja i $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$ vektor brzine i -te čestice, a t je indeks iteracije. Radij vektor položaja čestice je, općenito, optimizacijski vektor (4.1), odnosno vektor (4.4) u slučaju primjene PSO metode na optimizaciju parametara polaganja podmorskih cjevovoda.

Nova brzina i -te čestice sastoji se od kognitivne i socijalne komponente:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = c_c \cdot \mathbf{r}_1^t \circ (\mathbf{p}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_s \cdot \mathbf{r}_2^t \circ (\mathbf{g}_i^t - \mathbf{x}_i^t) \quad (5.2)$$

gdje je c_c kognitivni faktor, $\mathbf{p}_i^t \in \mathbb{R}^n$ vektor najboljeg položaja i -te čestice do iteracije t , c_s socijalni faktor i $\mathbf{g}_i^t \in \mathbb{R}^n$ vektor najboljeg položaja susjednih čestica (ili cijelog roja) do iteracije t . Operator \circ označava Harnardov produkt, a $\mathbf{r}_1 \in [0, 1]^n$ i $\mathbf{r}_2 \in [0, 1]^n$ su vektori nasumičnih vrijednosti s intervala $[0, 1]$ dimenzije n .

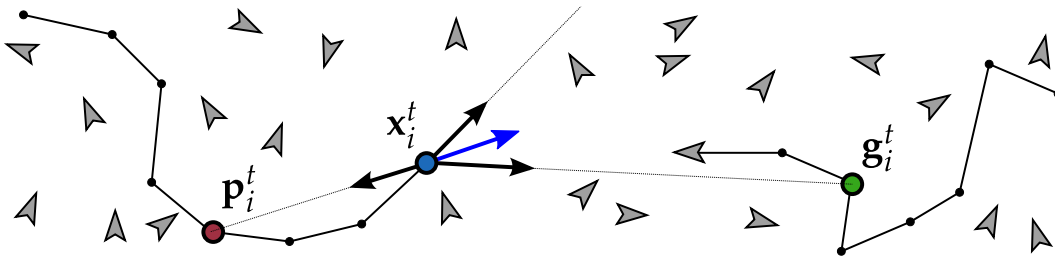
Shi i Eberhart [68] uvode inerciju čestice koja je kontrolirana preko faktora inercije ω :

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \omega \cdot \mathbf{v}_i^t + c_c \cdot \mathbf{r}_1^t \circ (\mathbf{p}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_s \cdot \mathbf{r}_2^t \circ (\mathbf{g}_i^t - \mathbf{x}_i^t). \quad (5.3)$$

Izraz (5.3) predstavlja zakon gibanja čestica koji se koristi u tzv. *standardnom PSO-u*. Brzina čestica sastoji se od tri komponente (Slika 5.3):

- inercijalne koja omogućuje gibanje čestice u dosadašnjem smjeru,
- kognitivne koja omogućuje individualno istraživanje svake čestice u okolini svog najboljeg dosadašnjeg položaja i

- socijalne koja omogućuje kontrakciju roja i pretraživanje u okolini najboljeg položaja cijeloga roja (ili najboljeg položaja povezanih čestica).



Slika 5.3: Komponente brzine čestice

U osnovnom obliku, faktor inercije je konstantan u vremenu. U slučaju $\omega \geq 1$, brzine čestica rastu u vremenu (čestice ubrzavaju), a formacija roja divergira. Usporavanje čestica i smanjivanje brzine do nule postiže se s $\omega < 1$. Veći faktor inercije omogućava lakše globalno pretraživanje, s povećanjem rasapa čestica, dok manji ω omogućuje bolje lokalno pretraživanje i bržu konvergenciju. Odabir faktora inercije treba temeljiti na karakteristikama funkcije cilja i svodi se na balansiranje širine pretraživanja i brzine konvergencije.

Prema [4]

$$\omega > \frac{c_c + c_s}{2} - 1 \quad (5.4)$$

garantira konvergenciju putanja čestica, a prema [8] preporučeni faktor inercije, za standardni PSO algoritam, je $\omega = 0.73$.

Socijalna komponenta brzine svake čestice, u principu, omogućuje razmjenu informacija u roju te osigurava konvergenciju svih čestica roja. Određivanje socijalne komponente brzine čestice vrši se s obzirom na najbolje položaje asociiranih čestica roja. Način na koji se određuje međusobna povezanost čestica naziva se topologija roja [55]. Neke od osnovnih topologija korištenih u PSO metodi prikazane su na Slici 5.4.

Postoje dva osnovna i najčešće korištena pristupa, tj. topologije roja, u određivanju utjecaja roja na pojedinu česticu:

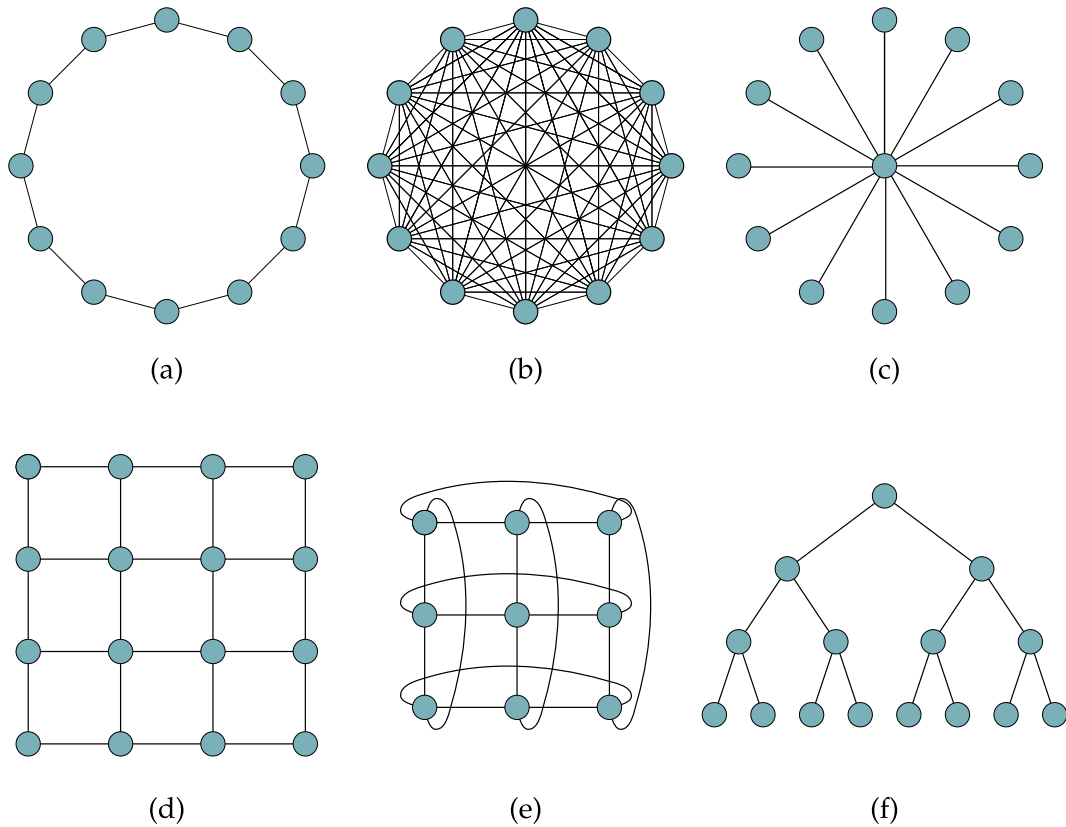
- Globalno najbolji PSO (*global best, gbest*) i
- Lokalno najbolji PSO (*local best, lbest*).

Varijanta *gbest PSO* određuje globalno najbolji položaj, tj. najbolji postignuti položaj svih čestica roja i odgovara potpuno spojenoj topologiji prikazanoj na slici 5.4. Pozicija najbolje čestice, na temelju koje se izračunava socijalna komponenta brzine, zajednička je za sve čestice roja:

$$\mathbf{g}_i^t = \mathbf{g}^t. \quad (5.5)$$

Korištenjem potpuno spojene topologije roja osigurava se brza konvergencija, ali velika je mogućnost da roj konvergira ka lokalnom optimumu.

Prstenasta topologija roja se koristi u *lbest* PSO varijanti metode. U ovoj topologiji, svaka čestica je pod utjecajem k najboljih pozicija svojih susjeda. Npr. ako je $k = 2$, svaka čestica je privlačena najboljom pozicijom dvije, topološki gledano, najbliže susjedne čestice. Zbog lančane povezanosti, informacije o najboljim položajima sporije propagiraju do svih čestica roja, što može uzrokovati sporiju konvergenciju nego u *gbest* varijanti, ali i omogućuje veće izgleda za pronalaženje globalnog optimuma.



Slika 5.4: Različite topologije roja: (a) prstenasta topologija (*lbest* PSO), (b) potpuno spojena topologija (*gbest* PSO), (c) zvjezdasta topologija, (d) mrežasta topologija, (e) toroidalna topologija i (f) stablasta topologija.

5.2 Modificirana optimizacija rojem čestica

Za potrebe optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda razvijena je hibridna PSO metoda, prilagođena rješavanju problema određivanja parametara polaganja podmorskih cjevovoda.

5.2.1 Dodatni pomak čestica

Za razliku od standardne PSO formulacije (5.1), promjena položaja i -te čestice definirana je izrazom

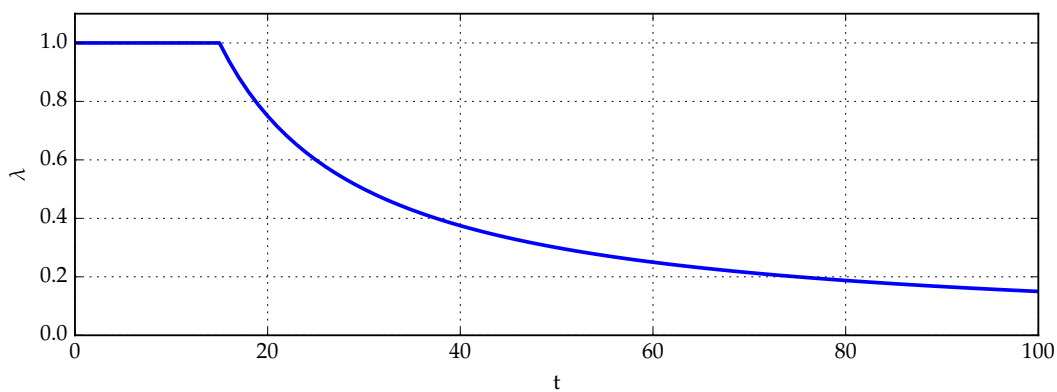
$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} + \delta_i^t \cdot \lambda^t \quad (5.6)$$

gdje je δ dodatni pomak i -te čestice koji se određuje na temelju rezultata u položaju \mathbf{x}_i^t i omogućuje bržu konvergenciju metode, a λ je faktor prigušenja dodatnog pomaka. Brzina \mathbf{v}_i^{t+1} je nepromijenjena u odnosu na standardni PSO i izračunava se prema jednadžbi (5.3).

Prigušenje omogućuje smanjenje utjecaja dodatnog pomaka tijekom iteracija PSO metode. Regulacija prigušenja se vrši faktorom prigušenja λ koji je definiran izrazom

$$\lambda^t = \min\left(\frac{t_\lambda}{t}, 1\right) \quad (5.7)$$

gdje je λ^t faktor prigušenja u iteraciji t , a t_λ je broj iteracija nakon koje počinje prigušavanje pomaka. Promjena faktora prigušenja tijekom iteracija PSO metode prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5: Faktor prigušenja za $t_\lambda = 15$

Pomak δ ovisi o rezultatima strukturalne analize za trenutni položaj čestice u prostoru pretraživanja

$$\delta_i^t = \delta(\mathbf{x}_i^t) \quad (5.8)$$

te, na temelju fizikalnih i iskustvenih optimizacijskih saznanja, usmjerava konačni novi položaj čestice prema boljem području.

Dodatno pomicanje čestica vrši se pomoću nekoliko metoda od kojih svaka pokušava poboljšati položaj čestice različitim pristupom. Odabir metode pomaka δ koja će se aplicirati na jedinku je stohastičan, a određen je nasumičnom varijablom $r_\delta \in [0, 1]$.

$$\delta(\mathbf{x}_i^t) = \begin{cases} \delta_1(\mathbf{x}_i^t) & \text{ako je } 0 \leq r_\delta < r_{\delta_1} \\ \delta_2(\mathbf{x}_i^t) & \text{ako je } r_{\delta_1} \leq r_\delta < r_{\delta_1} + r_{\delta_2} \\ \delta_3(\mathbf{x}_i^t) & \text{ako je } r_{\delta_1} + r_{\delta_2} \leq r_\delta < r_{\delta_1} + r_{\delta_2} + r_{\delta_3} \\ \mathbf{0} & \text{ako je } r_{\delta_1} + r_{\delta_2} + r_{\delta_3} \leq r_\delta < 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

gdje su r_{δ_1} , r_{δ_2} parametri optimizacijske metode koji predstavljaju vjerojatnost dešavanja pojedinog pomaka. Za vjerojatnosti dešavanja pomaka vrijedi $\sum r_{\delta_i} \leq 1$, što omogućuje da se dodatni pomaci ne dešavaju uvijek.

Pomak čestice $\delta_1(\mathbf{x}_i^t)$ omogućuje brže podizanje valjkastih oslonaca kako bi se uspostavili kontakti svih oslonaca sa cjevovodom. Vektor pomaka u prostoru pretraživanja određen je kao:

$$\delta_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ \delta T \\ \delta \alpha^s \\ 0 \\ 0 \\ \delta h_1 \\ \vdots \\ \delta h_{n_s} \end{pmatrix}. \quad (5.10)$$

a veličinom i redoslijedom članova odgovara vektoru optimizacijskih varijabli (4.4).

δT je promjena sile napetosti T i iznosi

$$\delta T = r_{T\alpha} \cdot 10000 \quad (5.11)$$

dok je promjena kuta *stingera* jednaka

$$\delta \alpha^s = -r_{T\alpha} \cdot 0.25 \quad (5.12)$$

gdje je $r_{T\alpha}$ nasumična vrijednost $r_{T\alpha} \in [-1.4, 0.6]$.

Promjena visine i -tog valjkastog oslonca računa se prema izrazu

$$\delta h_i = d_i \cdot 1.5 \cdot r_h, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n_s \quad (5.13)$$

gdje je d_i udaljenost i -tog oslonca od cijevi, r_h nasumična vrijednost $r_h \in [0, 1]$, a n_s ukupni broj valjkastih oslonaca. Za sve pomake oslonaca jedne čestice koristi se ista nasumično generirana vrijednost r_h .

U drugoj varijanti pomaka δ_2 isto se vrši varijacija visine valjkastih oslonaca, ali ovisno o momentu savijanja cijevi u točkama iznad valjkastih oslonaca. Kao i u slučaju δ_1 , osim visine oslonaca, mijenja se i sila napetosti te kut *stingera*.

$$\delta_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ \delta T \\ \delta \alpha^s \\ 0 \\ 0 \\ \delta h_1 \\ \vdots \\ \delta h_{n_s} \end{pmatrix}. \quad (5.14)$$

Promjene sile napetosti i kuta *stingera* u pomaku δ_2 jednake su kao kod pomaka δ_1 i računaju se prema izrazima (5.11) i (5.12).

Promjena visine valjkastih oslonaca temelji se na odstupanju momenta savijanja iznad oslonca u odnosu na prosjek iznad svih oslonaca:

$$\delta h_i = \frac{M_{\text{avg}} - M_i}{M_{\text{avg}}} \cdot r_h, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n_s \quad (5.15)$$

gdje je M_i moment savijanja cijevi iznad i -tog oslonca, M_{avg} je prosječni moment savijanja iznad svih valjkastih oslonaca, a r_h je nasumična vrijednost $r_h \in [0, 0.2]$ koja je jednaka za izračun svih pomaka varijabli oslonaca jedne čestice.

Treća varijanta dodatnog pomaka δ_3 (\mathbf{x}_i^t) omogućuje adaptaciju rješenja s obzirom na uzorak uzgonskih tankova B i sile napetosti T . U većini slučajeva, povećanje prosječnog razmaka uzgonskih tankova povećava moment savijanja, što se može nadomjestiti većom silom napetosti. Djelovanje sile napetosti smanjuje moment savijanja u području *sagbenda*, ali i u području *overbenda* uz adekvatnu prilagodbu kuta *stingera* i visine valjkastih oslonaca. Analogno povećanju prosječnog razmaka, prilikom smanjivanja prosječnog razmaka uzgonskih tankova smanjuje se moment savijanja cijevi, pa se manjom silom napetosti može postići izvedivo rješenje.

Dodatni pomak δ_3 definiran je kao

$$\delta_3 = \begin{pmatrix} \delta B \\ \delta T \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.16)$$

a postiže simultanu varijaciju varijable uzorka uzgonskih tankova δB i sile napetosti δT .

Promjena vrijednosti varijable uzgonskih tankova određena preko nasumičnog broja $r_{BT} \in [-0.8, 0.2]$:

$$\delta B = r_{BT} \quad (5.17)$$

dok se vrijednost sile napetosti dodatno mijenja prema izrazu:

$$\delta T = -r_{BT} \cdot r \cdot 60000 \quad (5.18)$$

gdje je r nasumična vrijednost s intervala $[0, 1]$.

5.2.2 Diskretne varijable

Prema formulaciji problema optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda, opisanoj u poglavlju 4, dvije su varijable diskretne

- napetost cijevi i
- uzorak uzgonskih tankova

što zahtijeva njihov poseban tretman sa strane optimizacijske metode. Iako postoje varijante PSO metode koje omogućavaju rješavanje kombinatornih problema [41, 19], u ovom radu je zadržana izvorna PSO formulacija (Poglavlje 5.1) koja podrazumijeva kontinuirani prostor pretraživanja.

Za tretman diskretnih varijabli korištena je linearna interpolacija između rješenja za susjedne diskretne vrijednosti tih varijabli. Ovakav pristup omogućuje da se varijable sile napetosti cjevovoda i uzorka uzgonskih tankova, kao i sve ostale varijable optimizacijskog vektora, smatraju kontinuiranim varijablama.

Interpolaciju između diskretnih vrijednosti varijabli potrebno je vršiti za dvije varijable tj. u dvije dimenzije dok su ostale varijable nepromijenjene.

Linearna dvodimenzionalna interpolacija naziva se i bilinerana interpolacija i definirana je izrazom:

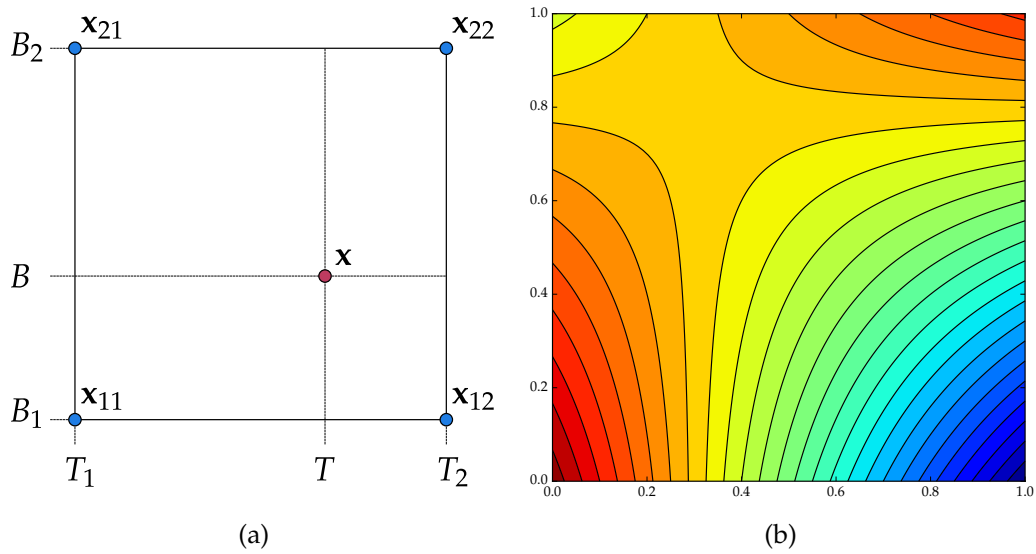
$$\begin{aligned} \tilde{F}(\mathbf{x}) = & \frac{F(\mathbf{x}_{11})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T_2 - T)(B_2 - B) + \\ & \frac{F(\mathbf{x}_{21})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T - T_1)(B_2 - B) + \\ & \frac{F(\mathbf{x}_{12})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T_2 - T)(B - B_1) + \\ & \frac{F(\mathbf{x}_{22})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T - T_1)(B - B_1) \end{aligned} \quad (5.19)$$

gdje su

- \mathbf{x} optimizacijski vektor koji sadrži kontinuirane varijable sile napetosti T i uzorka uzgonskih tankova B ,
- \mathbf{x}_{11} optimizacijski vektor u kojem su varijable sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova zaokružene na najbliže manje diskretne vrijednosti T_1 i B_1 ,
- \mathbf{x}_{21} optimizacijski vektor u kojem je varijabla sile napetosti zaokružene na najbližu veću diskretnu vrijednost T_2 , a varijabla uzorka uzgonskih tankova na najbližu manju diskretnu vrijednost B_1 ,
- \mathbf{x}_{12} optimizacijski vektor u kojem je varijabla sile napetosti zaokružene na najbližu manju diskretnu vrijednost T_1 , a varijabla uzorka uzgonskih tankova na najbližu veću diskretnu vrijednost B_2 ,
- \mathbf{x}_{22} optimizacijski vektor u kojem su varijable sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova zaokružene na najbliže veće diskretne vrijednosti T_2 i B_2 ,
- F funkcija cilja za optimizacijski vektor kontinuiranih varijabli definirana izrazom (4.15).

Varijable iz izraza (5.19) prikazane su na slici 5.6a.

Karakteristika ovakve interpolacije je da su minimumi interpolacijske funkcije, u ovom slučaju funkcije cilja, uvijek u poznatim tj. diskretnim vrijednostima varijabli (Slika 5.6b). Zbog toga će krajnje rješenje optimizacijskog procesa uvijek imati diskretne vrijednosti sile napinjanja i uzorka uzgonskih tankova, ili vrijednosti vrlo blizu diskretnih. Zaokruživanje vrijednosti sile napinjanja i uzorka uzgonskih tankova finalnog rješenja na diskretne vrijednosti, zbog navedenog svojstva interpolacije, će uvijek dati bolje, tj. optimalno, rješenje.



Slika 5.6: Bilinearna interpolacija: (a) crvena točka x određena je kontinuiranom silom napinjanja T i uzorkom uzgonskih tankova B , dok su plave točke definirane najbližim diskretiziranim vrijednostima sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova, (b) primjer bilinearne interpolacije za poznate vrijednosti $f(0,0) = 2$, $f(0,1) = 1.7$, $f(1,0) = 1.2$ i $f(1,1) = 1.9$

Zbog detaljnijeg praćenja optimizacijskog procesa, a uzimajući u obzir izraz (4.15), linearna interpolacija (5.19) može se rastaviti na interpolirane ocjene ciljeva i penale. Ove veličine su već uračunate u vrijednost funkcije cilja temeljene na izrazu (5.19) te sa stanovišta optimizacijskog algoritma nema potrebe za njihovim zasebnim računanjem, ali pružaju dodatni uvid u konvergenciju optimizacijske metode.

Interpolirana ocjena ciljeva može se, analogno izrazu (5.19), izračunati kao:

$$\begin{aligned} \tilde{O}(\mathbf{x}) = & \frac{O(\mathbf{x}_{11})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T_2 - T)(B_2 - B) + \\ & \frac{O(\mathbf{x}_{21})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T - T_1)(B_2 - B) + \\ & \frac{O(\mathbf{x}_{12})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T_2 - T)(B - B_1) + \\ & \frac{O(\mathbf{x}_{22})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T - T_1)(B - B_1) \end{aligned} \quad (5.20)$$

a interpolirani penali:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\mathbf{x}) = & \frac{P(\mathbf{x}_{11})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T_2 - T)(B_2 - B) + \\ & \frac{P(\mathbf{x}_{21})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T - T_1)(B_2 - B) + \\ & \frac{P(\mathbf{x}_{12})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T_2 - T)(B - B_1) + \\ & \frac{P(\mathbf{x}_{22})}{(T_2 - T_1)(B_2 - B_1)}(T - T_1)(B - B_1) \end{aligned} \quad (5.21)$$

U slučaju optimizacije polaganja u kojoj se ne razmatra postavljanje uzgonskih tankova ili u slučaju da je uzorak uzgonskih tankova smatran nepromjenjiv tj. izuzet iz optimizacijskog vektora interpolacije se vrši samo na temelju funkcije u diskretnih vrijednostima sile napetosti:

$$\tilde{F}(\mathbf{x}) = \frac{F(\mathbf{x}_{11})}{(T_2 - T_1)}(T_2 - T) + \frac{F(\mathbf{x}_{21})}{(T_2 - T_1)}(T - T_1). \quad (5.22)$$

Opisani pristup tretiranja diskretnih varijabli kao kontinuiranih, uz interpolaciju, zahtjeva znatno više simulacija nego što bi bio slučaj kada bi se direktno koristile diskretne varijable. Za n_d diskretnih varijabli potrebno je 2^{n_d} simulacija u diskretnim vrijednostima kako bi se moglo interpolirati rješenje za kontinuiranu vrijednost. Pošto su u problemu optimizacije polaganja samo dvije varijable diskretne, koristite se četiri simulacije za izračun svakog potencijalnog rješenja (ukoliko su uključene obje diskretne optimizacijske varijable).

Iako naizgled višestruko skuplje, provođenje četiri simulacije za dobivanje jednog rješenja je isplativo sa stanovišta učinkovitosti optimizacijske metode. Uvođenjem interpolacije se ovaj mješoviti kombinatorni problem svodi na čisti kontinuirani - koji je u većini slučajeva lakši za rješavanje od kombinatornog problema te omogućuje širi spektar odabira adekvatne optimizacijske metode. PSO metoda, iako postoje varijante za rad s diskretnim varijablama, je idealna upravo za rješavanje kontinuiranih problema.

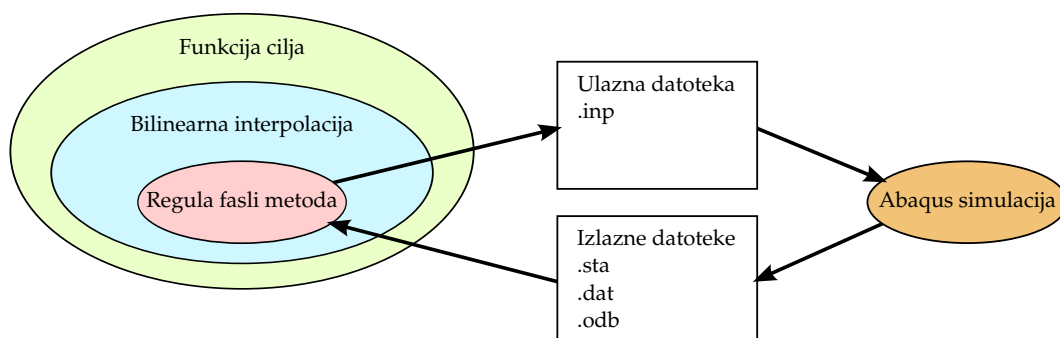
5.3 Implementacija optimizacijskog postupka

Optimizacijski postupak uključuje računanje funkcije cilja, koja svoje rezultate temelji na Abaqus simulacijama polaganja cjevovoda, te hibridni optimizacijski algoritam.

Za potrebe ovog rada, cijeli optimizacijski postupak implementiran je u vlastitom softverskom kodu. Korišten je programski jezik *Python* [60, 57] te modul *NumPy* [73] za lakši rad s matricama i modul *matplotlib* [35] za vizualizaciju rješenja strukturalne analize i vizualizaciju konvergencije optimizacijske metode.

Implementacija funkcije cilja uključuje (Slika 5.7):

- komunikaciju s *Abaqusom* preko ulaznih i izlaznih datoteka,
- *regula falsi* metodu za postizanje ciljane napetosti cijevi na izlazu iz napinjača,
- bilinearnu interpolacijsku metodu za određivanje valjanosti rješenja za kontinuirane varijable sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova.



Slika 5.7: Implementacija funkcije cilja

Zbog što manje potrebe za Abaqus simulacijama, što u konačnici omogućuje manje potrebno vrijeme za izračunavanje funkcije cilja, *regula falsi* metoda kombinirano pronalazi rješenja za obje susjedne diskretne sile napetosti T_1 i T_2 , ali i za stvarnu vrijednost sile napetosti T koja se koristi kao provjera i prikazuje se u vizualizacijama rješenja, međutim nema direktan utjecaj na iznos funkcije cilja. Kombinirano pronalaženje korijena funkcije (2.36) za tri ciljane sile napetosti T , T_1 i T_2 omogućuje korištenje prethodnih koraka metode koji se mogu iskoristiti za sljedeću ciljanu silu te se time smanjuje ukupan broj potrebnih koraka.

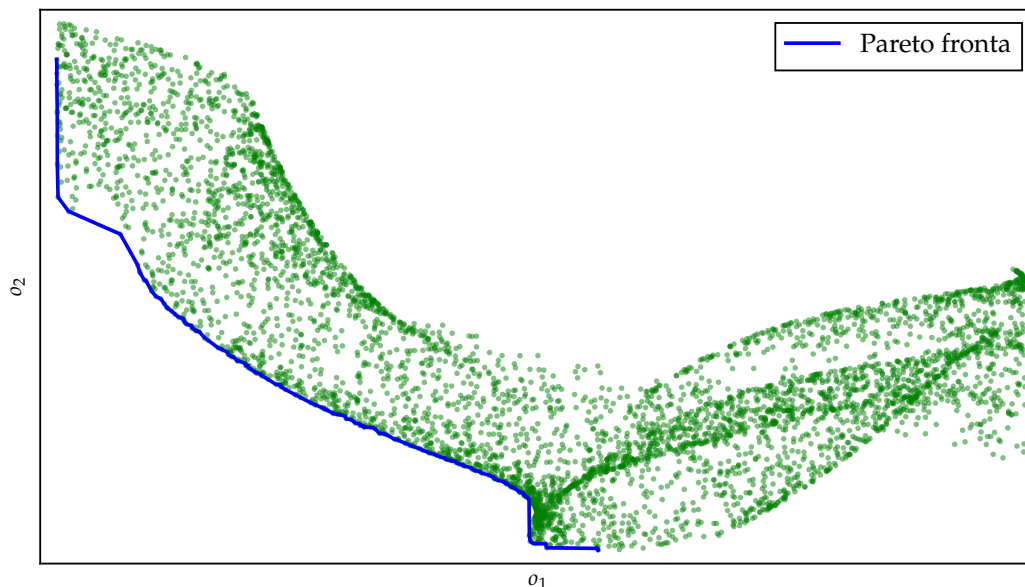
5.4 Pareto optimalnost

Generalno, optimizacijski problemi koji zahtijevaju optimizaciju više ciljeva nemaju jedinstveno rješenje koje postiže optimum svakog od ciljeva. Koncept Pareto optimalnosti, koji je uveo Vilfredo Pareto [61], umjesto jedinstvenog rješenja nudi skup rješenja višeciljnog optimizacijskog problema.

Skup tzv. Pareto-optimalnih rješenja čini Pareto frontu - hiperplohu u prostoru ciljeva optimizacije (Slika 5.8). Rješenje optimizacijskog problema \mathbf{x}^* je Pareto-optimalno rješenje ako ne postoji niti jedno drugo rješenje \mathbf{x} za koje vrijedi

$$o_i(\mathbf{x}) \leq o_i(\mathbf{x}^*), \quad \forall i \quad (5.23)$$

gdje o_i označava i -ti cilj optimizacije. Uvjet (5.23) podrazumijeva da su svi ciljevi minimizacijski.



Slika 5.8: Primjer Pareto fronte u slučaju dva minimizacijska cilja

Pareto fronta vrlo je korisna u inženjerskim optimizacijskim problemima [52, 54]. Pronalaženjem svih Pareto-optimalnih rješenja, tj. pronalaženjem Pareto fronte, može se odabrati finalno rješenje na temelju kompromisa između različitih ciljeva optimizacije. Takav pristup omogućuje promatranje rješenja i odluke u prostoru optimizacijskih ciljeva, bez dodatnih optimizacijskih procedura ili evaluacija ciljeva optimizacije.

U analizi rezultata optimizacije parametara polaganja podmorskih cjevovoda (poglavlje 6) prikazani su grafovi potencijalnih rješenja dobivenih u optimizacijskom procesu u prostoru različitih ciljeva optimizacije. Za svaki set potencijalnih rješenja izračunata je i prikazana Pareto fronta.

REZULTATI OPTIMIZACIJE PARAMETARA POLAGANJA CJEVOVODA

Testiranje i validacija optimizacijskog postupka napravljena je na različitim primjerima polaganja. Svaki primjer okarakteriziran je geometrijom i drugim karakteristikama broda i *stingera*, svojstvima cijevi te ostalim uvjetima polaganja. U testnim primjerima su korišteni različiti brodovi, različite cijevi i dubine polaganja kako bi se evaluiralo optimizacijski postupak na što širem području primjene.

Svi testovi temelje se na A varijanti modela (Poglavlje 2.2) kojom se simulira polaganje cjevovoda na ravno morsko dno koristeći fiksni *stinger*. Napredne značajke modela polaganja (Poglavlje 2.7) nisu korištene u testiranju optimizacijskog procesa jer nemaju bitan utjecaj na formulaciju funkcije cilja i na konvergenciju optimizacijske metode.

6.1 Primjer A

U testnom primjeru A testiran je optimizacijski postupak na problemu polaganja 18-inčne cijevi koja se polaže na dubinu od 68 m. U ovom primjeru nema potrebe za korištenjem uzgonskih tankova pa su oni izuzeti iz vektora optimizacijskih varijabli. Mijenjanje gaza i nagiba broda, čime se postiže preciznija optimizacija, je isto izuzeto iz ovog osnovnog optimizacijskog testnog primjera.

Na ovom primjeru želi se testirati optimizacijski postupak na relativno lakom optimizacijskom problemu gdje se očekuje da optimizacija bude dominantno vođena minimizacijom sile napetosti napinjača. Minimalna napetost napinjača, u ovom slučaju, očekivano bi se trebala postići s obzirom na granični moment savijanja u području *sagbenda*.

6.1.1 Podaci i postavke

U modelu polaganja za testni primjer A korištena je čelična 18-inčna cijev s betonskom oblogom koja je uzeta u obzir i uračunata u ekvivalentna svojstva cijevi (Tablica 6.1). Ograničenje savijanja cijevi je regulirano pomoću dopuštenog momenta savijanja koji se propisuje u području *overbenda* i *sagbenda* te je, u ovom slučaju, jednak za oba područja cjevovoda.

Svojstvo	Vrijednost
Youngov modul, E	265.8 GPa
Poissonov broj, μ	0.3
Vanjski promjer cijevi, D	457.2 mm
Debljina stjenke cijevi, s_p	12.4 mm
Duljina cijevi, l	350 m
Duljina elementa, l_e	1 m
Jedinična težina uronjene cijevi, q_y^-	1070.0 N/m
Dodatna jedinična težina neuronjene cijevi, q_y^+	2430.0 N/m
Dubina mora, H	68.0 m
Maksimalni dopušteni moment savijanja u <i>overbendu</i> , M_{dop}^o	627350 Nm
Maksimalni dopušteni moment savijanja u <i>sagbendu</i> , M_{dop}^s	627350 Nm

Tablica 6.1: Primjer A: Svojstva cijevi i ostali parametri

U ovom primjeru polaganja korišten je brod s tri valjkasta oslonca i maksimalnom silom napinjača od 400 kN na koji je priključen *stinger* duljine 65 m sa 6 valjkastih oslonaca (Tablica 6.2). Optimizacijska varijabla kuta *stingera* je ograničena na $\alpha_s \in [10^\circ, 30^\circ]$.

Odabrani raspon od oko 5 m za visine valjkastih oslonaca je vrlo velik u odnosu na stvarnu opremu koja se koristi u polaganju gdje su rasponi visine valjkastih oslonaca reda veličine 1 do 2 m. Povećani raspon visina oslonaca povećava prostor pretraživanja i time otežava optimizacijski problem, dok s druge strane omogućuje veću fleksibilnost i mogućnost postizanja optimalne konfiguracije.

Brod	x [m]	y, y_{\min} [m]	y_{\max} [m]	R_{\max} [kN]
Napinjač	0.0	5.80		300
Valjkasti oslonac 1	11.0	0.10	5.00	300
Valjkasti oslonac 2	22.0	0.10	5.00	300
Valjkasti oslonac 3	33.0	0.05	3.00	250
Zglob broda	36.0	-2.00		
Minimalna sila napinjanja	100 kN			
Maksimalna sila napinjanja	1000 kN			
Preciznost sile napinjanja	50 kN			
<i>Stinger</i>	x [m]	y, y_{\min} [m]	y_{\max} [m]	R_{\max} [kN]
Zglob <i>stingera</i>	0.0	0.00		
Valjkasti oslonac 1	8.0	0.10	5.00	250
Valjkasti oslonac 2	19.0	0.10	5.00	250
Valjkasti oslonac 3	30.0	0.10	5.00	250
Valjkasti oslonac 4	41.0	0.10	5.00	250
Valjkasti oslonac 5	52.0	0.10	5.00	250
Valjkasti oslonac 6	62.0	0.10	5.00	250
Vrh <i>stingera</i>	65.0	0.00		
Minimalni kut <i>stingera</i>	10°			
Maksimalni kut <i>stingera</i>	30°			

Tablica 6.2: Primjer A: Osnovni parametri broda i *stingera*

Pri formulaciji funkcije cilja korišteni su parametri dani u tablici 6.3. Na temelju vrijednosti težinskih faktora vidljivo je da dominira cilj minimizacije sile napetosti koji je prioritetni u odnosu na ostale ciljeve. Kao što je ranije navedeno, u ovom testnom primjeru ne razmatra se korištenje uzgonskih tankova pa je i težinski faktor cilja minimizacije gustoće postavljena uzgonskih tankova jednak nuli. Valja uočiti relativno velike vrijednosti težinskih faktora pomoćnih ciljeva, koji omogućuju brzu i stabilnu konvergenciju optimizacijskog algoritma.

Težinski faktor	Vrijednost
Uzgonski tankovi, γ_B	0.00
Sila napetosti, γ_T	0.63
<i>Overbend</i> moment savijanja, γ_{M_o}	0.05
<i>Sagbend</i> moment savijanja, γ_{M_s}	0.02
Udaljenost cijevi od valjkastih oslonaca, γ_d	0.10
Standardna devijacija momenta savijanja iznad oslonaca, $\gamma_{M_{dev}}$	0.15
Momenta savijanja iznad zadnjeg oslonaca, $\gamma_{M_{ns}}$	0.05

Tablica 6.3: Primjer A: Parametri funkcije cilja

Parametri optimizacijske metode prikazani su u tablici 6.4. Korišten je relativno mali faktor inercije ω koji omogućuje nešto bržu konvergenciju metode. Koeficijentima r_δ regulirana je upotreba dodatnih pomaka u modificiranoj PSO metodi, a dodatni pomak δ_3 , koji omogućava prilagodbu uzorka uzgonskih tankova i sile napinjača, je isključen pošto se u danom primjeru ne razmatra upotreba uzgonskih tankova.

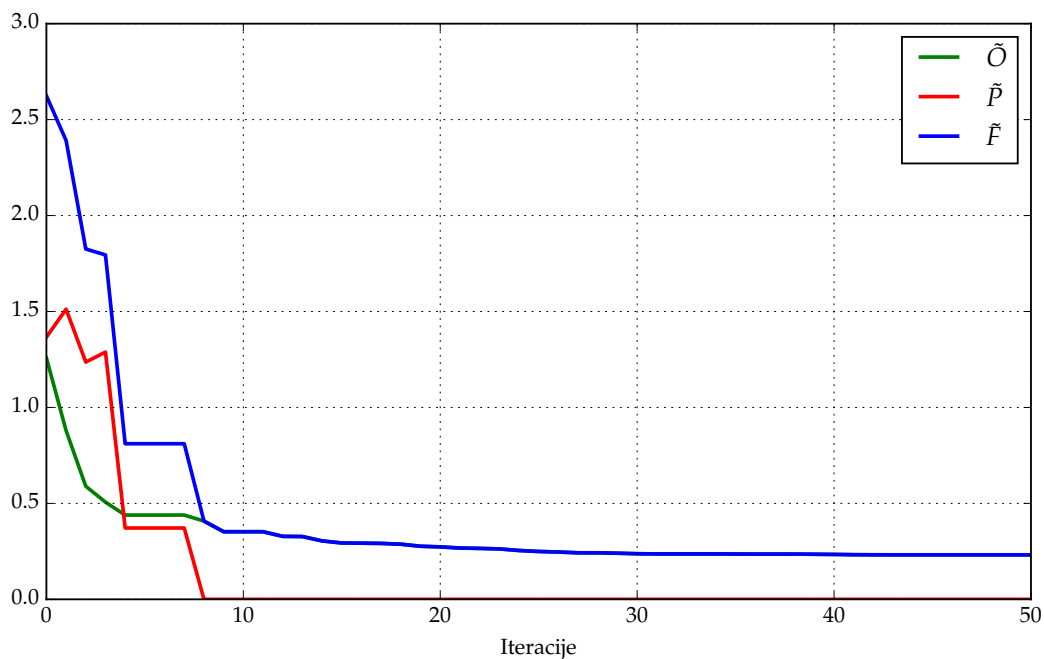
Parametar	Vrijednost
Veličina roja, s	16
Faktor inercije, ω	0.3
Kognitivni faktor, c_c	1.0
Socijalni faktor, c_s	1.0
r_{δ_1}	0.6
r_{δ_2}	0.4
r_{δ_3}	0.0
t_λ	20
Broj iteracija	50

Tablica 6.4: Primjer A: Parametri optimizacijske metode

6.1.2 Rezultati

Optimizacijski problem polaganja, određen gore navedenim parametrima, uspješno je riješen predloženom optimizacijskom metodom unutar specificiranog broja iteracija. Konvergencija optimizacijske metode, promatrana minimizacijom prikladnosti (eng. *fitness*) i njenih komponenata: ocjene ciljeva i penala, prikazana je na slici 6.1.

Vidljivo je da je već u osmoj iteraciji postignuto izvedivo rješenje koje zadovoljava sva postavljena ograničenja, pa je i iznos kažnjavanja jednak nuli. U nastavku optimizacijskog procesa, do posljednje pedesete iteracije, minimizira se samo ocjena ciljeva. Zbog očite stagnacije ocjene ciljeva optimizacije \tilde{O} , može se zaključiti da je metoda postigla gotovo idealno rješenje te da je pedeset iteracija metode primjereno za rješavanje ovog slučaja polaganja.



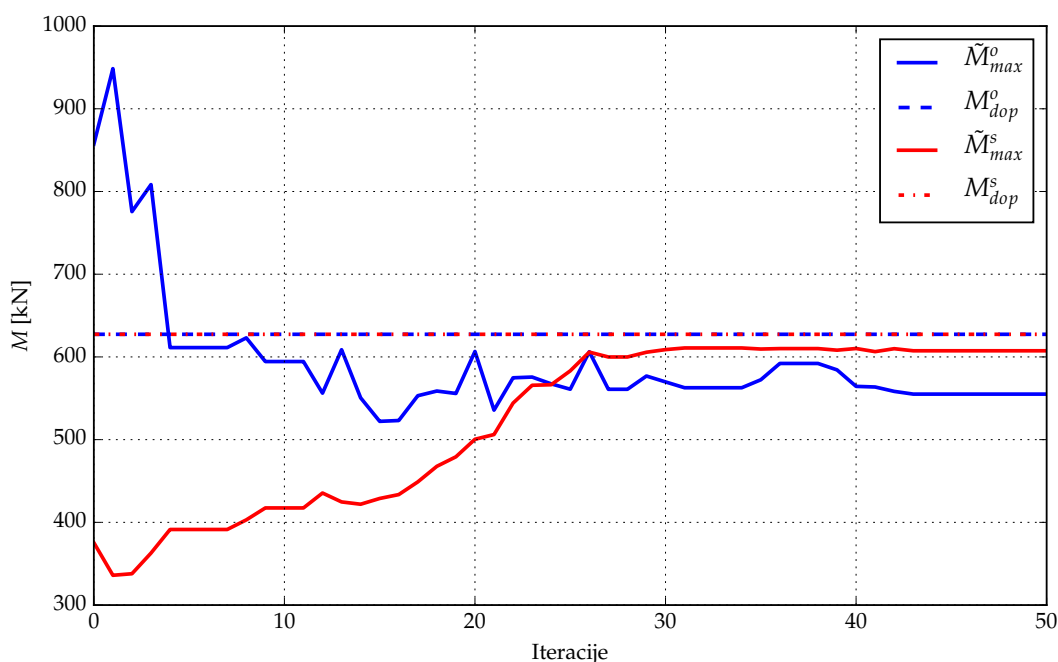
Slika 6.1: Primjer A: Konvergencija

Na slici 6.2 prikazana je promjena maksimalnog apsolutnog momenata savijanja u području *overbenda* i *sagbenda* za najbolje rješenje tijekom iteracija PSO metode. Ova dva promatrana cilja su ujedno i ograničenja optimizacijskog problema te dominantno određuju tijek i konvergenciju optimizacijskog postupka.

Prikazani momenti dobiveni interpolacijom rješenja simulacija za diskretne sile napinjača T_1 i T_2 . Interpolirane vrijednosti momenata savijanja ne pružaju cjelokupnu sliku o time kriterijima te je potrebna pažljiva in-

terpretacija ovih vrijednosti. Primjerice, interpolirana vrijednost može biti manja od najveće dopuštene vrijednosti momenta savijanja, a da je pri tome jedna od diskretnih vrijednosti veća od najveće dopuštene (kao što je slučaj za \tilde{M}_{max}^o od četvrte do sedme iteracije u grafu na slici 6.2).

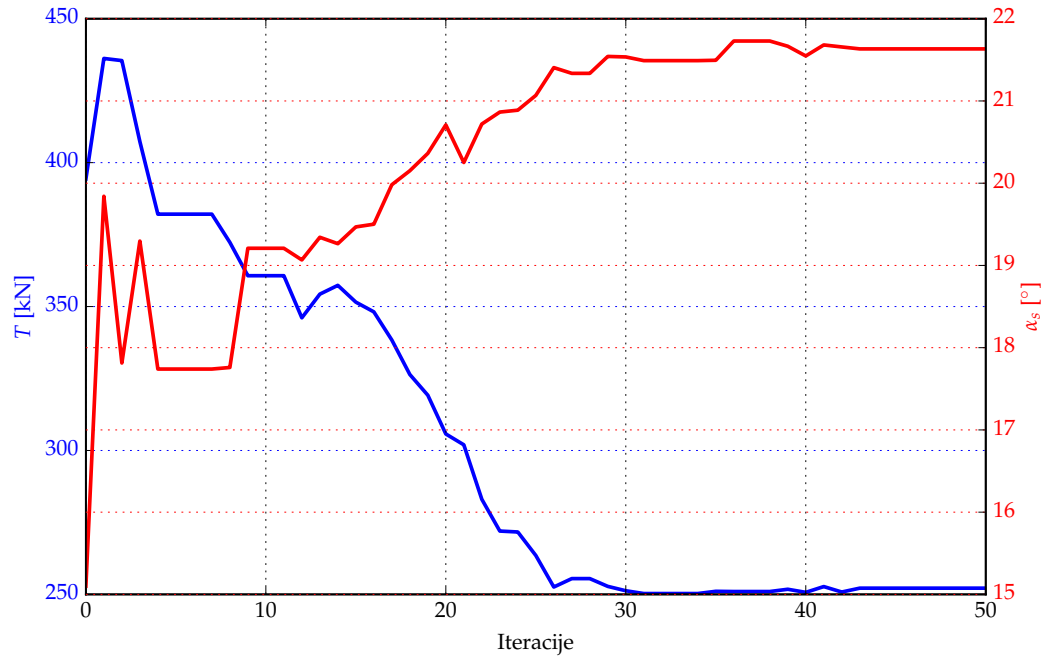
U prvom dijelu optimizacijskog postupka, vidljivo je da je maksimalni moment savijanja u području *overbenda* kritičniji od onoga u području *sagbenda*, što je razumljivo s obzirom da je pod utjecajem svih varijabli, pa teže postići zadovoljavajuće rješenje. Maksimalni apsolutni moment u *sagbendu* dominantno je određen samo silom napinjača i to je ograničenje lako zadovoljeno već u inicijalnom koraku metode.



Slika 6.2: Primjer A: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području *overbenda* i *sagbenda*

Interesantno je promatrati optimizacijske varijable najboljeg rješenja tijekom iteracija PSO metode, a posebice najutjecajnijih varijabli sile napinjača te kuta *stingera*. Korelacija sile napinjača i kuta *stingera*, uočena u analizi osjetljivosti u poglavlju 4.5, se potvrđuje i u optimizacijskom procesu što je vidljivo na slici 6.3. Moment savijanja u području *sagbenda* (Slika 6.2) je dominantno i gotovo isključivo pod utjecajem sile napetosti te je njegova promjena u PSO iteracijskom procesu obrnuto proporcionalna promjeni sile napinjača T.

Vrijednost sile napetosti T je, prema očekivanju, konvergirala ka diskretnoj vrijednosti što omogućuje zaokruživanje napetosti finalnog rješenja bez bitnih posljedica na postavljene ciljeve i ograničenja ovog slučaja polaganja.

Slika 6.3: Primjer A: Sila napetosti i kut *stingera*

Finalne vrijednosti optimizacijskog vektora (Tablica 6.5), postignute nakon pedeset iteracija PSO metode, predstavljaju rješenja optimizacijskog problema polaganja. Dobivene vrijednosti optimizacijskih varijabli pronađene su u kontinuiranom prostoru pretraživanja, a diskretna rješenja dobivena su zaokruživanjem s obzirom na preciznosti danima u tablici 4.1.

Zaokruživanje varijabli je potpuno opravdano zbog vrlo male promjene konfiguracije tj. rješenja optimizacije te producira zanemarivo malu promjenu u rješenjima simulacije polaganja cjevovoda.

Varijabla	Kontinuirana vrijednost	Diskretna vrijednost
Sila napinjača, T	$2.52166777e+05$ N	250 kN
Kut <i>stingera</i> , α_s	$2.16329799e+01$ °	21.633 °
h_1	$4.70990675e+00$ m	4.710 m
h_2	$3.09500076e+00$ m	3.095 m
h_3	$9.08473552e-01$ m	0.908 m
h_4	$3.12575212e+00$ m	3.126 m
h_5	$3.95208987e+00$ m	3.952 m
h_6	$4.23758239e+00$ m	4.238 m
h_7	$3.99909954e+00$ m	4.000 m
h_8	$3.23176195e+00$ m	3.231 m
h_9	$2.06363617e+00$ m	2.064 m

Tablica 6.5: Primjer A: Rješenje optimizacijskog problema

Rezultati simulacije polaganja cjevovoda za finalno kontinuirano rješenje (Tablica 6.5) prikazani su na slici 6.4. Na grafovima su, uz rješenje za kontinuiranu silu T , dodatno prikazana rješenja za dvije susjedne diskretne sile napetosti T_1 i T_2 .

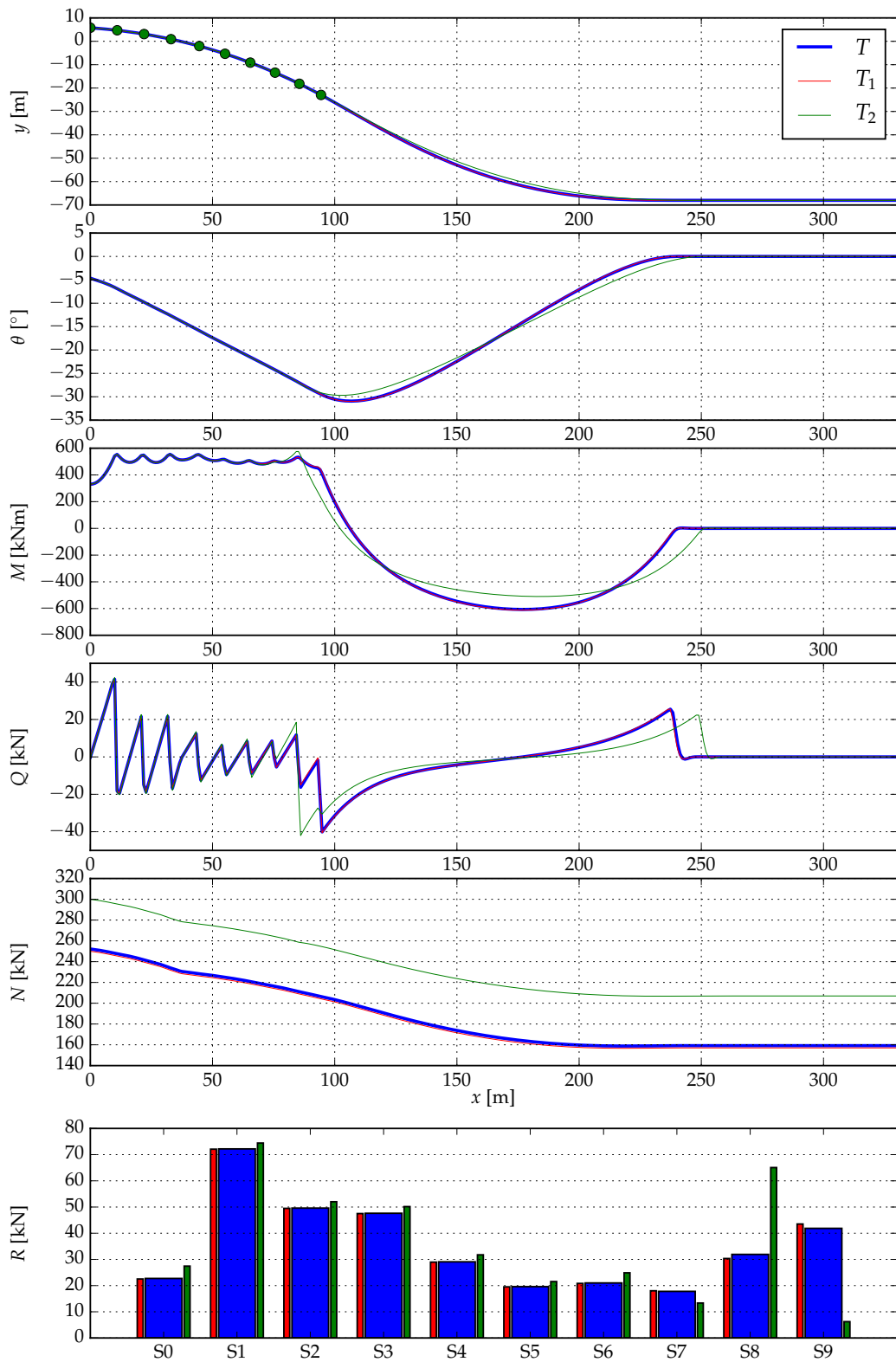
Maksimalni apsolutni moment savijanja u području *overbenda* iznosi 554.1 kNm, a u području *sagbenda* iznosi 611.8 kNm što zadovoljava zadana ograničenja momenta savijanja za ovaj primjer polaganja cjevovoda. Također, ograničenje maksimalnih dozvoljenih sila reakcija valjkastih oslonaca je zadovoljeno.

Modificirana PSO metoda pronašla je najnižu moguću diskretnu silu napinjača koja zadovoljava kriterij momenta savijanja u području *sagbenda*, dok je u području *overbenda* varirajući kut *stingera* i visine valjkastih oslonaca pronađena gotovo idealna konfiguracija što je vidljivo po gotovo konstantnoj krivulji momenta savijanja u području *overbenda*.

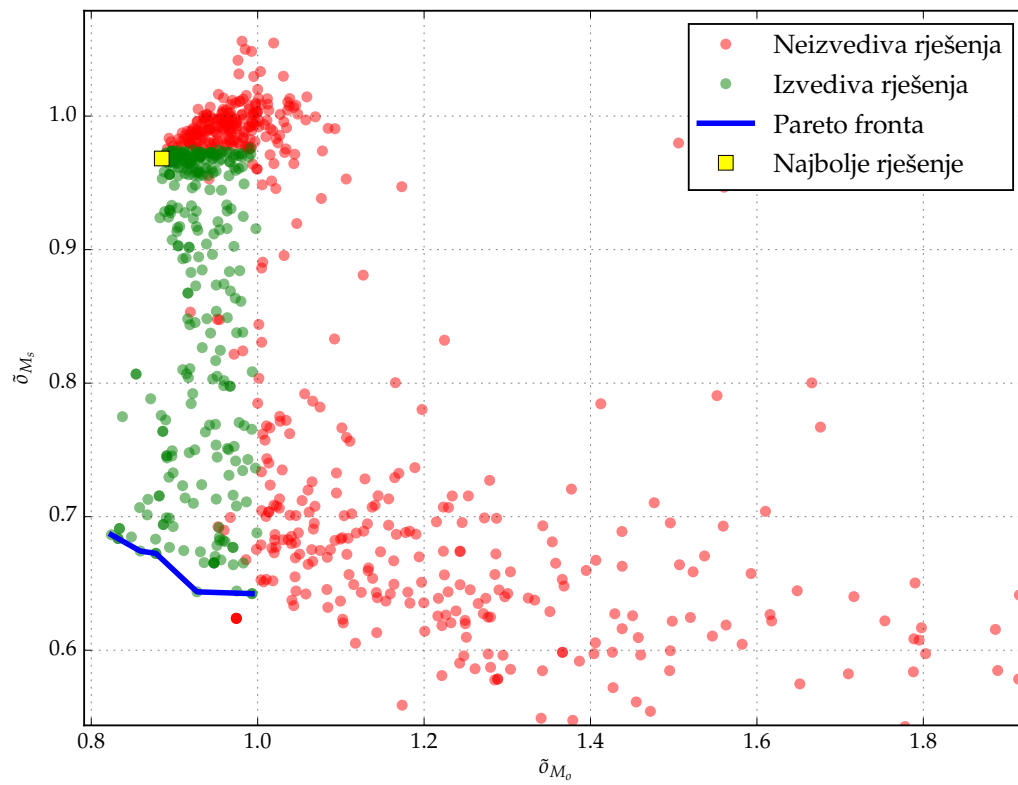
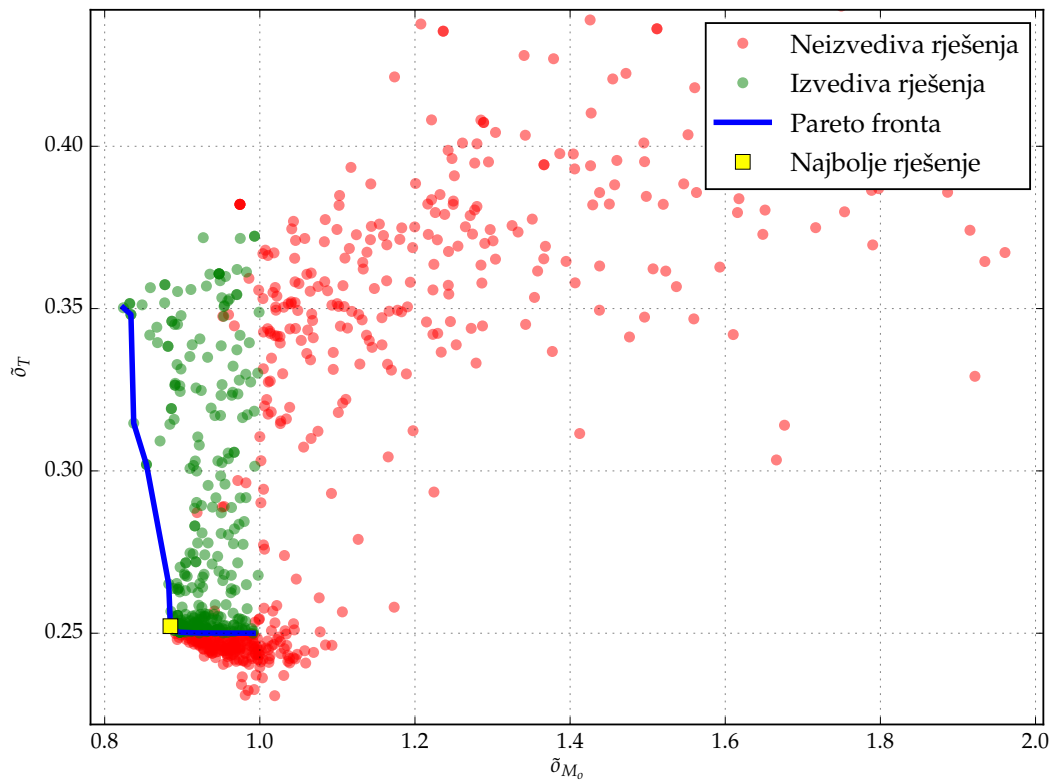
Za sve konfiguracije polaganja, producirane kao potencijalna rješenja u optimizacijskom postupku, ispitana je i vizualizirana Pareto optimalnost. Na slikama 6.5 i 6.6 promatrana su rješenja u prostoru ciljeva optimizacijskog postupka. Prikazane Pareto fronte dobivene su samo za parove promatranih ciljeva te su neovisne o ostalim ciljevima ovog slučaja polaganja podmorskih cjevovoda. Samo su izvediva rješenja uzeta u obzir pri određivanju Pareto fronte. Na grafovima su crvenim točkama prikazane neizvediva rješenja, zelenim točkama izvediva rješenja, a žuti kvadratni marker označava finalno rješenje optimizacijskog postupka. Plava linija spaja Pareto optimalna rješenja i predstavlja Pareto frontu.

Na slici 6.5 su vidljive granice između izvedivih i neizvedivih rješenja, definirane dopuštenim momentom savijanja za koji su ciljevi $\bar{\sigma}_{M_s}$ i $\bar{\sigma}_{M_o}$ jednaki 1. $\bar{\sigma}_{M_s}$ nema tako jasno istaknutu granicu jer je ograničenje momenta savijanja u području *sagbenda* dominantno pod utjecajem sile napetosti, a za diskretne vrijednosti sile napetosti nemoguće je postići slučaj blizu graničnog dopuštenog momenta savijanja u *sagbendu*. Na prvi pogled iznenađujuće, optimalno rješenje se ne nalazi na Pareto fronti, štoviše, nalazi se na suprotnoj strani skupa izvedivih rješenja. Pošto je u formulaciji funkcije cilja obuhvaćeno više ciljeva različitih prioriteta, a neki su i kontradiktorni, nije nužno da se optimalno rješenje nalazi na Pareto fronti za samo par promatranih ciljeva. Zbog minimizacije sile napetosti napinjača, minimizaciju momenta savijanja u području *sagbenda*, koja je nižeg prioriteta, nije bilo moguće ostvariti.

Najbolje rješenje nalazi se na Pareto fronti za ciljeve $\bar{\sigma}_{M_o}$ i $\bar{\sigma}_T$ (Slika 6.6) i vidljivo je da je najbolje rješenje postignuto gotovo idealno sa stanovišta oba promatrana cilja.



Slika 6.4: Primjer A: Graf rješenja simulacije polaganja za najbolje rješenje

Slika 6.5: Primjer A: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_{M_s} Slika 6.6: Primjer A: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_T

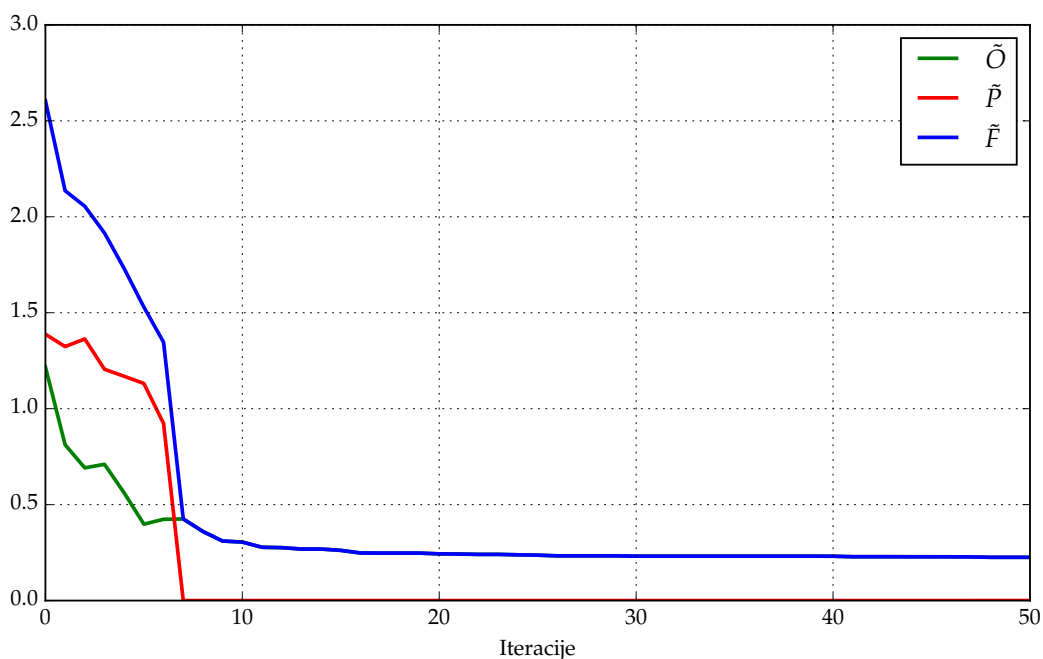
6.2 Primjer B

U primjeru B rješava se problem određivanja parametara polaganja za iste uvjete kao i u primjeru A, ali je u svrhu dobivanja bolje konfiguracije polaganja omogućena promjena nagiba i gaza broda.

Podaci o parametrima broda i *stingera* dani su u tablici 6.2, svojstva cijevi dana su u tablici 6.1, parametri funkcije u tablici 6.3 a parametri optimizacijske metode u tablici 6.4. Optimizacijska varijabla nagiba broda ograničena je na interval $\alpha_b \in [0^\circ, 2.0^\circ]$ dok je promjena gaza ograničena na $u_y^b \in [-0.5\text{m}, 2\text{m}]$.

6.2.1 Rezultati

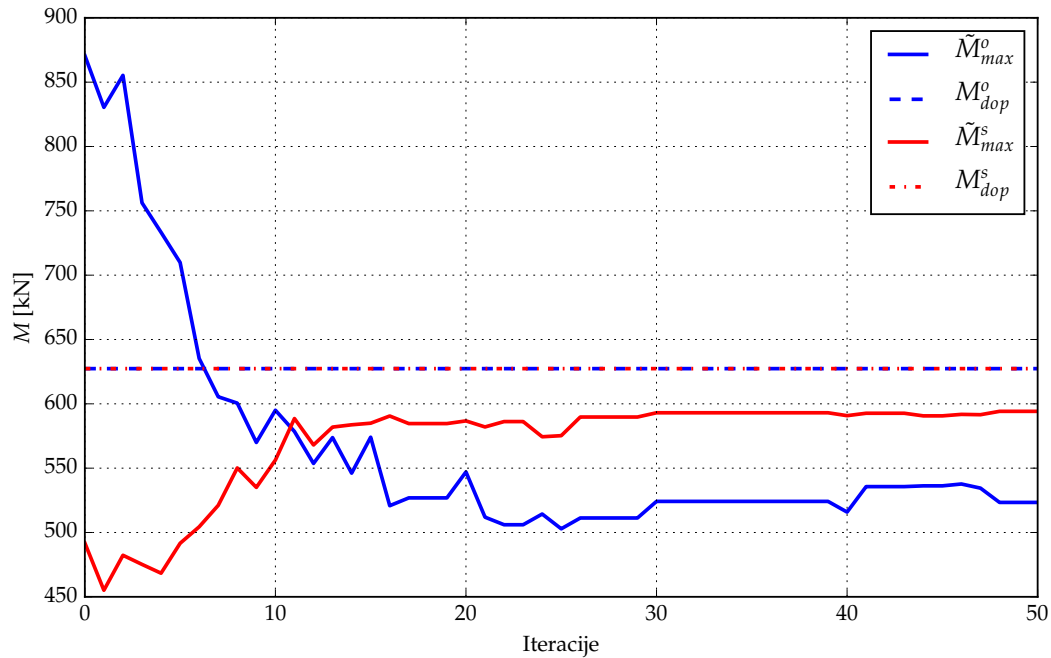
Očekivano, zbog malog utjecaja varijabli promjene gaza i nagiba broda, konvergencija PSO metode (Slika 6.7) je slična kao i u primjeru A. Izvediva konfiguracija je postignuta u početnim koracima metode te se u nastavku vrši optimizacija zadanih ciljeva.



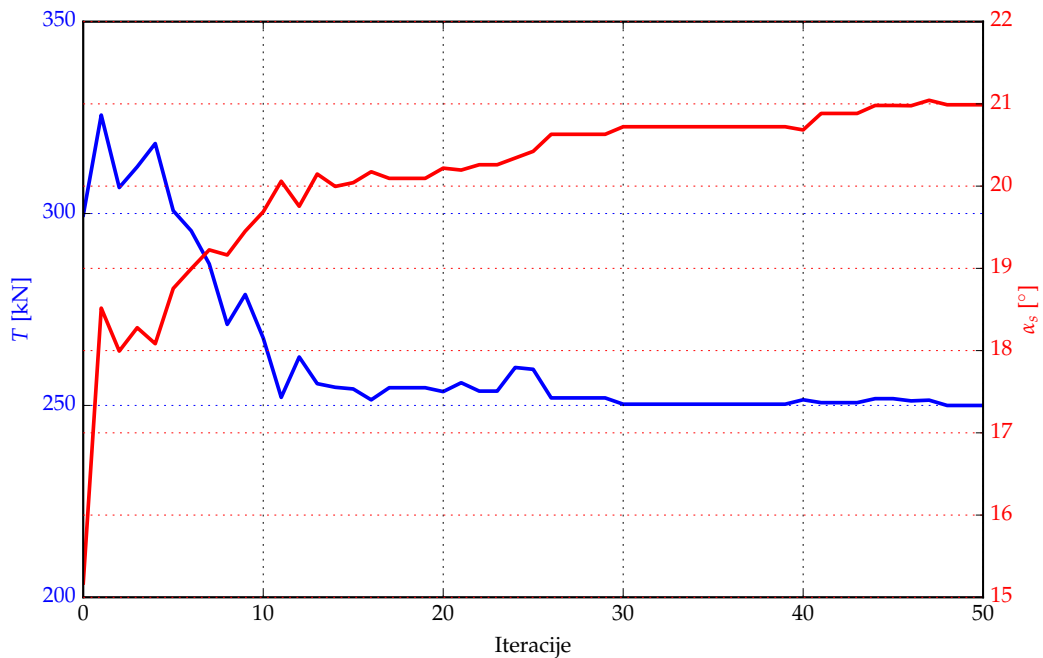
Slika 6.7: Primjer B: Konvergencija

Kao i graf konvergencije ocjene ciljeva i kazni, ni graf momenata savijanja tijekom iteracija optimizacijske metode (Slika 6.8) se značajno ne razlikuje od onoga za primjer A optimizacije polaganja cjevovoda. Iako su trendovi promjene momenata savijanja gotovo identični, u primjeru B su postignute vrijednosti momenata niže nego u primjeru A. Vrijednost sile napetosti je

ponovno konvergirala ka diskretnoj vrijednosti od 250 kN (Slika 6.9) dok je postignuti kut *stingera* nešto manji od onoga u primjeru A zbog prilagodbe drukčijem nagibu i gazu broda cjevopolagača.



Slika 6.8: Primjer B: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području *overbenda* i *sagbenda*



Slika 6.9: Primjer B: Sila napetosti i kut *stingera*

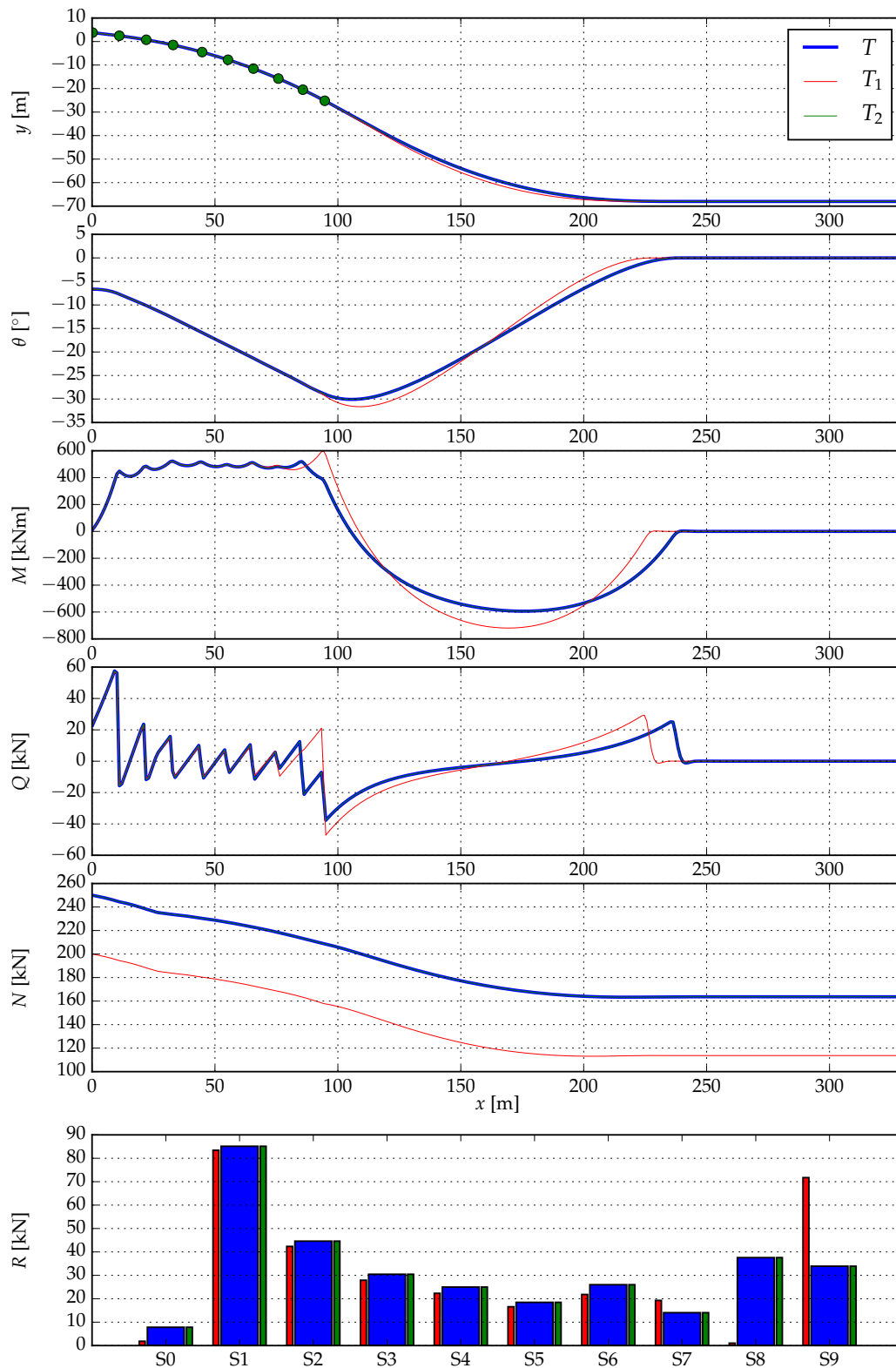
Dobiveno rješenje, tj. konfiguracija parametara polaganja (Tablica 6.6) se za razliku od promatranih ciljeva i ograničenja, značajno razlikuje od rješenja za primjer A. Zbog uvođenja dvije dodatne optimizacijske varijable, ostale varijable su postigle vrijednosti koje su prilagođene izmijenjenom gazu i nagibu broda, a koje daju optimalnu konfiguraciju polaganja. Očekivano, gaz i nagib broda su povećani do svojih maksimalnih vrijednosti kako bi se smanjilo savijanje cijevi u području *overbenda*.

Varijabla	Kontinuirana vrijednost	Diskretna vrijednost
Sila napinjača, T	2.49987743e+05 N	250 kN
Kut broda, α_b	2.00000000e+00 °	2.0 °
Promjena gaza broda, u_y^b	1.99992032e+00 m	2 m
Kut <i>stingera</i> , α_s	2.09892334e+01 °	20.989°
h_1	4.85208979e+00 m	4.852 m
h_2	3.52018973e+00 m	3.520 m
h_3	1.68889116e+00 m	1.689 m
h_4	3.89547502e+00 m	3.895 m
h_5	4.61104695e+00 m	4.611 m
h_6	4.80677171e+00 m	4.807 m
h_7	4.48053480e+00 m	4.481 m
h_8	3.64387095e+00 m	3.644 m
h_9	2.43236834e+00 m	2.532 m

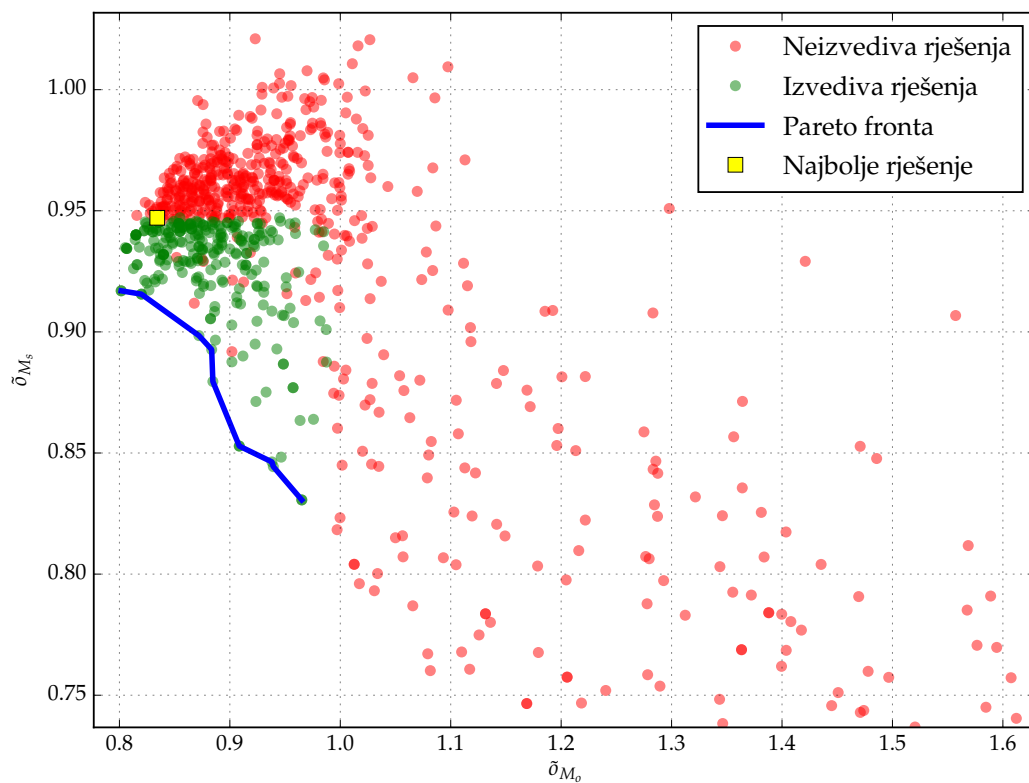
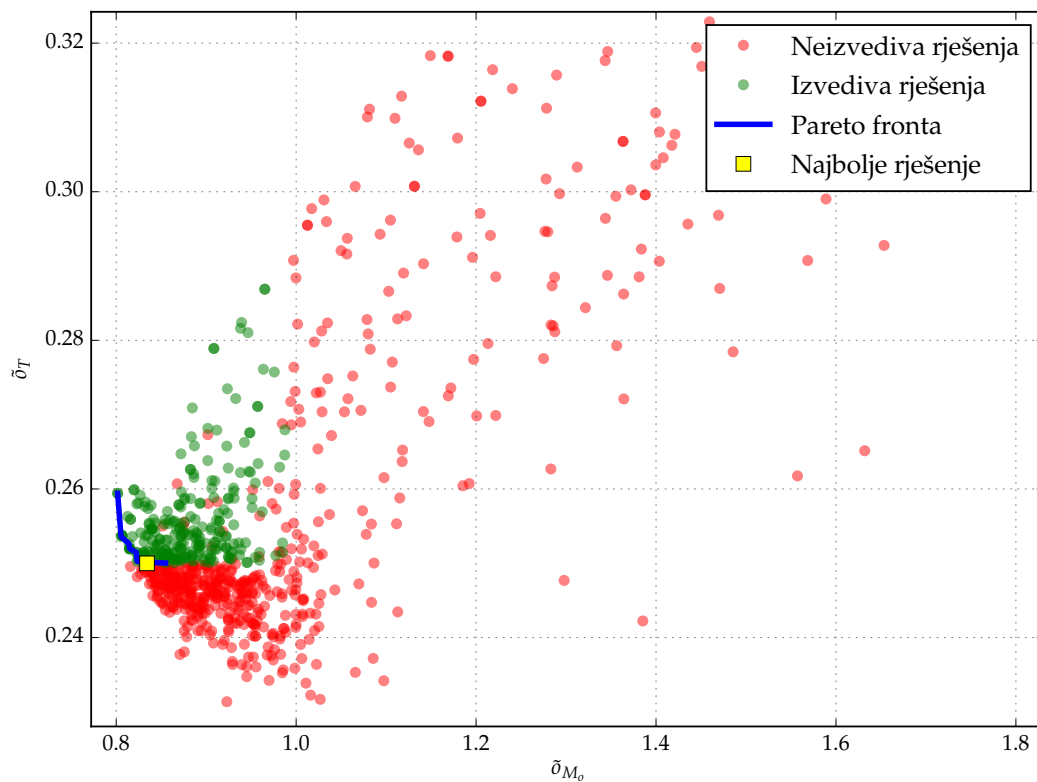
Tablica 6.6: Primjer B: Rješenje optimizacijskog problema

Detaljnijom analizom rezultata simulacije polaganja cjevovoda s optimalnom konfiguracijom parametara (Slika 6.10) može se zaključiti da je postignuto rješenje bolje od onoga dobiveno za primjer A. Maksimalni moment savijanja u *overbendu* iznosi 523.4 kNm što je za oko 5.5% manje nego u primjeru A, a u *sagbendu* 594.1 kNm što je za oko 3% manje od optimalnog rješenja u primjeru A. Vrlo je teško postići značajnije poboljšanje zbog malog utjecaja promjene gaza i nagiba broda, a to se posebno odnosi na savijanje u području *sagbenda* koje je pod dominantnim utjecajem sile napetosti.

Pareto fronte za sve konfiguracije parametara polaganja dobivene u optimizacijskom postupku su prikazane na slikama 6.11 i 6.12. Za razliku od primjera A, valja uočiti da puno uža područja ciljeva $\bar{\delta}_{M_s}$ i $\bar{\delta}_T$ što ukazuje na to da je relativno rano postignuto rješenje blisko finalnoj optimalnoj konfiguraciji parametara polaganja. To se prvenstveno odnosi na silu napetosti T , koja ima značajni utjecaj upravo na dva navedena cilja optimizacije.



Slika 6.10: Primjer B: Graf rješenja simulacije polaganja za najbolje rješenje

Slika 6.11: Primjer B: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_{M_s} Slika 6.12: Primjer B: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_T

6.3 Primjer C

U primjeru C testira se optimizacija parametara polaganja podmorskih cjevovoda uz upotrebu uzgonskih tankova. Za razliku od prethodna dva primjera, zbog uvođenja optimizacijske varijable uzorka uzgonskih tankova koja ima veliki utjecaj na rezultate simulacije polaganja, ovo je znatno teži optimizacijski problem. Testiranje optimizacije konfiguracije polaganja s upotrebom uzgonskih tankova potrebno je provesti na slučaju polaganja u kojem nije moguće ostvariti izvedivo rješenje samo s napetošću cijevi te oslanjanjem cijevi na valjkaste oslonce.

Sa stanovišta optimizacije, ovaj primjer predstavlja iznimno težak problem zbog niza čimbenika koji nepovoljno utječu prvenstveno na ograničenja problema, a time i na konvergenciju optimizacijske metode.

6.3.1 Podaci i postavke

Za ovaj primjer, korištena je cijev (Tablica 6.7) relativno velikog promjera (31.26 inča) koja je obložena s betonskom oblogom od 60 mm što joj daje veliku jediničnu težinu. Zbog konzervativnosti kriterija, betonska obloga nije uzeta u obzir pri proračunu maksimalnog dopuštenog momenta savijanja koji je vrlo nizak za tako tešku cijev [11].

Za polaganje cjevovoda na morsko dno na dubini od 73.5 metara nije moguće postići izvedivu konfiguraciju bez postavljanja uzgonskih tankova na cijev. Uzgon predviđenih tankova iznosi 21.582 kN (2.2 tone).

Svojstvo	Vrijednost
Youngov modul, E	239.9 GPa
Poissonov broj, μ	0.3
Vanjski promjer cijevi, D	794 mm
Debljina stjenke cijevi, s_p	16 mm
Duljina cijevi, l	350 m
Duljina elementa, l_e	2.44 m
Jedinična težina uronjene cijevi, q_y^-	2430.0 N/m
Dodatna jedinična težina neuronjene cijevi, q_y^+	6960.0 N/m
Dubina mora, H	73.5 m
Maksimalni dopušteni moment savijanja u <i>overbendu</i> , M_{dop}^o	2080.0 kNm
Maksimalni dopušteni moment savijanja u <i>sagbendu</i> , M_{dop}^s	2080.0 kNm
Uzgon tankova, U_B	21.582 kN

Tablica 6.7: Primjer C: Svojstva cijevi i ostali parametri

Za simulacije polaganja cjevovoda, u ovom primjeru, korišten je brod cjevopolagač i *stinger* prema dimenzijama i karakteristikama danima u tablici 6.8. Karakteristično za odabranu kombinaciju broda i *stingera* je izrazito neuniforman razmak valjkastih oslonaca koji dodatno otežava optimizaciju konfiguracije polaganja. Posebno je zahtjevno usklađivanje visina oslonaca na brodu, koji su u prosjeku razmaknuti samo oko deset metara, pa imaju snažan utjecaj na savijanje cijevi iznad susjednih oslonaca. Dopusnene reakcije oslonaca nisu jednake za sve oslonce što dodatno otežava postizanje optimalne konfiguracije polaganja.

Brod	x [m]	y, y _{min} [m]	y _{max} [m]	R _{max} [kN]
Napinjač	0.0	5.45		500
Valjkasti oslonac 1	9.5	3.80	5.00	200
Valjkasti oslonac 2	18.5	2.50	4.50	300
Valjkasti oslonac 3	28.2	1.20	3.50	300
Valjkasti oslonac 4	38.8	0.30	2.00	500
Zglob broda	43.3	-1.35		
Minimalna sila napinjanja	500 kN			
Maksimalna sila napinjanja	1350 kN			
Preciznost sile napinjanja	50 kN			
<i>Stinger</i>	x [m]	y, y _{min} [m]	y _{max} [m]	R _{max} [kN]
Zglob <i>stingera</i>	0.0	0.00		
Valjkasti oslonac 1	14.0	1.50	3.50	500
Valjkasti oslonac 2	29.5	1.50	3.50	500
Valjkasti oslonac 3	45.0	1.50	3.50	500
Vrh <i>stingera</i>	65.0	0.00		
Minimalni kut <i>stingera</i>	5°			
Maksimalni kut <i>stingera</i>	35°			

Tablica 6.8: Primjer C: Osnovni parametri broda i *stingera*

Zbog upotrebe uzgonskih tankova, u formulaciji funkcije cilja potrebno je u obzir uzeti i cilj minimizacije korištenja uzgonskih tankova. Potrebno je uskladiti težinske faktore ciljeva optimizacije (Tablica 6.9) u funkciji cilja s obzirom da je minimizacija korištenja uzgonskih tankova, prema poglavlju 4.3, cilj najvišeg prioriteta.

Težinski faktor	Vrijednost
Uzgonski tankovi, γ_B	0.90
Sila napetosti, γ_T	0.053
<i>Overbend</i> moment savijanja, γ_{M_o}	0.005
<i>Sagbend</i> moment savijanja, γ_{M_s}	0.002
Udaljenost cijevi od valjkastih oslonaca, γ_d	0.01
Standardna devijacija momenta savijanja iznad oslonaca, $\gamma_{M_{dev}}$	0.015
Momenta savijanja iznad zadnjeg oslonaca, $\gamma_{M_{ns}}$	0.005

Tablica 6.9: Primjer C: Parametri funkcije cilja

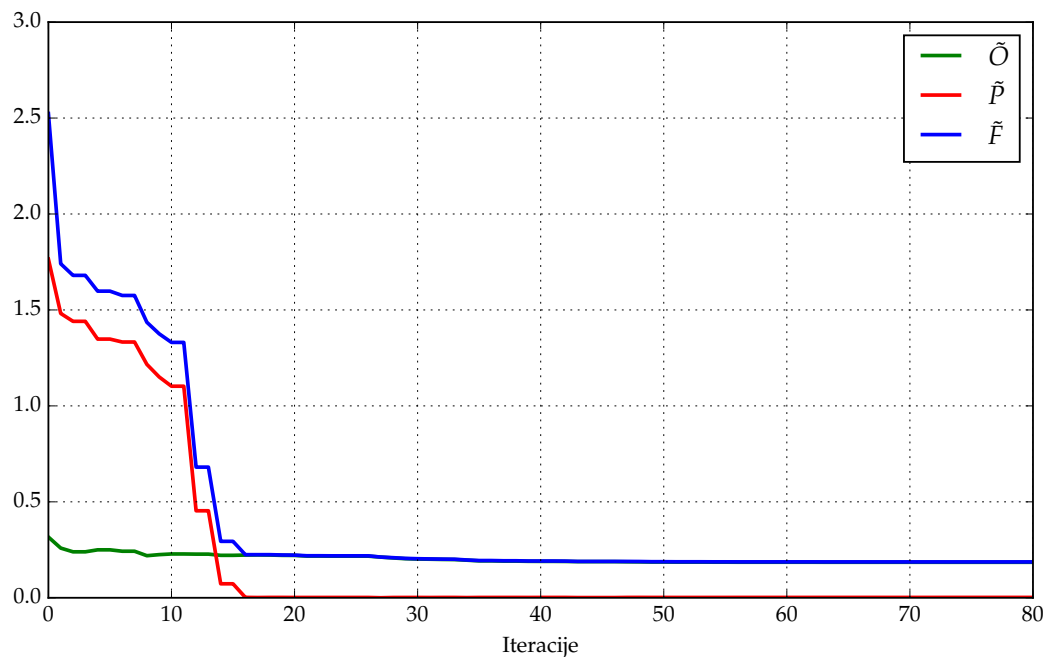
Zbog težine optimizacijskog problema potrebno je odabrati odgovarajuće parametre optimizacijske metode (Tablica 6.10). Kako bi se omogućilo detaljnije pretraživanje povećan je broj čestica u roju na 24, a ukupno 80 iteracija daje omogućuje duže pretraživanje i mogućnost preciznijeg postizanja optimalne konfiguracije parametara polaganja. U ovom slučaju, zbroj vjerojatnosti dešavanja dodatnih pomaka nije jednak jedan - što omogućuje da dio čestica u svakoj iteraciji nema dodatni pomak te se giba prema standardnoj PSO formulaciji gibanja (5.1).

Parametar	Vrijednost
Veličina roja, s	24
Faktor inercije, ω	0.5
Kognitivni faktor, c_c	1.0
Socijalni faktor, c_s	1.0
r_{δ_1}	0.4
r_{δ_2}	0.35
r_{δ_3}	0.05
t_λ	20
Broj iteracija	80

Tablica 6.10: Primjer C: Parametri optimizacijske metode

6.3.2 Rezultati

Na slici 6.13) prikazana je konvergencija optimizacije parametara polaganja za primjer C. Kao i u prethodnim primjerima, izvediva konfiguracija je postignuta vrlo brzo nakon čega slijedi optimizacija zadanih ciljeva, prije svega minimizacija upotrebe uzgonskih tankova.

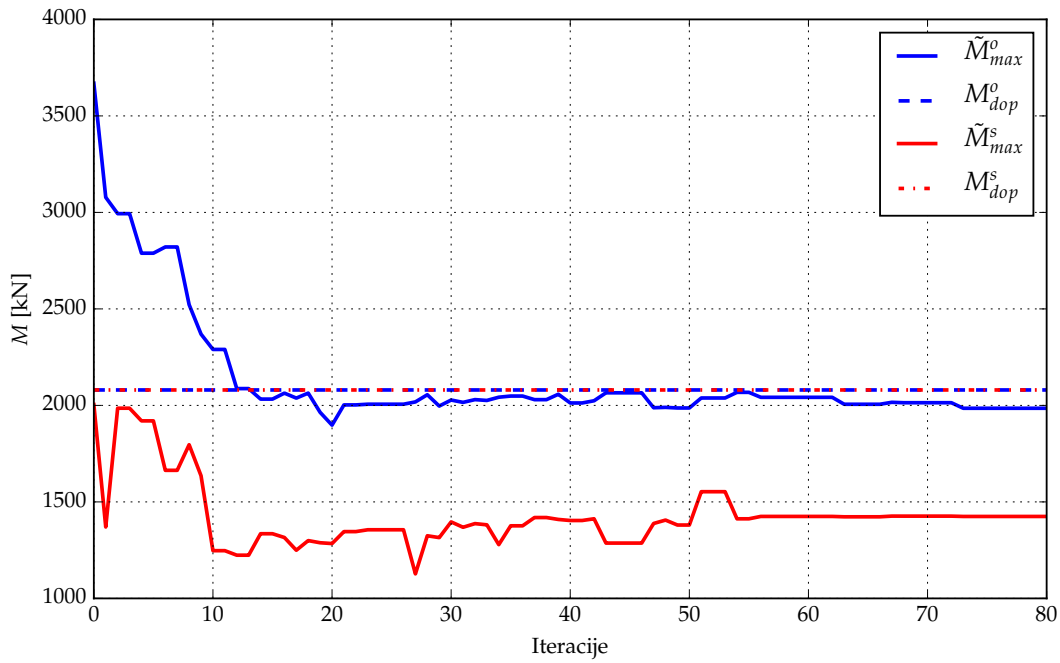


Slika 6.13: Primjer C: Konvergencija

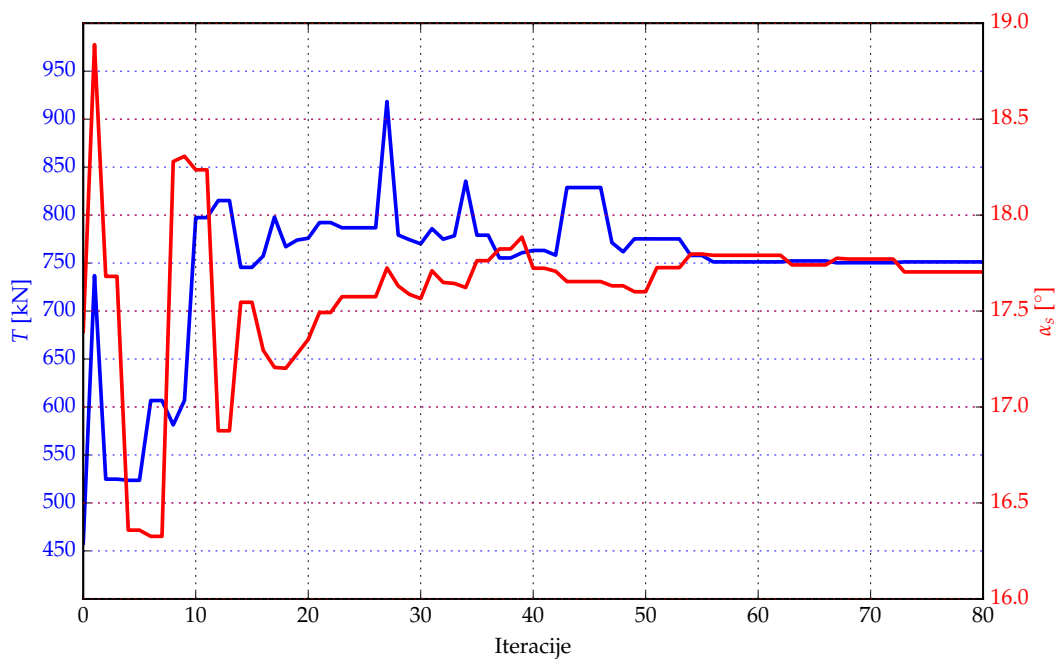
Moment savijanja u *sagbendu* je od početne iteracija ispod maksimalnog dopuštenog momenta zbog utjecaja sile napetosti i zbog korištenja uzgonskih tankova (Slika 6.14).

Vrijednost sile napetosti je konvergirala ka diskretnoj vrijednosti od 750 kN (Slika 6.15), međutim, interesantno je da varijacija kuta, zbog upotrebe uzgonskih tankova, nije obrnuto proporcionalna varijaciji sile napetosti kao u prethodna dva primjera.

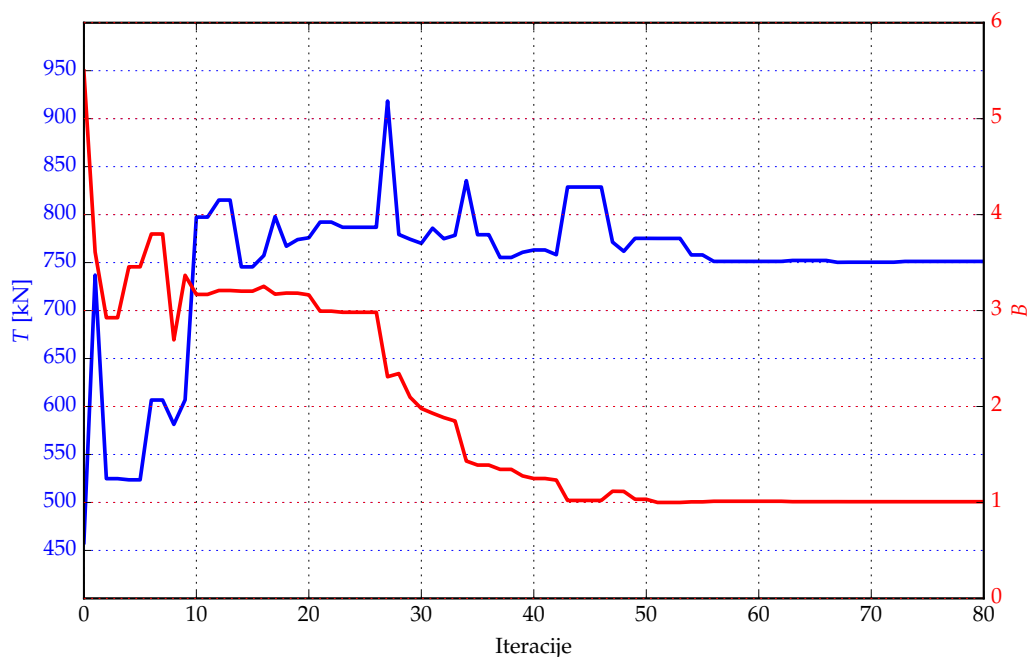
U ovom se primjeru dodatno promatra ponašanje varijable uzorka uzgonskih tankova usporedno sa silom napetosti (Slika 6.16). Može se uočiti da je gotovo svako bitnije smanjenje uzorka uzgonskih tankova popraćeno značajnijim povećanjem sile napetosti. Ovakvo ponašanje producirano je dodatnim pomakom u PSO metodi koji omogućuje adaptaciju sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova.



Slika 6.14: Primjer C: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području *overbenda* i *sagbenda*



Slika 6.15: Primjer C: Sila napetosti i kut *stingera*

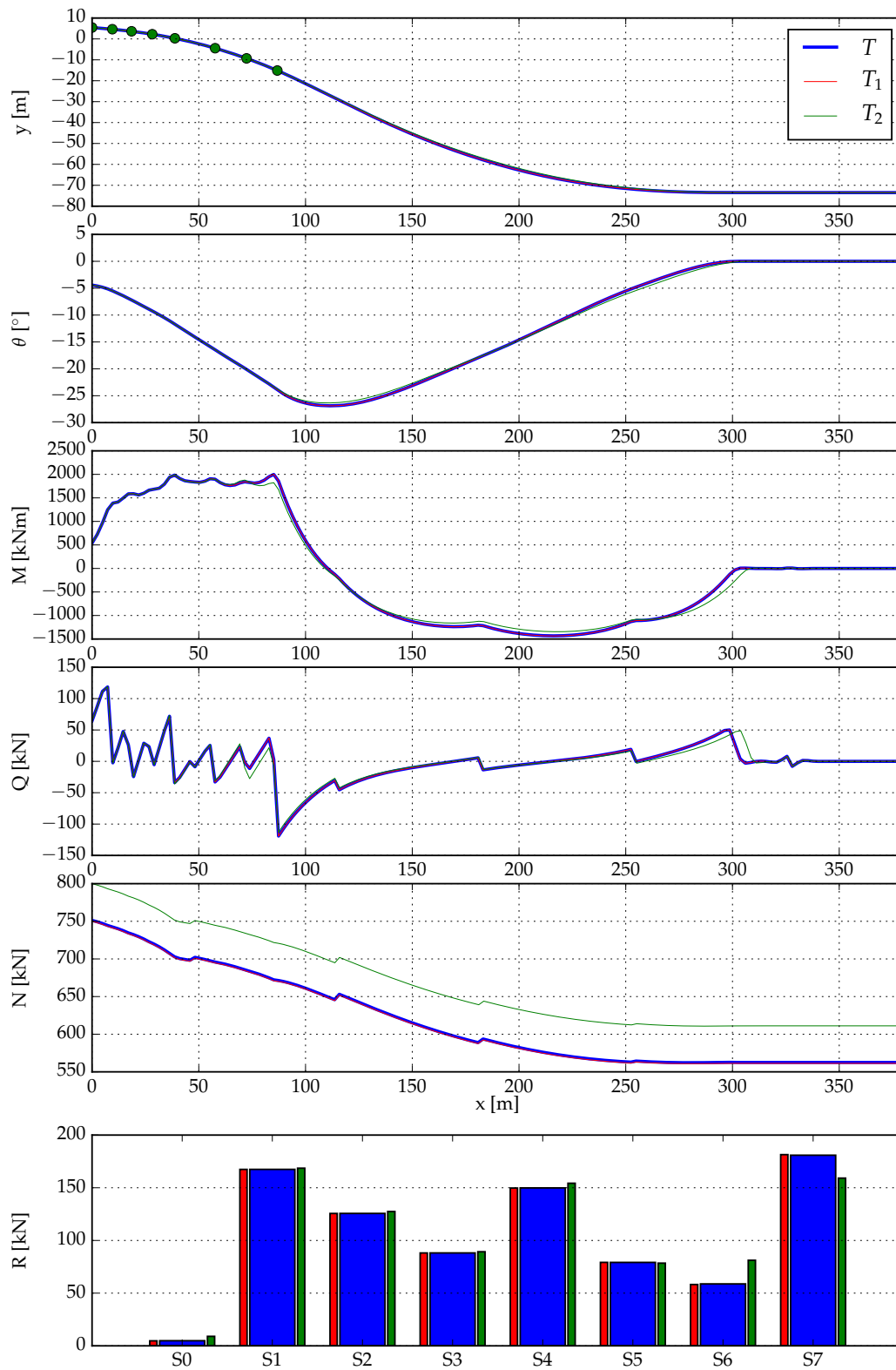


Slika 6.16: Primjer C: Sila napetosti i uzorak uzgonskih tankova

Optimalna konfiguracija parametara polaganja dana je u tablici 6.11, a pripadajuće rješenje simulacije polaganja na slici 6.17. I na rezultatima ovog primjera vidljivo je da podupiranje cijevi u području *overbenda* gotovo idealno unatoč nepovoljnoj geometriji tj. neuniformnom razmaku valjkastih oslonaca. Makimalni moment savijanja u području *overbenda* iznosi 200.2 kNm, a u području *sagbenda* 143.4 kNm.

Varijabla	Kontinuirana vrijednost	Diskretna vrijednost
Uzorak uzgonskih tankova, B	1.00777959e+00	1
Sila napinjača, T	7.51223478e+05 N	750 kN
Kut <i>stingera</i> , α_s	1.77038510e+01 °	17.039 °
h_1	4.64602200e+00 m	4.646 m
h_2	3.64843051e+00 m	3.648 m
h_3	2.24874551e+00 m	2.249 m
h_4	3.01237452e-01 m	0.301 m
h_5	3.33003228e+00 m	3.330 m
h_6	3.16932479e+00 m	3.169 m
h_7	2.01828821e+00 m	2.018 m

Tablica 6.11: Primjer C: Rješenje optimizacijskog problema

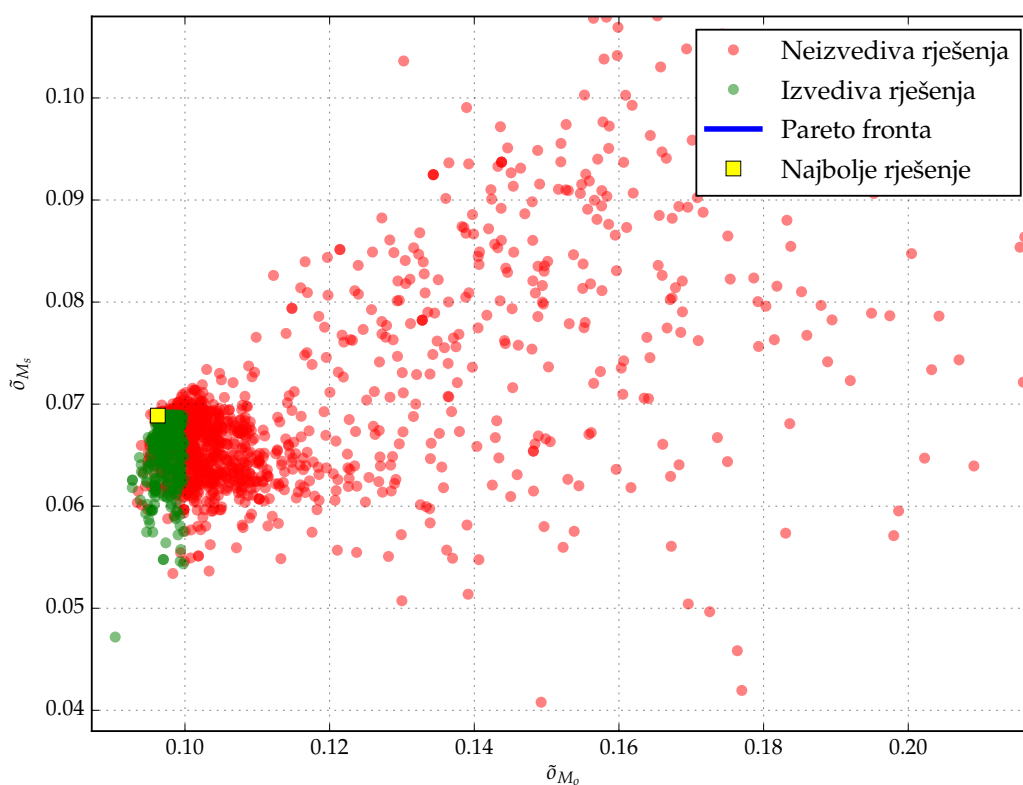


Slika 6.17: Primjer C: Graf rješenja simulacije polaganja za najbolje rješenje

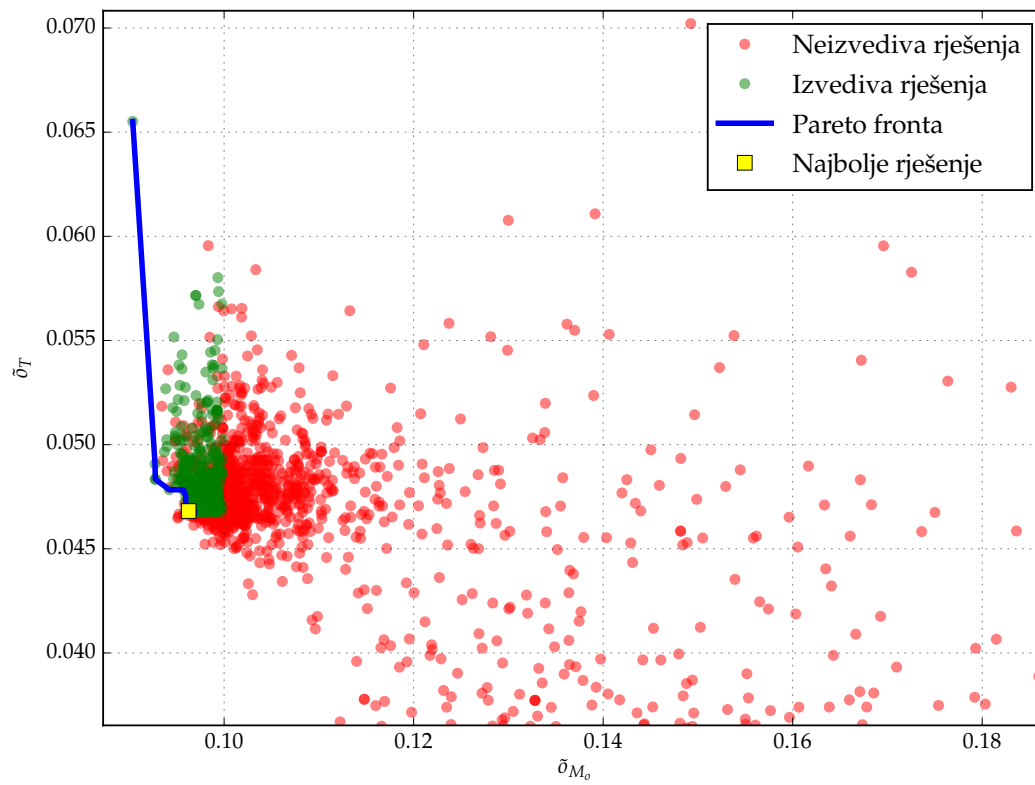
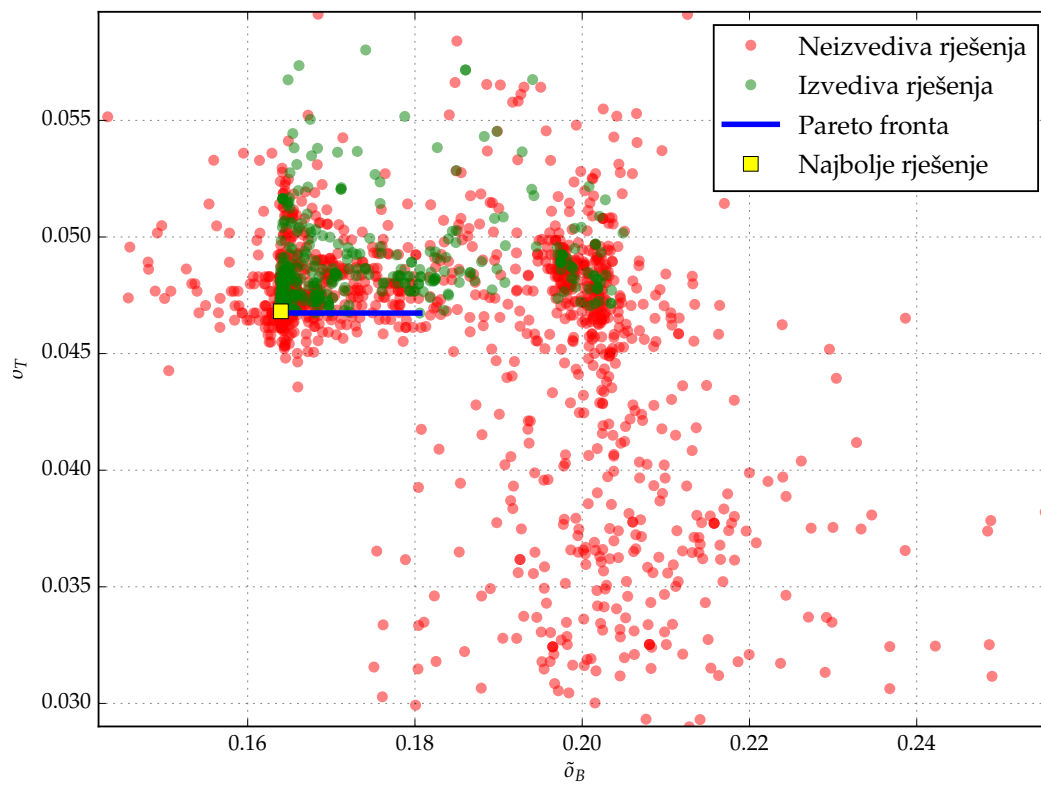
Na slikama 6.18, 6.19 i 6.20 prikazana su rješenja u prostoru ciljeva optimizacijskog problema polaganja te je vizualizirana Pareto fronta. U odnosu na prethodne primjere, dodatno je uvedena analiza u prostoru ciljeva δ_B i δ_T (Slika 6.20).

Za ciljeve δ_{M_o} i δ_{M_s} nije vizualizirana Pareto fronta jer skup Pareto optimalnih rješenja sadrži samo jednu točku (Izolirana zelena točka na slici 6.18). To upućuje na nedovoljnu istraženost u području Pareto optimalnih rješenja za ciljeve minimizacije momenta savijanja u području *overbenda* i *sagbenda*, što je posljedica postavljanja ciljeva značajno većeg prioriteta δ_B i δ_T .

Optimalno rješenje nalazi se na Pareto fronti prikazanima na slikama 6.19 i 6.20 što upućuje da je postignuta optimalna konfiguracija ujedno i Pareto optimalna što se tiče ciljeva δ_B , δ_T te δ_{M_o} .



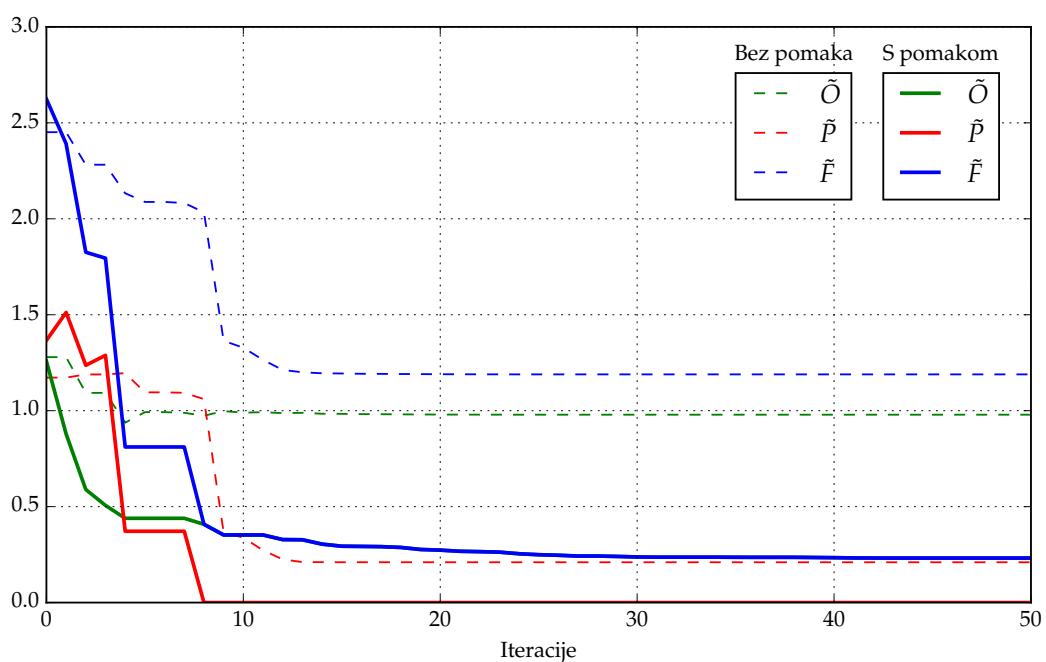
Slika 6.18: Primjer C: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_{M_s}

Slika 6.19: Primjer C: Pareto fronta za δ_{M_0} i δ_T Slika 6.20: Primjer B: Pareto fronta za δ_B i δ_T

6.4 Utjecaj dodatnog pomaka

Utjecaj dodatnog pomaka u modificiranoj PSO metode može se vidjeti na usporedbi konvergencije optimizacije parametara polaganja pomoću modificirane i standardne PSO implementacije (Slika 6.21). Za prikazane optimizacijske postupke korištene su iste postavke kao i u Primjeru A polaganja (Tablice 6.2, 6.1, 6.3 i 6.4).

Bez korištenja dodatnih pomaka u PSO metodi, optimizacijski postupak postiže vidno lošije rješenje koje čak nije ni izvedivo tj. ne zadovoljava sva propisana ograničenja. Ova usporedba ukazuje na veliko poboljšanje konvergencije optimizacijske metode zbog uvođenja dodatnih pomaka.



Slika 6.21: Usporedba konvergencija modificirane PSO metode (sa dodatnim pomakom) i standardne PSO metode (bez pomaka)

ZAKLJUČAK

Primarna zadatak pri izradi disertacije bio je postavljanje i rješavanje modela polaganja podmorskih cjevovoda. Modelom su obuhvaćene geometrijska nelinearnost, do koje dolazi zbog velikih pomaka i rotacija elastične strukture cijevi, te kontaktne interakcije cijevi s valjkastim osloncima i morskim dnom. Model polaganja podmorskih cjevovoda je implementiran u softveru Abaqus. Predstavljene su dvije različite varijante modela, koje se razlikuju s obzirom na postizanje sile napetosti cjevovoda na izlazu iz napinjača. Ta se napetost u A varijanti modela postiže prenošenjem sile stezanja preko tarnog kontakta mehanizma napinjača na aksijalnu silu u cjevovodu. U drugom se pristupu, tj. B varijanti modela, napetost na izlazu iz napinjača postiže prilagodbom sile na kraju cjevovoda, što je ostvareno iterativnim numeričkim rješavanjem. Model polaganja, prema potrebi, se može proširiti s naprednim značajkama koje omogućuju korištenje plutajućeg *stingera*, polaganje na neravno morsko dno te korištenje uzgonskih tankova na cjevovodu pri polaganju.

Usporedbom se pokazalo da obje izvedbe modela, iako fizikalno potpuno različite, uspješno postižu ciljanu napetost cijevi neposredno nakon napinjača. Validacija modela je provedena usporedbom rezultata simulacije polaganja cjevovoda s rezultatima dobivenim OFFPIPE-om, jednim od vodećih svjetskih softvera specijaliziranih za simulacije polaganja podmorskih cjevovoda. Usporedba rezultata ukazuje na iznimno dobro podudaranje rezultata predloženog modela s rezultatima OFFPIPE-a, što potpuno opravdava predstavljeni model, ali i procedure rješavanja modela.

Model polaganja podmorskih cjevovoda primijenjen je na više primjera polaganja uz korištenje naprednih značajki modela. Rezultati dobiveni rješavanjem modela u Abaqusu su analizirani te detaljno grafički prikazani.

Drugi dio disertacije posvećen je optimizaciji parametara polaganja podmorskih cjevovoda. Problem određivanja konfiguracije parametara polaganja je sagledan kao optimizacijski problem. Raščlanjene su optimizacijske varijable, ciljevi te ograničenja optimizacijskog problema. Ocjena valjanosti konfiguracije parametara polaganja provodi se preko formulirane funkcije cilja koja obuhvaća sve ciljeve i ograničenja polaganja.

Za rješavanje optimizacijskog problema određivanja parametara polaganja podmorskih cjevovoda razvijen je hibridni specijalizirani optimizacijski postupak temeljen na metodi optimizacije rojem čestica. Optimizacijska metoda je proširena specijaliziranim manipulacijama optimizacijskog vektora koje omogućuju znatno bržu konvergenciju metode te pouzdanije postizanje optimalne konfiguracije parametara polaganja. Diskretne optimizacijske varijable sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova se, uvođenjem bilinearne interpolacije rješenja u diskretnim vrijednostima, svode na kontinuirane.

U testiranju optimizacijskog postupka, simulacije polaganja su se temeljile na B varijanti modela koja je prikladnija zbog značajno bržeg rješavanja. Optimizacijski postupak je proveden na više testnih primjera polaganja te se na svima pokazao iznimno uspješan i stabilan. Konvergencija optimizacijskog postupka prikazana je detaljnim vizualizacijama ocjene rješenja, optimizacijskih parametara i ciljeva tijekom iteracija optimizacijske metode. Dodatna analiza provedena je na grafovima Pareto fronti koji omogućuju dublje i temeljitije tumačenje kompleksnosti višeciljnog optimizacijskog problema i konvergenciju provedenog optimizacijskog postupka.

Modeliranje i optimizacija polaganja podmorskih cjevovoda je vrlo zahtjevana i kompleksna tema koja pruža prostor za daljnja istraživanja. Predstavljani model omogućuje daljnja proširenja kojima se mogu modelirati dodatni zahtjevi koji se pojavljuju pri planiranju polaganja podmorskih cjevovoda. Korištenje nelinearno elastičnog materijala cijevi, polaganje cjevovoda promjenljivog poprečnog presjeka, analize prisilnog prekidanja polaganja (eng. *abandonment*) ili nastavljanja polaganja (eng. *recovery*) pri čemu se cijev čeličnom užadi spušta na odnosno podiže s morskog dna, samo su neka od mogućih proširenja modela polaganja.

Daljnjim istraživanjima i unapređenjima optimizacijskog postupka moguće je postići dodatna poboljšanja u vidu brzine konvergencije i pouzdanosti metode. Iako se optimizacija rojem čestica prikazala vrlo uspješnom, svakako treba razmotriti i upotrebu drugih optimizacijskih metoda. Eventualno proširenje funkcije cilja i uključivanje dodatnih ciljeva ili ograničenja omogućilo bi detaljnije preciziranje optimizacijskog problema kako bi se odgovorilo novim tehnološkim zahtjevima *offshore* industrije.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] Anderson, Edward J i Michael C Ferris: *Genetic algorithms for combinatorial optimization: the assemble line balancing problem*. ORSA Journal on Computing, 6(2):161–173, 1994.
- [2] Bai, Yong i Qiang Bai: *Subsea pipelines and risers*. Elsevier, 2005.
- [3] Bakhtiary, Abbas Yeganeh, Abbas Ghaheri i Reza Valipour: *Technical Note: Analysis of Offshore Pipeline Allowable Free Span Length*. 2007.
- [4] Bergh, F van den: *An Analysis of Particle Swarm Optimizers.*, Submitted Ph. D. Disertacija, thesis, University of Pretoria, Pretoria, 2001.
- [5] Bernitsas, Michael M i Nickolas Vlahopoulos: *Three-dimensional nonlinear statics of pipelaying using condensation in an incremental finite element algorithm*. Computers & structures, 35(3):195–214, 1990.
- [6] Bhavikatti, SS, Pasha Akram i TV Ravichandran: *Minimization of maximum moment in offshore pipeline during installation*. Applied ocean research, 8(3):164–168, 1986.
- [7] Braskoro, S, TDT Dronkers i M Van Driel: *From Shallow to Deep Implications for Offshore Pipeline Design*. Journal of The Indonesian Oil and Gas Community, Komunitas Migas Indonesia, 2004.
- [8] Bratton, Daniel i James Kennedy: *Defining a standard for particle swarm optimization*. U *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE*, stranice 120–127. IEEE, 2007.
- [9] British Standard, BS: *BS 8010: Code of Practice for Pipelines*, 1993.
- [10] Bruschi, R i ost.: *From the Longest to the Deepest Pipelines*. U *International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE2012-TPC-1145, Rhodes, Greece, 2012*.
- [11] Bruschi, R, L Ercoli Malacari, E Torselletti, L Vitali i ost.: *Concrete coated submarine pipelines: Further advances in strain concentration at field joints and relevant implications on strain based design*. U *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference, 1995.

- [12] Calégari, Patrice, Giovanni Coray, Alain Hertz, Daniel Kobler i Pierre Kuonen: *A taxonomy of evolutionary algorithms in combinatorial optimization*. Journal of Heuristics, 5(2):145–158, 1999.
- [13] Callegari, M, CB Carini, S Lenci, E Torselletti i L Vitali: *Dynamic models of marine pipelines for installation in deep and ultra-deep waters: analytical and numerical approaches*. U Proc. 5th National Congress of the Italian Association of Mechanics (AIMETA 2003), Ferrara, Italy, 2003.
- [14] Cavicchi, M, K Ardavanis i ost.: *J-lay installations lessons learned*. U Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. OTC, svezak 15333, 2003.
- [15] Choi, HS: *Free spanning analysis of offshore pipelines*. Ocean Engineering, 28(10):1325–1338, 2001.
- [16] Chong, Edwin KP i Stanislaw H Zak: *An introduction to optimization*, svezak 76. John Wiley & Sons, 2013.
- [17] Clauss, GF, H Weede i T Riekert: *Offshore pipe laying operations—Interaction of vessel motions and pipeline dynamic stresses*. Applied ocean research, 14(3):175–190, 1992.
- [18] Clauss, GF, H Weede i A Saroukh: *Nonlinear static and dynamic analysis of marine pipelines during laying*. Ship Technology Research, 38, 1991.
- [19] Clerc, Maurice: *Discrete particle swarm optimization, illustrated by the traveling salesman problem*. U New optimization techniques in engineering, stranice 219–239. Springer, 2004.
- [20] Dassault Systèmes: *Abaqus 6.11 Analysis User's Manual, Volume V: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions*, 2011.
- [21] Dassault Systèmes: *Abaqus 6.11 Theory Manual*, 2011.
- [22] Dassault Systèmes: *Analysis User's Manual, Volume I: Introduction, Spatial Modeling, Execution & Output*, 2011.
- [23] Dassault Systèmes: *Analysis User's Manual, Volume II: Analysis*, 2011.
- [24] Dassault Systèmes: *Analysis User's Manual, Volume IV: Elements*, 2011.
- [25] De Boer, Pieter Tjerk, Dirk P Kroese, Shie Mannor i Reuven Y Rubinstein: *A tutorial on the cross-entropy method*. Annals of operations research, 134(1):19–67, 2005.
- [26] Det Norske Veritas: *Offshore Standard DNV-OS-F101*, 2010.
- [27] DNV, Offshore Standard: *Submarine Pipeline Systems*. Tehnički izvještaj, DNV-OS-F101, 2012.
- [28] Dorigo, Marco, Gianni Caro i Luca Gambardella: *Ant algorithms for discrete optimization*. Artificial life, 5(2):137–172, 1999.
- [29] Fischer, KP, E Heier, T Sæther, M Johnsrud, DØ Askheim i G Heiberg: *Joining methods—technological summaries*, 2005.

- [30] Fyrileiv, Olav i Leif Collberg: *Influence of pressure in pipeline design—effective axial force*. U *24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, stranice 12–16, 2005.
- [31] Gaggiotti, Federico: *Deep water pipe laying: from mooring-based station keeping to dynamic positioning*. 2011.
- [32] Guarracino, F i V Mallardo: *A refined analytical analysis of submerged pipelines in seabed laying*. *Applied ocean research*, 21(6):281–293, 1999.
- [33] Hauch, Soren R i Yong Bai: *Bending moment capacity of pipes*. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 122(4):243–252, 2000.
- [34] Hong, Wei: *Simulation of TDP Dynamics during S-laying of Subsea Pipelines*. 2010.
- [35] Hunter, John D: *Matplotlib: A 2D graphics environment*. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):0090–95, 2007.
- [36] Hvidsten, Eivind: *Pipelaying on uneven seabed*. Magistarski rad, University of Stavanger, 2009.
- [37] Ivić, Stefan, Marko Čanađija i Siniša Družeta: *Static structural analysis of S-lay pipe laying with a tensioner model based on the frictional contact*. *Engineering Review*, 34(3):223–234, 2014.
- [38] Jensen, Gullik Anthon: *Offshore pipelaying dynamics*. Disertacija, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [39] Karabaić, Damir: *Optimizacija konfiguracije S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda*. Disertacija, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2012.
- [40] Kennedy, J. i R. Eberhart: *Particle swarm optimization*. U *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, svezak 4, stranice 1942–1948. IEEE, 1995.
- [41] Kennedy, James i Russell C Eberhart: *A discrete binary version of the particle swarm algorithm*. U *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on*, svezak 5, stranice 4104–4108. IEEE, 1997.
- [42] Kirkpatrick, Scott, C Daniel Gelatt, Mario P Vecchi i ost.: *Optimization by simulated annealing*. *science*, 220(4598):671–680, 1983.
- [43] Krause, Jonas, Jelson Cordeiro, Rafael Stubs Parpinelli i Heitor Silverio Lopes: *A survey of swarm algorithms applied to discrete optimization problems*. *Swarm Intelligence and Bio-inspired Computation: Theory and Applications*. Elsevier Science & Technology Books, stranice 169–191, 2013.
- [44] Langhelle, Morten: *Pipelines for Development at Deep Water Fields*. Magistarski rad, University of Stavanger, 2011.
- [45] Lawinsky da Silva, D. M., M. H. A. de Lima. i B. P. Jacob: *Numerical Model for the Simulation of the Pipeline-Laybarge interaction in pipelaying procedures*. *International journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry*, 3(1), lipanj 2009.

- [46] Leepipatpaiboon, Witcha: *An Appropriate FEA Modeling Technique for On-Bottom Roughness Analysis*. Disertacija, Asian Institute of Technology, 2010.
- [47] Lenci, S i M Callegari: *Simple analytical models for the J-lay problem*. *Acta Mechanica*, 178(1-2):23–39, 2005.
- [48] Levy, Adam B: *The basics of practical optimization*. SIAM, 2009.
- [49] Li, Z.G., Y. Chen, S.F. Gong i W.L. Jin: *Configuration of Submarine Pipeline for Deepwater S-lay Technique*. U *Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June 20-25, 2010*, 2010.
- [50] Malahy Jr, RC: *Nonlinear finite element method for the analysis of the offshore pipelaying problem*. Disertacija, Rice Univ., Houston, TX (USA), 1985.
- [51] Malahy Jr, RC: *OFFPIPE user's guide*, 1996.
- [52] Marler, R Timothy i Jasbir S Arora: *Survey of multi-objective optimization methods for engineering*. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6):369–395, 2004.
- [53] Martin, Andrew D i Kevin M Quinn: *A Review of Discrete Optimization Algorithms*. *The Political Methodologist*, 7:6–10, 1996.
- [54] Mattson, Christopher A i Achille Messac: *Concept selection using s-Pareto frontiers*. *AIAA journal*, 41(6):1190–1198, 2003.
- [55] Medina, Angelina Jane Reyes, Gregorio Toscano Pulido i Jose Gabriel Ramirez-Torres: *A Comparative Study of Neighborhood Topologies for Particle Swarm Optimizers*. U *IJCCI*, stranice 152–159. INSTICC Press, 2009, ISBN 978-989-674-014-6.
- [56] Menkham, Surapluet: *A Comprehensive Articulated Stinger Optimization Study*. Disertacija, Asian Institute of Technology, 2010.
- [57] Millman, K Jarrod i Michael Aivazis: *Python for scientists and engineers*. *Computing in Science & Engineering*, 13(2):9–12, 2011.
- [58] Nahar, Surendra, Sartaj Sahni i Eugene Shragowitz: *Simulated annealing and combinatorial optimization*. U *proceedings of the 23rd ACM/IEEE Design Automation Conference*, stranice 293–299. IEEE Press, 1986.
- [59] Nocedal, Jorge i Stephen J Wright: *Numerical Optimization 2nd*. Springer, 2006.
- [60] Oliphant, Travis E: *Python for scientific computing*. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):10–20, 2007.
- [61] Pareto, Vilfredo: *The new theories of economics*. *The Journal of Political Economy*, 5(4):485–502, 1897.
- [62] Perinet, Dominique, Ian Frazer i ost.: *Strain criteria for deep water pipe laying operations*. U *Proceedings of the 40th Offshore Technology Conference*. OTC, svezak 19329, 2008.
- [63] Randolph, Mark F i David J White: *Pipeline embedment in deep water: processes and quantitative assessment*. U *Proceedings of the 40th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Tex*, stranice 5–8, 2008.

- [64] Rao, Singiresu S i SS Rao: *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2009.
- [65] Reynolds, C.W.: *Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*. U *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, svezak 21, stranice 25–34. ACM, 1987.
- [66] Rienstra, SW: *Analytical approximations for offshore pipelaying problems*. U *Proceedings of the First International Conference on Industrial and Applied Mathematics ICIAM*, svezak 87, stranice 99–108, 1987.
- [67] Rubinstein, Reuven: *The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization*. *Methodology and computing in applied probability*, 1(2):127–190, 1999.
- [68] Shi, Y. i R. Eberhart: *A modified particle swarm optimizer*. U *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, stranice 69–73. IEEE, 1998.
- [69] Simmonds, DG: *Some problems involving umbilicals, cables and pipes*. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, 12:323–352, 1985.
- [70] Spinelli, CM, G Demofonti, A Fonzo, A Lucci, J Ferino, M Di Biagio, V Flaxa, S Zimmermann, C Kalwa i FM Knoop: *Full Scale Investigation on Strain Capacity of High Grade Large Diameter Pipes*. 2011.
- [71] Stelmack, Marc A, Nari Nakashima i Stephen M Batill: *Genetic algorithms for mixed discrete/continuous optimization in multidisciplinary design*. U *Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, stranice 499–509, 1998.
- [72] Torselletti, Enrico, Statoli Asa i Kim J Mørk: *Submarine Pipeline Installation JIP: Strength and Deformation Capacity of Pipes*. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, stranice 1–9, 2006.
- [73] Van Der Walt, Stefan, S Chris Colbert i Gael Varoquaux: *The NumPy array: a structure for efficient numerical computation*. *Computing in Science & Engineering*, 13(2):22–30, 2011.
- [74] Vedeld, Knut, Håvar A. Sollund, Jostein Hellesland i Olav Fyrileiv: *Effective axial forces in offshore lined and clad pipes*. *Engineering Structures*, 66(0):66–80, 2014, ISSN 0141-0296.
- [75] Veritas, Det Norske: *Recommended Practice DNV-RP-F105*. Free spanning pipelines, 2006.
- [76] Veritas, Det Norske: *Global buckling of submarine pipelines—structural design due to high temperature/high pressure*. *Prática Recomendada, DNV RP-F110*, 2007.
- [77] Veritas, Det Norske i Det Norske Veritas: *Rules for Submarine Pipeline Systems 1981*. Det Norske Veritas, 1982.
- [78] Wang, Alan, Yun Yang, Shaohua Zhu, Huailiang Li, Jingkuo Xu, Min He i ost.: *Latest Progress In Deepwater Installation Technologies*. U *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2012*.

- [79] Wedin, Hampus: *Limit State Criteria Theory for Pipeline Subsea Installation Processes*. 2012.
- [80] Yeniay, Ozgur: *Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms*. *Mathematical and Computational Applications*, 10(1):45–56, 2005.
- [81] Zeng, Xia Guang, Meng Lan Duan i Chen An: *Mathematical Model of Pipeline Abandonment and Recovery in Deepwater*. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 2014.
- [82] Zhu, D.S. i Y.K. Cheung: *Optimization of buoyancy of an articulated stinger on submerged pipelines laid with a barge*. *Ocean Engineering*, stranice 301–311, 1997.
- [83] Zinovieva, T. V.: *Analysis of pipeline stress-strain state in seabed laying*. *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*, stranice 237–253, 2011.

POPIS SLIKA

Slika 1.1	Osnovne metode polaganja podmorskih cjevovoda	6
Slika 1.2	Mogućnost polaganja ovisi o dubini vode i veličini cijevi	7
Slika 1.3	Polaganje podmorskih cjevovoda S-Lay metodom	8
Slika 1.4	Osnovno nazivlje u S-Lay metodi polaganja cjevovoda	9
Slika 1.5	Cijev u napinjaču	9
Slika 1.6	Valjkasti oslonac	10
Slika 2.1	Model grede	19
Slika 2.2	A varijanta modela	24
Slika 2.3	C varijanta modela	24
Slika 2.4	Pojednostavljena geometrija krutih struktura broda i <i>stingera</i>	25
Slika 2.5	<i>Node-to-surface</i> diskretizacija kontakta	32
Slika 2.6	Prodiranje čvorova kontaktne konture kod <i>node-to-surface</i> diskretizacije kontakta	32
Slika 2.7	Prodiranje čvorova kontaktne konture kod <i>surface-to-surface</i> diskretizacije kontakta	33
Slika 2.8	Ponašanje linearno elastičnog kontakta	34
Slika 2.9	Kontakt cijevi i valjkastih oslonaca: realni, idealizirani kruti i idealizirani elastični kontakt	36
Slika 2.10	Skica modela napinjača	37
Slika 2.11	Poznate sile na plutajući <i>stinger</i>	45
Slika 2.12	Profil neravnog morskog dna	46
Slika 2.13	Upotreba uznoskih spremnika prilikom polaganja	47
Slika 3.1	Usporedba varijanti modela: aksijalna sila	52
Slika 3.2	Usporedba varijanti modela: poprečna sila	53
Slika 3.3	Usporedba varijanti modela: moment savijanja	53
Slika 3.4	Usporedba rezultata dobivenih modelom napinjača temeljenim na tarnom kontaktu i rezultata dobivenih OFFPIPE-om	55
Slika 3.5	Inkrementacija u fazama Abaqus simulacije	57
Slika 3.6	Položaj deformiranog cjevovoda	58
Slika 3.7	Nagib cijevi	58
Slika 3.8	Dijagram momenta savijanja	58
Slika 3.9	Dijagram poprečne sile	59
Slika 3.10	Dijagram aksijalne sile	59

Slika 3.11	Sile reakcija valjkastih oslonaca	60
Slika 3.12	Kut <i>stingera</i> tijekom inkrementacije	61
Slika 3.13	Rezultati modela polaganja s plutajućim <i>stingerom</i>	62
Slika 3.14	Rezultati modela polaganja na neravno morsko dno	64
Slika 3.15	Rezultati simulacije polaganja cjevovoda uz korištenje uzgonskih tankova	66
Slika 4.1	Fleksibilni parametri polaganja podmorskih cjevovoda.	70
Slika 4.2	Pojava slobodnih raspona (eng. <i>freespan</i>) pri različitim napetostima cjevovoda	75
Slika 4.3	Optimalna napetost cijevi [38]	76
Slika 4.4	Maksimalni apsolutni moment savijanja u području <i>overbenda</i> s obzirom na silu napinjača T i kut <i>stingera</i> α_s	88
Slika 4.5	Maksimalni apsolutni momenta savijanja u području <i>sagbenda</i> s obzirom na silu napinjača T i kut <i>stingera</i> α_s	88
Slika 5.1	Ponašanje jedinki u Reynoldsovom modelu: <i>Odvajanje, usmjerenje i kohezija</i>	90
Slika 5.2	Utjecaj gnijezda na jedinke jata	91
Slika 5.3	Komponente brzine čestice	92
Slika 5.4	Različite topologije roja: (a) prstenasta topologija (<i>lbest</i> PSO), (b) potpuno spojena topologija (<i>gbest</i> PSO), (c) zvjezdasta topologija, (d) mrežasta topologija, (e) toroidalna topologija i (f) stablasta topologija.	93
Slika 5.5	Faktor prigušenja za $t_\lambda = 15$	94
Slika 5.6	Bilinearna interpolacija: (a) crvena točka x određena je kontinuiranom silom napinjanja T i uzorkom uzgonskih tankova B, dok su plave točke definirane najbližim diskretiziranim vrijednostima sile napetosti i uzorka uzgonskih tankova, (b) primjer bilinearne interpolacije za poznate vrijednosti $f(0,0) = 2$, $f(0,1) = 1.7$, $f(1,0) = 1.2$ i $f(1,1) = 1.9$	99
Slika 5.7	Implementacija funkcije cilja	101
Slika 5.8	Primjer Pareto fronte u slučaju dva minimizacijska cilja	102
Slika 6.1	Primjer A: Konvergencija	107
Slika 6.2	Primjer A: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području <i>overbenda</i> i <i>sagbenda</i>	108
Slika 6.3	Primjer A: Sila napetosti i kut <i>stingera</i>	109
Slika 6.4	Primjer A: Graf rješenja simulacije polaganja za najbolje rješenje	111
Slika 6.5	Primjer A: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_{M_s}	112
Slika 6.6	Primjer A: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_T	112
Slika 6.7	Primjer B: Konvergencija	113
Slika 6.8	Primjer B: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području <i>overbenda</i> i <i>sagbenda</i>	114
Slika 6.9	Primjer B: Sila napetosti i kut <i>stingera</i>	114
Slika 6.10	Primjer B: Graf rješenja simulacije polaganja za najbolje rješenje	116
Slika 6.11	Primjer B: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_{M_s}	117
Slika 6.12	Primjer B: Pareto fronta za δ_{M_o} i δ_T	117
Slika 6.13	Primjer C: Konvergencija	121

Slika 6.14	Primjer C: Maksimalni apsolutni moment savijanja u području <i>overbenda</i> i <i>sagbenda</i>	122
Slika 6.15	Primjer C: Sila napetosti i kut <i>stingera</i>	122
Slika 6.16	Primjer C: Sila napetosti i uzorak uzgonskih tankova	123
Slika 6.17	Primjer C: Graf rješenja simulacije polaganja za najbolje rješenje	124
Slika 6.18	Primjer C: Pareto fronta za $\tilde{\delta}_{M_o}$ i $\tilde{\delta}_{M_s}$	125
Slika 6.19	Primjer C: Pareto fronta za $\tilde{\delta}_{M_o}$ i $\tilde{\delta}_T$	126
Slika 6.20	Primjer B: Pareto fronta za $\tilde{\delta}_B$ i $\tilde{\delta}_T$	126
Slika 6.21	Usporedba konvergencija modificirane PSO metode (sa dodatnim pomakom) i standardne PSO metode (bez pomaka)	127

POPIS TABLICA

Tablica 2.1	Mogući rubni uvjeti za osnovni model grede	21
Tablica 2.2	Faze Abaqus simulacije	39
Tablica 3.1	Osnovna geometrija broda i <i>stingera</i> za testni primjer . . .	50
Tablica 3.2	Svojstva cijevi za testni primjer	51
Tablica 3.3	Usporedba varijanti modela	51
Tablica 3.4	Koordinate profila neravnog morskog dna	63
Tablica 3.5	Svojstva cijevi za primjer polaganja s uzgonskim tankovima	65
Tablica 4.1	Raspon i preciznost optimizacijskih varijabli	71
Tablica 4.2	Uzorci rasporeda uzgonskih tankova	72
Tablica 6.1	Primjer A: Svojstva cijevi i ostali parametri	104
Tablica 6.2	Primjer A: Osnovni parametri broda i <i>stingera</i>	105
Tablica 6.3	Primjer A: Parametri funkcije cilja	106
Tablica 6.4	Primjer A: Parametri optimizacijske metode	106
Tablica 6.5	Primjer A: Rješenje optimizacijskog problema	109
Tablica 6.6	Primjer B: Rješenje optimizacijskog problema	115
Tablica 6.7	Primjer C: Svojstva cijevi i ostali parametri	118
Tablica 6.8	Primjer C: Osnovni parametri broda i <i>stingera</i>	119
Tablica 6.9	Primjer C: Parametri funkcije cilja	120
Tablica 6.10	Primjer C: Parametri optimizacijske metode	120
Tablica 6.11	Primjer C: Rješenje optimizacijskog problema	123

ŽIVOTOPIS

Stefan Ivić rođen je 13. ožujka 1984. u Rijeci. Program opće gimnazije završio je 2002. godine u Gimnaziji i strukovnoj školi Jurja Dobrile u Pazinu te iste godine upisuje diplomski sveučilišni studija strojarstva na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Kao student sudjeluje u radu na stručnim projektima *Freespan Analysis Software* i *Optimization of pipelaying laybarge and stinger configuration* na Zavodu za mehaniku fluida i računarskom inženjerstvu, na kojima prvenstveno radi na izradi specijaliziranog inženjerskog softvera za *offshore* industriju. Diplomirao je 2008. godine s diplomskim radom *Optimizacija rute cjevovoda rashladnog sustava novog bloka TE Plomin genetskim algoritmom*. Nakon završetka studija nastavlja rad na Zavodu za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo kao stručni suradnik na projektima za privredu. Znanstveni novak postaje 2009. godine na znanstvenom projektu *Numeričko modeliranje i optimizacija strujanja fluida* pod voditeljstvom prof. Luke Sopte. Od 2009. godine sudjeluje u nastavi više kolegija Zavoda na preddiplomskim i diplomskim studijima na Tehničkom fakultetu: Računalne aplikacije u inženjerstvu, Računarske metode, Programiranje, Modeliranje u tehnici te Optimizacije u tehnici. Godine 2011. boravi na *University of California* u Santa Barbari gdje sudjeluje u istraživačkom radu na području dinamičkih sustava. Primjena optimizacijskih metoda na inženjerske probleme je glavna tema njegovog interesa, kako u znanstvenom tako i u nastavnom radu. Autor je više znanstvenih radova.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

- [1] Ivić, Stefan, Marko Čanađija i Siniša Družeta. *Static structural analysis of S-lay pipe laying with a tensioner model based on the frictional contact*. Engineering Review 34.3 (2014): 223-234.
- [2] Ivić, Stefan, Karlo Čiković, i Siniša Družeta. *Optimalni dizajn nepneumatske gume kotača pomoću genetičkog algoritma*. Šesti susret Hrvatskoga društva za mehaniku (2014).
- [3] Ivić, Stefan, Ivan Staver, i Lado Kranjčević. *PSO optimizacija mreže cjevovoda s obzirom na troškove instalacije i eksploatacije*. Šesti susret Hrvatskoga društva za mehaniku (2014).
- [4] Ivić, S., A. Sušan, i S. Družeta. *Optimizacija trase cjevovoda s obzirom na isplativost instalacije i eksploatacije*. Peti susret Hrvatskog društva za mehaniku (2013).
- [5] Valentine, David L., Igor Mezić, Senka Maćešić, Nelida Črnjarić-Žic, Stefan Ivić, Patrick J. Hogan, Vladimir A. Fonoberov, i Sophie Loire. *Dynamic autoinoculation and the microbial ecology of a deep water hydrocarbon irruption*. Proceedings of the National Academy of Sciences 109.50 (2012): 20286-20291.