

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

**OPTIMIZACIJA KONFIGURACIJE S-LAY POSTUPKA  
POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA**

**Doktorska disertacija**

**Damir Karabaić**

**Rijeka, 2012.**



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

**OPTIMIZACIJA KONFIGURACIJE S-LAY POSTUPKA  
POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA**

**Doktorska disertacija**

**Damir Karabaić**

Mentor: Red. prof. dr. sc. Luka Sopta, dipl.ing. \_\_\_\_\_

Komentor: Izv. prof. dr. sc. Nelida Črnjarić-Žic, dipl. ing. \_\_\_\_\_

**Rijeka, 2012.**



## Sažetak

U radu je opisana optimizacija parametara S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda upotrebom genetskog algoritma. Na početku rada prikazan je S-Lay postupak, odgovarajući matematički model te NLay softver za 2D statički analizu S-Lay postupka tvrtke Saipem. Nakon toga je sistematizirana metodologija analize polaganja podmorskih cjevovoda S-Lay postupkom. Na osnovu metodologije definirani su ciljevi i ograničenja optimizacije konfiguracije S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda. Optimizacija je izvedena pomoću genetskog algoritma čiji su operatori posebno prilagođeni problemu. Za simulaciju S-Lay postupka i izračun funkcije kvalitete koristi se NLay softver. Analiza i optimizacija genetskim algoritmom implementirane su unutar softvera SLayOpti za profesionalnu inženjersku primjenu čiji je razvoj autor vodio u okviru projekta suradnje sa gospodarstvom za tvrtku Saipem. Razvijeni softver SLayOpti omogućuje inženjeru analitičaru instalacija podmorskih cjevovoda veliko povećanje produktivnosti i smanjenje radnih sati potrebnih za pronalaženje optimalne konfiguracije. Dizajn softvera omogućuje upotrebu od strane korisnika koji nije upućen u detalje optimizacije genetskim algoritmom.

## Abstract

This work describes offshore pipelines installation S-Lay method parameters optimization with genetic algorithm. At the beginning, S-Lay method is described, following description of the mathematical model and Saipem Company's NLay software for S-Lay method 2D static analysis. Offshore pipelines S-Lay method analysis methodology is systematized next. On the basis of that methodology, S-Lay method configuration optimization goals and constraints are defined. Optimization uses genetic algorithm with operators specially adjusted to the optimization problem. NLay softver is used for S-Lay method simulation and for fitness function evaluation. Analysis and genetic algorithm optimization are implemented within professional engineering software SLayOpti whose development was leaded by the author, in the frame of industry collaboration project for Saipem Company. Developed SLayOpti software facilitates great productivity enhancement for offshore pipelines installation analyst engineer and great decrease of engineering manhours required for the optimal configuration assessment. Software design allows its usage by the user who is not acquainted with genetic algorithm optimization details.



## **Predgovor**

Ovaj rad je nastao na temelju prethodnog autorovog radnog iskustva u tvrtki Saipem Mediteran Usluge d.o.o., Rijeka te kasnijeg rada u okviru druge faze programa znanstvene suradnje Tehničkog Fakulteta Sveučilišta u Rijeci sa tvrtkom Saipem. Stoga se želim zahvaliti kolegama inženjerima iz Saipema na pruženom povjerenju i podršci tijekom rada na kompleksnoj problematici polaganja podmorskih cjevovoda, a posebno Niki Fabrisu na velikoj podršci.

Posebnu zahvalnost dugujem mentoru rada prof. dr. sc. Luki Sopti koji me je uveo u problematiku znanstvenog istraživanja na području Računarske mehanike fluida i numeričkih metoda i čije je veliko povjerenje i razumijevanje omogućilo nastavak mojeg znanstvenog i stručnog rada. Ujedno se zahvaljujem i komentorici izv. prof. dr. sc. Nelidi Črnjarić-Žic na korisnim savjetima i sugestijama. Također se želim zahvaliti kolegama sa Zavoda za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo na pruženoj pomoći i korisnim savjetima, a posebno Stefanu Iviću na velikom poslu odradenom tijekom razvoja softvera SLayOpti.

Na kraju se želim zahvaliti Ani i obitelji na pruženoj podršci.



## Sadržaj

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | UVOD .....   | 5  |
| 2     | INSTALACIJA PODMORSKIH CJEVOVODA .....                                     | 9  |
| 2.1   | Postupci instalacije podmorskih cjevovoda .....                            | 9  |
| 2.2   | S-Lay postupak.....  | 10 |
| 3     | ANALIZA S-LAY POSTUPKA POLAGANJA .....                                     | 17 |
| 3.1   | Općenito .....   | 17 |
| 3.2   | Kriteriji analize naprezanja u cjevovodu.....                              | 20 |
| 3.2.1 | DNV OS-F101 projektni kriterij za kombinirana opterećenja .....            | 21 |
| 3.3   | Matematički model polaganja cjevovoda.....                                 | 25 |
| 3.4   | Softver za analizu postupka instalacije podmorskih cjevovoda .....         | 28 |
| 3.4.1 | NLay softver.....  | 29 |
| 4     | OPTIMIZACIJA KONFIGURACIJE S-LAY POSTUPKA.....                             | 35 |
| 4.1   | Metodologija statičke analize polaganja cjevovoda.....                     | 35 |
| 4.2   | Kriteriji statičke analize polaganja podmorskih cjevovoda.....             | 37 |
| 4.3   | Metodologija dinamičke analize polaganja cjevovoda.....                    | 38 |
| 4.4   | Parametri optimizacije.....  | 39 |
| 4.5   | Uvjeti optimizacije .....  | 41 |
| 4.5.1 | Polaganje s uzgonskim tankovima .....                                      | 42 |
| 5     | PRIMJENA GENETSKOG ALGORITMA NA OPTIMIZACIJU S-LAY KONFIGURACIJE .43       | 43 |
| 5.1   | Formulacija optimizacijskog problema.....                                  | 43 |
| 5.2   | Genetski algoritam .....   | 45 |
| 5.2.1 | Kodiranje kromosoma .....  | 47 |
| 5.2.2 | Populacija.....  | 47 |
| 5.2.3 | Selekcija .....  | 48 |
| 5.2.4 | Križanje .....   | 49 |
| 5.2.5 | Mutacija.....  | 50 |
| 5.3   | Primjena genetskog algoritma na optimizaciju konfiguracije polaganja ..... | 51 |
| 5.3.1 | Kodiranje kromosoma .....  | 51 |
| 5.3.2 | Funkcija kvalitete .....   | 52 |
| 5.3.3 | Funkcije cilja .....   | 53 |
| 5.3.4 | Funkcije kažnjavanja.....  | 59 |
| 5.3.5 | Križanje .....   | 61 |
| 5.3.6 | Mutacija.....  | 62 |
| 5.3.7 | Automatizirane postavke optimizacije .....                                 | 63 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6     | SLAYOPTI SOFTVER .....   | 65  |
| 6.1   | Općenito .....   | 65  |
| 6.2   | Objektni dizajn aplikacije SLayOpti .....                      | 68  |
| 6.2.1 | UML dijagram klasa modula Fix Database .....                   | 68  |
| 6.2.2 | UML dijagram podatkovnih klasa .....                           | 69  |
| 6.2.3 | UML dijagram klasa optimizacijskih varijabli .....             | 70  |
| 6.2.4 | UML dijagram klasa parametara polaganja .....                  | 71  |
| 6.2.5 | UML dijagram klasa analize polaganja .....                     | 72  |
| 6.2.6 | UML dijagram klasa modula Optimization Manager .....           | 73  |
| 6.2.7 | UML dijagram klasa modula Optimizer .....                      | 74  |
| 6.2.8 | UML dijagram klasa genetskog algoritma .....                   | 75  |
| 6.3   | SLayOpti radno okružje (Workspace) .....                       | 76  |
| 6.3.1 | Baza brodova i stingera za polaganje (Fix baza podataka) ..... | 76  |
| 6.3.2 | Prozor projekta (Project Form) .....                           | 77  |
| 6.3.3 | Prozor sekcija (Sections Form) .....                           | 78  |
| 6.3.4 | Prozor analize (Analysis Form) .....                           | 79  |
| 6.3.5 | Tablica nelinearnog materijala .....                           | 79  |
| 6.3.6 | Definicija kriterija analize i optimizacije .....              | 80  |
| 6.4   | Konfiguracije polaganja .....                                  | 81  |
| 6.4.1 | Prozor konfiguracija (Configurations Form) .....               | 82  |
| 6.5   | Analiza polaganja cjevovoda .....                              | 83  |
| 6.5.1 | Sučelje sa programom N-Lay .....                               | 83  |
| 6.5.2 | Automatizirani zadaci S-Lay analize .....                      | 85  |
| 6.5.3 | Analiza sa fiksnim stingerom .....                             | 86  |
| 6.5.4 | Analiza sa plutajućim stingerom .....                          | 86  |
| 6.5.5 | Prozor rezultata analize (Analysis Results Form) .....         | 88  |
| 6.5.6 | Grafički prikaz rezultata .....                                | 90  |
| 6.5.7 | Analiza sa uzgonskim tankovima .....                           | 91  |
| 6.5.8 | Kompletna provjera sekcije (Complete section check) .....      | 91  |
| 6.5.9 | Analiza svih sekcija (All sections analysis) .....             | 92  |
| 6.6   | Optimizacija konfiguracije polaganja cjevovoda .....           | 93  |
| 6.6.1 | Općenito .....   | 93  |
| 6.6.2 | Optimizacija genetskim algoritmom .....                        | 96  |
| 6.6.3 | Optimizacijska procedura .....                                 | 97  |
| 6.6.4 | Postavke optimizacije .....                                    | 99  |
| 6.6.5 | Optimizacijski zapis .....                                     | 101 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 7    | REZULTATI OPTIMIZACIJE .....                     | 105 |
| 7.1  | Testni primjer 1 .....                           | 105 |
| 7.2  | Testni primjer 2 .....                           | 111 |
| 8    | ZAKLJUČAK .....                                  | 115 |
| 9    | LITERATURA .....                                 | 117 |
| 10   | POPISI SKRAĆENICA, OZNAKA, SLIKA I TABLICA ..... | 123 |
| 10.1 | Popis skraćenica .....                           | 123 |
| 10.2 | Popis oznaka .....                               | 124 |
| 10.3 | Popis slika .....                                | 126 |
| 10.4 | Popis tablica .....                              | 128 |



## 1 UVOD

Podmorski cjevovodi danas predstavljaju jedno od glavnih i nezaobilaznih sredstava kontinuiranog transporta energenata (nafte i plina) na velike udaljenosti te je njihov politički i ekonomski značaj sve izraženiji. Sve veća potražnja i rast potrošnje energenata utječe na projektiranje i postavljanje sve duljih cjevovoda na sve većim dubinama koje su do pred desetak godina bile tehnološki nedohvatljive. U takvim uvjetima, zahtjevi na sigurnost i pouzdanost integriteta cjevovoda postaju sve složeniji. Da bi se pomirila dva suprotna zahtijeva, zahtjev za što manjim troškovima instalacije cjevovoda i zahtjev za dovoljnom pouzdanošću u kasnijoj eksploraciji i našao optimum, koriste se sve rafiniranije metode analize potencijalnih problema i oštećenja kojima podmorski cjevovod može biti izložen tijekom instalacije te njegovog eksploracijskog perioda.

Postupak polaganja podmorskih cjevovoda na morsko dno je vrlo zahtjevna operacija ovisna o okolišnim uvjetima i podrazumijeva pažljivo planiranje i detaljnu analizu u fazi projektiranja. Najrašireniji postupak polaganja podmorskih cjevovoda je S-Lay postupak sa brodovima polagačima prilikom kojeg se cijev kontrolirano savija do morskog dna u obliku slova S. Postupak uključuje spajanje pojedinih dijelova cijevi na brodu cjevopolagaču gdje se na nekoliko stanica za zavarivanje provodi simultano zavarivanje, ispitivanje i oblaganje spojeva cijevi. Brod cjevopolagač napreduje u malim koracima po ruti cjevovoda u skladu sa nadodavanjem zavarenih spojeva na glavnu liniju cjevovoda.

Matematički model S-Lay postupka se svodi na Euler-Bernoullijev model nelinearnog elastičnog štapa s velikim pomacima. Za rješavanje problema najprikladnije su nelinearne metode konačnih elemenata te se na njima baziraju specijalizirana softverska rješenja za analizu postupka polaganja. Specijalizirana softverska rješenja za analizu postupka polaganja podmorskih cjevovoda imaju prednost pred softverskim paketima koji podržavaju nelinearne konačne elemente opće namjene (ANSYS, ABAQUS itd.) zbog praktičnijeg rukovanja sa velikim brojem parametara koje treba varirati tijekom analize postupka polaganja.

Opterećenja u cjevovodu su veoma osjetljiva na male promjene konfiguracije oslonaca cjevovoda tijekom polaganja. Broj oslonaca koje inženjer treba postavljati prema rezultatima analize često je veći od deset (10), a osim njih potrebno je varirati i druge bitne parametre, kao što su sila napinjачa, kut jednog ili više stingera (podupirača), nagib i gaz broda cjevopolagača, itd. Zbog toga postupak inženjerske instalacijske analize često zahtjeva veliki broj radnih sati. Radi neprestane potrebe za što većim brojem analiza u cilju traženja optimalnih i konkurenčnih rješenja na tržištu konstrukcije podmorskih cjevovoda, javila se potreba za softverom koji bi mogao pronaći optimalne kombinacije parametara instalacije. Takav softver bi uvelike unaprijedio efikasnost rada inženjera

analitičara instalacija podmorskih cjevovoda.

Prvi cilj istraživanja je bio analizirati i sistematizirati postupak inženjerske instalacijske analize koji se provodi u tvrtki Saipem. Taj postupak se bazira na upotrebi softvera NLay tvrtke Saipem za analizu S-Lay postupka polaganja te na industrijski propisanim standardima i kriterijima.

Drugi cilj istraživanja bio je da se na temelju toga napravi kompletan optimizacijski postupak baziran na genetskom algoritmu (GA) koji će omogućiti efikasno pronalaženje optimalne kombinacije svih utjecajnih postavki S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda. Optimizacija sa genetskim algoritmom posebno prilagođenim problemu treba ispuniti sve zahtjeve koji se postavljaju prilikom analize i određivanja konfiguracije postupka polaganja u projektnoj praksi. Optimizacija genetskim algoritmom pri tome koristi pozive postojećeg softvera za analizu S-Lay postupka NLay.

Na kraju je tako definiran postupak GA optimizacije implementiran u sklopu aplikacije SLayOpti. Aplikacija SLayOpti predstavlja sučelje za analizu i GA optimizaciju S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda s pomoću NLay rješavača postavljenog S-Lay modela. Autor ovog rada je vodio tim za istraživanje i razvoj softvera SLayOpti koji su provedeni u sklopu projekta za gospodarstvo pod nazivom "*Optimization of Pipe Laying Stress Analysis*" (Optimizacija analize naprezanja kod polaganja cjevovoda) čiji je naručitelj bila tvrtka Saipem Mediteran Usluge d.o.o.

Problem optimizacije postupka polaganja podmorskih cjevovoda obradivan je u malom broju radova. Prvi rad na tu temu bio je Ref. [1], gdje Daley opisuje grafički postupak pronalaženja optimalne sile napinjača ovisno o zahtjevu minimizacije duljine stingera ili o zahtjevu postizanja maksimalnog radijusa zakrivljenosti oslonaca stingera. U Ref. [2] su Maier, Corradi, Mazzoli i Michelini obradili optimizaciju geometrije artikuliranog stingera (stinger sastavljen od više plutajućih dijelova međusobno zglobno povezanih) pomoću metode nelinearnog programiranja. U Ref. [3] su Bhavikatti i Ravichandran razvili metodu pronalaženja optimalne sile napinjača i slobodnog raspona sa ciljem minimizacije maksimalnog moment savijanja u „S“ krivulji. Kao metoda optimizacije je korištena usavršena metoda pomicne granice sekvencijalnog linearнog programiranja. U Ref. [4] su Zhu i Cheung prikazali analitičku metodu analize pojednostavljenog modela S-Lay postupka s artikuliranim stingerom na osnovu singularne perturbacijske tehnike. Tako dobiveno analitičko rješenje upotrijebili su za pronalaženje optimalne kombinacije uzgona u dijelovima artikuliranog stingera sa determinističkom metodom nelinearnog programiranja koju nisu specificirali.

Genetski algoritam nije do sada bio primjenjivan kao metoda optimizacije instalacije podmorskih cjevovoda, tako da je ovo prvi takav rad sa takvom primjenom. Što se tiče primjene GA na probleme strukturalne optimizacije slične prirode, Wang i Chen (Ref. [5]) su upotrijebili genetski algoritam za pronalaženje optimalnih lokacija oslonaca elastičnog vibrirajućeg štapa sa ciljem minimizacije vibracija. Chiba, Okado, Fujii, Itami i Hara (Ref. [6]) su optimizirali raspored oslonaca sistema cijevi izloženog dinamičkim opterećenjima. Tabakov u Ref. [7] daje prikaz višekriterijske

optimizacije slojevitih struktura pomoću GA. Vieira, de Lima, Evsukoff i Jacob su u Ref. [8] primijenili GA na optimizaciju konfiguracije vertikalne podmorske cijevi (eng. riser) te su u Ref. [12] usporedili takvu primjenu GA sa drugim optimizacijskim algoritmima inspiriranim biološkim procesima. Gantovnik (Ref. [9]) daje prikaz GA prilagođenog optimizaciji kompozitnih struktura.

Shafieefar i Rezvani u Ref. [10] prikazuju optimizaciju sidrenih linija plutajućih naftnih platformi pomoću GA, dok Boulogouris i Papanikolaou (Ref. [11]) primjenjuju GA na višekriterijsku optimizaciju plutajućeg LNG terminala. Clauss i Birk su prema Ref. [13] istražili optimizaciju hidrodinamičkog oblika općih velikih morskih struktura pomoću determinističke metode tangencijalnog pretraživanja (eng. tangent search method), a zatim su u Ref. [14] usporedili na sličnom problemu efikasnost optimizacije determinističkom metodom sekvensijalnog kvadratičnog programiranja (eng. Sequential Quadratic Programming) sa genetskim algoritmom i simuliranim kaljenjem (eng. simulated annealing). U Ref. [15] Lee i Clauss prikazuju metodu automatiziranog projektiranja oblika plutajuće morske strukture sa ciljem minimizacije gibanja induciranih morskim valovima. Optimizaciju oblika su izveli pomoću metode adaptivnog simuliranog kaljenja.

Značaj ovog rada je u tome što prikazuje primjenu genetskog algoritma na problem pronalaženja optimalne konfiguracije S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda. GA optimizacija razvijena je u okviru razvojno-istraživačkog projekta za gospodarstvo čiji je cilj bio razvoj softverskog alata za podršku inženjerskoj analizi S-Lay postupka instalacije u tvrtki Saipem. Razvijeni softverski alat SlayOpti je jedinstven po tome što predstavlja softver za inženjerske analize koji sadrži implementaciju GA optimizacije namijenjenu upotrebi od strane korisnika koji ne trebaju biti upućeni u detalje GA optimizacije. Parametri GA se definiraju posredno preko standardnih postavki inženjerske analize instalacije podmorskih cjevovoda. Kod svih sličnih primjena GA, GA optimizacija nije bila implementirana kao dio komercijalne aplikacije nego u aplikacijama koje koriste sami istraživači u svrhu dobivanja optimalnih rješenja i istraživanja ponašanja optimizacijskih algoritama.



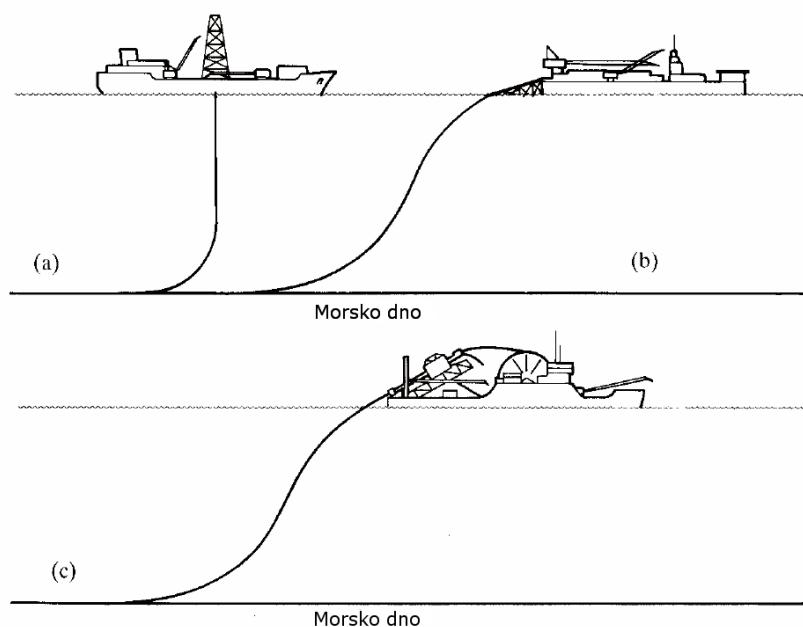
## 2 INSTALACIJA PODMORSKIH CJEVOVODA

### 2.1 Postupci instalacije podmorskih cjevovoda

Instalacija podmorskih cjevovoda izvodi se pomoću specijaliziranih brodova za polaganje (brod cjevopolagač – *eng. pipelay vessel*). Postoji više postupaka instalacije, a tri (3) u najširoj upotrebi su (slika 2.1):

- a) J- Lay postupak
- b) S- Lay postupak
- c) Polaganje cijevi namotane na bubnju (*eng. reel lay*)

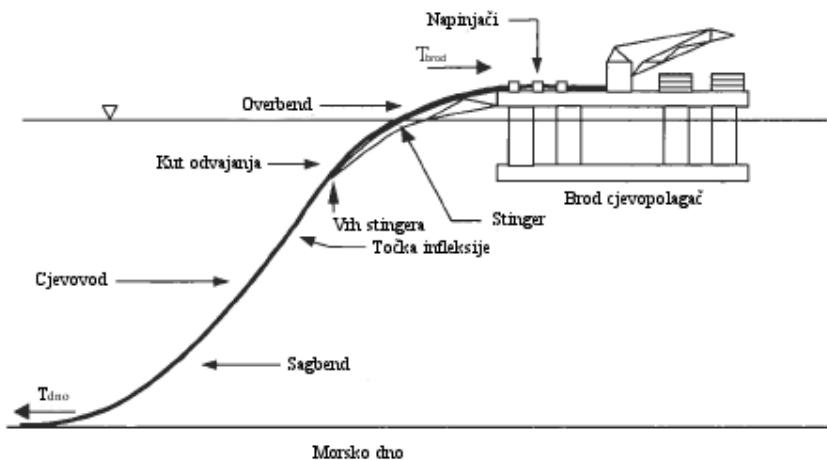
S-Lay i J- Lay postupci polaganja podmorskih cjevovoda dobili su nazine po izgledu krivulje (oblici slova „S“ i „J“) koju poprima cjevovod u slobodnom rasponu tijekom operacije polaganja. Sufiks Lay dolazi od eng. Pipe lay – polaganje cjevovoda. U nastavku će se detaljnije opisati S-Lay postupak. Opisi J-Lay postupka, polaganja cijevi namotane na bubnju te opisi preostalih mogućih postupaka instalacije podmorskih cjevovoda mogu se pronaći u literaturi vezanoj za općenito područje konstruiranja i projektiranja podmorskih struktura (Ref. [16], [17]), kao i u literaturi posvećenoj samo tematiki konstruiranja i projektiranja podmorskih cjevovoda (Ref. [18], [19], [20], [21], [22]).



Sl. 2.1. Postupci polaganja podmorskih cjevovoda

## 2.2 S-Lay postupak

S-Lay postupak je najrašireniji postupak instalacije podmorskih cjevovoda sa kojim je izvedena većina postojećih projekata podmorskih cjevovoda. Postupak polaganja s osnovnim elementima prikazan je na slici 2.2. Maksimalni nazivni promjer cijevi koja se može polagati S-Lay postupom je 72" bez ograničenja debljine stjenke cijevi. Prosječni kapacitet polaganja cjevovoda za većinu brodova je 4,5 km/dan, dok neki brodovi mogu postaviti i do 7 km/dan,

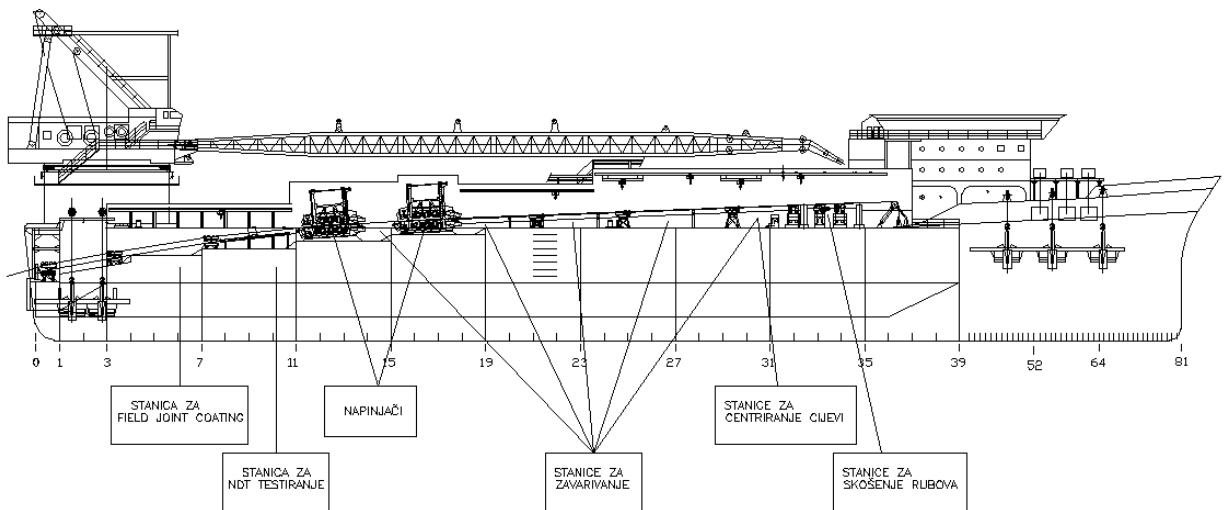


Sl. 2.2. S-Lay postupak polaganja podmorskih cjevovoda

Tijekom S-Lay postupka polaganja, cjevovod se spaja zavarivanjem na palubi broda za polaganje (cjevopolagača) te se spušta kontinuirano sa palube sve do morskog dna. Cjevovod se sastoji iz niza pojedinačnih elemenata cijevi (eng. pipe joint) standardne duljine 12.2 m ili 24.4 m čiji se krajevi spajaju na traci za spajanje.

Traka za spajanje ili proizvodna linija (eng firing line) uobičajeno se sastoji od slijedećih dijelova, odnosno radnih stanica (slika 2.3):

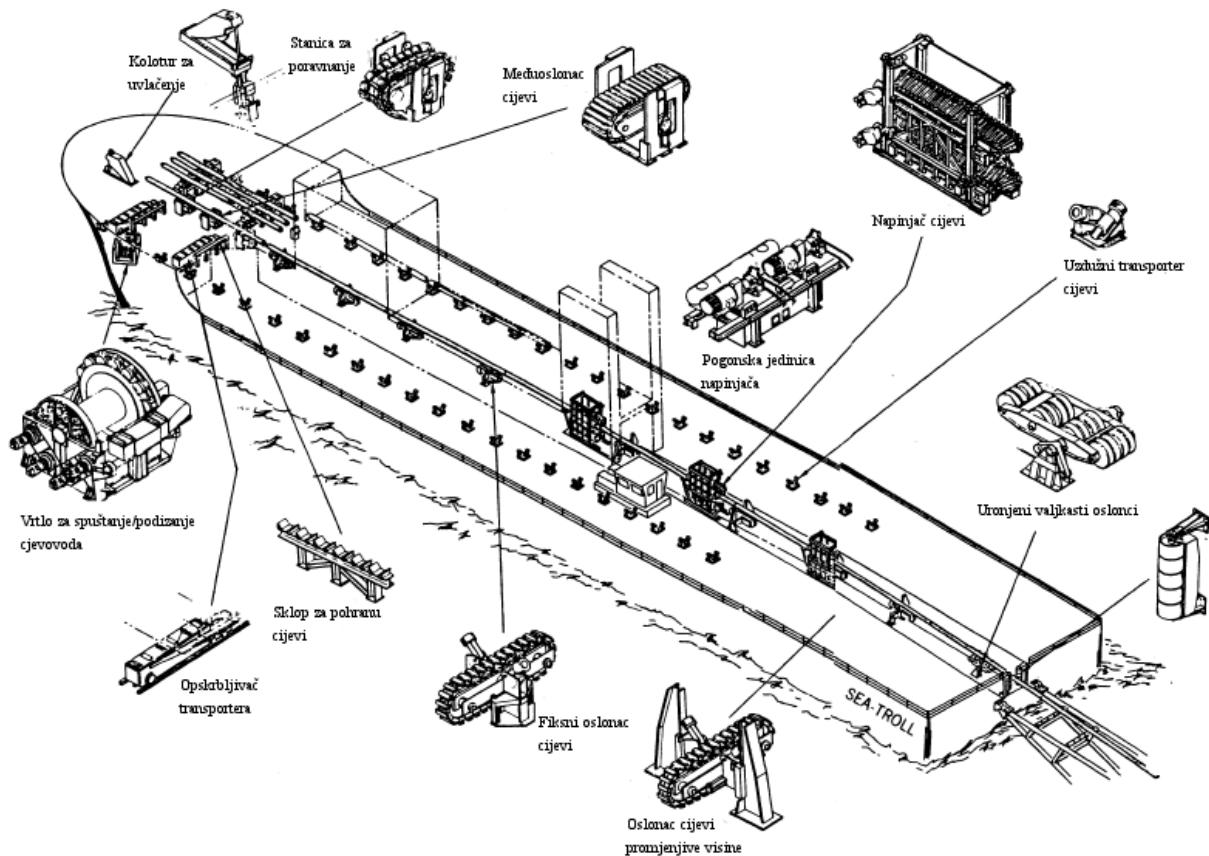
1. Stanica za skošenje rubova cijevi
2. Stanica za centriranje cijevi
3. Jedna ili više stanica za zavarivanje
4. Stanica za ispitivanje materijala bez razaranja
5. Jedan ili više napinjača
6. Stanica za ispunu materijala između dva betonska omotača.



Sl. 2.3. Prikaz radnih stanica S-Lay proizvodne linije

Na slici 2.4 prikazan je raspored standardne opreme na palubi broda cjevopolagača (ref. [16]), dok je na slici 2.5 prikazan brod cjevopolagač Castoro 6 za polaganje cjevovoda S-Lay postupkom, jedan od najvećih brodova iz flote tvrtke Saipem.

Na palubi cjevopolagača, cjevovod se oslanja na niz diskontinuirano postavljenih oslonaca (*eng. supports*) koji mogu biti izvedeni kao niz valjaka (*eng. rollers*) ili kao tračni oslonci. Na slikama 2.6 i 2.7 prikazan je valjkasti oslonac na brodu Crawler tvrtke Saipem.



Sl. 2.4. Raspored opreme na brodu za polaganje S-Lay postupkom (Ref. [16])

Osim kod izrazito plitkih voda, u pravilu se kod svih slučajeva koristi dugačka fiksna rampa ili uronjeni plutajući podupirač (nadalje će se koristiti engleski izraz *stinger*) koji služe za podupiranje cjevovodaiza krme broda dok se spušta u vodu. Stinger je rešetkasta konstrukcija postavljena na krmi broda i koja uobičajeno spojena zglobnom vezom te može slobodno plutati u vodi. Pri tome stinger svojom uzgonskom silom podupire cijev i suprotstavlja se njenoj težini. Ta se sila, a time i dubina, odnosno kut stingera mogu kontrolirati sa količinom vode u balastnim tankovima stingera. Na stingeru se, slično kao i na palubi, nalaze valjkasti oslonci na koje se cijev oslanja. Na slikama 2.8 i 2.9 prikazan je stinger broda Crawler.



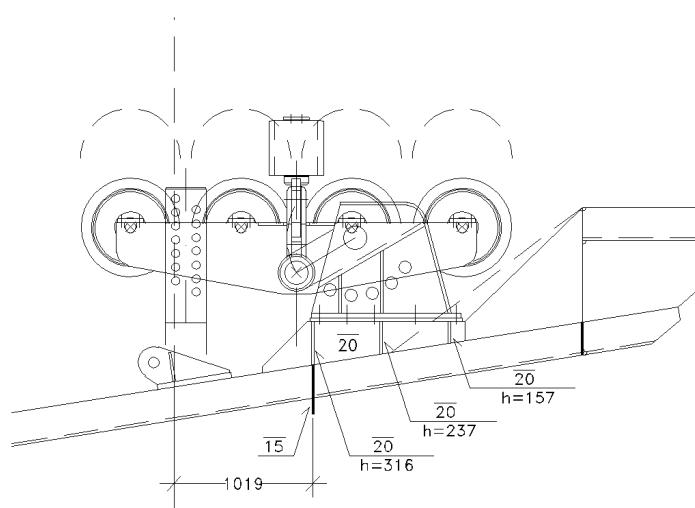
Sl. 2.5. Castoro 6 brod cjevopolagač tvrtke Saipem

Nakon točke odvajanja od stingera cijev se proteže u dugačkom slobodnom rasponu sve do točke dodira sa morskim dnem (*eng. Touch Down Point – TDP*). Duljina slobodnog raspona kod S-Lay postupka je uobičajeno 2-3 puta veća od dubine vode.

Da bi se naprezanja u cjevovodu reducirala u prihvatljive okvire, koriste se jedan ili više strojeva za napinjanje ili napinjača (*eng. tensioner*) na palubi broda koji prenose razmjerno veliku vlačnu silu na cjevovod koji se sastavlja. Sila napinjanja (*eng. tension*) isteže liniju cjevovoda i time smanjuje njegovu zakriviljenost te povećava duljinu slobodnog raspona (*eng. free span*). Kod polaganja u dubokim vodama, sila napinjanja je često potrebna i da bi smanjila iznos kuta pod kojim se cijev odvaja od stingera (slika 2.1) te da se osigura odvajanje cijevi od kraja stingera, odnosno posljednjeg oslonca na njemu. Na slici 2.10 prikazan je vertikalni napinjač cijevi na brodu cjevopolagaču Crawler tvrtke Saipem. Maksimalni kapacitet napinjača, odnosno sila u napinjačima se kreće u granicama 50 – 750 tona (490 – 7360 kN).

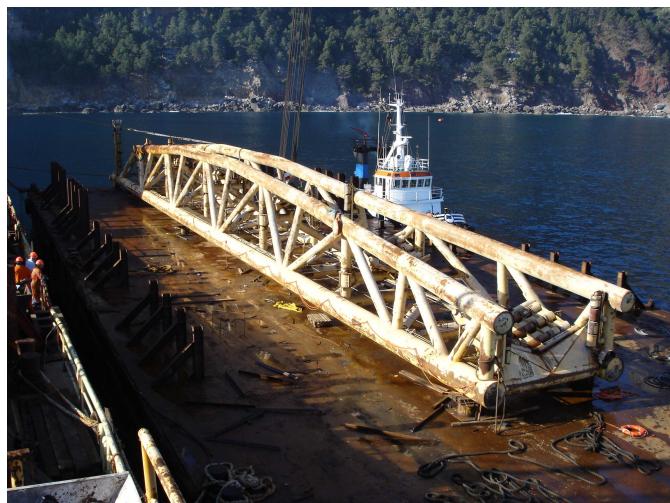


Sl. 2.6. Prikaz valjkastog oslonca na brodu Crawler

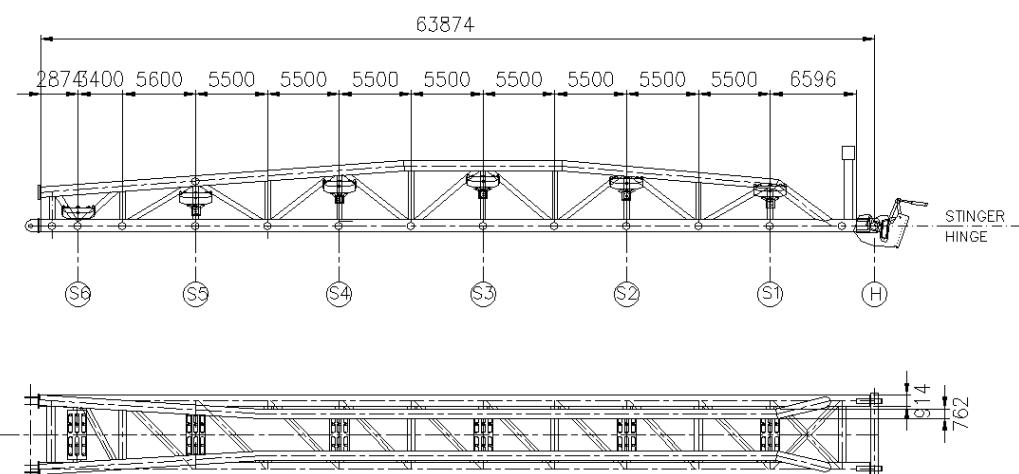


Sl. 2.7. Nacrt valjkastog oslonca na brodu Crawler

Tijekom operacije polaganja, brod cjevopolagač drži na poziciji radijalni sidreni sistem koji se, uobičajeno, sastoji od četiri (4) do dvanaest (12) sidrenih linija sa vitlima i sidrima koje se pružaju radijalno okolo broda. Sa nadodavanjem novog segmenta cijevi na proizvodnoj traci, brod se pomiče naprijed za njegovu duljinu. Pomicanje naprijed se ostvaruje skraćivanjem (uzimanjem) sidrenih linija na pramu i otpuštanjem (dodavanjem) sidrenih linija na krmi broda. Nakon pomicanja naprijed od više stotina metara potrebno je premještati sidra, što rade specijalno opremljene brodice za tu namjenu (eng. *anchor tug*). Sidrene linije pružaju protudjelovanje sili napinjanja u cijevi te drže brod na traženoj poziciji i opiru se okolišnim silama na brod (valovi, struje, vjetar). Kod brodova cjevopolagača četvrte generacije koriste se dinamički propulzori i sistem za dinamičko pozicioniranje koji preuzima ulogu sidrenih linija. Dinamičko pozicioniranje omogućuje polaganje na većim dubinama gdje se više ne mogu koristiti klasične sidrene linije.



Sl. 2.8. Prikaz stingera broda Crawler



Sl. 2.9. Nacrt stingera broda Crawler



Sl. 2.10. Napinjač cijevi na brodu Crawler tvrtke Saipem

### 3 ANALIZA S-LAY POSTUPKA POLAGANJA

#### 3.1 Općenito

Na proizvodnoj liniji, gdje se izvodi spajanje segmenata cjevovoda, linija cjevovoda može se smatrati gotovo ravnom i paralelnom sa vodenom površinom. Na krmenom dijelu, prije ulaska cjevovoda u vodu, paluba i oslonci cijevi poprimaju silazni nagib tako da cjevovod uranja u vodu pod određenim kutom. Oslonci cijevi se obično konfiguriraju tako da se linija cijevi savija prema dolje pod određenim radiusom zakrivljenosti. Isto se odnosi na oslonce na plutajućem stingeru ili na fiksnoj rampi. Zbog te zakrivljenosti cijev postiže određeni kut odvajanja (*eng. departure angle*) od stingera. Pri tome kut pod kojim stoji stinger treba biti veći ili jednak kuta odvajanja kako ne bi došlo do prekomjernog savijanja cijevi preko posljednjeg oslonca na stingeru i rezultirajućih prevelikih naprezanja u toj točki.

„S“ krivulja ima točku infleksije koja razdvaja dva (2) područja zakrivljenosti (Sl. 2.2):

- **Overbend** – početno područje „S“ krivulje koje prolazi preko oslonaca na brodu i stingeru. Krivulja cjevovoda  $y = f(x)$  je konkavna ( $y'' < 0$ );
- **Sagbend** – završno područje „S“ krivulje koje se proteže do morskog dna. Krivulja cjevovoda je konveksna ( $y'' > 0$ ).

Točka infleksije nalazi se redovito, neposredno nakon kraja stingera, tj. nakon posljednjeg oslonca na stingeru. U točki infleksije je moment savijanja jednak nuli i mijenja predznak, kao i zakrivljenost koja je prema Euler-Bernoulli teoriji savijanja štapa linearno proporcionalna momentu savijanja (poglavlje 3.3).

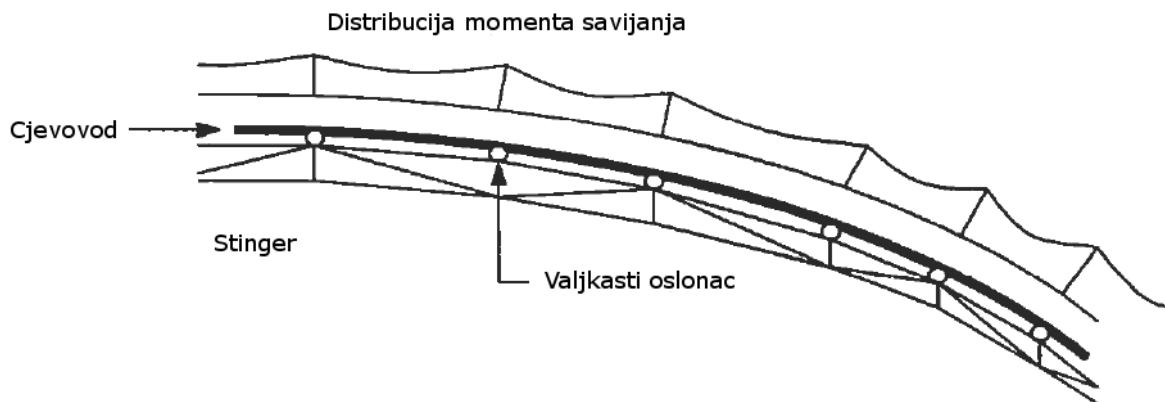
Kod, relativno, manjih dubina vode i cijevi većih promjera, oblik „S“ krivulje cjevovoda je razmjerno položen i prvenstveno je određen sa krutošću cijevi na savijanje. Ponašanje cijevi u slobodnom rasponu, odnosno u sagbendu, je slično ponašanju elastičnog oslonjenog linearног štapa. Nasuprot tome, kod većih dubina i cijevi manjih promjera sa, relativno, malom krutošću na savijanje je ponašanje cijevi slično modelu lančanice (*eng. catenary*). Zakrivljenost cijevi je naglašenija te je prvenstveno određena silom napinjača.

Na kraju područja sagbenda, cijev dolazi u dodir sa morskim dnem u točki dodira (TDP). Ukoliko je dno približno ravno, može se smatrati da cijev leži na dnu nedeformirana, ako se zanemari rezidualno vlačno naprezanje uslijed sile napinjajuća i savijanje u neposrednoj blizini točke dodira. Na određenoj udaljenosti (uobičajeno oko 100 m) od TDP nalazi se točka prividne fiksiranosti cjevovoda iza koje se može smatrati da je stanje cjevovoda konstantno i van utjecaja operacije polaganja.

Statička naprezanja u cijevi u području overbenda su primarno posljedica slijedećih utjecaja:

- zajednički radius zakrivljenosti pod kojim su približno postavljeni valjkasti oslonci cijevi;
- težina slobodnog raspona cijevi između oslonaca;
- lokalno povećanje momenta savijanja preko oslonaca;
- vlačne sile u cijevi uslijed sile napinjanja.

Pri tome je iznos tih naprezanja veoma osjetljiv na promjenu visine valjkastih oslonaca. Zbog relativno malog razmaka između oslonaca, promjena naprezanja u cijevi može biti vrlo izrazita uslijed male promjene visine oslonca.



Sl. 3.1. Distribucija momenta savijanja preko oslonaca cijevi (Ref. [18])

Primarni faktori koji utječu na statička naprezanja u cijevi u području sagbenda su:

- sila napinjajuća;
- težina cijevi u slobodnom rasponu;
- duljina slobodnog raspona.

Svi glavni utjecajni faktori od kojima ovise statička naprezanja u cjevovodu u područjima overbenda i sagbenda djeluju u vertikalnoj ravnini, tako da se statička analiza polaganja cjevovoda svodi na dvodimenzionalni problem. Analiza u tri (3) dimenzije je potrebna samo u slučajevima

polaganja cjevovoda po zavojitoj ruti kod kojih je potrebna detaljna analiza potrebne zakrivljene putanje broda za polaganje.

Deformacija uslijed savijanja je data sa

$$\epsilon = \frac{D}{2R} \quad (3.1)$$

D - vanjski promjer čelika cijevi

R - radijus zakrivljenosti u overbendu

Odgovarajuće aksijalno naprezanje uslijed savijanja

$$\sigma = \frac{ED}{2R} \quad (3.2)$$

E - modul elastičnosti

Prema tome, minimalni radijus zakrivljenosti u overbendu, uz pretpostavku uniformnog radijusa zakrivljenosti na osloncima na brodu i stingeru, se može približno odrediti kao

$$R = \frac{ED}{2\sigma_0 \gamma_{DF}} \quad (3.3)$$

$\sigma_0$  - minimalno specificirano naprezanje tečenja (SMYS)

$\gamma_{DF}$  - faktor sigurnosti

U stvarnosti se cijev više savija preko oslonaca nego između njih, tako da se i naprezanje u overbendu obično povećava na osloncima, a smanjuje između njih (Sl. 3.1).

Dinamička gibanja cjevovoda i rezultirajuća naprezanja tijekom operacije polaganja su pod primarnim utjecajem gibanja broda i stingera. U području overbenda je gibanje cjevovoda fizički ograničeno i uvjetovano gibanjem oslonaca i općenito se mora prilagoditi gibanjima broda i stingera. U slobodnom rasponu (sagbend) gibanje cijevi je posljedica gibanja kraja stingera te promjene napetosti cijevi uslijed gibanja broda naprijed-nazad (zalijetanje, eng. *surge*) i gore-dolje (posrtanje, eng. *pitch*). Utjecaj valova na gibanje cijevi u tom području je uobičajeno od sekundarnog značaja zbog opadanja sila valova sa dubinom.

Gibanja broda za polaganje su posljedica djelovanja valnih sila i mogu se izraziti kao funkcija visine, perioda i dolaznog kuta regularnog vala ili parametara valnog spektra ukoliko se promatra utjecaj iregularnih valova. U većini slučajeva se može smatrati da je dinamički odziv broda za

polaganje neovisan o prisutnosti cjevovoda i stingera, no kod većih dubina mora i cijevi većeg promjera i težina, utjecaj cjevovoda postaje zamjetan.

Gibanje plutajućeg stingera je pod utjecajem gibanja broda te pod utjecajem sila cjevovoda i hidrodinamičkih sila okolne vode. Dok je gibanje prednjeg dijela stingera vezano za gibanje zglobne veze na samom brodu, stražnji kraj stingera je najviše pod utjecajem djelovanja cijevi i hidrodinamičkih sila. Priroda djelovanja tih sila je takva da je vertikalno gibanje stingera uglavnom van faze sa gibanjem broda. Kada se krma broda giba prema gore, sile cijevi te hidrodinamičke sile tjeraju stinger prema dolje i obratno.

### **3.2 Kriteriji analize naprezanja u cjevovodu**

Kriteriji analize naprezanja u cjevovodu su definirani sa industrijskim projektnim propisima i mogu se razlikovati od projekta do projekta, ovisno o zahtjevima naručioca radova. U upotrebi su sljedeći projektni kriteriji, odnosno propisi:

1. DnV Offshore standard OS F-101 – Submarine Pipeline Systems
2. DnV Rules for Submarine Pipeline Systems – 1981
3. British Standard – BS8010 Part 3 – Pipelines subsea
4. ASME B31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems
5. ASME B31.4 – Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and other Liquids
6. Statoil Specification F-SD-101

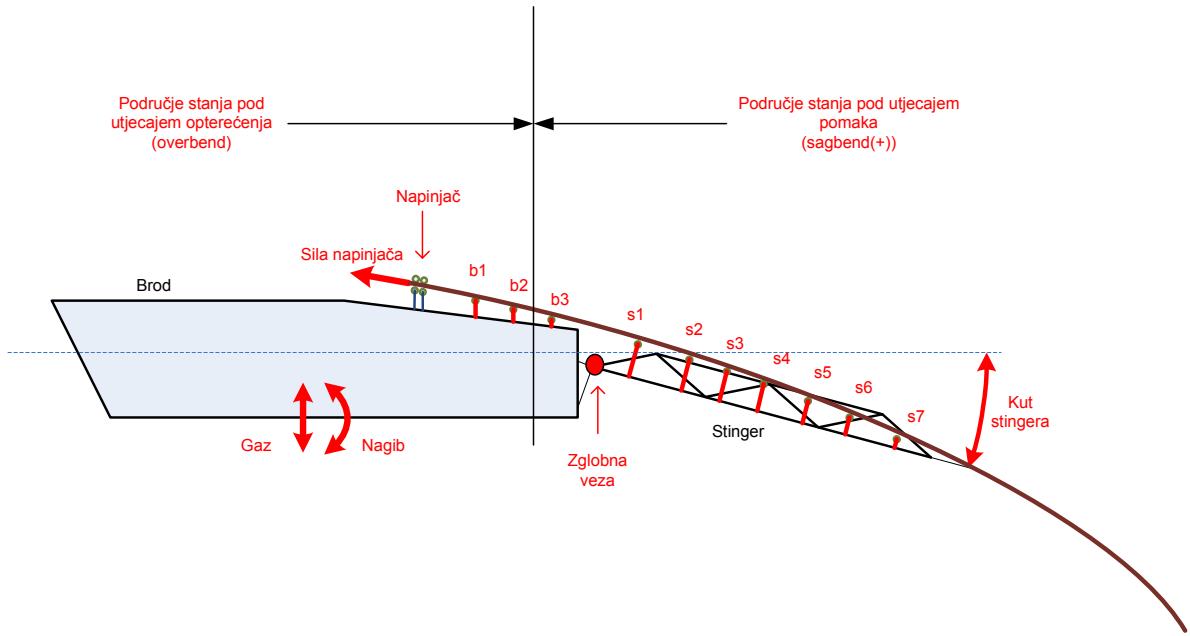
Najpotpuniji i u najširoj primjeni je DNV-OS-F101 standard (Ref. [23]) čije će primjena na određivanje kriterija za instalaciju podmorskih cjevovoda biti opisana u nastavku.

### 3.2.1 DNV OS-F101 projektni kriterij za kombinirana opterećenja

DNV-OS-F101 projektni kriterij propisuje različite kriterije dopuštenih kombiniranih opterećenja ovisno o podjeli na dva područja (Sl. 3.2):

1. **Područje stanja pod utjecajem pomaka** (*eng. Displacement Controlled Condition – DCC*) - deformacija cjevovoda i položaj „S“ krivulje su, prvenstveno, određeni položajem oslonaca i stinger-a, dakle geometrijski su uvjetovani. Kriterij propisuje dopuštenu deformaciju  $\epsilon \leq \epsilon_{\text{crit}}$  u svim analiziranim točkama (čvorovima) overbenda. Tako izračunata dopuštena instalacijska deformacija predstavlja ulazni podatak jedinstven za svaku sekciju cjevovoda. Standardna vrijednost je  $\epsilon_{\text{crit}} = 0.002$  (0.2%). Kod dionica cjevovoda sa betonskim omotačem propisuje se dopuštena deformacija iznad koje dolazi do pucanja betona. To se područje u inženjerskoj praksi neprecizno označava kao **overbend** i ta će se terminologija koristiti nadalje iako je granica overbenda i sagbenda definirana točkom infleksije „S“ krivulje (vidi 3.1).
2. **Područje stanja pod utjecajem opterećenja** (*eng. Load Controlled Condition - LCC*) – deformacija cjevovoda i položaj „S“ krivulje su, prvenstveno, određeni silom napinjачa, dakle uvjetovani su opterećenjima cjevovoda. Kriterij propisuje dopušteni moment savijanja  $M_b \leq M_{\text{crit}}$  u svim analiziranim točkama (čvorovima). Ovo se područje, također neprecizno, označava kao **sagbend**, iako obuhvaća i područje iznad točke infleksije. Zato će se u radu nadalje označavati sa **sagbend(+)** područje iznad točke infleksije „S“ krivulje sa pozitivnim momentom savijanja, a sa **sagbend(-)** područje ispod točke infleksije sa negativnim momentom savijanja.

Granica između područja stanja pod utjecajem pomaka i pod utjecajem opterećenja je, uobičajeno, prije posljednjeg oslonca na brodu ili na fiksnoj rampi koji se nalazi prije zglobne veze sa plutajućim stingerom. Na Sl. 3.2 je to prije oslonca b3 tako da taj oslonac pripada području stanja pod utjecajem opterećenja. Ukoliko brod ima samo fiksnu rampu tada je granica prije posljednjeg oslonca na njoj. Kriterij dopuštenog momenta savijanja za Stanje pod utjecajem opterećenja je općenito konzervativniji i ponekad se primjenjuje i u području sagbenda



Sl. 3.2. Područja stanja pod utjecajem opterećenja i pod utjecajem pomaka

### 3.2.1.1 Stanje pod utjecajem opterećenja

Prilikom instalacije cjevovod je izložen kombiniranom djelovanju momenta savijanja, efektivne aksijalne sile i vanjskog nadpritiska  $p_e$  u cijevi, te prema Ref. [23] mora zadovoljiti slijedeći uvjet u svim presjecima:

$$\left( \gamma_{SC} \cdot \gamma_m \left( \frac{M_d}{\alpha_c \cdot M_p} \right) + \gamma_{SC} \cdot \gamma_m \left( \frac{S_d}{\alpha_c \cdot S_p} \right)^2 \right)^2 + \left( \gamma_{SC} \cdot \gamma_m \cdot \frac{p_e}{p_c} \right)^2 \leq 1 \quad (3.4)$$

$M_d$  je projektni moment savijanja

$$M_d = M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + M_E \cdot \gamma_E \quad (3.5)$$

$S_d$  je projektna efektivna aksijalna sila

$$S_d = S_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + S_E \cdot \gamma_E \quad (3.6)$$

Ostali parametri objašnjeni su u Ref. [23].

Dopušteni moment savijanja je bitan parametar koji definira dopušteno opterećenje za statičku analizu polaganja cjevovoda, kao i ograničenje za optimizaciju konfiguracije. Prema relaciji 3.5, projektni moment savijanja  $M_d$  se izračunava na osnovu njegove funkcionalne (statičke) komponente  $M_F$  i okolišne (dinamičke) komponente  $M_E$ . Da bi se pronašla dopuštena vrijednost funkcionalnog momenta savijanja, okolišna komponenta se izražava preko pretpostavljenog omjera okolišne i funkcionalne komponente

$$\alpha_{ME} = \frac{M_E}{M_F} \quad (3.7)$$

U praksi se uzima  $\alpha_{ME} = 0.3$ .

Uz poznatu projektnu aksijalnu silu i vanjski pritisak, može se iz 3.4 izračunati dopušteni maksimalni projektni moment savijanja  $M_{d\_CRIT}$ . Zatim se na osnovu relacija 3.5 i 3.7 dobiva dopuštena funkcionalna (statička) komponenta momenta savijanja

$$M_{F\_CRIT} = \frac{M_{d\_CRIT}}{\gamma_F \cdot \gamma_C + \alpha_{ME} \cdot \gamma_E} \quad (3.8)$$

### 3.2.1.2 Stanje pod utjecajem pomaka

Cjevovod koji je prilikom instalacije izložen kombiniranom djelovanju longitudinalne tlačne deformacije uslijed momenta savijanja i aksijalne sile, te vanjskom nadpritisku  $p_e$  mora zadovoljiti slijedeći uvjet u svim presjecima:

$$\left( \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} \right)^{0.8} + \frac{p_e - p_{min}}{\frac{p_c}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}}} \leq 1 \quad (3.9)$$

$\varepsilon_d$  je projektna tlačna deformacija

$$\varepsilon_d = \varepsilon_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + \varepsilon_E \cdot \gamma_E \quad (3.10)$$

$p_{min}$  je minimalni unutarnji pritisak. Ostali parametri objašnjeni su u Ref. [23].

Prema relaciji 3.10, projektna tlačna deformacija  $\varepsilon_d$  se izračunava na osnovu funkcionalne (statičke) komponente  $\varepsilon_F$  i okolišne (dinamičke) komponente  $\varepsilon_E$ . Da bi se pronašla dopuštena vrijednost funkcionalne tlačne deformacije, okolišna komponenta se izražava preko prepostavljenog omjera okolišne i funkcionalne komponente

$$\alpha_{EE} = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_F} \quad (3.11)$$

U praksi se, također kao i kod momenta savijanja, uzima  $\alpha_{EE} = 0.3$ .

Uz poznati vanjski pritisak, može se iz 3.9 izračunati dopuštena maksimalna projektna tlačna deformacija  $\varepsilon_{d\_CRIT}$ . Zatim se na osnovu relacija 3.10 i 3.11 dobiva dopuštena funkcionalna (statička) komponenta tlačne deformacije

$$\varepsilon_{F\_CRIT} = \frac{\varepsilon_{d\_CRIT}}{\gamma_F \cdot \gamma_C + \alpha_{EE} \cdot \gamma_E} \quad (3.12)$$

### 3.3 Matematički model polaganja cjevovoda

Od kraja 60-tih godina do danas model S-Lay postupka polaganja cjevovoda i pripadne numeričke metode rješavanja opsežno su obrađene u literaturi (Ref. [24]..[38]). Za statičku analizu polaganja uobičajeno se primjenjuje pojednostavljeni model nelinearnog savijanja u vertikalnoj ravnini  $x-y$  (gdje je  $x$  horizontalna i  $y$  vertikalna koordinatna os). Cjevovod se aproksimira sa homogenim napetim štapom konstantnog poprečnog presjeka. U osnovnoj formulaciji pretpostavlja se da vrijedi Euler-Bernoullijev linearни zakon ponašanja savijanja štapa, odnosno pretpostavka je da su deformacije štapa u elastičnom području. Euler-Bernoullijev zakon ponašanja daje vezu između zakriviljenost štapa  $\kappa$  (koja se može izraziti i preko radijusa savijanja  $R$ ) i momenta savijanja u vertikalnoj ravnini  $M$ :

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad (3.13)$$

gdje je  $I$  moment inercije poprečnog presjeka štapa (cijevi), a umnožak  $EI$  predstavlja krutost štapa na savijanje. Nelinearnost modela slijedi iz pretpostavke velikih pomaka.

Pretpostavka linearног zakona ponašanja u elastičnom području je primjenljiva za većinu slučajeva u praksi. No, u području stanja pod utjecajem pomaka prema DNV OS-F101 (Ref. [23]) se može dozvoliti plastična deformacija. U tom slučaju se primjenjuje nelinearni zakon ponašanja. U najširoj je upotrebi relacija nelinearnog materijala prema Rambergu i Osgoodu (Ref. [39]) koja je data u obliku:

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{M}{M_0} + A \left( \frac{M}{M_0} \right)^B \quad (3.14)$$

gdje su

$A, B$  – koeficijenti karakteristični za određeni materijal

$\kappa_0$  – zakriviljenost cijevi pri minimalno specificiranom naprezanju tečenja  $\sigma_0$

$$\kappa_0 = \frac{2 \cdot \sigma_0}{E \cdot D} \quad (3.15)$$

$M_0$  – moment savijanja pri  $\sigma_0$

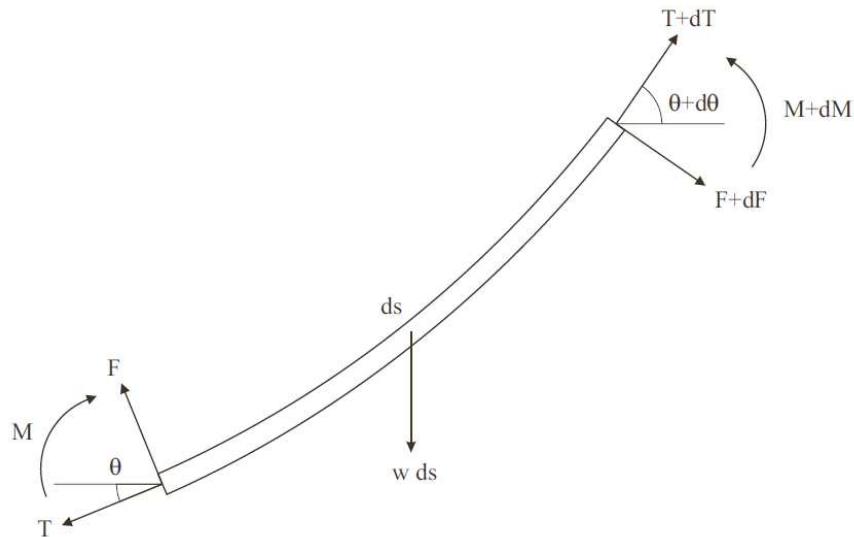
$$M_0 = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot I}{D} \quad (3.16)$$

U dalnjem tekstu će biti izведен model sa linearnim zakonom ponašanja (3.13). Izraz za zakriviljenost pomoću kurvilinearih koordinata (Sl. 3.3)  $s$  (duž krivulje cjevovoda) i  $\theta$  (nagib krivulje u koordinati  $s$ ) glasi:

$$\kappa = \frac{d\theta}{ds} \quad (3.17)$$

Zakriviljenost izražena u rektangularnim koordinatama je

$$\kappa = -\frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.18)$$



Sl. 3.3. Ravnoteža sila na elementarni segment cijevi duljine  $ds$

Ravnoteža sila u horizontalnom x i vertikalnom smjeru y na elementarnom segmentu  $ds$  napete cijevi daje:

$$(T + dT) \cos(\theta + d\theta) - T \cos(\theta) + (F + dF) \sin(\theta + d\theta) - F \sin(\theta) = 0 \quad (3.19)$$

$$(T + dT) \sin(\theta + d\theta) - T \sin(\theta) - (F + dF) \cos(\theta + d\theta) + F \cos(\theta) - wds = 0 \quad (3.20)$$

gdje je

$w$  - težina cijevi po jedinici duljine,

$T$  – aksijalna sila ili napetost,

$F$  – sručna sila.

Za male vrijednosti  $d\theta$  vrijedi aproksimacija:

$$\cos(\theta + d\theta) \approx \cos(\theta) - \sin(\theta)d\theta \quad (3.21)$$

$$\sin(\theta + d\theta) \approx \sin(\theta) + \cos(\theta)d\theta \quad (3.22)$$

tako da se uvrštavanjem jednadžbi 3.21 i 3.22 u 3.19 i 3.20 dobiva

$$-(T \sin(\theta) - F \cos(\theta))d\theta + dT \cos(\theta) + dF \sin(\theta) = 0 \quad (3.23)$$

$$(T \cos(\theta) + F \sin(\theta))d\theta + dT \sin(\theta) - dF \cos(\theta) - wds = 0 \quad (3.24)$$

Množenje 3.23 sa  $(-\sin(\theta))$ , i 3.24 sa  $(\cos(\theta))$ , pa njihovo pribrajanje uz dijeljenje sa  $ds$  daje

$$T \frac{d\theta}{ds} - \frac{F}{ds} - w_s \cos(\theta) = 0 \quad (3.25)$$

Ravnoteža momenata oko donjeg dijela štapnog segmenta na Sl. 3.3 daje:

$$-M + (M + dM) - (F + dF)ds = 0 \quad (3.26)$$

Odakle uz  $dFd ds \approx 0$  i dijeljenje sa  $ds$  slijedi relacija za smičnu silu

$$F = \frac{dM}{ds} \quad (3.27)$$

Uvrštavanjem 3.27 uz 3.13 i 3.17 u 3.25 slijedi

$$T \frac{d\theta}{ds} - EI \frac{d^3\theta}{ds^3} - w \cos(\theta) = 0 \quad (3.28)$$

Ukoliko se promatra ravnoteža horizontalnih sila između točke dodira sa morskim dnom (O) gdje je  $\theta = 0$  i  $H_O = T_O$  i proizvoljnog presjeka, slijedi relacija za konstantnu horizontalnu komponentu sile u proizvolnjom presjeku štapa:

$$H_0 = T \cos(\theta) + F \sin(\theta) \quad (3.29)$$

Uvrštavanjem 3.29, uz relaciju 3.27, u 3.28 dobiva se jednadžba homogenog napetog štapa pod utjecajem vlastite težine:

$$EI \frac{d}{ds} \left[ \sec(\theta) \frac{d^2\theta}{ds^2} \right] - H_0 \sec^2(\theta) \frac{d\theta}{ds} + w = 0 \quad (3.30)$$

Ta jednadžba je poznata kao jednadžba nelinearnog savijanja i vrijedi i za plitke i duboke vode i male i velike pomake. To je nelinearna diferencijalna jednadžba trećeg reda sa nepoznatom duljinom cijevi u slobodnom rasponu i nepoznatom reakcijom podloge. Rubni uvjeti obično uključuju pomak na krajevima raspona cijevi pa se 3.30 može izraziti i kao jednadžba sa funkcijom  $y(s)$  umjesto  $\theta(s)$ . Taj oblik je još složeniji. Uz četiri (4) rubna uvjeta potrebna je dodatna rubna jednadžba za određivanja nepoznate duljine raspona elastične linije cijevi. Te se jednadžbe obično tretiraju kao problemi rubne vrijednosti (*eng. Boundary Value Problem - BVP*) i rješavaju se numeričkim metodama.

### **3.4 Softver za analizu postupka instalacije podmorskih cjevovoda**

Glavnina specijaliziranih softverskih paketa za statičku analizu S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda baziraju se na rješavanju nelinearnog dvodimenzionalnog modela savijanja sa velikim pomacima pomoću nelinearne metode konačnih elemenata. Specijalizirana softverska rješenja imaju prednost pred softverskim paketima koji podržavaju nelinearne konačne elemente opće namjene zbog praktičnijeg rukovanja sa velikim brojem parametara koje treba varirati tijekom analize postupka polaganja.

Specijalizirani softverske paketi za simulaciju polaganja podmorskih cjevovoda su:

- **NLay** – softver za 2D statičku analizu S-Lay postupka polaganja baziran na MKE tvrtke Saipem
- **EMC Pipe** – softver za 2D statičku i dinamičku analizu S-Lay postupka polaganja baziran na MKE tvrtke Saipem
- **OFFPIPE** – najrašireniji standardni softver za 2D i 3D statičku i dinamičku analizu postupka polaganja baziran MKE
- **MCS Pipelab** – softver za 2D i 3D statičku i dinamičku analizu postupka polaganja tvrtke MSC Kenny

- **PIPELINE** – softver za analizu postupka polaganja baziran na metodi konačnih razlika tvrtke ZENTECH UK
- **ORCALAY** – softver 2D i 3D statičku i dinamičku analizu postupka polaganja tvrtke Orcina software Ltd.

Programski paketi bazirani na MKE opće namjene, koji mogu simulirati proces polaganja podmorskih cjevovoda su:

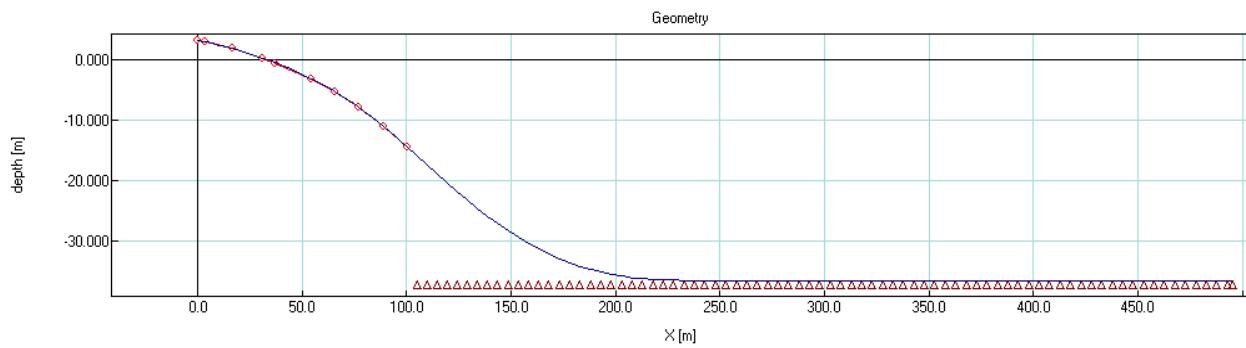
- **ABAQUS**
- **ANSYS**

### 3.4.1 NLay softver

Programski paket NLAY je softver za analizu naprezanja, momenta savijanja i dr. koja se javljaju tokom instalacije cjevovoda. Sam program daje tekstualni prikaz ulaznih podataka, a grafički i tekstualni prikaz izlaznih podataka.

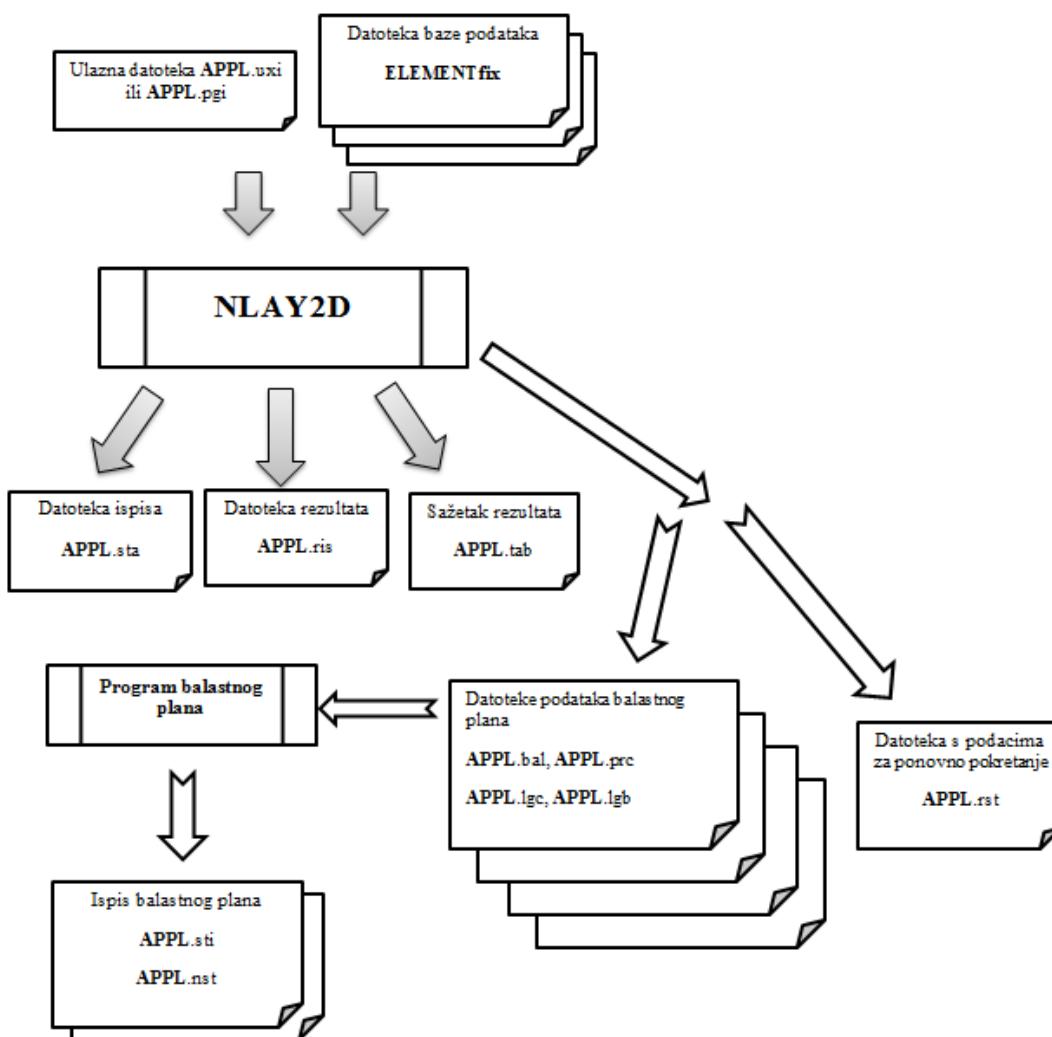
NLAY2D je program primarne namjene za statičku analizu za S-lay. Program je konzolna aplikacija za windows 9X/NT napravljena u programskom jeziku FORTRAN. Može se pokretati kao zasebna aplikacija (u DOS-u) ili kao eksterni proces unutar SEAL Programs Suite Manager softvera. Program ima sljedeća važnija obilježja:

1. Pojednostavljeni opis brodova za instalaciju je postignut s opisom geometrije u vanjskim ASCII datotekama, koji djeluju poput baze podataka;
2. Opis pojedinih dijelova brodova za instalaciju koja su izvan prije spomenute baze podataka;
3. Nelinearno ponašanje materijala, koje je opisano u ulaznoj datoteci;
4. Pojednostavljen opis unosa podataka za instalacijske brodove s priključenim plutajućim elementom podupirača;
5. Grub, vrlo brz rješavač koji koristi Newton – Raphson algoritam;
6. Višesmjerni prilaz rješenju, u uvjetima graničnih vrijednosti i fiksnom/pokretnom modeliranju podupirača.



Sl. 3.4. Primjer grafičkog prikaza rezultata simulacije S-Lay postupka softverom NLayer

Program započinje analizu sa stanjem cjevovoda bez naprezanja i zatim se tijekom proračuna jedan kraj cijevi spušta na morsko dno. Kontakt između cijevi i morskog dna i između cijevi i rampi i oslonaca na podupiraču broda polagača se simulira pomoću specijalnih nelinearnih elemenata. Osim toga, uzima se u obzir i utjecaj hidrostatskog pritiska na deformacije cijevi.



*Sl. 3.5. Struktura sustava datoteka softvera NLay (Ref.[41])*

NLay softver koristi nekoliko 2D koordinatnih sistema za definiciju geometrije S-Lay problema polaganja podmorskih cjevovoda:

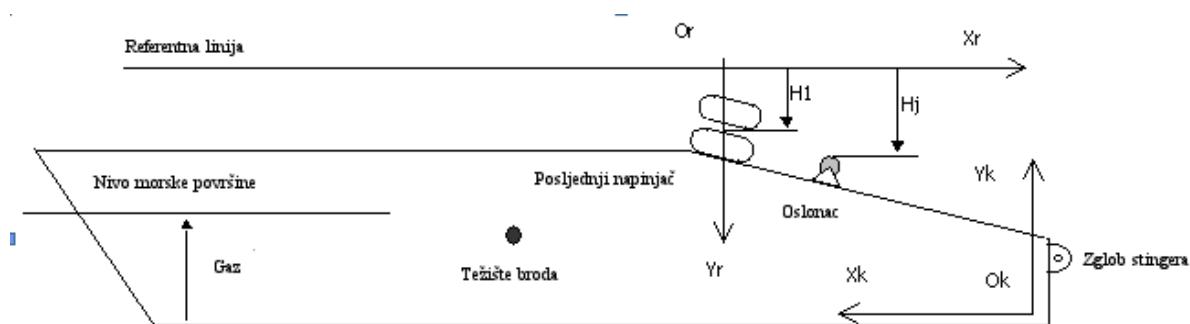
1. Koordinatni sistem broda
2. Koordinatni sistem stingera
3. Globalni koordinatni sistem

NLAY2D koristi za opis broda ulaznu datoteku koja se nalazi u bazi podataka. Datoteke imaju ekstenziju ime\_datoteke.uxi. Za daljnji unos podataka koristi se prije napravljena tekstualna datoteka.

Program odabire model broda na bazi unesenog seta podataka i izvlači sve potrebne podatke iz baze podataka za taj brod.

Brodski koordinatni sistem opisuje :

- poziciju zadnjeg napinjača na barci
- poziciju (točku) centra broda, vezano za korištenje trima (nagiba) broda
- podatke o geometriji nosača na rampi broda
- poziciju zglobne veze stingera (*eng. stinger hinge*)

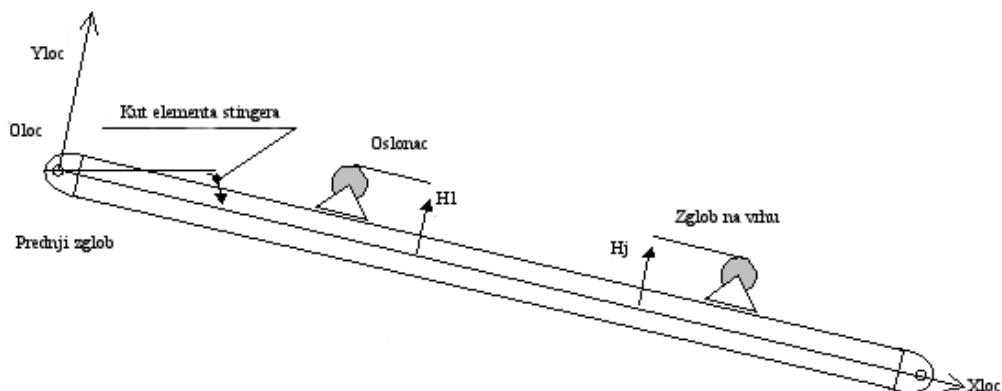


Sl. 3.6. Koordinatni sistem broda softvera NLayer

(Xr-Or-Yr) je referentni koordinatni sistem (koristi se za visinu nosača u ulaznoj datoteci);

(Xk-Ok-Yk) je koordinatni sistem samog broda (koristi se za opis geometrije broda u bazi podataka);

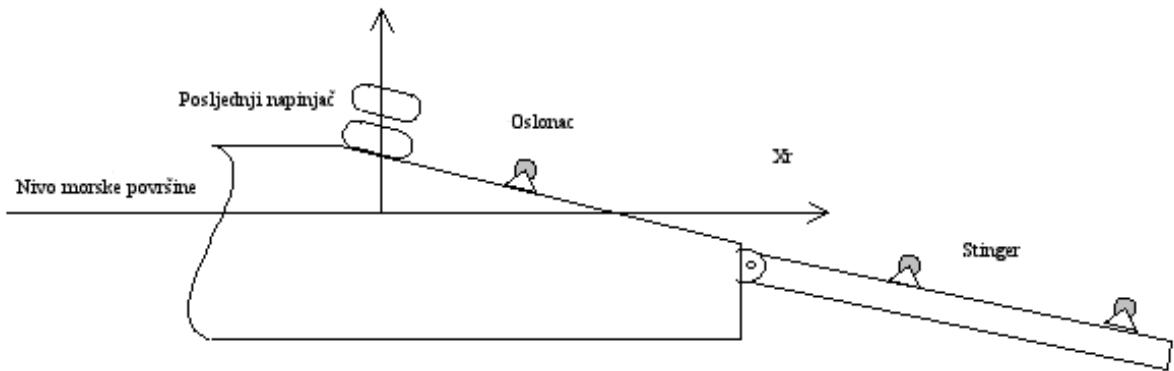
H1,...Hj su visine oslonaca (upisanih sa strane korisnika u ulaznoj datoteci).



Sl. 3.7. Koordinatni sistem stingera softvera NLayer

(Xloc-Oloc-Yloc) je koordinatni sistem stinger elementa (koristi se u bazi podataka i u ulaznoj datoteci)

H1,...,Hj su visine oslonaca na stingeru (unose se u ulaznoj datoteci od strane korisnika)



Sl. 3.8. Globalni koordinatni sistem softvera NLay

(Xg-Og-Yg) je globalni koordinatni referentni sistem ( koristi se u izlaznoj datoteci)



## 4 OPTIMIZACIJA KONFIGURACIJE S-LAY POSTUPKA

### 4.1 Metodologija statičke analize polaganja cjevovoda

Tijekom tipične statičke analize polaganja cjevovoda, inženjer instalacije mora optimizirati veliki broj parametara s ciljem pronalaženja njihove kombinacije koja će omogućiti sigurnu operaciju polaganja uz minimalan broj potrebnih dana, a posljedično i troškova cijele operacije. Metodologija inženjerske analize polaganja cjevovoda S-Lay postupkom, uobičajeno se bazira na statičkoj analizi opterećenja cjevovoda u „S“ krivulji (vlačna sila tj. sila napinjanja, savijanje, pritisak, kontaktne sile na osloncima te kontaktne sile na morskom dnu) sa ciljem pronalaženja S-Lay statičke konfiguracije polaganja. Statička S-Lay konfiguracija je uvjetovana slijedećim parametrima:

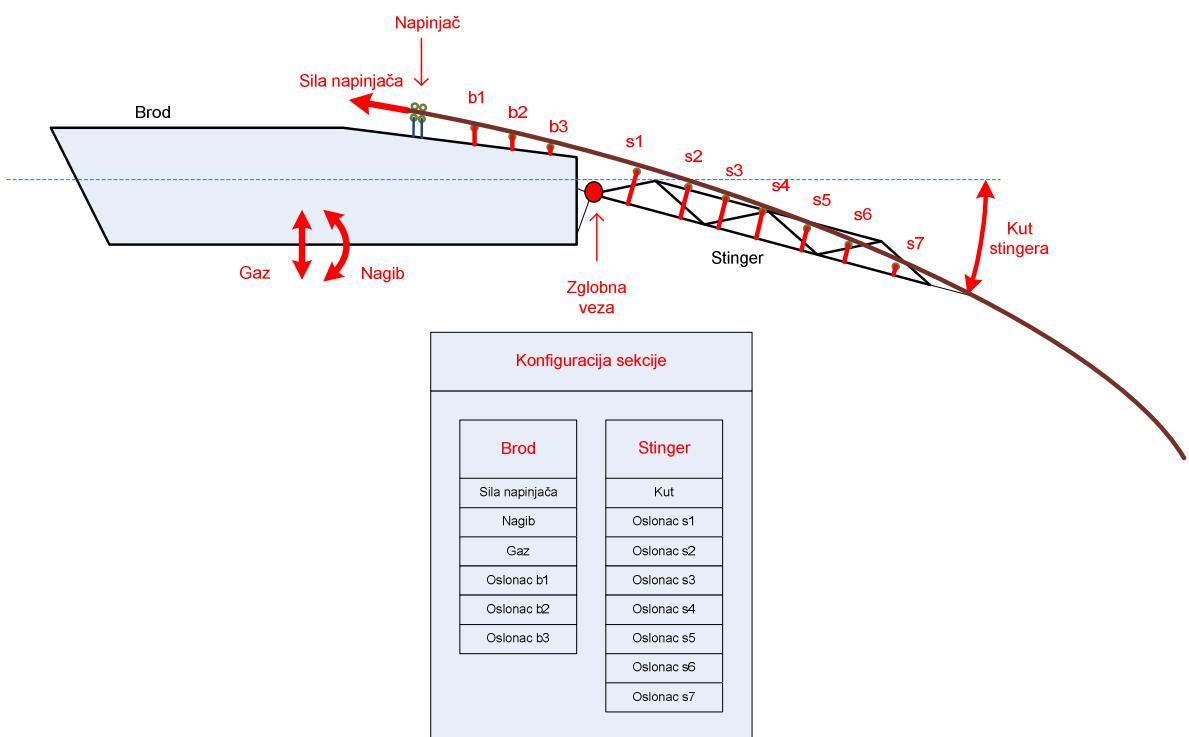
- Sila napinjača na brodu,
- Nagib broda,
- Gaz broda,
- Raspored oslonaca na brodu i na stingeru,
- Visine oslonaca, odnosno njihov srednji radijus zakriviljenosti,
- Kut stingera,
- Težina cijevi,
- Krutost cijevi na savijanje.

Zakriviljenost „S“ krivulje u overbendu je pod utjecajem kuta stingera te konfiguracije (visina) oslonaca na brodu i na stingeru. Sila napinjača utječe na zakriviljenost „S“ krivulje u sagbendu te na moment savijanja na vrhu stingera. Potrebna sila napinjača ovisi o dubini vode, uronjenoj težini cijevi, dopuštenom radijusu zakriviljenosti u overbendu, kutu odvajanja cijevi od vrha stingera te o dopuštenom radijusu zakriviljenosti u sagbendu.

Glavni parametri konfiguracije polaganja cjevovoda S-Lay postupkom koji se podešavaju tijekom instalacijske analize prikazani su u tablici 4.1 i na slici 4.1 Dubina vode i težina cijevi su zadane projektom cjevovoda, tako da one ne spadaju u parametre koji se optimiziraju tijekom instalacijske analize.

| <b>Brod za polaganje</b>                          |  |
|---|--|
| Sila napinjača                                    |  |
| Kut nagiba broda                                  |  |
| Gaz broda   |  |
| Visine oslonaca                                   |  |
| <b>Stinger</b>                                    |  |
| Kut stingera                                      |  |
| Visine oslonaca                                   |  |
| Balastni plan (samo za<br>plutajući tip stingera) |  |
| <b>Uzgonski tankovi</b>                           |  |
| Kapacitet (uzgonska sila)                         |  |
| Razmak  |  |

Tab. 4.1. Parametri S-Lay konfiguracije polaganja



Sl. 4.1. Parametri S-Lay konfiguracije polaganja

Tijekom standardne procedure, inženjer analitičar instalacije cjevovoda namješta pojedinačno sve navedene parametre te nakon svake promjene pokreće softver za analizu polaganja te provjerava da li postavljena konfiguracija zadovoljava ograničenja postavljena u industrijskim propisima i standardima. Takva praksa, uobičajeno, zahtijeva veliki broj radnih sati da bi se pronašlo zadovoljavajuće rješenje. Uz to, postoji i velika mogućnost pogreške uslijed istovremenog variranja velikog broja parametara te popratnog velikog broja ulaznih datoteka.

## 4.2 Kriteriji statičke analize polaganja podmorskih cjevovoda

Jedan od glavnih ciljeva optimizacije parametara konfiguracije polaganja je zadovoljavanje projektnih kriterija. Projektni kriteriji su propisani sa svrhom:

1. **Osiguravanja integriteta cjevovoda** tijekom procesa polaganja;
2. Zadovoljavanja **operativnih ograničavajućih kriterija instalacijske opreme** (brodovi itd...) planiranih za određeni projekt.

**Projektni kriteriji sa svrhom osiguravanja integriteta cjevovoda** su definirani sa industrijskim projektnim propisima i mogu se razlikovati od projekta do projekta, ovisno o zahtjevima naručioca radova. U upotrebi su slijedeći projektni kriteriji, odnosno propisi:

- DnV Offshore standard OS F-101 – Submarine Pipeline Systems
- DnV Rules for Submarine Pipeline Systems – 1981
- British Standard – BS8010 Part 3 – Pipelines subsea
- ASME B31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems
- ASME B31.4 – Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and other Liquids
- Statoil Specification F-SD-101

Prvi navedeni od projektnih kriterija DNV-OS-F101 (Ref. [23]) je najrelevantniji te nalazi najširu primjenu u većini projekata instalacije cjevovoda od strane tvrtke Saipem, tako da je uzet kao predložak za definiciju, testiranje te kalibraciju optimizacijskog algoritma aplikacije SlayOpti. Svi ostali kriteriji predstavljaju, u biti, slične kombinacije dopuštenog savijanja ili ekvivalentnog naprezanja te dopuštene deformacije u overbendu i sagbendu. Shodno tome, fleksibilna mogućnost definicije projektnog kriterija omogućiti će optimizaciju prema proizvoljnom od navedenih kriterija, kao što je opisano u narednim poglavljima.

S obzirom na moguće varijacije kriterija u overbendu i sagbendu, pristupilo se fleksibilnoj definiciji kriterija koja dozvoljava postavljanje i dopuštenog statičkog momenta savijanja i dopuštene deformacije u overbendu i u sagbendu.

Pod **operativne ograničavajuće kriterije instalacijske opreme** ubrajamo slijedeće:

- Dopuštene sile reakcija oslonaca cijevi na brodu i na stingeru
- Maksimalna primjenljiva sila napinjača
- Ograničenje kuta plutajućeg stingera s obzirom na izvedivost balastnog plana

### **4.3 Metodologija dinamičke analize polaganja cjevovoda**

Nakon pronađene optimalne statičke konfiguracije, provodi se dinamička analiza s ciljem procjene utjecaja okolišnih uvjeta. To su utjecaj morskih valova, struja te vjetra, ali je pri tome najveću važnost ima provjera generiranih dinamičkih opterećenja uslijed djelovanja morskih valova pod određenim upadnim kutovima na brod. Dinamička analiza utjecaja morskih valova se provodi na osnovu simulacije iregularnog stanja mora. Iregularno stanje mora se opisuje pomoću valnog spektra. Kod analiza podmorskih cjevovoda u najširoj je upotrebi JONSWAP spektar koji opisuje stanja mora koja se razvijaju pod utjecajem vjetra, a određen je sa tri parametra:

1. Značajna visina vala  $H_s$  – definira se kao srednja vrijednost trećine najviših valova u promatranom stanju mora. To je visina koju većina promatrača percipira kao opaženu visinu valova u promatranom stanju mora,
2. Vršni period valnog spektra  $T_p$ ,
3. Faktor oblika vrha spektra  $\gamma$ .

Konačni rezultat dinamičke analize je maksimalna značajna visina vala  $H_s$  pri kojoj su zadovoljeni svi kriteriji statičke analize. Faktor oblika vrha spektra  $\gamma$  se odabire na osnovu valne statistike za promatrano područje, dok preostali parametar, vršni period valnog spektra  $T_p$  eliminira kao slobodna varijabla na tak način da se uspostavi relacija  $T_p = f(H_s)$  na osnovu regresijske analize valne statistike.

Dopuštena značajna visina vala  $H_s$  obrnuto je proporcionalna vremenu čekanja uslijed vremenskih uvjeta (*eng. weather standby*). To vrijeme čekanja se procjenjuje na osnovu dugoročne statistike morskih valova i biti će to veće, što je dopuštena značajna visina vala manja. U svrhu, već

spomenute, minimizacije minimalnog broja potrebnih dana, a time i troškova cijele operacije, potrebno je postići što veću dopuštenu značajnu visinu vala  $H_s$ .

U rijetkim slučajevima u praksi se primjenjuje metodologija pronalaženja konfiguracije polaganja na osnovu rezultata dinamičke analize uz propisanu minimalnu značajnu visinu vala  $H_s$  koju treba postići. Takva metodologija je u principu nepraktična i prezahtjevna sa stanovišta potrebnog broja radnih sati za provođenje analiza. Uobičajeni je pristup namještanju konfiguracije polaganja na osnovu rezultata statičke analize, pri čemu se ciljevi i ograničenja statičke analize postavljaju na taj način da se ostavi dovoljno prostora tako da dinamička opterećenja zadovoljavaju kriterije prilikom naknadne dinamičke analize te da se minimiziraju dinamička opterećenja na pojedinim osloncima cjevi. To su slijedeći ciljevi i ograničenja:

- Postavljanje dinamičkih (*eng. environmental*) komponenti kriterija analize. Uobičajeno se dinamičke komponente postavljaju na vrijednost od 30% statičkih komponenti, tako da je krajnji efekt smanjenje dopuštenih statičkih opterećenja za 30%,
- Minimizacija maksimalne vrijednosti statičkih opterećenja u promatranom području krivulje cjevovoda,
- Ujednačavanje distribucije statičkih opterećenja na osloncima cjevi. Svodi se na minimizaciju devijacije od srednje vrijednosti,
- Ujednačavanje distribucije statičkih sila reakcija na osloncima.

Nadalje opisana i implementirana i optimizacija konfiguracije polaganja sa bazira na pristupu korištenja statičke analize sa modificiranim ciljevima i ograničenjima u svrhu zadovoljavanja kriterija naknadne dinamičke analize.

#### **4.4 Parametri optimizacije**

Cilj optimizacije statičke analize polaganja je pronalaženje optimalne kombinacije parametara koji definiraju konfiguraciju S-Lay postupka polaganja, pri čemu su zadovoljenu svi zadani projektni kriteriji. Cjelokupan proces S-Lay optimizacije polaganja definirati će se sa skupom invarijantnih (konstantnih) parametara te sa skupom varijabilnih parametara.

**Invarijantni (konstantni) parametri** su specifični za svaku pojedinačnu sekciju duž rute cjevovoda i definiraju optimizacijsku okolinu kao skup promjenljivih stanja tijekom procesa polaganja. U tu grupu spadaju parametri koji predstavljaju ulazne varijable Nlay rješavača te su izvedeni iz promjenljivih svojstava cjevovoda duž rute:

1. Dubina vode
2. Vanjski promjer cjevovoda
3. Debljina stjenke cijevi
4. Težina cijevi u zraku
5. Uronjena težina cijevi
6. Naprezanje na granici tečenja materijala cijevi (*eng. Specified Mean Yield Stress – SMYS*)
7. Ekvivalentni Youngov modul (modul elastičnosti) cijevi (sa betonskim omotačem ukoliko je prisutan).

**Varijabilni parametri** su parametri čije vrijednost treba odrediti tijekom procesa optimizacije.

To su, dakle, optimizirani parametri i mogu se grupirati na slijedeći način:

1. Parametri broda
  - 1.1 Sila napinjača
  - 1.2 Konfiguracija oslonaca (raspored visina oslonaca)
  - 1.3 Kut nagiba broda
  - 1.4 Gaz broda
  - 1.5 Lista korištenih elemenata stingera (može biti prazna)
2. Parametri stingera (za svaki pridruženi element stinger-a)
  - 2.1 Konfiguracija valjkastih oslonaca (raspored visina oslonaca)
  - 2.2 Kut stinger-a
  - 2.3 Smjer punjena balastnih tankova plutajućeg stinger-a (regularan ili obrnut)
  - 2.4 Stanja punjenja balastnih tankova bez daljinske kontrole – balastni tankovi koji se ne mogu kontinuirano puniti ili prazniti preko daljinske kontrole, već je potrebna intervencija ronilaca. Definirani su binarnim stanjem pun-prazan.
  - 2.5 Ukupna uzgonska sila stinger-a

## 4.5 Uvjeti optimizacije

Uvjeti optimizacije mogu se podijeliti u dvije grupe s obzirom na neophodnost njihovog ispunjavanja po završetku optimizacijskog procesa:

1. **Nužni uvjeti optimizacije** – ispunjavanje tih uvjeta je obavezno i predstavljaju osnovu za definiciju funkcija ograničenja optimizacije ta za definiciju cjelokupnog postupka optimizacije. Nužni uvjeti optimizacije su izvedeni iz prethodno opisanih kriterija statičke analize polaganja (poglavlje 4.2):
  - Zadovoljavanje kriterija integriteta cjevovoda,
  - Zadovoljavanje operativnih ograničavajućih kriterija instalacijske opreme,
2. **Dodatni uvjeti optimizacije** – optimizacijski proces treba težiti ispunjavanju tih uvjeta u najvećoj mogućoj mjeri, ali nisu obavezni. Većina tih uvjeta predstavlja osnovu za definiciju funkcije cilja optimizacije. Optimizacijski problem sa tako definiranim višestrukim ciljevima postaje višekriterijski (*eng. multiobjective*) i u tom slučaju svaki cilj (kriterij) optimizacije treba imati definiran težinski faktor cilja koji opisuje relativnu važnost svakog uvjeta (cilja) u usporedbi sa ostalim uvjetima. Optimizacija prema tim uvjetima će biti konfigurabilna na osnovu postavljenih težinskih faktora. U dodatne uvjete optimizacije ubrajamo:
  - Minimizacija maksimalnih vrijednosti za definirane kriterije integriteta cjevovoda - npr. maksimalna vrijednost momenta savijanja, naprezanja ili deformacije u svim proračunskim čvorovima u overbendu ili sagbendu;
  - Minimizacija maksimalnih vrijednosti za definirane operativne ograničavajuće kriterije instalacijske opreme - npr. maksimalna vrijednost sile reakcije na svim osloncima;
  - Jednolika distribucija sile reakcije po osloncima – minimizacija devijacije sile reakcije oslonaca od njihove srednje vrijednosti uz izbjegavanje oslonaca koji nisu u kontaktu sa cijevi;
  - Jednolika distribucija opterećenja po osloncima – minimizacija devijacije opterećenja po pojedinim osloncima od njihove srednje vrijednosti
  - Primjena minimalne potrebne sile napinjачa.

#### **4.5.1 Polaganje s uzgonskim tankovima**

Ukoliko se ne može pronaći konfiguracija koja zadovoljava glavne uvjete optimizacije, tada se treba provjeriti mogućnost upotrebe uzgonskih tankova (*eng. buoyancy tanks*). Uzgonksi tankovi određenog kapaciteta postavljaju se na određenoj međusobnoj fiksnoj udaljenosti te smanjuju uronjenu težinu cijevi. Smanjenje uronjene težine cijevi smanjuje opterećenja cjevovoda i potrebnu silu napinjачa.

Cilj optimizacije polaganja s uzgonskim tankovima je pronaći minimalan potreban broj uzgonskih tankova, distribuiranih po određenom uzorku po slobodnom rasponu cjevovoda, s kojima će biti zadovoljeni glavni uvjeti optimizacije. Cilj optimizacije biti će postignut ako se kao primarni prioritet zada pronalaženje maksimalne primjenljive udaljenosti uzgonskih tankova uz sekundarni prioritet upotrebe minimalnog potrebnog uzgonskog kapaciteta (veličine) tankova. Pretpostavka je da su uzgonksi tankovi jednoliko distribuirani sa korakom udaljenosti koji je višekratnik polovice standardne duljine segmenta cijevi (12.2 m). Parametri koji će se definirati kao optimizacijske postavke biti će maksimalan početni i minimalan primjenljiv razmak uzgonskih tankova, korak promjene razmaka te lista mogućih kapaciteta uzgonskih tankova.

## 5 PRIMJENA GENETSKOG ALGORITMA NA OPTIMIZACIJU S-LAY KONFIGURACIJE

### 5.1 Formulacija optimizacijskog problema

Problem optimizacije konfiguracije S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda spada u grupu općih problema nelinearne optimizacije (Ref. [42]). Problem je uz okarakteriziran miješanim kontinuiranim i diskretnim varijablama te nelinearnom funkcijom cilja te nelinearnim funkcijama ograničenja. Funkcija cilja, kao i funkcije ograničenja se ne mogu prikazati u analitičkom obliku, već predstavljaju rezultate numeričke simulacije postupka polaganja.

Opći problem nelinearne optimizacije može se formulirati na slijedeći način:

Pronadi vektore

$$\begin{aligned} X^* &= (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)^T \\ Y^* &= (y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*)^T \end{aligned}$$

koji minimiziraju funkciju cilja

$$f(X^*, Y^*, P, R) = \min [f(X, Y, P, R)]$$

i zadovoljavaju ograničenja

$$g_k(X^*, Y^*, P, R) \geq 0, \quad k \in \{1, \dots, r\} \quad (5.1)$$

$$h_l(X^*, Y^*, P, R) = 0, \quad l \in \{1, \dots, s\} \quad (5.2)$$

te zadane gornje i donje granice optimizacijskih varijabli

$$(X_i)_{\min} \leq X_i \leq (X_i)_{\max}, \quad i \in \{1, \dots, m\}$$

$$(Y_j)_{\min} \leq Y_j \leq (Y_j)_{\max}, \quad j \in \{1, \dots, n\}$$

gdje je

$f(X, Y, P, R)$  - funkcija cilja,

$X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T, X \in \mathbb{R}^m$  – vektor realnih (kontinuiranih) optimizacijskih varijabli,

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, Y \in \mathbb{Z}^n$  – vektor cjelobrojnih (diskontinuiranih) optimizacijskih varijabli,

$P = (p_1, p_2, \dots, p_p)^T, P \in \mathbb{R}^p$  – vektor invarijantnih realnih parametara,

$R = (r_1, r_2, \dots, r_q)^T, R \in \mathbb{Z}^q$  – vektor invarijantnih cjelobrojnih parametara,

$g_k(X, Y, P, R) \geq 0$  – funkcije ograničenja u obliku nejednakosti,

$h_l(X, Y, P, R) = 0$  – funkcije ograničenja u obliku jednakosti,

m – broj realnih optimizacijskih varijabli,

n – broj cjelobrojnih optimizacijskih varijabli,

r – broj funkcija ograničenja u obliku nejednakosti,

s – broj funkcija ograničenja u obliku jednakosti,

p – broj invarijantnih realnih parametara,

q – broj invarijantnih cjelobrojnih parametara.

Svaka funkcija ograničenja u obliku jednakosti se može zamijeniti sa dvije (2) funkcije ograničenja u obliku nejednakosti, tako da se 5.1 i 5.2 mogu nadomjestiti sa

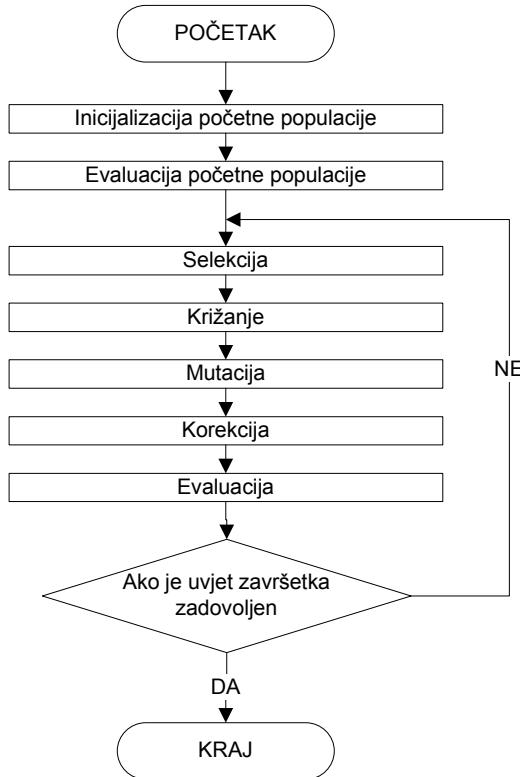
$$g_k(X^*, Y^*, P, R) \geq 0, \quad k \in \{1, \dots, r+2s\} \quad (5.3)$$

## 5.2 Genetski algoritam

Optimizacija konfiguracije S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda može se svrstati u grupi teških problema nelinearne optimizacije. Nelinearna funkcija cilja, kao i nelinearne funkcije ograničenja se izračunavaju na osnovu rezultata numeričke simulacije postupka polaganja pomoću softvera N-Lay, dakle nisu dostupne u analitičkom obliku. Shodno tome, derivacije prvog i drugog reda neophodne za upotrebu gradijentnih metoda mogu se proračunati samo približnim metodama kao što je npr. metoda konačnih razlika. Pri tome bi metoda konačnih razlika zahtijevala barem dvije N-Lay simulacije po svakoj parcijalnoj derivaciji funkcije cilja i za svaki parametar optimizacije.

Ukoliko bi se upotrijebile standardne metode nelinearnog programiranja (gradijentne i druge metode) za tako definiran problem, pokazale bi se neefikasnim, zahtjevnim sa stanovišta računarskih resursa i, u većini slučajeva, pronalazile bi lokalni optimum najbliži početnoj točki. Za takvu vrsti nelinearnih problema su najprikladnije heurističke optimizacijske metode koje su sposobne pronaći globalni optimum upotrebom usmjerenih slučajnih pretrage. Genetski algoritmi su se pokazali prikladnim za rješavanjem za problema takve vrste i, u većini slučajeva, mogu pronaći globalno optimalno rješenje sa visokom vjerojatnošću.

Genetski algoritam (GA) je algoritam koji koristi usmjerenu slučajnu (heurističku, stohastičku) metodu pretraživanja koja se bazira na modelu prirodne evolucije (Ref. [43]). Prirodna evolucija sa bazira na selekcijskom procesu koji je usmjeren ka preživljavanju najvrsnijih (najboljih) jedinki određene vrste. Operatori genetskog algoritma djeluju na jedinke određene populacije kroz više generacija sa ciljem postepenog poboljšavanja njihove kvalitete (*eng. fitness*). Jedinke koje predstavljaju moguća rješenja se često uspoređuju sa kromosomima i prikazuju se pomoću nizova znakova (*eng. string*) ili binarnih brojeva. Baš kao i neke druge heurističke metode (npr. simulirano kaljenje – *eng. simulated annealing*), genetski algoritam bi trebao pronaći globalni minimum čak i u slučajevima kada funkcija cilja ima nekoliko ekstrema, uključujući lokalne maksimume i minimume.



Sl. 5.1. Opći dijagram toka genetskog algoritma

Prema Goldbergu (Ref. [43]) genetski algoritam se razlikuje od klasičnih optimizacijskih metoda u slijedećim bitnim aspektima:

1. Skup točaka odnosno populacija točaka (probni vektor rješenja) se koristi na početku postupka umjesto jedne početne točke. Ako je broj optimizacijskih varijabli  $n$ , obično se veličina populacije uzima kao  $2n$  do  $4n$ . Budući da su nekoliko točaka koristi kao početno rješenja, manja je vjerojatnost da će genetski algoritam biti uhvaćen u lokalnom optimumu.
2. GA koristi samo vrijednosti funkcije cilja. Derivacije se ne koriste u postupku pretraživanja.
3. Kod GA su optimizacijske varijable su predstavljene kao nizovi binarnih varijabli koje odgovaraju kromosomima u genetici. Stoga je taj postupak pretraživanja, po samoj svojoj prirodi, primjenljiv za rješavanje problema diskretnе i cjelobrojne optimizacije. Kod

kontinuiranih optimizacijskih varijabli duljina stringa se može prilagođavati bilo kojoj željenoj preciznosti rješenja.

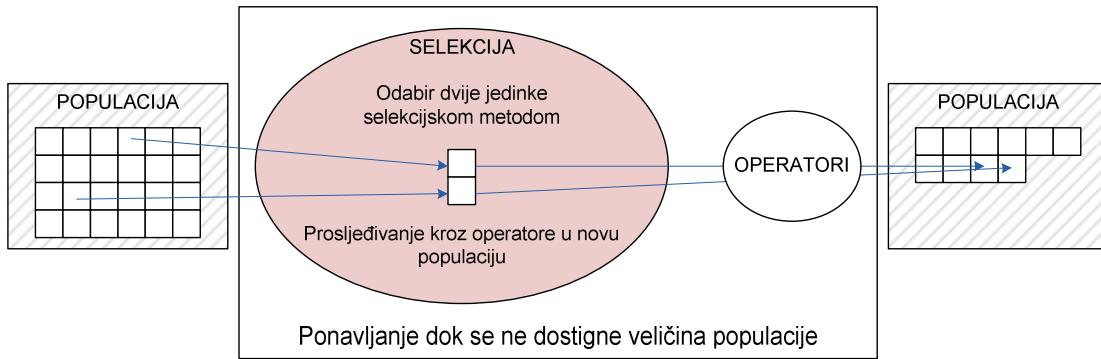
4. Vrijednosti funkcije cilja pridružena vektoru optimizacijskih varijabli predstavlja ocjenu kvalitete jedinke u prirodnoj selekciji.
5. U svakoj novoj generaciji proizvodi se novi skup jedinki (rješenja) pomoću križanja slučajno odabranih roditelja iz stare generacije (stari skup jedinki). Iako se baziraju na slučajnosti, GA nisu metode jednostavnog slučajnog pretraživanja. Oni učinkovito istražuju nove kombinacije na osnovu sposobnosti pronalaženja nove generacije sa boljom kvalitetom ili vrijednosti funkcije cilja.

### **5.2.1 Kodiranje kromosoma**

Kromosom predstavlja jedinku genetskog algoritma i sadrži vrijednosti optimizacijskih varijabli. Radi pojednostavljenja variable nisu enkodirane u njihovom decimalnom obliku nego su predstavljene cjelobrojnim vrijednostima koje predstavljaju diskretizaciju realnih vrijednosti između minimuma i maksimuma za zadani diskretizacijski korak. Optimizacijska varijabla se često označava kao gen.

### **5.2.2 Populacija**

Populacija je skup rješenja trenutnog iteracijskog koraka (generacije) genetskog algoritma. Veličina populacije je vrlo bitan parametar genetskog algoritma i njegovo pravilno određivanje je od velike važnosti. Ukoliko je veličina populacije premalena genetski algoritam može generirati prebrzo; ukoliko je prevelika tada genetski algoritam nepotrebno troši računalne resurse i vrijeme čekanja na poboljšanje rješenja može biti predugačko. Dva su važna pojma koja se pojavljuju kod evolucijskog procesa i genetskog pretraživanja: raznolikost populacije i selektivni pritisak. Oba faktora su pod utjecajem veličine populacije. Fleksibilnost veličine populacije se može relativno lako implementirati u genetskom algoritmu.



Sl. 5.2. Kreiranje nove populacije

### 5.2.3 Selekcija

Tijekom svake naredne generacije udio postojeće populacije se odabire s namjerom stvaranja nove generacije. Individualna rješenja se selektiraju kroz proces baziran na funkciji kvalitete (eng. fitness function), gdje će bolja rješenja imati veću vjerojatnost da budu selektirana. Određene metode selekcije ocjenjuju kvalitetu svakog rješenja i izabiru najbolja rješenja na osnovi usporedbe. Druge metode provode ocjenjivanje samo na slučajnom uzorku cjelokupne populacije s ciljem smanjivanja vremena potrebnog za izvođenje procesa.

Mnoge funkcije su stohastičke i dizajnirane su tako da se isto selektira mali udio loših rješenja. To pomaže održavanju raznolikosti populacije i na taj način sprečava preuranjenu konvergenciju sa slabim rješenjima. Neki od najpoznatijih selekcijskih algoritama su:

- jednostavna selekcija (roulette wheel),
- proporcionalna selekcija
- turnirska selekcija

#### 5.2.3.1 Jednostavna selekcija

Jednostavna selekcija (eng. roulette wheel) se može implementirati na slijedeći način:

1. Za svaku jedinku se izračunava funkcija kvalitete zatim se te vrijednosti normaliziraju. Normalizacija podrazumijeva množenje vrijednosti kvalitete svake individue sa fiksnim brojem tako da suma vrijednosti bude jednaka 1.
2. Populacija se sortira silaznim redoslijedom po vrijednostima funkcije kvalitete

3. Izračunavaju se akumulirane normalizirane vrijednosti kvalitete (akumulirana vrijednost neke jedinke je zbroj vrijednosti njene vlastite kvalitete i vrijednosti za sve prethodne jedinke). Akumulirana vrijednost posljednje jedinke mora biti jednaka 1.
4. Odabire se slučajni broj  $R$  između 0 i 1.
5. Odabire se prva jedinka čija je akumulirana normalizirana vrijednost veća od broja  $R$ .

### 5.2.3.2 Turnirska selekcija

Turnirska selekcija je jedna od mnogih selekcijskih metoda genetskih algoritama koja provodi „natjecanje“ između nekoliko slučajno odabranih jedinki populacije i odabire pobjednika (onaj s najboljom funkcijom kvalitete) za križanje. Selekcijski pritisak se može na jednostavan način prilagođavati sa promjenom veličine turnira. Ukoliko je veličina turnira veća slabije jedinke imaju manje šanse za preživljavanje.

Pseudokod turnirske selekcije:

```

odaberite k (veličinu turnira) jedinki iz populacije na slučajan način
odaberite najbolju jedinku iz turnira sa vjerojatnošću p
odaberite drugu najbolju jedinku sa vjerojatnošću p*(1-p)
odaberite treću najbolju jedinku sa vjerojatnošću p*((1-p)^2)
itd...

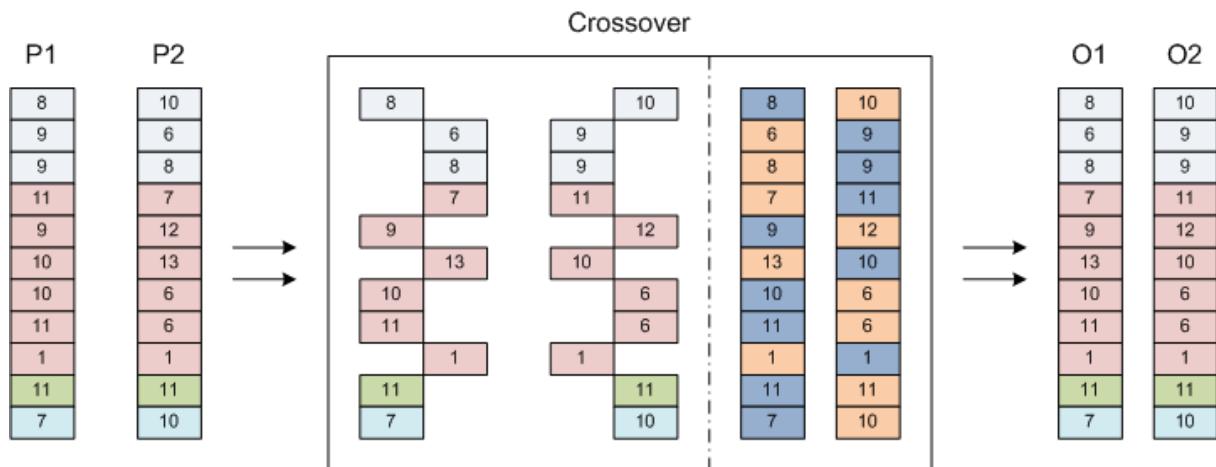
```

Deterministička turnirska selekcija odabire najbolje jedinke u svakom turniru (kada je  $p=1$ ). Jednostruka turnirska selekcija ( $k=1$ ) je ekvivalentna slučajnoj selekciji. Turnirska selekcija ima nekoliko prednosti: efikasna je za kodiranje, radi na paralelnim arhitekturama i omogućuje da se selekcijski pritisak prilagođava na jednostavan način.

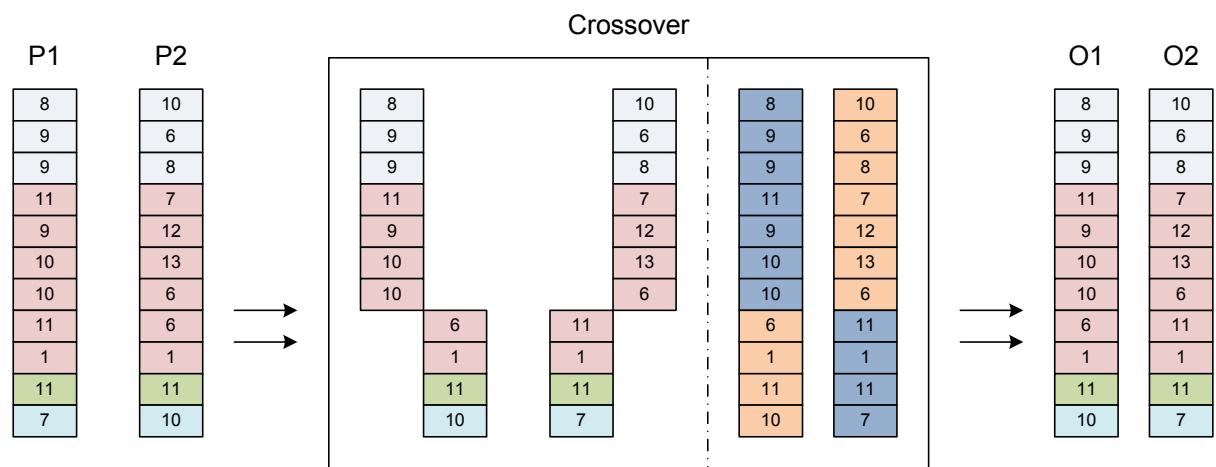
### 5.2.4 Križanje

Najvažnija uloga križanja je kombiniranje različitih kromosoma (jedinki) i prosljeđivanje njihovih gena u novu populaciju. Za svako novo rješenje koje treba proizvesti bira se par (roditeljskih) rješenja koja su selektirana za razmnožavanje iz prethodno selektiranog skupa. Stvaranje „djeteta“ (ili „potomstva“) koristeći prethodno opisane metode križanja i mutacije kreira se novo rješenje koje

uobičajeno dijeli nove karakteristike svojih „roditelja“. Novi roditelji se odabiru za svako dijete i proces se nastavlja sve dok se generira nova populacija rješenja odgovarajuće veličina.



Sl. 5.3. Uniformno križanje



Sl. 5.4. Križanje s jednom točkom dijeljenja

## 5.2.5 Mutacija

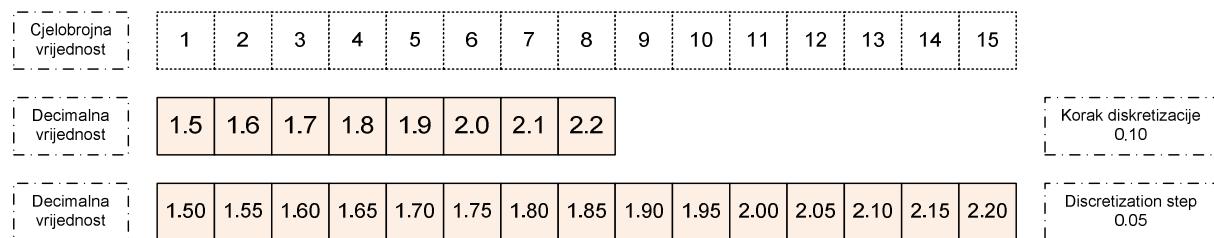
Mutacija je neophodna zbog toga jer populacija ne može sadržavati sve moguće gene te mora postojati neki mehanizam kreiranja novih gena koji bi mogli biti optimalni ili biti bitna vodeća točka prema optimumu. Kod genetskog algoritma mutacija je mehanizam koji osigurava raznolikost populacije.

Kao i križanje mutacija se ne izvršava svaki put. Vjerojatnost mutacije je obično manja od 0.05 za binarno kodirane kromosome, ali za cjelobrojno kodiranje i za kodiranje s pomicnim zarezom je mnogo veća, sve do 0.8.

## 5.3 Primjena genetskog algoritma na optimizaciju konfiguracije polaganja

### 5.3.1 Kodiranje kromosoma

Kromosom predstavlja jedinku genetskog algoritma i sadrži vrijednosti optimizacijskih varijabli. Radi pojednostavljenja varijable nisu enkodirane u njihovom decimalnom obliku nego su predstavljene cjelobrojnim vrijednostima koje predstavljaju diskretizaciju realnih vrijednosti između minimuma i maksimuma za zadani diskretizacijski korak. Optimizacijska varijabla se često označava kao gen.



Sl. 5.5. Diskretizacija decimalne varijable

Matematička formulacija generalnog oblika rješenja (kromosoma) je vektor vrijednosti parametra  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ . Na slici 5.6 prikazano je kodiranje kromosoma primjenjeno za optimizaciju S-Lay postupka polaganja na primjeru broda Crawler iz flote tvrtke Saipem.

| Parameter     | Value | Chromosome |
|---------------|-------|------------|
| ROL_1         | 4.600 | 3          |
| ROL_2         | 3.150 | 5          |
| ROL_3         | 1.550 | 6          |
| s1            | 1.800 | 6          |
| s2            | 2.350 | 3          |
| s3            | 2.700 | 9          |
| s4            | 2.800 | 21         |
| s5            | 2.500 | 31         |
| s6            | 1.017 | 1          |
| Tension       | 50    | 9          |
| Stinger Angle | 9     | 9          |

Sl. 5.6. Kodiranje kromosoma za optimizaciju polaganja

### 5.3.2 Funkcija kvalitete

Kvaliteta predstavlja relativnu (u odnosu na prosječni ili u odnosu na najbolji kromosom) evaluaciju kromosoma. Funkcija kvalitete predstavlja mehanizam pomoću kojeg se računa dobrota kromosoma. Za optimizaciju polaganja cjevovoda koristi se funkcija sa više ciljeva i sastoji se od nekoliko funkcija cilja i ograničenja. Optimizacija s ograničenjima je implementirana kroz funkciju kvalitete genetskog algoritma. Ograničenja mogu biti definirana kao dopuštena ograničenja na maksimalna naprezanja u cjevovodu (moment savijanja, relativno naprezanje ili deformacija) i/ili dopuštene sile reakcije na osloncima.

Funkcija kvalitete za višekriterijsku optimizaciju s ograničenjima uz primjenu funkcije kažnjavanja data je sa

$$f(X) = O(X) + P(X) \quad (5.5)$$

gdje je

$O(X)$  – Višekriterijska funkcija cilja koju treba minimizirati

$P(X)$  – Funkcija kažnjavanja

Funkcija kvalitete se zbog pojednostavljenja selekcijskih metoda transformira u apsolutnu funkciju kvalitete koju treba maksimizirati:

$$F(X) = \frac{1}{f(X)} \quad (5.6)$$

### 5.3.3 Funkcije cilja

Ciljevi ili ograničenja optimizacije koji se odnose na stanje cijevi (ili oslonca) mogu se primijeniti na cjelokupnoj duljini cijevi ili se različiti ciljevi i ograničenja mogu definirati po različitim područjima cijevi (overbend, sagbend). Višekriterijska funkcija cilja se formira kao suma težinskih skaliranih pojedinačnih funkcija cilja:

$$O(X) = \sum_{i=1}^{N_O} o w_i \cdot o_i(X) \quad (5.7)$$

Gdje je

$N_O$  – broj ciljeva

$o w_i$  – težinski faktor i-te funkcije cilja, pri čemu je

$$\sum o w_i = 1 \quad (5.8)$$

$o_i(X)$  – funkcija cilja

#### 5.3.3.1 Minimizacija kriterija u overbendu i sagbendu

Kriteriji analize koji se mogu postaviti nezavisno u overbendu i sagbendu su:

1. Dopušteni moment savijanja -  $M_{b\_allow}$
2. Dopušteno relativno naprezanje - omjer ekvivalentnog naprezanja i naprezanja na granici tečenja –  $\sigma_{rel\_allow}$
3. Dopuštena deformacija –  $\epsilon_{allow}$

Funkcija cilja koja minimizira **maksimalni moment savijanja u overbendu** je

$$o_1(X) = \frac{M_{b\_max\_OV}(X)}{M_{b\_allow\_OV}} \quad (5.9)$$

gdje je

$M_{b\_max\_OV}$  – maksimalni moment savijanja u overbendu,

$M_{b\_allow\_OV}$  – dopušteni moment savijanja u overbendu.

Funkcija cilja koja minimizira **maksimalno relativno naprezanje u overbendu** je

$$o_2(X) = \frac{\sigma_{rel\_max\_OV}(X)}{\sigma_{rel\_allow\_OV}} \quad (5.10)$$

gdje je

$$\sigma_{rel\_max\_OV}(X) = \frac{\sigma_{e\_max\_OV}(X)}{\sigma_0} - \text{maksimalno relativno naprezanje u overbendu},$$

$\sigma_{e\_max\_OV}$  – maksimalno ekvivalentno (prema Von Miesesu) naprezanje u overbendu,

$\sigma_0$  – naprezanje na granici tečenja,

$\sigma_{rel\_allow\_OV}$  – dopušteno relativno naprezanje u overbendu.

Funkcija cilja koja minimizira **maksimalnu deformaciju u overbendu** je

$$o_3(X) = \frac{\epsilon_{max\_OV}(X)}{\epsilon_{allow\_OV}} \quad (5.11)$$

gdje je

$\epsilon_{max\_OV}$  – maksimalna deformacija u overbendu,

$\epsilon_{allow\_OV}$  – dopuštena deformacija u overbendu.

Funkcija cilja koja minimizira **maksimalni moment savijanja u sagbendu** je

$$o_4(X) = \frac{M_{b\_max\_SAG}(X)}{M_{b\_allow\_SAG}} \quad (5.12)$$

gdje je

$M_{b\_max\_SAG}$  – maksimalni moment savijanja u sagbendu,

$M_{b\_allow\_SAG}$  – dopušteni moment savijanja u sagbendu.

Funkcija cilja koja minimizira **maksimalno relativno naprezanje u sagbendu** je

$$o_2(X) = \frac{\sigma_{rel\_max\_SAG}(X)}{\sigma_{rel\_allow\_SAG}} \quad (5.13)$$

gdje je

$$\sigma_{rel\_max\_SAG}(X) = \frac{\sigma_{e\_max\_SAG}(X)}{\sigma_0} - \text{maksimalno relativno naprezanje u overbendu},$$

$\sigma_{e\_max\_SAG}$  – maksimalno ekvivalentno (prema Von Miesesu) naprezanje u overbendu,  
 $\sigma_{rel\_allow\_SAG}$  – dopušteno relativno naprezanje u overbendu.

Funkcija cilja koja minimizira **maksimalnu deformaciju u sagbendu** je

$$o_6(X) = \frac{\epsilon_{max\_SAG}(X)}{\epsilon_{allow\_SAG}} \quad (5.14)$$

gdje je

$\epsilon_{max\_SAG}$  – maksimalna deformacija u sagbendu,

$\epsilon_{allow\_SAG}$  – dopuštena deformacija u sagbendu.

Barem jedan (1) od tih kriterija mora biti uključen za optimizaciju u overbendu i jedan (1) u sagbendu, a mogu biti uključena i sva tri (3) istovremeno, što čini minimalno dva (2), a maksimalno šest (6) uključenih kriterija. Svi uključeni kriteriji imaju jednaku važnost u overbendu ili u sagbendu, odnosno imaju jednake težinske faktore. S obzirom da do maksimalnih opterećenja dolazi u pravilu u čvorovima modela gdje se nalaze oslonci cijevi, razdioba težinskih faktora između overbenda i sagbenda ovisi o rasporedu (količini) oslonaca u overbendu i sagbendu.

U skladu s time, težinski faktor funkcije cilja koja minimizira kriterij u overbendu ima općeniti oblik:

$$ow_i = oa_i \cdot A \cdot B \cdot 0.7 \cdot \frac{N_{S\_OV} + 1}{N_S + 1} \cdot \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_{CRIT\_OV}} oa_k}, \quad i \in \{1, \dots, N_{CRIT\_OV}\} \quad (5.15)$$

Dok je općeniti izraz za težinski faktor funkcije cilja koja minimizira kriterij u sagbendu

$$ow_j = oa_j \cdot A \cdot B \cdot 0.7 \cdot \frac{N_{S\_SAG}}{N_S + 1} \cdot \frac{1}{\sum_{k=N_{CRIT\_OV} + 1}^{N_{CRIT}} oa_k}, \quad j \in \{N_{CRIT\_OV} + 1, \dots, N_{CRIT}\} \quad (5.16)$$

gdje je

$N_{S\_OV}$  – broj oslonaca u overbendu,

$N_{S\_SAG}$  – broj oslonaca u sagbendu,

$N_S = N_{S\_OV} + N_{S\_SAG}$  – ukupan broj oslonaca,

$N_{CRIT\_OV} = 3$  – broj kriterija u overbendu,

$N_{CRIT\_SAG} = 3$  – broj kriterija u sagbendu,

$N_{CRIT} = N_{CRIT\_OV} + N_{CRIT\_SAG} = 6$  – ukupan broj kriterija u overbendu i sagbendu,  
 $oa_i$  - uključenost (aktivnost) kriterija u overbendu i sagbendu (0 – isključen | 1 - uključen),  
 $A = 0.1$  – faktor skaliranja težinskog faktora za optimizaciju sile napinjača,  
 $B = 0.1$  – faktor skaliranja težinskog faktora za optimizaciju razmaka uzgonskih tankova.

Pomoću faktora  $A$  i  $B$  postiže se skaliranje težinskih faktora tako da optimizacija sile napinjača i optimizacija razmaka uzgonskih tankova dobivaju veći prioritet kada su jednom zadovoljena sva ograničenja (vidi ).

### 5.3.3.2 Minimizacija devijacije kriterija na osloncima

Cilj minimizacije devijacije kriterija na osloncima je ujednačiti opterećenja na pojedinim osloncima i dobiti što ujednačeniju distribuciju opterećenja. Računa se standardna devijacija  $\sigma_{STD\_σ\_rel}$  relativnog naprezanja po svim osloncima u overbendu i sagbendu.

$$\sigma_{STD\_σ\_rel} = \frac{1}{N_S} \frac{\sum_{i=1}^{N_S} (\sigma_{rel,i} - \bar{\sigma}_{rel})^2}{\bar{\sigma}_{rel}^2(X)} \quad (5.17)$$

Funkcija cilja koja minimizira devijaciju kriterija na osloncima je skalirana pomoću arctan funkcije na interval  $[0,1]$

$$o_7(X) = \frac{2}{\pi} \arctan(10 \cdot \sigma_{STD\_σ\_rel}) \quad (5.18)$$

Odgovarajući težinski faktor dat je sa

$$ow_7 = 0.2 \cdot A \cdot B \quad (5.19)$$

### 5.3.3.3 Minimizacija kumulativne udaljenosti oslonaca od cijevi

Minimizacijom kumulativne udaljenosti oslonaca od cijevi nastoji se stimulirati približavanje oslonaca cijevi koji nisu u kontaktu sa njom te postići konfiguracija kod koje svi oslonci podupiru cijev

$$o_8(X) = \sum_{i=1}^{N_s} d_i(X) \quad (5.20)$$

gdje je  $d_i$  - udaljenosti i-tog oslonca od cijevi.

Odgovarajući težinski faktor dat je sa

$$ow_8 = 0.1 \cdot A \cdot B \quad (5.21)$$

### 5.3.3.4 Minimizacija sile napinjača

Ukoliko se provodi optimizacija sile napinjača, tada je cilj primijeniti što je manju potrebnu silu pri kojoj će sva ograničenja biti zadovoljena. Glavni prioritet je prvo pronaći konfiguraciju koja će zadovoljiti sva ograničenja, bez obzira na veličinu sile napinjača i zatim kada su zadovoljena sva ograničenja, minimizacija sile napinjača dobiva najviši prioritet. Kada su zadovoljena sva ograničenja, funkcija kvalitete poprima vrijednost  $f(x) < 1$ , a apsolutna funkcija kvalitete poprima vrijednost  $F(x) > 1$ .

Funkcija cilja i težinski faktor definiran na slijedeći način postiže taj cilj:

$$o_9(X) = \frac{T}{T_{\max}} \quad (5.22)$$

$$ow_9 = \begin{cases} 0 & \text{za } f(X) > 1 \\ 0.9 \cdot B & \text{za } f(X) \leq 1 \end{cases} \quad (5.23)$$

Uklanjanjem  $A = 0.1$ , faktora skaliranja težinskog faktora za optimizaciju sile napinjača, postiže se viši prioritet minimizacije sile napinjača nad minimizacijom ostalih kriterija kada su zadovoljena sva ograničenja.

### 5.3.3.5 Maksimizacija razmaka uzgonskih tankova

Ukoliko se provodi optimizacija razmaka uzgonskih tankova, tada je cilj primijeniti što veći mogući razmak uzgonskih tankova pri kojem će sva ograničenja biti zadovoljena. Glavni prioritet je prvo pronaći konfiguraciju koja će zadovoljiti sva ograničenja, bez obzira na veličinu razmaka uzgonskih tankova. Kada su zadovoljena sva ograničenja, maksimizacija razmaka uzgonskih tankova (odnosno minimizacija broja upotrijebljenih uzgonskih tankova) dobiva najviši prioritet. Taj prioritet treba biti viši od minimizacije sile napinjača, što se postiže uklanjanjem  $B = 0.1$ , faktora skaliranja težinskog faktora za optimizaciju razmaka uzgonskih tankova.

Funkcija cilja i težinski faktor dati su sa:

$$o_{10}(X) = \frac{i_{UT}}{N_{UUT} + 1} \quad (5.24)$$

$$ow_{10} = \begin{cases} 0 & \text{za } f(X) > 1 \\ 0.9 & \text{za } f(X) \leq 1 \end{cases} \quad (5.25)$$

pri čemu je  $i_{UT}$  indeks uzorka uzgonskih tankova definiran prema tablici 5.1.

| $i_{UT}$      | $d_{UT} [m]$ |
|---------------|--------------|
| 1             | 72           |
| 2             | 66           |
| 3             | 60           |
| ....          | ....         |
| $N_{UUT}$     | 6            |
| $N_{UUT} + 1$ | 0            |

Tab. 5.1. Indeksi i razmaci uzoraka uzgonskih tankova

gdje je

$d_{UT}$  - razmak uzgonskih tankova

$N_{UUT}$  - broj uzoraka uzgonskih tankova.

### 5.3.4 Funkcije kažnjavanja

Kod metode kažnjavanja problem optimizacije s ograničenjima se transformira u problem bez ograničenja sa pridruživanjem cijene ili kazne za svako narušavanje ograničenja. Ta cijena je uključena u evaluaciju funkcije cilja (kvalitete). Funkcija kažnjavanja narušavanja ograničenja ima općeniti oblik:

$$P(X) = \sum_{j=1}^{NC} cw_j \cdot p_j(X) \quad (5.26)$$

Gdje je komponenta funkcije kažnjavanja općenito definirana kao linearna funkcija sa kaznenim skokom:

$$p_j(X) = \begin{cases} 0 & \text{za } C_{\max}(X) \leq C_{allow} \\ PJ_j + \frac{C_{\max}(X)}{C_{allow}} & \text{za } C_{\max}(X) > C_{allow} \end{cases} \quad (5.27)$$

gdje je

$cw_j$  – težinski faktor komponente ograničenja. U ovoj implementaciji je za sva ograničenja jednak jedinici:  $cw_j = 1, j \in \{1, \dots, N_C\}$ ,

$PJ_j$  – kazneni skok za specifično ograničenje. U ovoj implementaciji je za sva ograničenja jednak jedinici:  $PJ_j = 1, j \in \{1, \dots, N_C\}$ ,

$C_{\max}(X)$  – maksimalna vrijednost proizvoljnog kriterija u promatranom području,

$C_{allow}$  – dopuštena vrijednost proizvoljnog kriterija u promatranom području.

#### 5.3.4.1 Ograničenja kriterija u overbendu i sagbendu

Funkcija kažnjavanja za prekoračenje **dopuštenog momenta savijanja u overbendu** je

$$p_1(X) = \begin{cases} 0 & \text{za } M_{b\_max\_OV}(X) \leq M_{b\_allow\_OV} \\ 1 + \frac{M_{b\_max\_OV}(X)}{M_{b\_allow\_OV}} & \text{za } M_{b\_max\_OV}(X) > M_{b\_allow\_OV} \end{cases} \quad (5.28)$$

Funkcija kažnjavanja za prekoračenje **dopuštenog relativnog naprezanja u overbendu** je

$$p_2(X) = \begin{cases} 0 & za \quad \sigma_{rel\_max\_OV}(X) \leq \sigma_{rel\_allow\_OV} \\ 1 + \frac{\sigma_{rel\_max\_OV}(X)}{\sigma_{rel\_allow\_OV}} & za \quad \sigma_{rel\_max\_OV}(X) > \sigma_{rel\_allow\_OV} \end{cases} \quad (5.29)$$

Funkcija kažnjavanja za prekoračenje **dopuštene deformacije u overbendu** je

$$p_3(X) = \begin{cases} 0 & za \quad \epsilon_{max\_OV}(X) \leq \epsilon_{allow\_OV} \\ 1 + \frac{\epsilon_{max\_OV}(X)}{\epsilon_{allow\_OV}} & za \quad \epsilon_{max\_OV}(X) > \epsilon_{allow\_OV} \end{cases} \quad (5.30)$$

Funkcija kažnjavanja za prekoračenje **dopuštenog momenta savijanja u sagbendu** je

$$p_4(X) = \begin{cases} 0 & za \quad M_{b\_max\_SAG}(X) \leq M_{b\_allow\_SAG} \\ 1 + \frac{M_{b\_max\_SAG}(X)}{M_{b\_allow\_SAG}} & za \quad M_{b\_max\_SAG}(X) > M_{b\_allow\_SAG} \end{cases} \quad (5.31)$$

Funkcija kažnjavanja za prekoračenje **dopuštenog relativnog naprezanja u overbendu** je

$$p_5(X) = \begin{cases} 0 & za \quad \sigma_{rel\_max\_SAG}(X) \leq \sigma_{rel\_allow\_SAG} \\ 1 + \frac{\sigma_{rel\_max\_SAG}(X)}{\sigma_{rel\_allow\_SAG}} & za \quad \sigma_{rel\_max\_SAG}(X) > \sigma_{rel\_allow\_SAG} \end{cases} \quad (5.32)$$

Funkcija kažnjavanja za prekoračenje **dopuštene deformacije u overbendu** je

$$p_6(X) = \begin{cases} 0 & za \quad \epsilon_{max\_OV}(X) \leq \epsilon_{allow\_OV} \\ 1 + \frac{\epsilon_{max\_OV}(X)}{\epsilon_{allow\_OV}} & za \quad \epsilon_{max\_OV}(X) > \epsilon_{allow\_OV} \end{cases} \quad (5.33)$$

### 5.3.4.2 Ograničenja reakcija oslonaca

Broj funkcija kažnjavanja prekoračenja dopuštene reakcije oslonca jednak je broju oslonaca  $N_S$ . Pri tome svaki oslonac može imati različitu dopuštenu reakciju.

$$p_i(X) = \begin{cases} 0 & \text{za } R_i(X) \leq R_{allow,i} \\ 1 + \frac{R_i(X)}{R_{allow,i}} & \text{za } R_i(X) > R_{allow,i}, \end{cases} \quad i \in \{N_{CRIT} + 1, \dots, N_{CRIT} + N_S\} \quad (5.34)$$

gdje je

$R_i(X)$  – sila reakcije na  $i$ -tom osloncu,

$R_{allow,i}$  – dopuštena sila reakcije na  $i$ -tom osloncu.

### 5.3.4.3 Ograničenje izvedivosti balastnog plana stingera

Konfiguracije sa neizvedivim (nemogućim) balastnim planom stingera se trebaju u potpunosti odbaciti, tako da je ograničenje izvedivosti balastnog plana stingera implementirano kao ograničenje odbacivanja jedinke koje postavlja vrijednost funkcije kvalitete na unaprijed zadanu malenu vrijednost  $f(X) = 0.00001$ .

### 5.3.4.4 Ograničenje udaljenosti vrha stingera od morskog dna

Udaljenost vrha stingera od morskog dna mora biti veća od minimalno dopuštene vrijednosti (uobičajeno 1.5 m). Ograničenje je, također, implementirano kao ograničenje odbacivanja jedinke koje postavlja vrijednost funkcije kvalitete na unaprijed zadanu malenu vrijednost  $f(X) = 0.00001$ .

## 5.3.5 Križanje

Razvijena je fleksibilna procedura križanja koja omogućava proizvoljno kombiniranje slijedećih standardnih operatora križanja:

- Uniformno križanje
- Križanje s jednom točkom dijeljenja
- Miješano križanje

Svakom tipu operatora križanja se u postavkama genetskog algoritma dodjeljuje težinski faktor operatora križanja. Na taj način je omogućeno testiranje prikladnosti pojedinih vrsta križanja ili njihovih kombinacija. Korištena je kumulativna vjerovatnost operatora križanja 0.7.

### 5.3.6 Mutacija

Osim implementirani standardnih općenitih operatora mutacije **Slučajna mutacija i Mala varijacija**, razvijeni su posebni operatori mutacije specifični za problem optimizacije S-Lay postupka polaganja. Ti operatori su bazirani na geometriji i fizici problema S-Lay postupka polaganja:

1. **Mutacija oslonaca prema cijevi** – nastoji mijenjati sve oslonce tako da dođu u kontakt sa cijevi;
2. **Mutacija kuta stingera** – promjena kuta stingera uz istovremeno prilagođavanje visina oslonaca.
3. **Mutacija prema iznosu sila reakcija oslonaca** – nastoji usrednjiti sve reakcije oslonaca
4. **Mutacija sile napinjača** – promjena sile napinjača je vezana za promjene visina oslonaca
5. **Mutacija oslonaca prema momentu savijanja** – nastoji usrednjiti moment savijanja na svim osloncima preko promjene njihovih visina;
6. **Mutacija ekstremnih oslonaca** – nastoji korigirati visine oslonaca sa ekstremnim vrijednostima funkcija ograničenja. Uz njih korigira i visine susjednih oslonaca.
7. **Mutacija razmaka uzgonskih tankova** – promjena razmaka uzgonskih tankova praćena sa korekcijom sile napinjača i kuta stingera

### 5.3.7 Automatizirane postavke optimizacije

Implementacija GA je izvedena istovremeno na fleksibilan način i transparentna za korisnika. Parametri GA se u svrhu testiranja i istraživanja mogu mijenjati preko ulaznih postavki, dok, s druge strane, korisnik inženjer analitičar instalacije cjevovoda može koristiti optimizaciju bez poznavanja funkciranja genetskog algoritma. To je omogućeno fleksibilnom implementacijom definiranja parametara genetskog algoritma koji se mogu postavljati i posredno preko standardnih postavki inženjerske analize instalacije podmorskih cjevovoda koje se preko posebnih relacija preračunavaju u odgovarajuće parametre GA. Automatizirane postavke optimizacije mogu se svrstati u sljedeće grupe:

1. **Automatizirana diskretizacija optimizacijskih varijabli** - diskrette vrijednosti optimizacijskih varijabli se automatski postavljaju na osnovu granica definiranih u Fix bazi podataka i diskretizacijskog koraka definiranog u GUI. Za diskontinuirane oslonce diskrette se vrijednosti kopiraju iz predefiniranih diskretnih vrijednosti u Fix bazi.
2. **Automatizirana definicija funkcije kvalitete** - tijekom inicijalizacije optimizacije izvodi se automatizirana definicija ciljeva i ograničenja optimizacije genetskim algoritmom na osnovu svih kombinacija specificiranih kriterija analize. Postavke funkcije kvalitete se automatski proračunavaju na osnovu specificiranih kriterija analize. Funkcije ciljeva i ograničenja se uključuju ili isključuju na osnovu njih. Težinski faktori se izračunavaju kao jednaki udjeli uključenih funkcija cilaj i ograničenja u overbendu i sagbendu.
3. **Automatizirano postavljanje vjerojatnosti operatora** - S obzirom da neki operatori (mutacije) barataju samo s određenim optimizacijskim varijablama, isključivanjem jedne (ili više) od tih varijabli isključuju se i vezani operatori. Nakon isključivanja nekih operatora vjerojatnosti svih ostalih operatora moraju se ponovno računati kako bi se osiguralo da je suma njihovih vjerojatnosti jednaka 1. Ta procedura je također implementirana kod inicijalizacije optimizacije.



## 6 SLAYOPTI SOFTVER

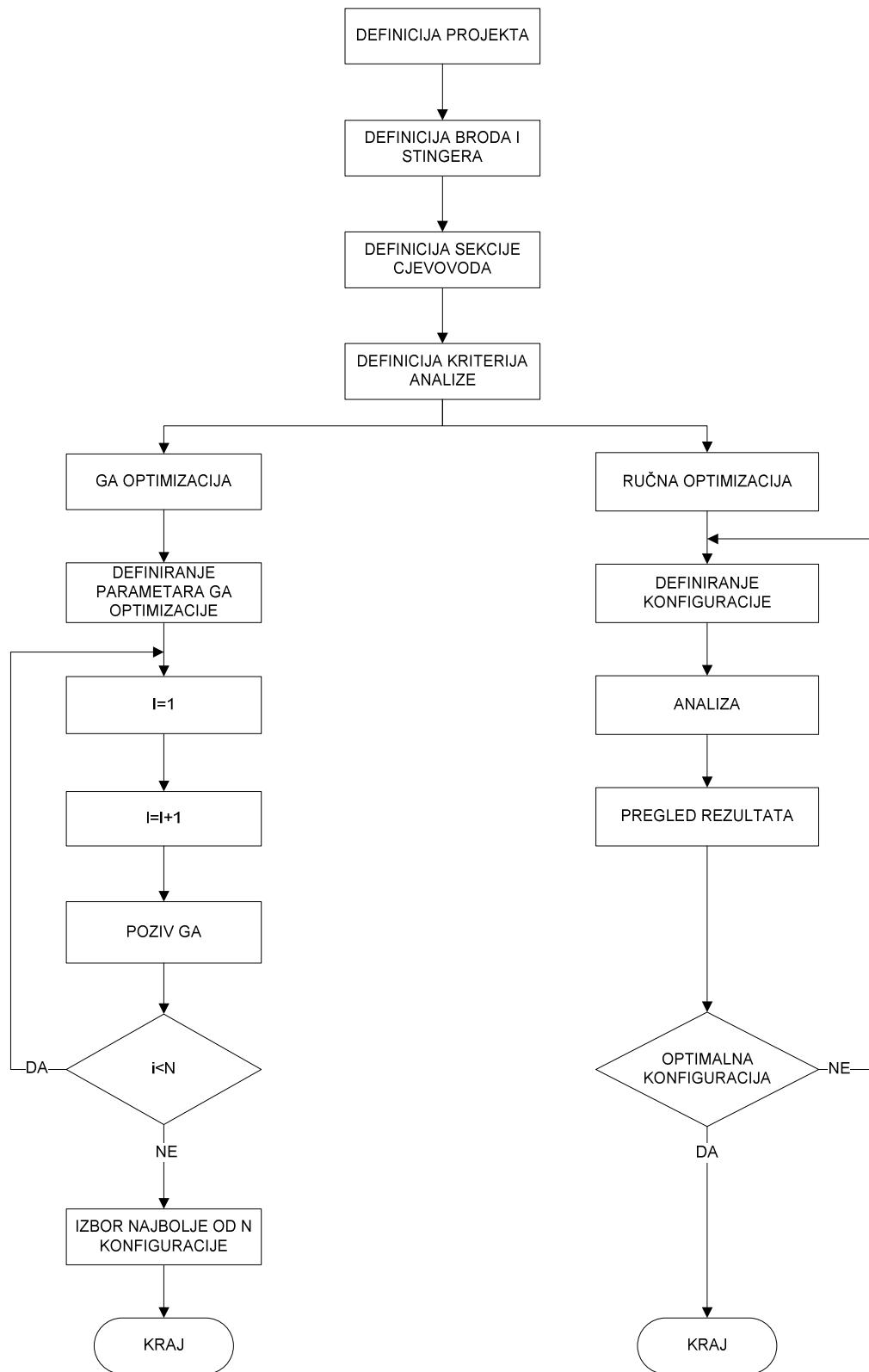
### 6.1 Općenito

SLayOpti je desktop aplikacija koja automatski pronađuje optimalnu konfiguraciju broda za polaganje i stinger za izabrane kritične sekcije uzduž rute cjevovoda. Modeliranje S-Lay krivulje cjevovoda i analiza konačnim elementima se izvodi korištenjem Saipemove N-lay aplikacije. SLayOpti omogućuje velika unapređenja inženjerske efikasnosti sa svojstvom optimizacije, izvođenjem automatiziranih zadataka analize i manipulacijom podataka projektnog radnog okružja (eng. workspace). Softver je razvijen u C++ programskom jeziku sa grafičkim korisničkim sučeljem baziranim na Windows Forms i Microsoft .NET Framework.

Glavne karakteristike softvera:

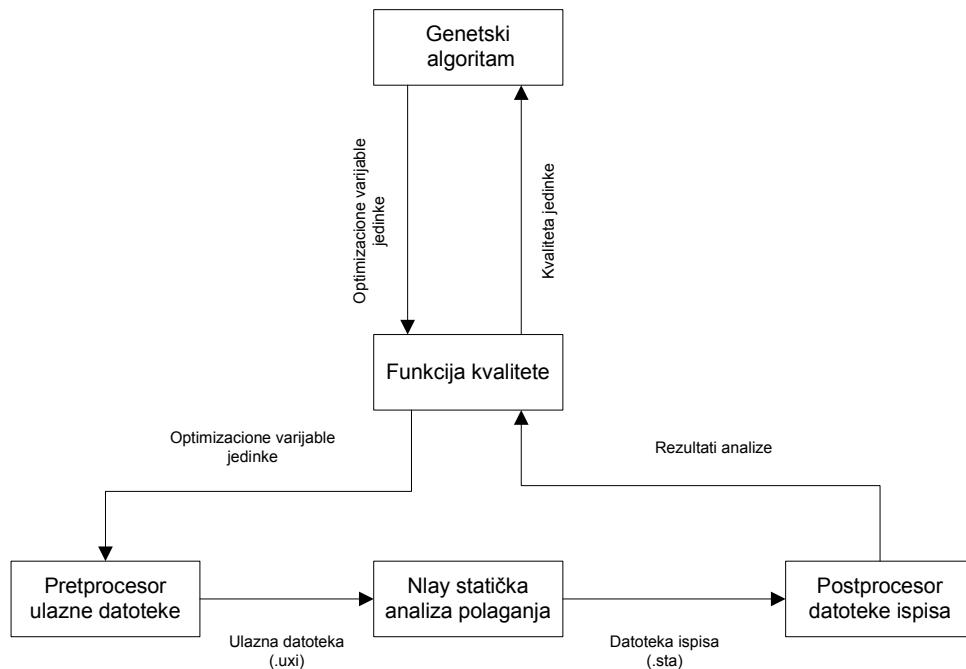
- Radno okružje,
- XML baza brodova za polaganje i stinger tvrtke Saipem,
- Fleksibilna definicija kriterija analize i optimizacije,
- Višestruke konfiguracije polaganja cjevovoda,
- Automatizirani zadaci S-Lay analize,
- Prezentacija rezultata analize,
- Optimizacija konfiguracije polaganja cjevovoda pomoću genetskog algoritma,
- Optimizacijska procedura s optimizacijom razmaka uzgonskih tankova.

Dijagram toka sa prikazom osnovnih funkcionalnosti aplikacije SLayOpti dat je na Sl. 6.1. Na njemu se vidi da korisnik treba prvo definirati podatke projekta i zatim brod i pripadni jedan ili više stinger. Pri tome se koriste već definirani podaci uneseni u bazu brodova i stinger (Fix baza). Nakon što se definiraju podaci jedne ili više sekcija cjevovoda i pripadni kriteriji analize, može se pristupiti pokretanju GA optimizacije ili tzv. ručne optimizacije. Kod ručne optimizacije korisnik mijenja optimizirane parametre polaganja i pokreće analizu sa NLay programom, pregledava rezultate te iterativno ponavlja postupak dok ne dobije zadovoljavajuću optimalnu konfiguraciju.



Sl. 6.1. Dijagram toka sa osnovnim funkcionalnostima aplikacije SLayOpti

GA optimizacija je nedeterministička metoda optimizacije koja se oslanja na stohastičke procese, tako se prilikom svakog pokretanja sa istim početnim parametrima dobiva različito optimalno rješenje. Zbog toga je uvedena mogućnost definiranja broja ponavljanja GA optimizacije  $N$ . Nakon  $N$  izvođenja GA optimizacije do kriterija završetka, automatski se na osnovu vrijednosti absolutne funkcije kvalitete odabire najbolje optimalno rješenje. Funkcija kvalitete se izračunava preko poziva softvera NLay što je prikazano na dijagramu, Slika 6.2.

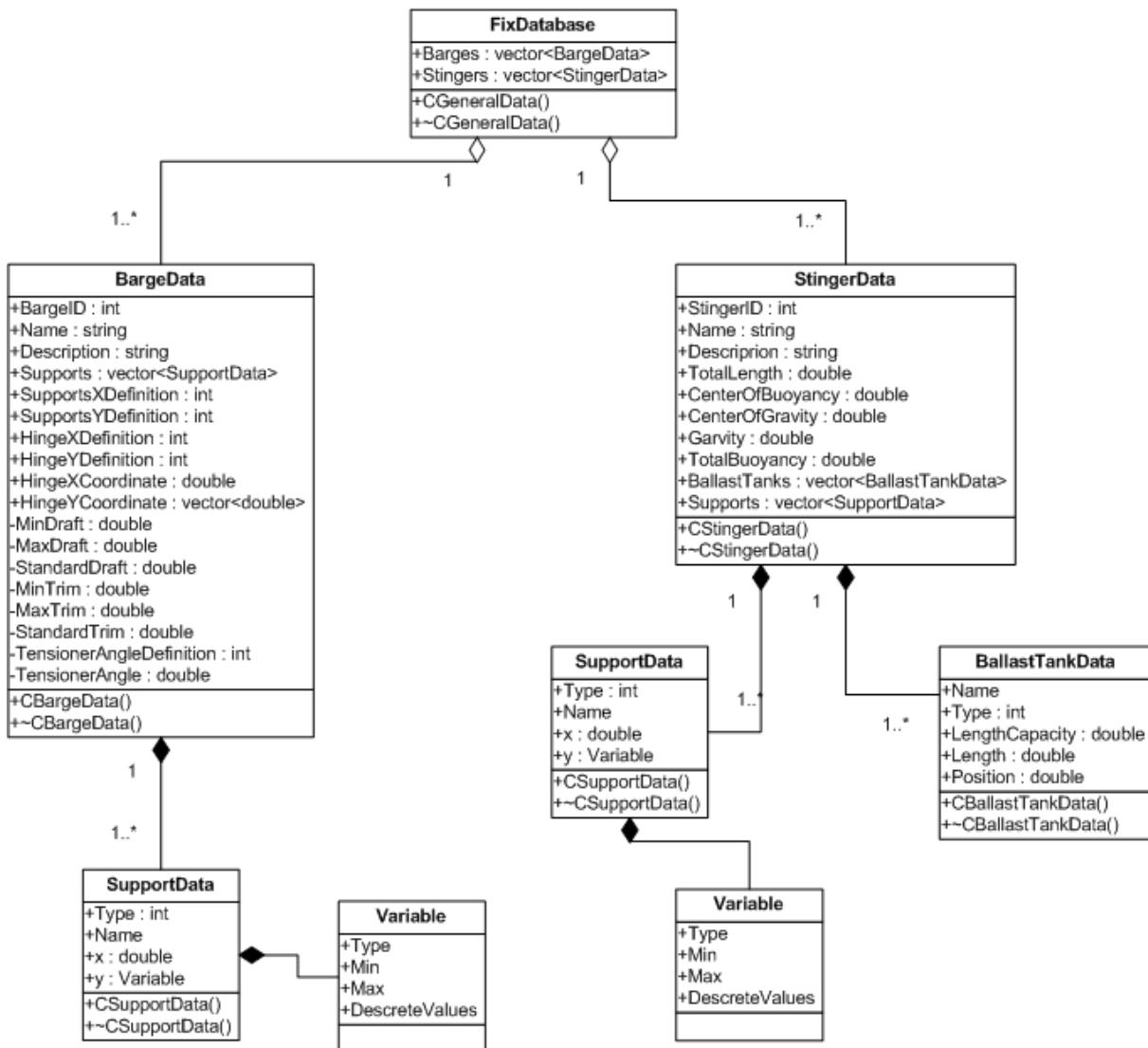


Sl. 6.2. Dijagram toka poziva softvera NLay u svrhu izračuna funkcije kvalitete GA

## 6.2 Objektni dizajn aplikacije SlayOpti

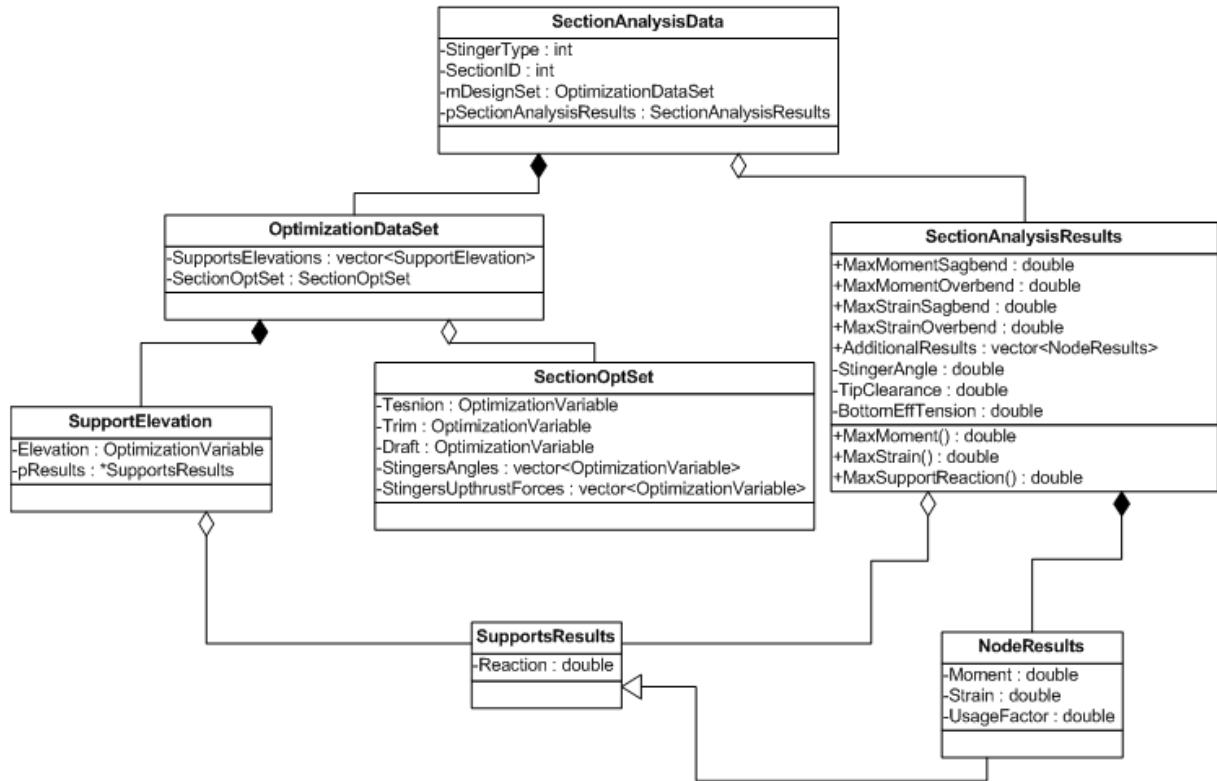
Objektni dizajn aplikacije SlayOpti prikazan je s pomoću UML (eng. Unified Modelling Language – Unificirani jezik za modeliranje) dijagrama klasa koji daju pregled osnovnih relacija između objekata (klasa) aplikacije.

### 6.2.1 UML dijagram klasa modula Fix Database



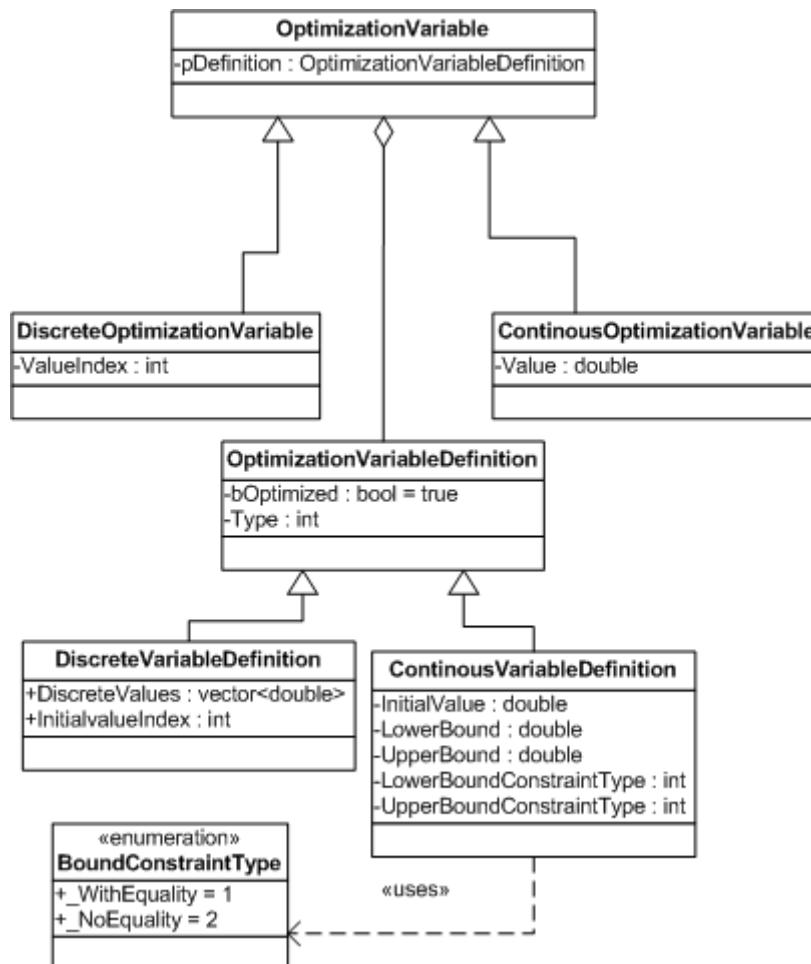
Sl. 6.3. UML dijagram klasa modula Fix Database

## 6.2.2 UML dijagram podatkovnih klasa



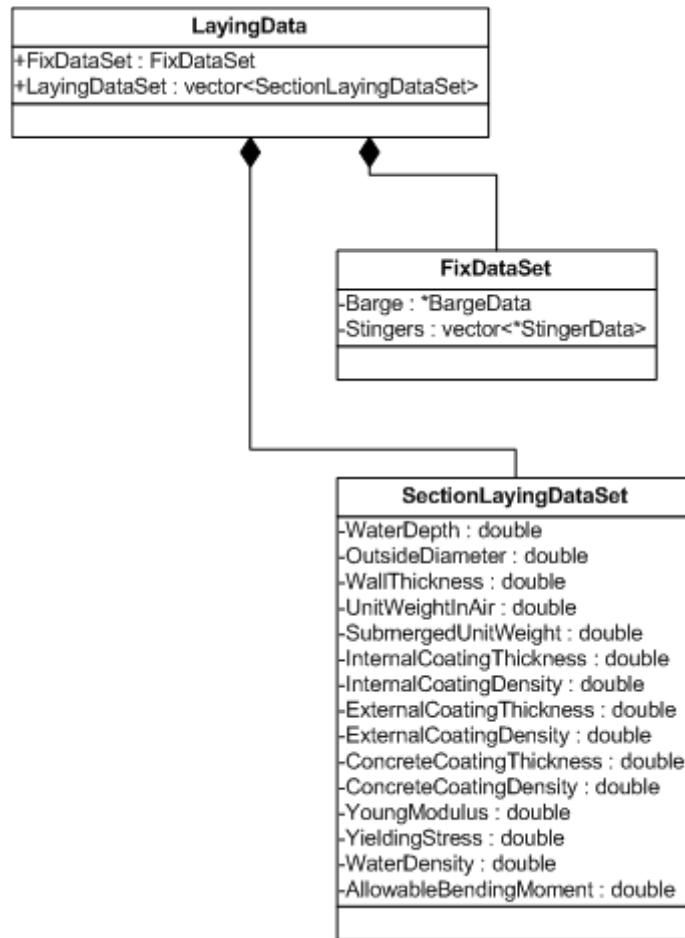
Sl. 6.4. UML dijagram podatkovnih klasa

### 6.2.3 UML dijagram klasa optimizacijskih varijabli



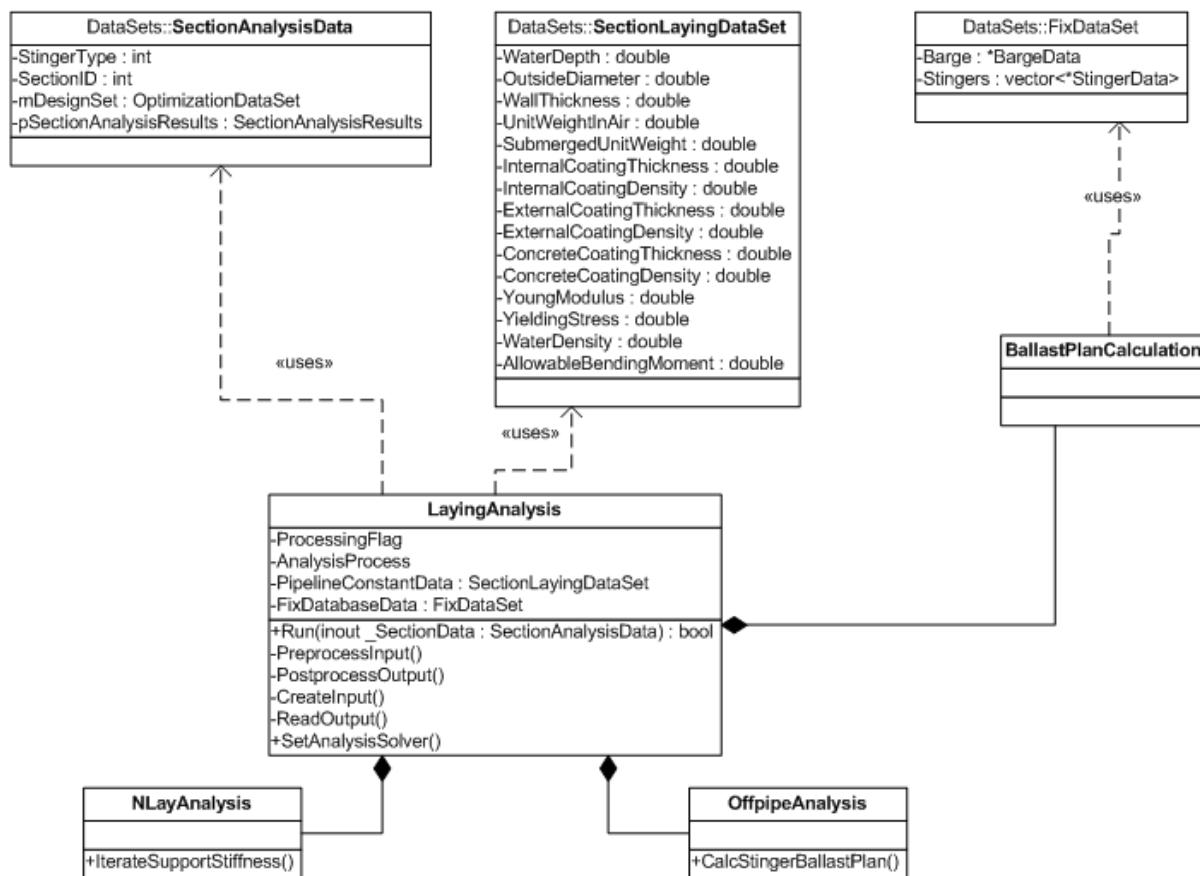
Sl. 6.5. UML dijagram klasa optimizacijskih varijabli

### 6.2.4 UML dijagram klasa parametara polaganja



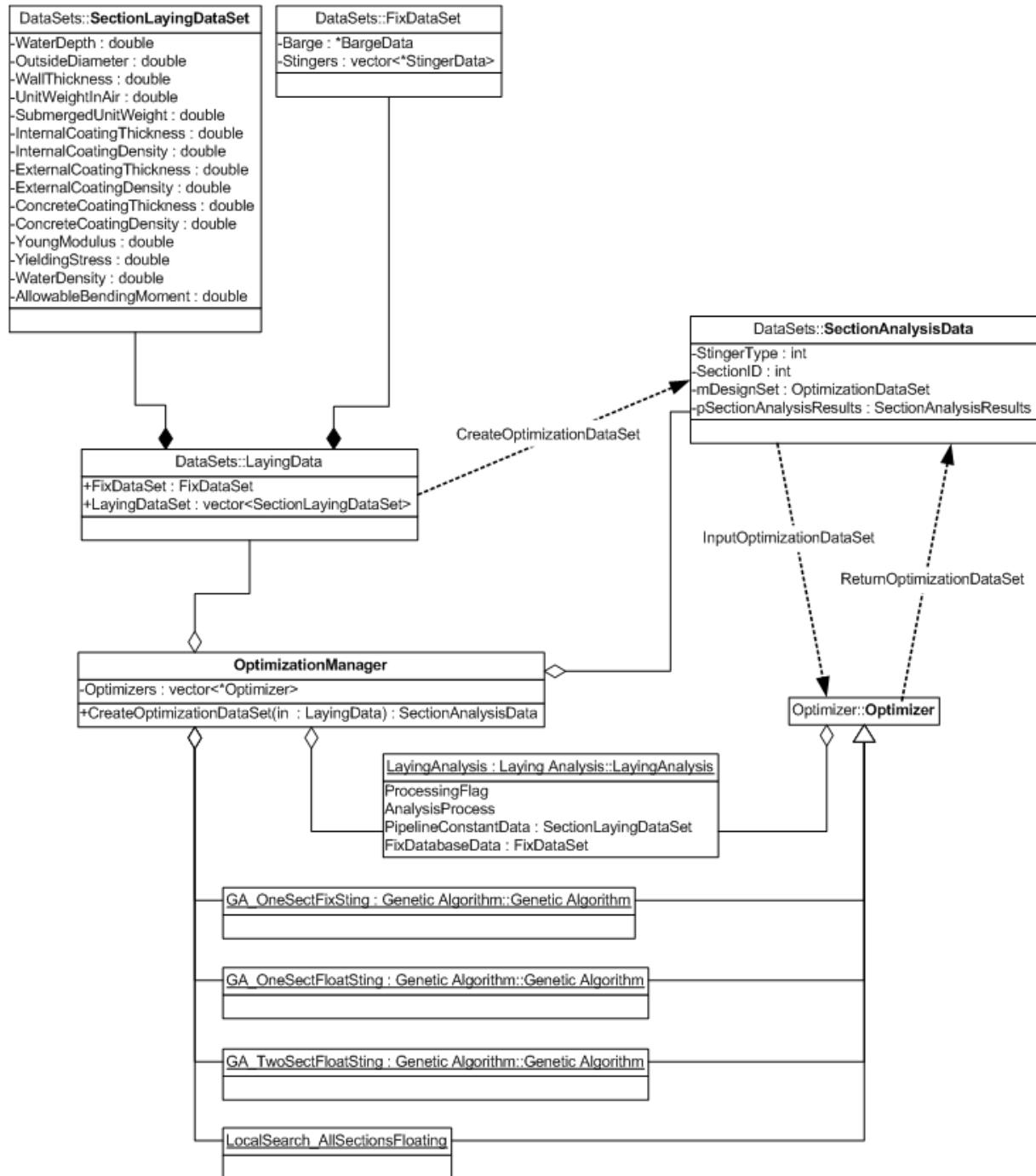
Sl. 6.6. UML dijagram klasa parametara polaganja

### 6.2.5 UML dijagram klasa analize polaganja



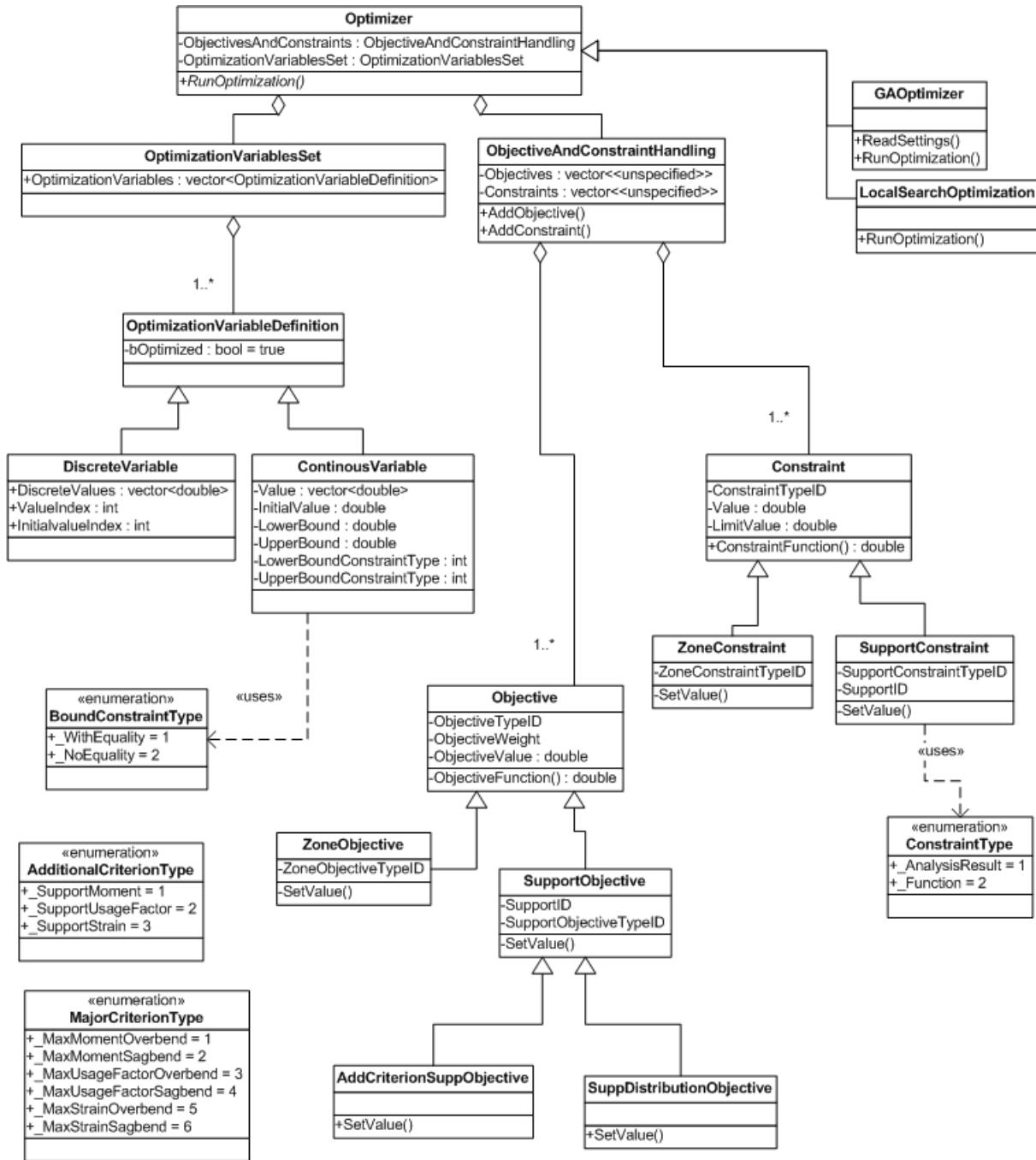
Sl. 6.7. UML dijagram klasa analize polaganja

### 6.2.6 UML dijagram klasa modula Optimization Manager



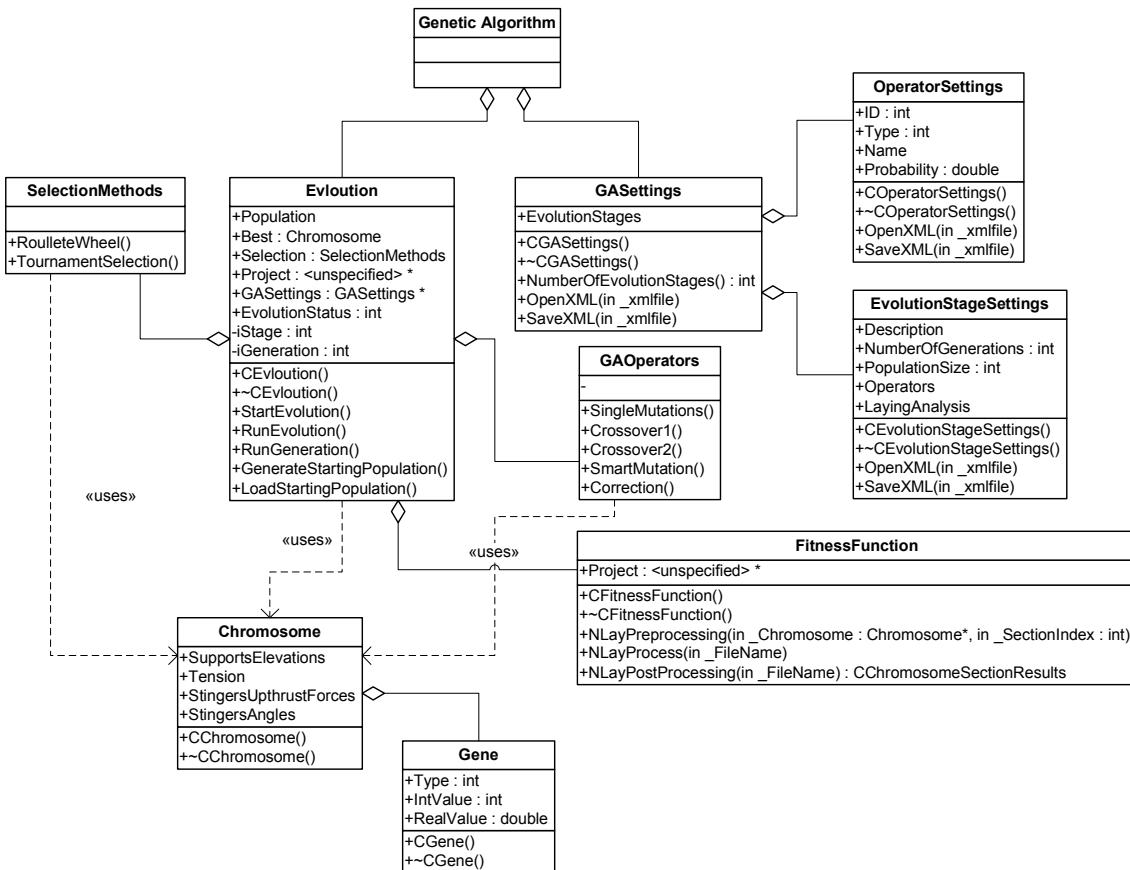
Sl. 6.8. UML dijagram klase modula Optimization Manager

### 6.2.7 UML dijagram klasa modula Optimizer



Sl. 6.9. UML dijagram klasa modula Optimizer

## 6.2.8 UML dijagram klasa genetskog algoritma



Sl. 6.10. UML dijagram klasa genetskog algoritma

## 6.3 S-Lay Opti radno okružje (Workspace)

S-Lay Opti radno okružje sadrži kompletne projektne podatke zajedno sa višestrukim konfiguracijama polaganja i može se spremiti u XML formatu. Također se može pregledavati ili uređivati sa vanjskim aplikacijama te sadrži zajedničke projektne podatke i parametre sekcija rute cjevovoda. Prikupljanje svih neophodnih podataka za analizu polaganja za jedno mjesto, unapređuje manipulaciju i reducira rizik od ljudske pogreške.

### 6.3.1 Baza brodova i stingera za polaganje (Fix baza podataka)

Izvorne karakteristike brodova za polaganje i stingera tvrtke Saipem su skupljene u skupu zasebnih tekstualnih datoteka N-lay aplikacije (N-Lay Fix baza podataka). Podaci iz N-Lay Fix baze su preneseni u XML datoteku. Baza je unaprijeđena i proširena važnim podacima koji se tiču analize i optimizacije. Datoteka XML baze se može jednostavno uređivati s bilo kojim XML uređivačem teksta.

Podaci o brodu za polaganje i povezani stingeri mogu se pročitati iz Fix baze podataka i prikazani su u grafičkom korisničkom sučelju na više mjesta:

- Broj oslonaca na brodu za polaganje (tablica konfiguracije oslonaca automatski mijenja veličinu)
- Broj oslonaca na stingeru (tablica konfiguracije oslonaca automatski mijenja veličinu))
- Podržane su elevacije dopuštene granice i sila reakcije
- Tipovi oslonaca (fiksni, diskretni, kontinuirani)
- Raspon dostupnih sila napinjača (nominalna sila napinjača se nalazi unutar izbornika u odjeljku konfiguracije tablice)

i drugi podatci koji nisu izravno vidljivi u grafičkom-korisničkom sučelju (geometrija broda za polaganje i podatci o pozicijama oslonaca, podatci o uzgonskim tankovima itd.)

### 6.3.2 Prozor projekta (Project Form)

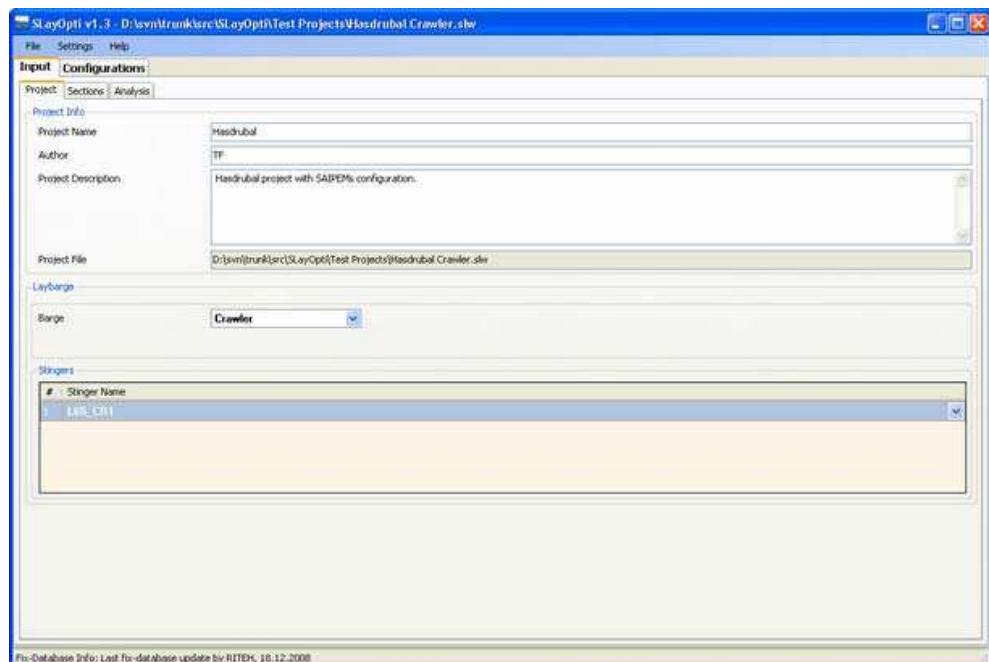
Prozor projekta (Project Form) (Sl. 6.11) sadrži opće podatke o projektu zajedničke za sve sekcije.

Podijeljen je u tri zasebna dijela prozora:

1. Informacije o projektu (*Project Info*)
2. Brod za polaganje (*Laybarge*)
3. Stingeri (*Stingers*)

Projekt Info prozor sadrži neke informacije o projektu (ime projekta, autora projekta i opis projekta).

Dio koji se odnosi na brodove za polaganje sadrži popis brodova koje postoje u *Fixdatabase.xml* datoteci. U dijelu za stingere (*Stingers*) moguće je vidjeti popis stingeri koji su kompatibilni s odabranim brodovima za polaganje u Laybarge dijelu.



Sl. 6.11. Prozor projekta (Project form)

### 6.3.3 Prozor sekcija (Sections Form)

Prozor sekcija (Sections Form) (Sl. 6.12) prikazuje tablicu sekcija na koje je podijeljen cjevovod duž rute polaganja.

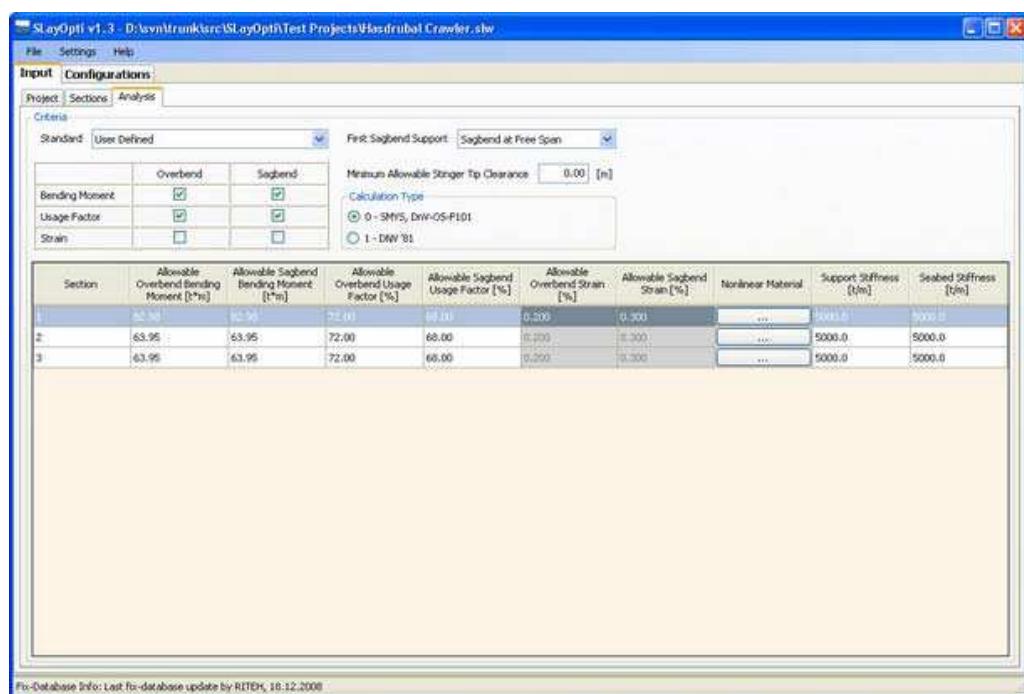
| SlayOpti v1.3 - D:\svn\trunk\src\SlayOpti\Test Projects\Hosdrubal Crawler.slw |          |        |                 |                            |                     |                     |                        |                                   |                   |                                 |                                 |                                 |   |   |   |  |
|---|----------|--------|-----------------|----------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Input Configurations  |          |        |                 |                            |                     |                     |                        |                                   |                   |                                 |                                 |                                 |   |   |   |  |
| Project   | Sections |        | Analysis        |                            |                     |                     |                        |                                   |                   |                                 |                                 |                                 |   |   |   |  |
| Sec.  | KP Start | KP End | Water Depth [m] | Steel Outside Diameter [m] | Wall Thickness [mm] | Weight In Air [t/m] | Submerged Weight [t/m] | Young Modulus [t/m <sup>2</sup> ] | Yield Stress [kg] | Concrete Coating Thickness [mm] | External Coating Thickness [mm] | Internal Coating Thickness [mm] | Concrete Coating Density [kg/m <sup>3</sup> ] | External Coating Density [kg/m <sup>3</sup> ] | Internal Coating Density [kg/m <sup>3</sup> ] | Sea Water Density [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 1   | 0.000    | 10.000 | 17.9            | 12.470                     | 15.2                | 0.35000             | 0.00000                | 2100000.0                         | 35.00             | 0.0                             | 0.0                             | 0.0                             | 0.0   | 0.0   | 1027.0  |  |
| 2   | 10.000   | 18.000 | 68.0            | 18.000                     | 12.4                | 0.35000             | 0.10700                | 23490000.0                        | 65.00             | 45.0                            | 0.0                             | 0.0                             | 3045.0  | 0.0   | 0.0   | 1027.0                                 |
| 3   | 18.000   | 18.120 | 37.0            | 18.000                     | 12.4                | 0.59700             | 0.27100                | 26580000.0                        | 65.00             | 90.0                            | 0.0                             | 0.0                             | 3045.0  | 0.0   | 0.0   | 1027.0                                 |

Sl. 6.12. Prozor sekcija (Sections form)

### 6.3.4 Prozor analize (Analysis Form)

*Prozor analize (Analysis Form)* (Sl. 6.13) sadrži sve podatke potrebne za definiciju analize polaganja:

- Odabir kriterija analize;
- Odvojene definicije kriterija za područja overbenda i sagbenda;
- Definicija oslonca na granici područja overbenda i sagbenda;
- Minimalna dopuštena udaljenost vrha stingera od morskog dna;
- Odabir tipa proračuna;
- Tablica unosa definicija kriterija za svaku zasebnu sekciju.



Sl. 6.13. Prozor analize (Analysis form)

### 6.3.5 Tablica nelinearnog materijala

Analiza i optimizacija s nelinearnim materijalom obavljat će se samo ako je barem jedan kriterij dopuštene deformacije (overbend ili sagbend) omogućen. Pri tome treba biti definirana tablica svojstava nelinearnih materijala (Sl. 6.14).

| #  | Strain   | Stress |
|----|----------|--------|
| 1  | 0.000000 | 0.000  |
| 2  | 0.008756 | 2.039  |
| 3  | 0.017510 | 4.079  |
| 4  | 0.026270 | 6.118  |
| 5  | 0.035020 | 8.158  |
| 6  | 0.043780 | 10.200 |
| 7  | 0.052540 | 12.240 |
| 8  | 0.061290 | 14.280 |
| 9  | 0.070050 | 16.320 |
| 10 | 0.078810 | 18.350 |
| 11 | 0.087570 | 20.390 |
| 12 | 0.096390 | 22.430 |
| 13 | 0.105400 | 24.470 |
| 14 | 0.115100 | 26.510 |

Sl. 6.14. Tablica nelinearnog materijala

### 6.3.6 Definicija kriterija analize i optimizacije

Definicija kriterija analize i optimizacije je napravljena na fleksibilan način pri čemu su podržani sve glavne vrste kodova za projektiranje i definicija projektnih kriterija. Korisnik može definirati kombinacije dozvoljenih momenata savijanja, relativnog naprezanja ili deformacije u overbendu i/ili sagbendu. Moguće je konfigurirati poziciju graničnog oslonca između sagbenda i overbenda. Provjera kriterija se izvodi automatski nakon bilo koje vrste analize – analiza sa fiksnim stingerom, sa plutajućim stingerom i potpuna provjera sekciјe.

*Minimalna dozvoljena udaljenost vrha stingera* je parametar koji bitan za postavljanje jednog od ograničenja optimizacije genetskim algoritmom. Konfiguraciji koja narušava dozvoljenu udaljenost vrha stingera od morskog dna daje se vrijednost funkcije kvalitete nula i shodno tome se eliminira iz slijedeće generacije.

## 6.4 Konfiguracije polaganja

Konfiguracija predstavlja skup svih varijabli koje inženjer postavlja tijekom analize polaganja cjevovoda. Konfiguracijski podaci sadrže elevacije oslonaca koje su zajedničke i nepromjenjive za sve sekcije u projektu te varijable koje se odvojeno definiraju za svaku sekciju (definicija sile napinjača, nagib broda, gas broda, postavke uzgonskih tankova, kut stingera i postavke balastnog plana).

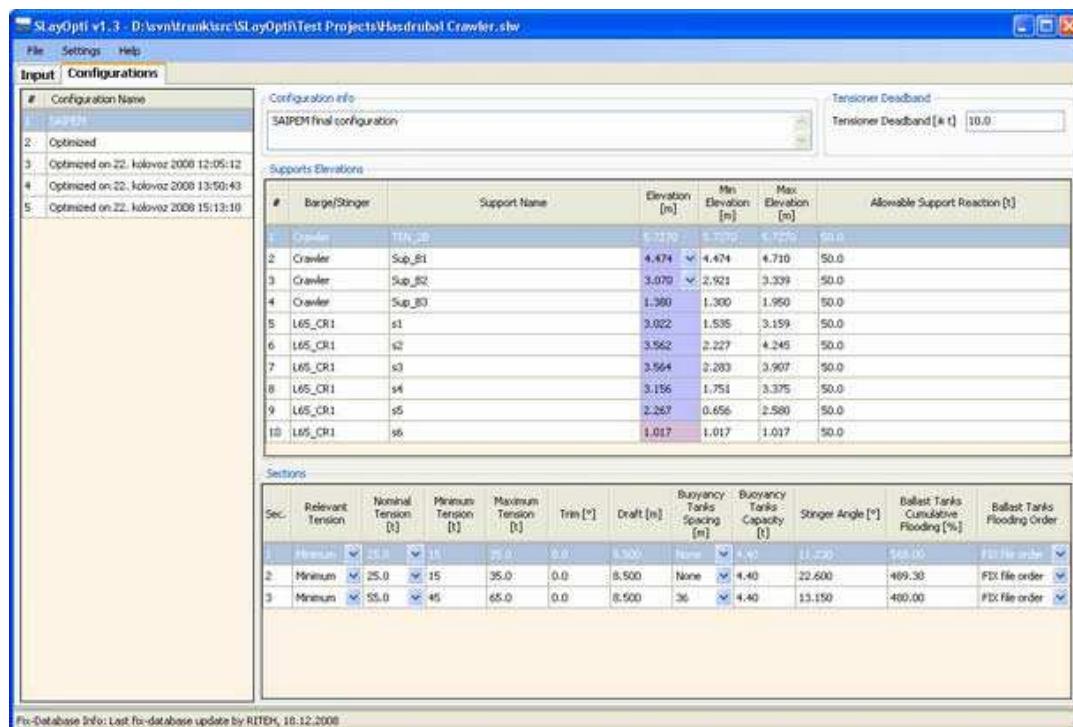
SLayOpti projektno radno okruženje može sadržavati višestruke konfiguracije polaganja. Te se konfiguracije mogu kreirati ručno od strane korisnika ili automatski kao rezultat optimizacijskog procesa.

Istovremeno rukovanje minimalnom, nominalnom i maksimalnom silom napinjača – svaka sekcija ima definiranu trijadu sila napinjača koja sadrži nominalnu силу sa postavkom graničnih vrijednosti raspona. Jedna od tih vrijednosti sile napinjača se treba označiti kao *relevantna sila* (relevant tension). Standardna postavka je minimalna sila napinjača. Optimizacija sa fiksiranim silom napinjača i optimizacijska procedura su usmjerene na postavljenu relevantnu silu napinjača. Analiza sa fiksnim ili plutajućim stingerom može se provoditi samo za relevantnu silu napinjača ili za kompletну trijadu sila odjednom.

#### 6.4.1 Prozor konfiguracija (Configurations Form)

Prozor konfiguracija je podijeljen u tri područja:

- Lista konfiguracija
- Tablica elevacija oslonaca (zajednička za sve sekcije)
- Tablica sekcija sa konfiguracijom varijabli za pojedinačne sekcije



Sl. 6.15. Prozor konfiguracija (Configurations Form)

## 6.5 Analiza polaganja cjevovoda

Implementirana analiza polaganja cjevovoda u aplikaciji SLayOpti ima slijedeće glavne karakteristike:

- Čitanje neophodnih podataka broda za polaganje i stingera iz *Fix* baze
- Čitanje podataka projekta i sekcije iz grafičko-korisničkog sučelja
- Kreiranje UXI datoteke
- Kontrola izvođenja N-Lay rješavača
- Obrada izlaznih podataka N-Lay softvera i kreiranje klase Section Analysis Data i Section Optimization Data Set classes
- Komunikacija sa Optimization Manager i Genetic Algorithm klasama
- Analiza sa fiksnim stingerom
- Analiza s plutajućim stingerom uz automatizirano smanjenje krutosti oslonaca do konvergencije
- Analiza s nelinearnim materijalom
- Kompletna provjera sekcije prema svim propisanim kriterijama za definirani raspon sile napinjачa (minimalna, nominalna i maksimalna sila napinjачa)
- Izračuni i provjere balasnog plana stingera
- Automatiziranje i pozicioniranje uzgonskih tankova i analiza

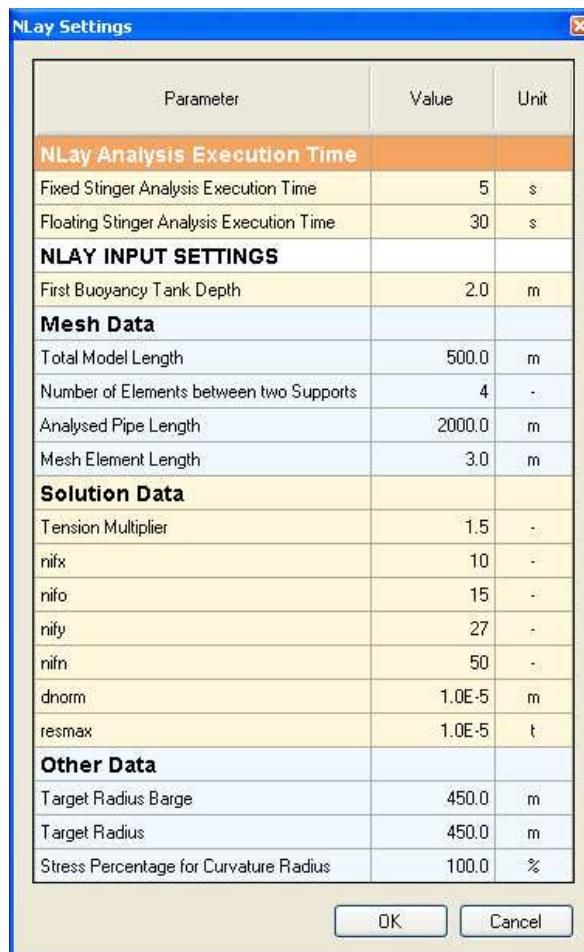
### 6.5.1 Sučelje sa programom N-Lay

SlayOpti kontrolira i poziva N-Lay rješavač kao vanjsku aplikaciju pri čemu se izvodi predprocesiranje i postprocesiranje svih neophodnih ulazno/izlaznih datoteka koje koristi N-Lay. N-Lay se poziva kao skriveni proces da bi se ubrzalo vrijeme izvođenja simulacija te sam proces pozivanja učinio transparentnim za korisnika.

*Tablica postavki N-lay aplikacije (NLay Settings table ) omogućuje korisniku da:*

- Definira vrijeme izvođenja N-Lay analize kod analize sa fiksnim i plutajućim stingerom koje je bitno za ispravnu komunikaciju aplikacije s N-layem i čekanje da N-Lay završi analize. Preporučuje se da se postavi dulje vrijeme na sporijim računalima i obratno;

- Preporučuje se da se na sporijim računalima, posebno kod sekcija sa težim cijevima i većim dubinama vode, da se poveća vrijeme izvođenja analize sa fiksnim stingerom sa standardne vrijednosti sa 5 sekundi na 15 sekundi;
- Definira dubinu za pozicioniranje prvog uzgonskog tanka,
- Da promijeni standardne vrijednosti ulaznih postavki N-laya koje su sortirane po grupama: podaci umrežavanja (eng. mesh data), podaci rješavača (eng. solution data) i ostali podaci (other data).

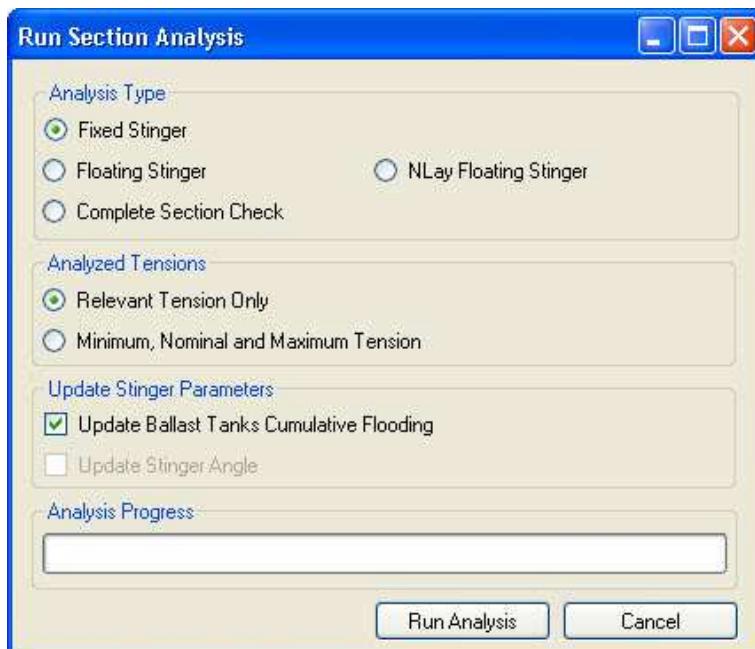


Sl. 6.16. Prozor sa tablicom postavki NLay softvera

### 6.5.2 Automatizirani zadaci S-Lay analize

Glavne karakteristike:

- Analiza sa fiksnim stingerom;
- Analiza s plutajućim stingerom sa automatskim smanjivanjem krutosti oslonaca do konvergencije;
- Analiza s nelinearnim materijalom;
- Kompletna provjera sekcije u odnosu na sve specificirane kriterije za definirani raspon sile napinjača (minimalna, nominalna i maksimalna sila napinjača);
- Provjera balastnog plana stingera s proračunima;
- Automatizirano postavljanje uzgonskih tankova i analiza.



Sl. 6.17. Prozor za pokretanje analize sekcije

### 6.5.3 Analiza sa fiksnim stingerom

Analiza sa fiksnim stingerom može se izvoditi sa ili bez spojenog stingera na brod za polaganje. Analiza sa fiksnim stingerom zahtijeva unos kuta stingera od strane korisnika. Nakon svakog pokretanja analize izvodi se provjera izvedivosti balastnog plana stingera. Totalna ukupna uzgonska sila i njen krak kod plutajućeg stingera se izračunavaju na osnovu stupnja popunjenošći balastnih tankova i smjera punjenja. Te vrijednosti se postavljaju u UXI datoteku za analizu sa plutajućim stingerom. Izračunate vrijednosti mogu se provjeriti u logu analize.

### 6.5.4 Analiza sa plutajućim stingerom

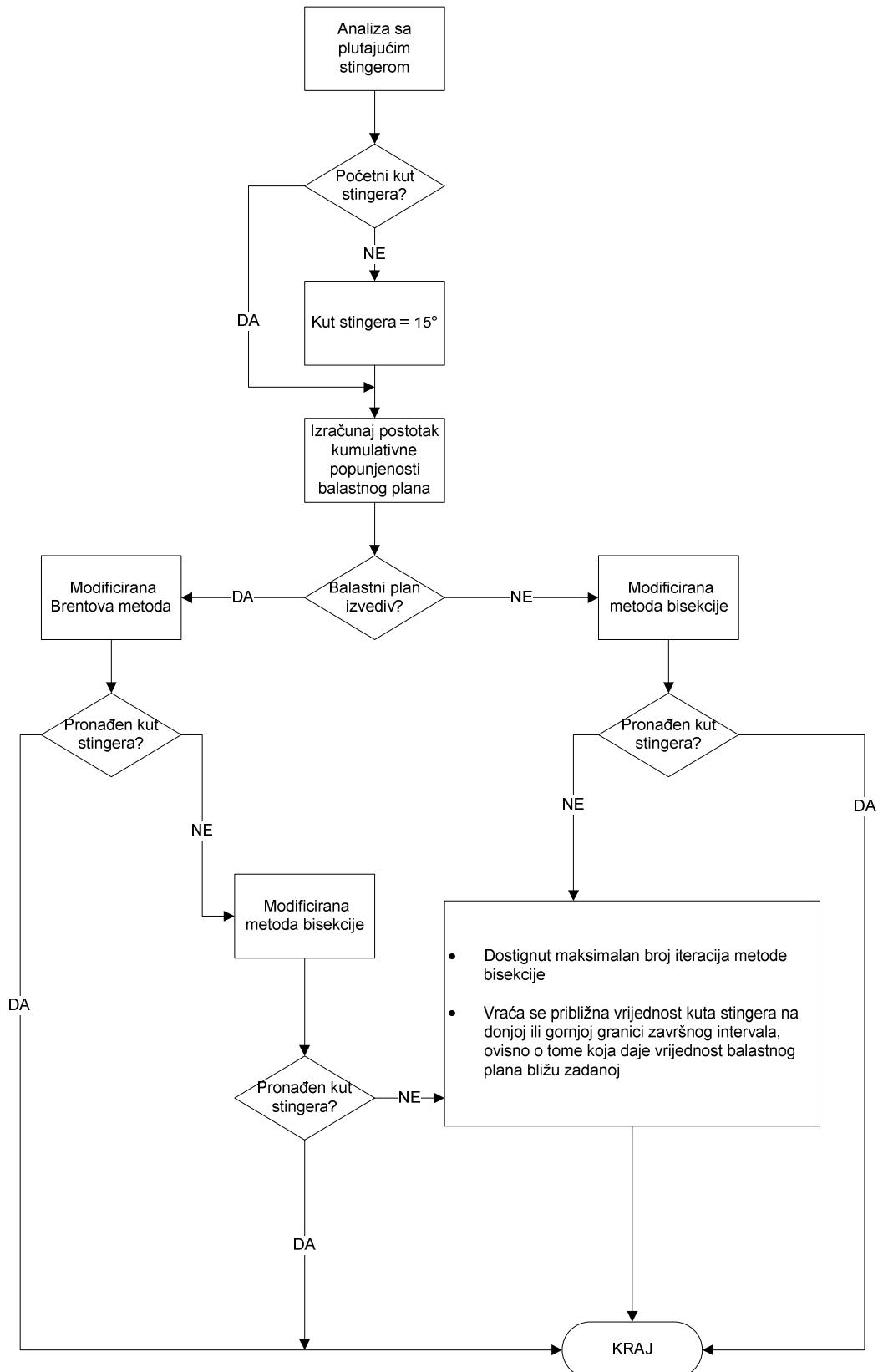
Analiza sa plutajućim stingerom odabrane sekcije daje korisniku informaciju za dobivanje određenog balastnog plana, provjeru njegove izvedivosti ili te daje vrijednost kuta stingera koji odgovara zadanim balastnom planu.

Procedura analize s plutajućim stingerom:

- Bazira se na pronalaženju korijena nelinearne funkcije uz iterativno pozivanje N-Lay analize s fiksnim stingerom.
- Ta funkcija predstavlja razliku između trenutnog balastnog plana i unesenog balastnog plana. Nezavisna varijabla je kut fiksnog stinger-a:

$$f(x) = f(\alpha) = BP(\alpha) - BP_{input} \quad (6.1)$$

- Funkcija  $BP(\alpha)$  se računa preko pozivanja N-Lay analize sa fiksnim stingerom te izračuna balastnog plana za zadani kut stinger-a
- Koriste se dvije metode za pronalaženje korijena nelinearne jednadžbe:
  - Modificirana metoda bisekcije – sigurnije konvergira rješenju
  - Modificirana Brentova metoda – brža konvergencija
- Odabir metode izvodi aplikacija automatski sljedeći logiku prikazanu u dijagramu toka (Sl. 6.18)



Sl. 6.18. Dijagram toka analize sa plutajućim stingerom

### 6.5.5 Prozor rezultata analize (Analysis Results Form)

Prozor rezultata analize (Sl. 6.19) prikazuje podatke iz N-Lay STA datoteke u tabličnom obliku. Povrh toga sadrži tablicu s pregledom maksimalnih vrijednosti, izvještaj o provjeri reakcije oslonaca te neke druge korisne podatke kao što su kut stingera, efektivna sila napinjanja na dnu te razmak vrha stingera od morskog dna.

| Fixed Stinger Analysis                                  |        | Value |       | Unit               |           |                      |                       | Abs. Bending Moment [t*m] |                      | Usage Factor [%]  |                                       | Strain [%] |  |
|---|--------|-------|-------|--------------------|-----------|----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------|------------|--|
| Tension   | 15.0   |       | t     | Overbend Max       | 54.33     |                      | 51.27                 |                           | 0.000                |                   |                                       |            |  |
| Stinger Tip Clearance                                   | 53.22  |       | m     | Overbend Allowable | 82.98     |                      | -                     |                           | -                    |                   |                                       |            |  |
| Bottom Effective Tension                                | 12.40  |       | t     | Sagbend Max        | 18.32     |                      | 18.18                 |                           | 0.000                |                   |                                       |            |  |
| L65_CR1 Angle   | 11.230 |       | deg   | Sagbend Max (+)    | 18.32     |                      | 18.18                 |                           | 0.000                |                   |                                       |            |  |
| Trim  | 0.0    |       | deg   | Sagbend Max (-)    | 18.03     |                      | 17.90                 |                           | 0.000                |                   |                                       |            |  |
| Draft   | 8.500  |       | m     | Sagbend Allowable  | 82.98     |                      | -                     |                           | -                    |                   |                                       |            |  |
| <b>All support reactions are below allowable limit.</b> |        |       |       |                    |           |                      |                       |                           |                      |                   |                                       |            |  |
| Node  | S [m]  | X [m] | Y [m] | Y support [m]      | Slope [°] | Support reaction [t] | Effective tension [t] | Axial force [t]           | Bending moment [t*m] | Pipe weight [t/m] | Bending stiffness [t*m <sup>2</sup> ] | H st [t]   |  |
| TEM_2B  | 0.00   | 0.00  | 5.96  | 5.96               | -4.65     | 0.62                 | 14.97                 | 14.97                     | 29.46                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 2.95   | 2.94  | 5.71  |                    | -5.09     |                      | 14.91                 | 14.91                     | 32.36                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 5.90   | 5.88  | 5.44  |                    | -5.59     |                      | 14.83                 | 14.83                     | 37.42                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 8.85   | 8.81  | 5.14  |                    | -6.18     |                      | 14.73                 | 14.73                     | 44.68                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| Sup_B1  | 11.80  | 11.74 | 4.80  | 4.80               | -6.89     | -8.12                | 14.66                 | 14.66                     | 54.22                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 14.74  | 14.66 | 4.43  |                    | -7.58     |                      | 14.62                 | 14.62                     | 42.18                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 17.69  | 17.58 | 4.03  |                    | -8.11     |                      | 14.56                 | 14.56                     | 32.38                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 20.63  | 20.49 | 3.60  |                    | -8.52     |                      | 14.48                 | 14.48                     | 24.70                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| Sup_B2  | 23.57  | 23.40 | 3.16  | 3.16               | -8.83     | -1.39                | 14.41                 | 14.41                     | 19.07                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 25.78  | 25.58 | 2.81  |                    | -9.01     |                      | 14.34                 | 14.34                     | 13.10                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 27.98  | 27.75 | 2.47  |                    | -9.12     |                      | 14.28                 | 14.28                     | 8.19                 | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 30.18  | 29.93 | 2.12  |                    | -9.19     |                      | 14.20                 | 14.20                     | 4.33                 | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| Sup_B3  | 32.38  | 32.10 | 1.76  | 1.58               | -9.22     | 0.00                 | 14.11                 | 14.11                     | 1.48                 | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 35.59  | 35.27 | 1.25  |                    | -9.22     |                      | 14.01                 | 14.01                     | -0.87                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 38.80  | 38.43 | 0.74  |                    | -9.21     |                      | 13.90                 | 13.90                     | -1.14                | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 42.00  | 41.60 | 0.22  |                    | -9.20     |                      | 13.80                 | 13.80                     | 0.69                 | 0.207             | 11794.0                               |            |  |
| s1  | 45.21  | 44.76 | -0.29 | -0.36              | -9.24     | 0.00                 | 13.74                 | 13.70                     | 4.64                 | 0.020             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 47.96  | 47.48 | -0.73 |                    | -9.34     |                      | 13.72                 | 13.61                     | 9.04                 | 0.020             | 11794.0                               |            |  |
| BTWN...   | 50.71  | 50.19 | -1.18 |                    | -9.49     |                      | 13.71                 | 13.51                     | 13.67                | 0.020             | 11794.0                               |            |  |

Sl. 6.19. Prozor rezultata analize (Analysis Results Form )za određenu silu napinjača

Tablica sažetka rezultata (Sl. 6.20) omogućuje vrlo brzu i efikasnu provjeru pokretanja višestrukih proračuna dajući sažetak maksimalnih izračunatih vrijednosti reakcija oslonaca, momenata savijanja te pregled proračunskih čvorova u kojima propisani kriteriji nisu zadovoljeni.

| Complete Section Check       |                 |                 |                 |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                              | Minimum tension | Nominal tension | Maximum tension |
| Tension [t]                  | 15.0            | 25.0            | 35.0            |
| L65_CR1 Angle [deg]          | 11.230          | 10.055          | 9.264           |
| Trim [deg]                   | 0.0             | 0.0             | 0.0             |
| Draft [m]                    | 8.500           | 8.500           | 8.500           |
| L65_CR1 Ballast Tanks Cu...  | 580.42          | 580.41          | 580.40          |
| L65_CR1 Ballast Tanks FL...  | FDX file order  | FDX file order  | FDX file order  |
| Bending Moment [t*m]         |                 |                 |                 |
| Overbend Max Bending M...    | 51.87           | 54.11           | 57.74           |
| Overbend Allowable Bend...   | 82.98           | 82.98           | 82.98           |
| Sagbend Max Bending Mo...    | 18.16           | 10.33           | 7.16            |
| Sagbend Max (+) Bending ...  | 18.16           | 8.64            | 4.28            |
| Sagbend Max (-) Bending ...  | 17.94           | 10.33           | 7.16            |
| Sagbend Allowable Tension... | 82.98           | 82.98           | 82.98           |
| Usage Factor [%]             |                 |                 |                 |
| Overbend Max Usage Factor    | 49.00           | 52.22           | 56.55           |
| Overbend Allowable Usage...  | 72.00           | 72.00           | 72.00           |
| Sagbend Max Usage Factor     | 18.05           | 11.89           | 10.01           |
| Sagbend Max (+) Usage F...   | 18.05           | 10.32           | 7.33            |
| Sagbend Max (-) Usage Fa...  | 17.83           | 11.89           | 10.01           |
| Sagbend Allowable Usage...   | 68.00           | 68.00           | 68.00           |
| Strain                       |                 |                 |                 |
| Overbend Max Strain          | 0.000           | 0.000           | 0.000           |

Sl. 6.20. Prozor rezultata analize (Analysis Results Form ) – sažetak rezultata sekcije

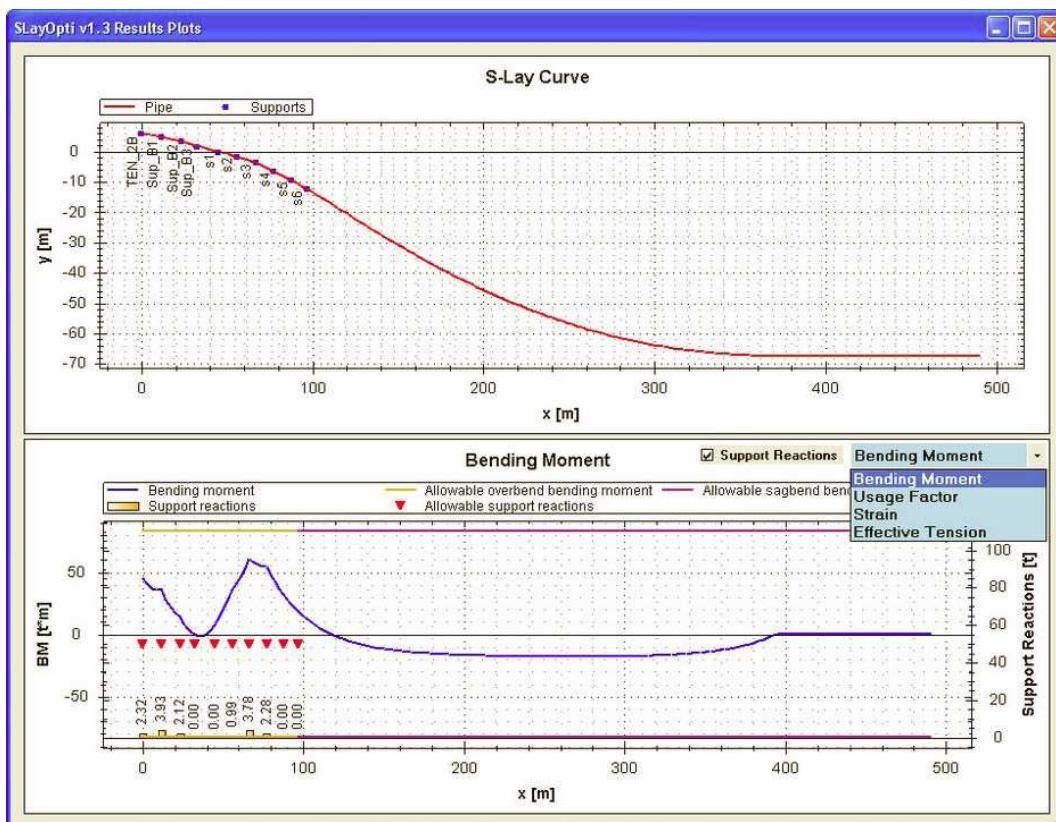
| Analysis Log   |                        |          |        |            |      |  |
|--|------------------------|----------|--------|------------|------|--|
| N-Lay Section AnalysisBuild 177351                     |                        |          |        |            |      |  |
| 12. rujan 2008   |                        |          |        |            |      |  |
| 11:10:49   |                        |          |        |            |      |  |
| -----  |                        |          |        |            |      |  |
| FIXED STINGER ANALYSIS WITH Minimal Tension = 15.0 [t] |                        |          |        |            |      |  |
| -----  |                        |          |        |            |      |  |
| Standard   | : UserDefined          |          |        |            |      |  |
| Equivalent Stress Calculation Type                     | : SMYS                 |          |        |            |      |  |
|  |                        | BM [t*m] | UF [%] | Strain [%] |      |  |
| Allow. Overbend  | 82.98                  | -        | -      | -          |      |  |
| Max. Overbend  | 51.87                  | -        | -      | -          |      |  |
| Allow. Sagbend   | 82.98                  | -        | -      | -          |      |  |
| Max. Sagbend   | 18.16                  | -        | -      | -          |      |  |
| CRITERIA DEFINED FROM STANDARD IS SATISFIED!           |                        |          |        |            |      |  |
| Bottom Effective Tension [t]: 12.44                    |                        |          |        |            |      |  |
| Support Reactions                                      |                        |          |        |            |      |  |
| Support Name   | : Sup_B1 Sup_B2 Sup_B3 | s1       | s2     | s3         | s4   |  |
| Allow. Reaction [t]                                    | : 50.0 50.0 50.0       | 50.0     | 50.0   | 50.0       | 50.0 |  |
| Support Reaction [t]                                   | : 0.00 5.30 0.00       | 0.00     | 2.13   | 0.24       | 3.36 |  |

Sl. 6.21. Prozor sa zapisom analize

### 6.5.6 Grafički prikaz rezultata

Prozor za grafički prikaz rezultata je podijeljen u dva područja:

- **Prikaz geometrije (Geometry Plot)** - gornji graf uvijek prikazuje samo geometriju cijevi sa čvorovima oslonaca;
- **Prikaz kriterija (Criteria plot)** – donji graf prikazuje izračunate vrijednosti kriterija sa reakcijama oslonaca, ovisno o selektiranoj opciji:
  - Moment savijanja
  - Faktor iskoristivosti
  - Deformacija
  - Efektivna sila napinjanja
  - Reakcije oslonaca



Sl. 6.22. Prozor sa grafičkim prikazom rezultata

### 6.5.7 Analiza sa uzgonskim tankovima

Implementirana je procedura za pozicioniranje prvog i posljednjeg uzgonskog tanka – korektno se pozicionira prvi uzgonski tank prema definiranoj dubini (**First Buoyancy Tank Depth**) i posljednji buoyancy tank sa Last Buoyancy Tank Depth. Procedura ima sljedeće korake koji se ponavljaju dok se ne pronađu zadovoljavajuće pozicije (ili dok nije dostignut maksimalni broj korekcionih koraka):

1. Približna procjena vrijednosti krivuljne apcise prvog i posljednjeg uzgonskog tanka
2. Preliminarna analiza sa približnim pozicijama uzgonskih tankova
3. Izračun točne krivuljne apcise prvog uzgonskog tanka na bazi rezultata analize i linearna interpolacija sa ciljem poklapanja sa definiranom dubinom prvog uzgonskog tanka
4. Izračun točne krivuljne apcise zadnjeg uzgonskog tanka na bazi rezultata analize i linearna interpolacija sa ciljem poklapanja sa definiranom dubinom posljednjeg uzgonskog tanka
5. Završno pokretanje analize sa ispravnim pozicijama uzgonskih tankova.

### 6.5.8 Kompletna provjera sekcije (Complete section check)

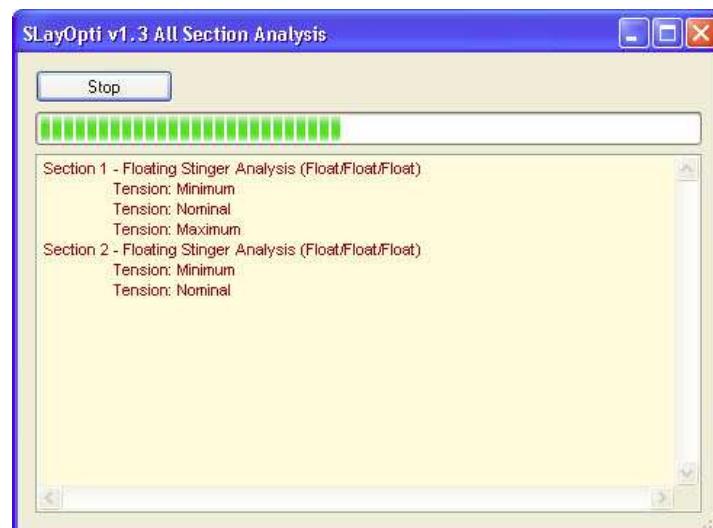
Kompletna provjera sekcije (Complete section check) je procedura koja podrazumijeva pokretanje analize za sve tri vrijednosti sile napinjača (minimalna, nominalna i maksimalna) sa ciljem provjere sekcije sa zadanim balastnim planom.

Sila napinjača koja je označena kao relevantna u tablici podataka sekcija (Slika....) se analizira prva s analizom fiksnog stinger-a, stoga je neophodan unos vrijednosti kuta stinger-a. Nakon uspješne analize s fiksnim stingerom provodi se provjera izvedivosti dobivenog balasnog plana. Proračunavaju se postotak punjenja balasnih tankova i smjer punjenja i na osnovu njih ukupna uzgonska sila i njen krak koji se koriste u narednoj analizi sa plutajućim stingerom.

Analiza sa plutajućim stingerom se provodi dva puta za preostale sile napinjača koje nisu označene kao relevantne. Provjera propisanih kriterija i sila reakcija oslonaca se provode nakon svake pokrenute analize.

### 6.5.9 Analiza svih sekcija (All sections analysis)

Analiza svih sekcija odjednom (All sections analysis) se provodi za selektiranu konfiguraciju u tablici konfiguracija (Sl. 6.23). Analiza kompletne trijade sila napinjača se provodi za sve sekcije definirane u projektu.



Sl. 6.23. Prozor za analizu svih sekcija

## **6.6 Optimizacija konfiguracije polaganja cjevovoda**

### **6.6.1 Općenito**

Optimizacija konfiguracije polaganja cjevovoda se provodi s višekriterijskim genetskim algoritmom sa ograničenjima koji je proširen sa optimizacijskom procedurom koja oponaša proces inženjerske analize.

Višestruki ciljevi optimizacije se mogu transparentno i fleksibilno konfigurirati preko definicije fleksibilnih kriterija analize. Moguće je proizvoljno uključiti ili isključiti optimizacijske varijable te definirati korake diskretizacije za svaku optimizacijsku varijablu posebno. Pri tome nije nužno da korisnik bude upoznat sa detaljima izvođenja nelinearne optimizacije i genetskog algoritma. Postoje dva načina optimizacije:

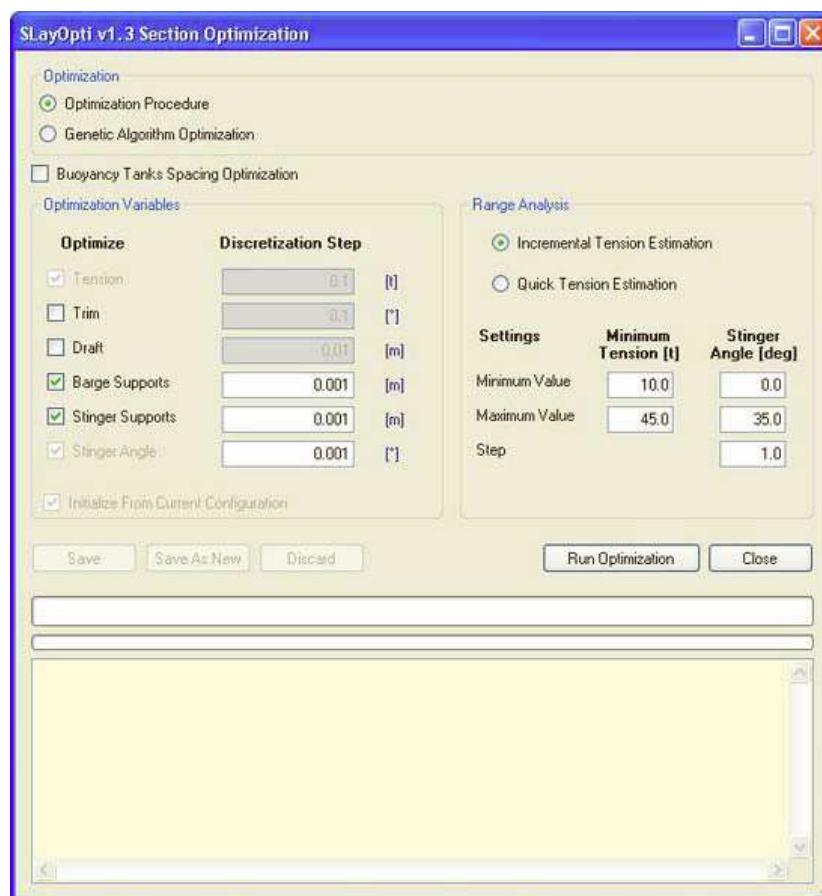
- Optimizacija s genetskim algoritmom
- Optimizacijska procedura

#### **6.6.1.1 Definicija ciljeva optimizacije i ograničenja na osnovu kriterija analize**

Definicija ciljeva optimizacije i ograničenja se provodi automatski prema proizvoljnoj kombinaciji specificiranih kriterija analize u prozoru analize (Analysis Form). Postavke funkcije cilja se automatski izračunavaju prema definiranim kriterijima analize. Na osnovu njih se uključuju ili isključuju određene funkcije cilja ili ograničenja. Težinski faktori se izračunavaju kao proporcionalni udjeli svih uključenih ciljeva i ograničenja optimizacije u overbendu i sagbendu. Izračunate i aplicirane vrijednosti se ispisuju u zaglavlju loga postavki genetskog algoritma.

### 6.6.1.2 Optimizacijske varijable

Implementirana je podrška za uključivanje ili isključivanje optimizacijskih varijabli iz optimizacijskog procesa na taj način da se fiksiraju njihove vrijednosti na one zadane u određenoj konfiguraciji. Sve optimizacijske varijable (sila napinjača, visine oslonaca na brodu, visine oslonaca na stingeru, nagib broda i gaz broda) mogu se definirati kao konstante tijekom optimizacije preko Optimization/Optimization Settings izbornika (Sl. 6.24).



Sl. 6.24. Prozor za pokretanje optimizacije

Nezavisno od postavki varijabli koje su konstantne u optimizaciji, optimizirane varijable mogu se postaviti na početne vrijednosti koje su postavljene u grafičko-korisničkom sučelju (Initialize from GUI).

Podržana je fleksibilna definicija diskretizacije elevacija oslonaca:

- **Uniformna diskretizacija** - definirana sa minimalnom ili maksimalnom vrijednošću oslonaca te korakom diskretizacije.
- **Proizvoljna diskretizacija** – definirana sa diskretnim vrijednostima elevacija oslonaca zadanim u Fix bazi podataka.

Kada se pokrene optimizacijska procedura procjenjuje se vrijednost potrebne sile napinjača sa pokretanjem analize raspona vrijednosti sila napinjača - kut stingera. Dvije metode procjene sile napinjača su na raspolaganju:

1. **Inkrementalna procjena sile napinjača** (*eng. Incremental Tension Estimation*) – metoda sa postupnim povećanjem vrijednosti sile napinjača od minimalne do maksimalne vrijednosti u rasponu. To je općenito sporija, ali pouzdanija metoda za problematičnije slučajeve optimizacije.
2. **Brza procjena sile napinjača** (*eng. Quick Tension Estimation*) – pretpostavlja da se omjer kriterija (stvarna vrijednost kriterija / dozvoljena vrijednost kriterija) kontinuirano smanjuje s povećanjem sile napinjača i pronalazi minimalnu potrebnu силу uz pomoć metode bisekcije. To je općenito brža metoda, ali nije preporučena za problematične slučajeve optimizacije.

Varijable analize raspona:

- Raspon minimalne sile napinjača
- Raspon kuta stingera
- Korak kuta stingera (korak minimalne sile napinjača je uvijek 5 tona)

## 6.6.2 Optimizacija genetskim algoritmom

Implementirana metoda optimizacije genetskim algoritmom ima slijedeće karakteristike:

- Višekriterijska optimizacija
- Optimizacija s ograničenjima implementirana kroz funkcije kažnjavanja
- Automatizirana diskretizacija varijabli
- Automatizirano postavljanje vjerojatnosti genetskih operatora
- Automatizirano postavljanje ograničenja na izvedivost balastnog plana
- Automatizirano postavljanje ograničenja na razmak vrha stingera od morskog dna

Ukoliko se optimizira sila napinjača, tijekom optimizacije genetskim algoritmom, vrijednost siel se optimizira sa standardnim korakom 0.1 tona što u konačnici daje konfiguracije sa vrijednostima koje nisu zaokružene na 5 tona. Po završetku genetskog algoritma izvodi se analiza sa fiksnim stingerom sa dobivenom točnom vrijednosti sile napinjanja i kutom stingera sa ciljem da se izračuna balastni plan. Dobiveni balastni plan se koristi za dvije kompletne provjere sekcije (analiza sa plutajućim stingerom za 3 sile napinjača). Prva provjera se izvodi za nižu zaokruženu vrijednost sile napinjača u intervalu od 5 tona te ukoliko ne prođe provjeru izvodi se druga provjera sa vrijednošću sile napinjača zaokruženu na višu vrijednost u intervalu 5 tona. Vrijednost sile napinjača se prikazuje u koloni **Ten** u logu optimizacije genetskim algoritmom.

Minimizacija sile napinjača ima prioritet pred ostalim vrijednostima funkcije cilja osim razmaka uzgonskih tankova kada su zadovoljeni optimizacijski kriteriji. Optimizacija razmaka uzgonskih tankova se uvodi preko skalirane vrijednosti razmaka u minimizacijsku funkciju cilja. Vrijednost razmaka uzgonskih tankova se prikazuje u **BTS** koloni u logu optimizacije genetskim algoritmom.

Funkcija cilja je proširena s uvođenjem odvojenih sagbend+ i sagbend- područja koja su odjeljena s točkom infleksije elastične linije cjevovoda. Važnost odgovarajućih kriterija u pozitivnom i negativnom području sagbenda se specificira preko težinskih faktora. Ti su faktori proporcionalni broju oslonacu u tim područjima.

### 6.6.3 Optimizacijska procedura

Optimizacijska procedura automatski pronalazi optimalnu konfiguraciju sa minimalnom potrebnom silom napinjača simulirajući proces inženjerske analize. Sastoji se od tri optimizacijske metode:

- Analiza raspona Sila napinjača – Kut stingera
- Analiza raspona kuta stingera
- Optimizacija genetskim algoritmom,

koje se koriste unutar dvije petlje:

- Petlja povećavanja sile napinjača
- Petlja smanjivanja razmaka uzgonskih tankova

Sila napinjača se automatski predviđa za optimizaciju i ne može biti isključena iz optimizacijske procedure. Korak diskretizacije sile napinjača je postavljen na 5 tona i ne može se mijenjati. Ukoliko projekt polaganja koristi stinger, kut stingera se isto predviđa za optimizaciju bez mogućnosti isključivanja, ali korisnik pri tome može promijeniti njegov korak diskretizacije.

Optimizacijska procedura pokušava pronaći konfiguraciju s minimalnom silom napinjača koja zadovoljava sve kriterije. Prva aproksimacija minimalne sile napinjača se dobiva s analizom raspona Sila napinjača – Kut stingera.

#### 6.6.3.1 Analiza raspona Sila napinjača – Kut stingera

Glavni cilj analize raspona Sila napinjača – Kut stingera je pronaći minimalnu potrebnu силу napinjača koja zadovoljava sve kriterije u negativnom području sagbenda (sagbend-). Sekundarni cilj analize raspona Sila napinjača – Kut stingera je približna vrijednost najboljeg kuta stingera koja se računa kao aritmetička sredina vrijednosti kutova koji daju najbolje rezultate u području overbenda i sagbenda-. Taj kut se koristi za redukciju domene kuta stingera tijekom naredne optimizacije.

### 6.6.3.2 Optimizacija genetskim algoritmom i petlja sile napinjača

Optimizacija genetskim algoritmom i petlja sile napinjača se provodi za konstantnu minimalnu silu napinjača koja je pronadena s analizom raspona sila napinjača – kut stingera. Granice raspona kuta stingera se određuju na osnovu najboljeg kuta stingera pronađenog tijekom analize raspona i sa širinom raspona kuta stingera:

$$\alpha_{\min} = \alpha_{\text{najbolji}} - \frac{\alpha_{\text{raspon}}}{2} \quad (6.1)$$

$$\alpha_{\max} = \alpha_{\text{najbolji}} + \frac{\alpha_{\text{raspon}}}{2} \quad (6.1)$$

Nakon završetka GEA optimizacije sa fiksnom silom napinjača, optimizirana sekcija se validira pomoću procedure “*Complete section check*”(*kompletna provjera sekcije*). Ukoliko je ta provjera zadovoljena optimizacijska procedura se završava.

U drugom slučaju, ukoliko “*Complete section check*” ne prolazi za optimalnu sekciju koja je pronađena tijekom GA optimizacije, sila napinjača se povećava za 5 tona. Nova analiza raspona kuta stingera se pokreće sa ciljem pronalaženja najboljeg kuta stingera za novu povećanu silu napinjača. GA optimizacija se pokreće za novu silu napinjača i nove granice kuta stingera.

Ako sila napinjača dostigne maksimalnu vrijednost i optimizirana konfiguracija ne prođe “*Complete section check*”, zahtjev za upotrebu uzgonskih tankova se pojavljuje u izvještaju ukoliko uzgontski tankovi još nisu bili upotrijebljeni. Zahtjev za smanjivanjem razmaka uzgonskih tankova se pojavljuje u izvještaju ukoliko su uzgontski tankovi već bili postavljeni.

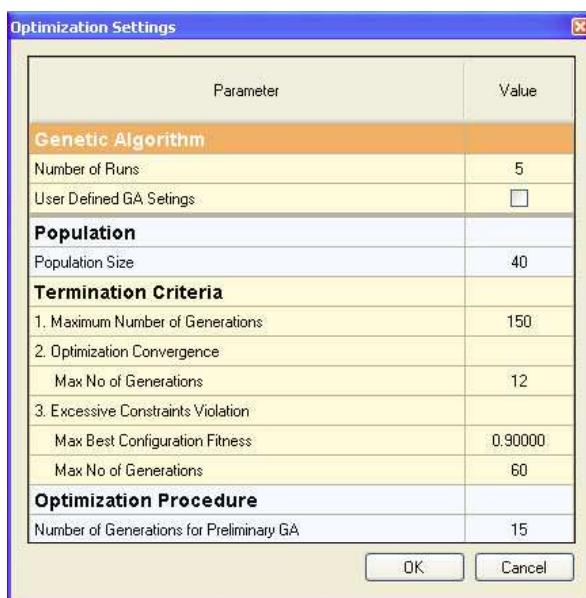
### 6.6.3.3 Optimizacija razmaka uzgonskih tankova

Optimizacija razmaka uzgonskih tankova se može uključiti u optimizacijskom prozoru samo za optimizacijsku proceduru. Da bi se mogla provesti ta optimizacija mora se unijeti kapacitet uzgonskih tankova veći od nule. Petlja za smanjivanje razmaka uzgonskih tankova započinje s razmakom koji je unesen u GUI.

U slučaju nedovoljnog kapaciteta napinjača broda za polaganje, razmak uzgonskih tankova se smanjuje i pokreće se nova analiza raspona Sila napinjača – Kut stingera. Nakon toga slijedi GA optimizacija unutar petlje sile napinjača.

#### 6.6.4 Postavke optimizacije

U prozoru Optimization Settings moguće je postaviti glavne parametre koji kontroliraju GA optimizaciju i spremiti ih zajedno s radnim okružjem projekta.



Sl. 6.25. Prozor sa postavkama optimizacije

**Number of Runs** – definira koliko ciklusa genetskog algoritma treba izvršiti sa specificiranim postavkama optimizacije. Nakon završetka te procedure najbolji rezultat iz svih ciklusa se procjenjuje na osnovu vrijednosti funkcije kvalitete se provodi kompletna provjera sekcije za tu konfiguraciju.

**User defined GA settings** – Ukoliko ta opcija nije uključena postavke optimizacije se automatski izračunavaju i uzimaju u obzir umjesto vrijednosti postavljene u prozoru Optimization Settings, osim broja pokretanja (**Number of Runs**).

**Population Size** – veličina populacije koja se koristi kod glavne GA optimizacije. Veličina populacije ovisi o prirodi problema; veća populacija je potrebna kod teških optimizacijskih problema. Treba imati na umu da veličina populacije proporcionalno povećava vrijeme potrebno za izvođenje optimizacije.

Preporučene vrijednost je oko 40 jedinki je određena na osnovu testiranja kod većine problema polaganja.

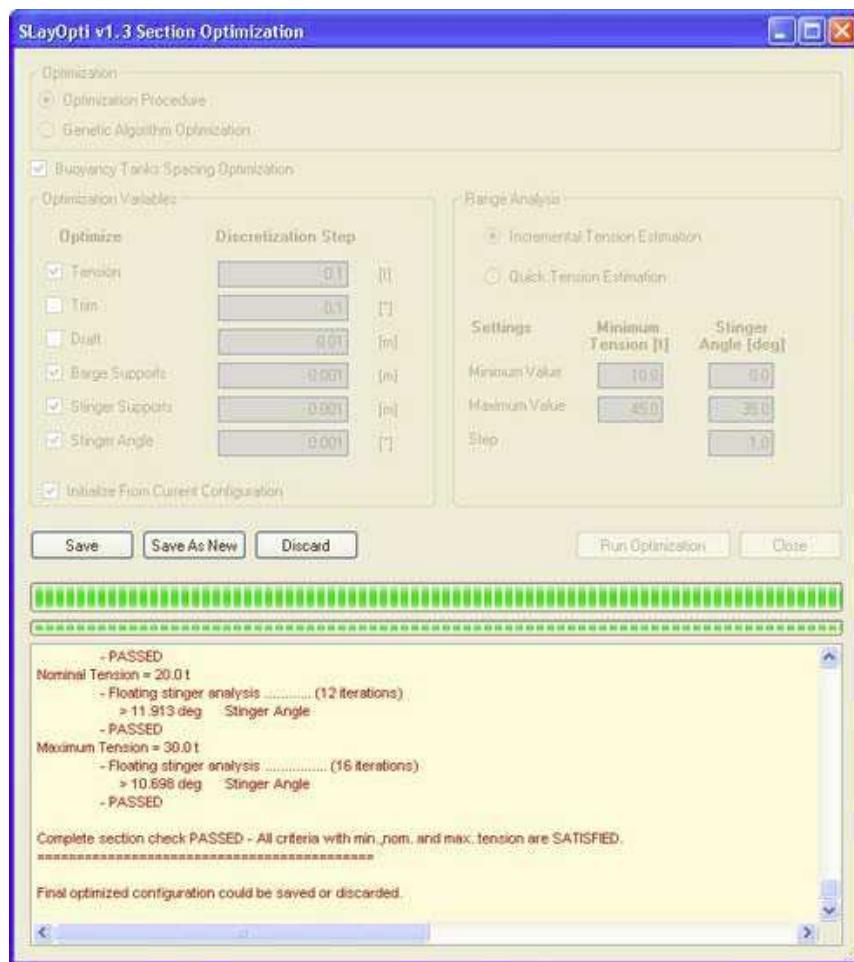
**Termination Criteria** – GA optimizacija će biti zaustavljena kada je zadovoljen bilo koji od sljedećih kriterija zaustavljanja:

1. Maksimalni broj generacija je dostignut
2. Relativna prosječna kvaliteta populacije (Relative Average Population Fitness) prelazi specificiranu graničnu vrijednost (osnovna postavka je 75%) i kvaliteta najbolje jedinke u populaciji (Best Configuration(individual) fitness) ostaje nepromijenjena kroz određeni broj generacija (Max. No of Generations with Unchanged Best Configuration - Maksimalni broj generacija s nepromijenjenom najboljom konfiguracijom);
3. Prekomjerno narušavanje ograničenja (Excessive Constraints Violation) koje je definirano sa dvije vrijednosti u postavkama optimizacije:
  - a. Maksimalna kvaliteta konfiguracije (Max. Best Configuration Fitness) – optimizacija treba premašiti tu vrijednost nakon specificiranog broja generacija. Standardna vrijednost je 0.9, ali se može postaviti i na manju ako se treba postaviti stroži kriterij zaustavljanja;
  - b. Maksimalni broj generacija (Max. No of Generations) – Maksimalni broj generacija nakon kojeg će se zaustaviti optimizacija ukoliko je kvaliteta najbolje jedinke konfiguracije još uvijek manja od Maksimalne kvalitete konfiguracije (Max. Best Configuration Fitness)

**Number of generations for preliminary GA** – Broj generacija za preliminarnu GA optimizaciju kod optimizacijske procedure.

### 6.6.5 Optimizacijski zapis

Proces optimizacije se može nadgledati u Run Log prozoru. Optimizacija je razvijena s podrškom za višenitost tako da se optimizacijski proces može zaustaviti prije nego što se dostigne maksimalno broj generacija genetskog algoritma.



Sl. 6.26. Prozor sa logom optimizacije

#### 6.6.5.1 GA optimizacijski log

Nakon što se prikažu postavke genetskog algoritma, nadgledanje optimizacije se vrši preko pregleda ispisa redova za svaku generaciju. Prvi stupac je broj generacija nakon koje slijede stupci koji predstavljaju optimizacijske varijable slijedećim redoslijedom:

- Razmak uzgonskih tankova (Buoyancy tanks spacing - BTS)
- Sila napinjača (Tension - Ten)
- Nagib broda (Trim)
- Gaz broda (Draft)
- Oslonci na brodu (Bs1, Bs2, itd.)
- Kutevi stingera (S1.Angle)
- Oslonci na stingerima (S1.1, S1.2, itd.)

Nakon optimizacije prikazuju se glavne varijable rezultata:

- Omjer maksimalnog momenta savijanja u overbendu (BMo)
- Omjer maksimalnog momenta savijanja u sagbendu (+) (BMs+)
- Omjer maksimalnog momenta savijanja u sagbendu (-) (BMs-)
- Omjer maksimalnog faktora iskoristivosti u overbendu (UFo)
- Omjer maksimalnog faktora iskoristivosti u sagbendu (+) (UFs+)
- Omjer maksimalnog faktora iskoristivosti u sagbendu (-) (UFs-)
- Omjer maksimalne deformacije u overbendu (So)
- Omjer maksimalne deformacije u sagbendu (+) (Ss+)
- Omjer maksimalne deformacije u sagbendu (-) (Ss-)
- Omjer maksimalne reakcije oslonaca (React)
- Devijacija vrijednosti kriterija po osloncima (CritDev)
- Kumulativna udaljenost oslonaca od cijevi (SuppDist)

Posljednji stupci predstavljaju neke specifične rezultate genetskog algoritma:

- Number of untouchable supports (NoUTS) – broj oslonaca koji nisu u kontaktu sa cijevi
- Funkcija kvalitete najboljeg kromosoma (Fitness)
- Prosječna kvaliteta populacije relativna u odnosu na funkciju kvalitete najboljeg kromosoma (Pop\_Fit)
- Posljednji primjenjeni operator (LAO)

S ciljem nadgledanja stupnja efikasnosti pojedinačnih operatora genetskog algoritma, posljednji primjenjeni operatori mutacije i križanja tijekom generiranja trenutnog najboljeg kromosoma (konfiguracije) se ispisuju u log. Kodovi operatora su:

Selekcija:

- E – Elitizam

- DM – Direktna mutacija
- TS – Turnirska selekcija
- RW – Jednostavna selekcija

Križanje:

- C1 – Uniformno križanje
- C2 – Križanje s jednom točkom prekida
- C3 – Miješajuće križanje

Mutacija:

- M1 - Slučajna mutacija
- M2 – Mala varijacija
- M3 – Mutacija oslonca prema cijevi
- M4 – Mutacija kuta stingera
- M5 – Mutacija prema reakcijama oslonaca
- M6 – Mutacija sile napinjača
- M7 – Mutacija oslonaca prema momentu savijanja
- M8 – Mutacija oslonaca s ekstremnom vrijednošću kriterija
- M9 – Mutacija razmaka uzgonskih tankova

### 6.6.5.2 Log optimizacijske procedure

Objašnjenje stupaca loga analize raspona:

- Tension – trenutno analizirana sila napinjača
- Sagbend(-) Criteria Ratio – maksimalni omjer kriterija u sagbendu
- Overbend Criteria Ratio – maksimalni omjer kriterija u overbendu
- Sagbend Best Angle – kut stingera za najbolji omjer kriterija u sagbendu
- Overbend Best Angle – kut stingera za najbolji omjer kriterija u overbendu
- Best Angle – aproksimirani najbolji kut stingera za trenutnu silu napinjača



## 7 REZULTATI OPTIMIZACIJE

### 7.1 *Testni primjer 1*

Testni primjer 1 prikazuje postupak optimizacije za testirani brod cjevopolagač Crawler iz Saipemove flote. Parametri polaganja su uzeti iz projektne prakse.

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| Brod za polaganje                    | Crawler     |
| Stinger                              | L65_CR1     |
| Dubina vode                          | 37 m        |
| Vanjski promjer cijevi               | 18 in       |
| Debljina stjenke cijevi              | 12.4 mm     |
| Jedinična težina cijevi u zraku      | 597 kg/m    |
| Uronjena jedinična težina cijevi     | 271 kg/m    |
| Naprezanje na granici tečenja čelika | 65 Ksi      |
| Dopušteni moment savijanja           | 63.95 ton*m |

Tab. 7.1. Parametri S-Lay postupka polaganja za Testni primjer 1

|   |             |
|---|-------------|
| Vjerojatnost križanja                                     | 0.85        |
| Ukupna vjerojatnost mutacije                              | 0.5         |
| Vjerojatnost jake mutacije                                | 0.2         |
| Vjerojatnost slabe mutacije                               | 0.8         |
| Veličina populacije                                       | 80          |
| Maksimalan broj generacija                                | 100         |
| Diskretizacijski korak visina oslonaca                    | 5 mm        |
| Diskretizacijski korak sile napinjača                     | 5 t         |
| Diskretizacijski korak kuta stingera                      | 0.5 deg     |
| Raspon kutova stingera                                    | 0...20 deg  |
| Raspon sile napinjača                                     | 10...50 ton |
| Težinski faktor ukupnog maksimalnog momenta savijanja     | 1.0         |
| Težinski faktor maksimalnog momenta savijanja u overbendu | 0.1         |
| Težinski faktor maksimalnog momenta savijanja u sagbendu  | 0.1         |

Tab. 7.2. Parametri GA optimizacije za Testni primjer 1

Kod ovog testnog primjera je kao kriterij analize i optimizacije postavljen samo moment savijanja u oba područja – overbendu i sagbendu. Pri tome je funkcija cilja formirana na osnovu slijedećih komponenti:

- Minimizacija maksimalnog momenta savijanja u overbendu (relacija 5.9),
- Minimizacija maksimalnog momenta savijanja u sagbendu (relacija 5.12),
- Minimizacija devijacije kriterija na osloncima (relacija 5.17),
- Minimizacija kumulativne udaljenosti oslonaca od cijevi (relacija 5.20),
- Minimizacija sile napinjača (relacija 5.22)

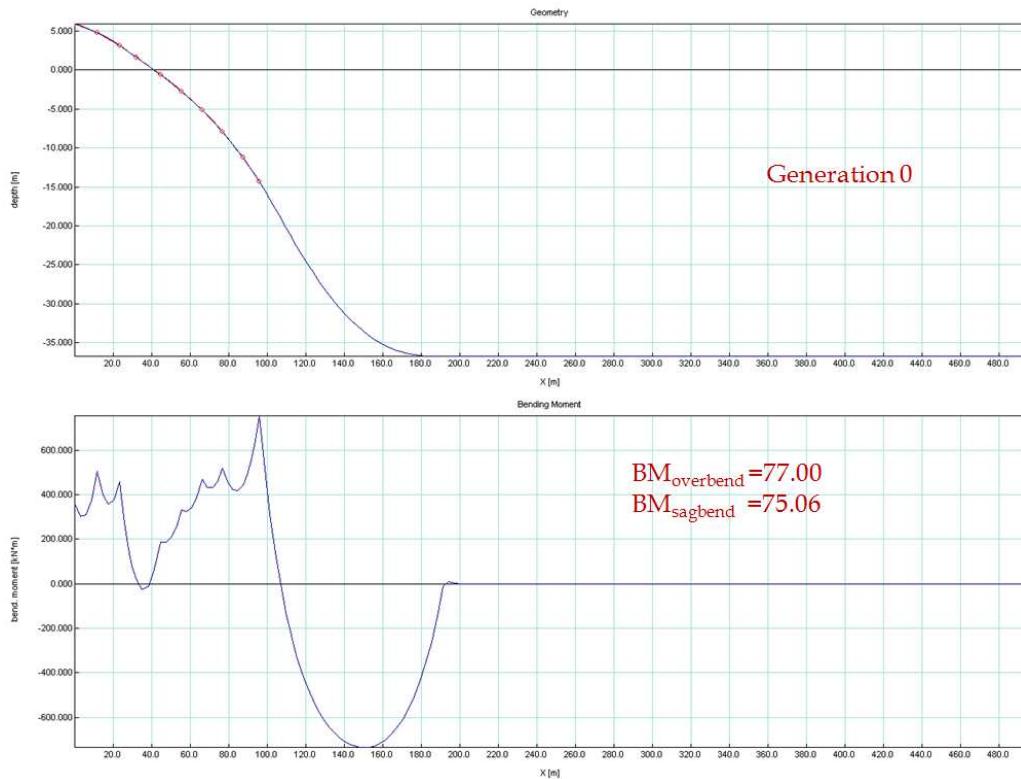
Funkcija kažnjavanja narušavanja ograničenja ima slijedeće komponente:

- Prekoračenje dopuštenog momenta savijanja u overbendu (relacija 5.28),
- Prekoračenje dopuštenog momenta savijanja u sagbendu (relacija 5.31),
- Prekoračenje reakcija oslonaca (relacija 5.34),
- Ograničenje izvedivosti balastnog plana stinger-a,
- Ograničenje udaljenosti vrha stinger od morskog dna.

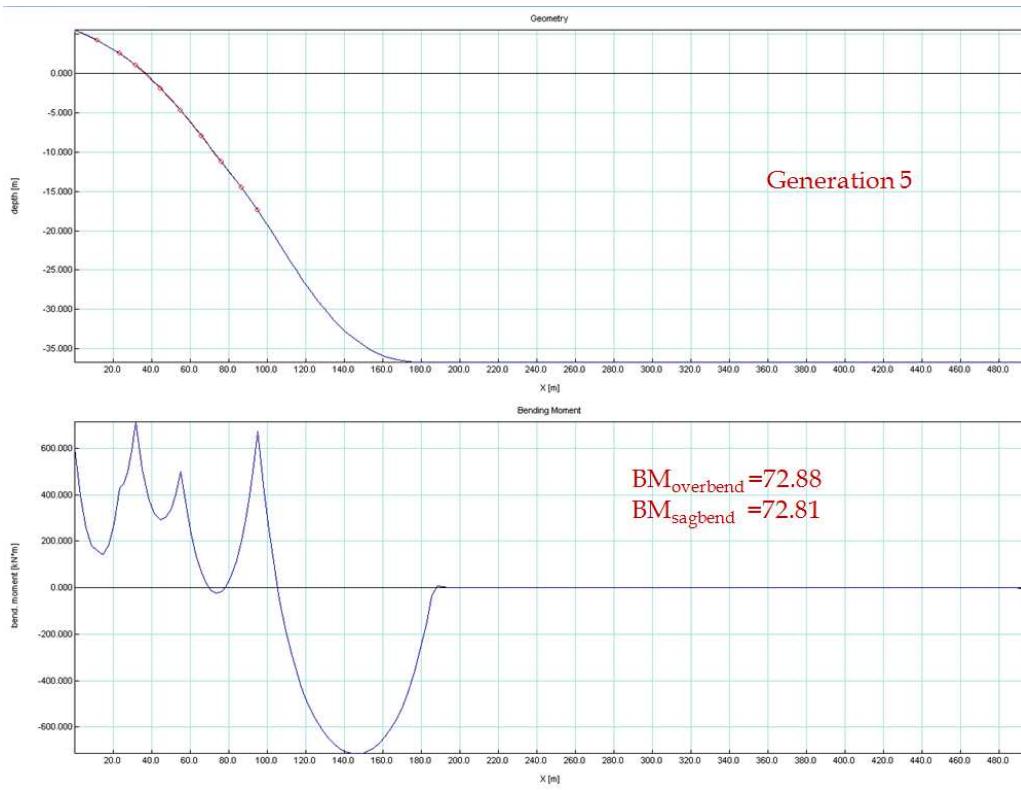
Optimizacijske varijable su:

- Sila napinjača,
- Visine oslonaca na brodu i na plutajućem stingeru,
- Kut stinger-a.

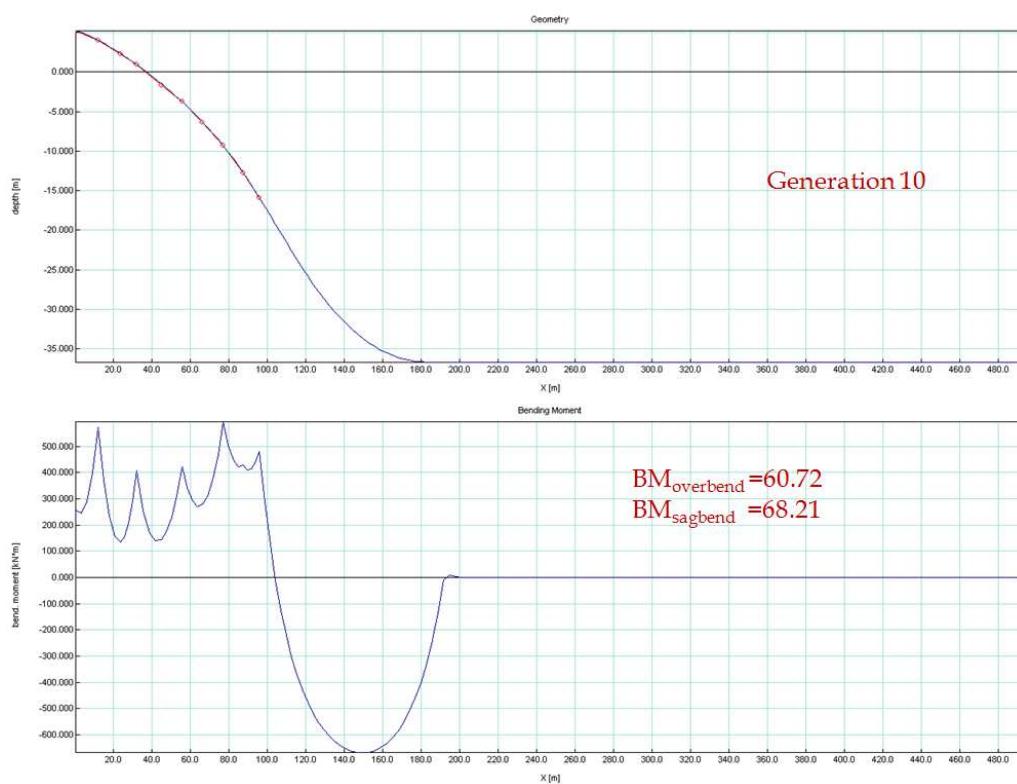
Na slikama 7.1 do 7.6 je prikazano kretanje glavnog kriterija, momenta savijanja za najbolju jedinku kroz više generacija genetskog algoritma. Iz rezultata sa vidi da je optimizacija konvergirala već negdje oko 30. generacije, jer nakon nje nema više značajnijih promjena u ulaznim parametrima i rezultatima. Na slici 7.7 dat je prikaz promjene maksimalnog momenta savijanja u overbendu i sagbendu najbolje jedinke tijekom GA optimizacije, dok su na slici 7.8 prikazane promjene visina pojedinačnih oslonaca najbolje jedinke tijekom GA optimizacije.



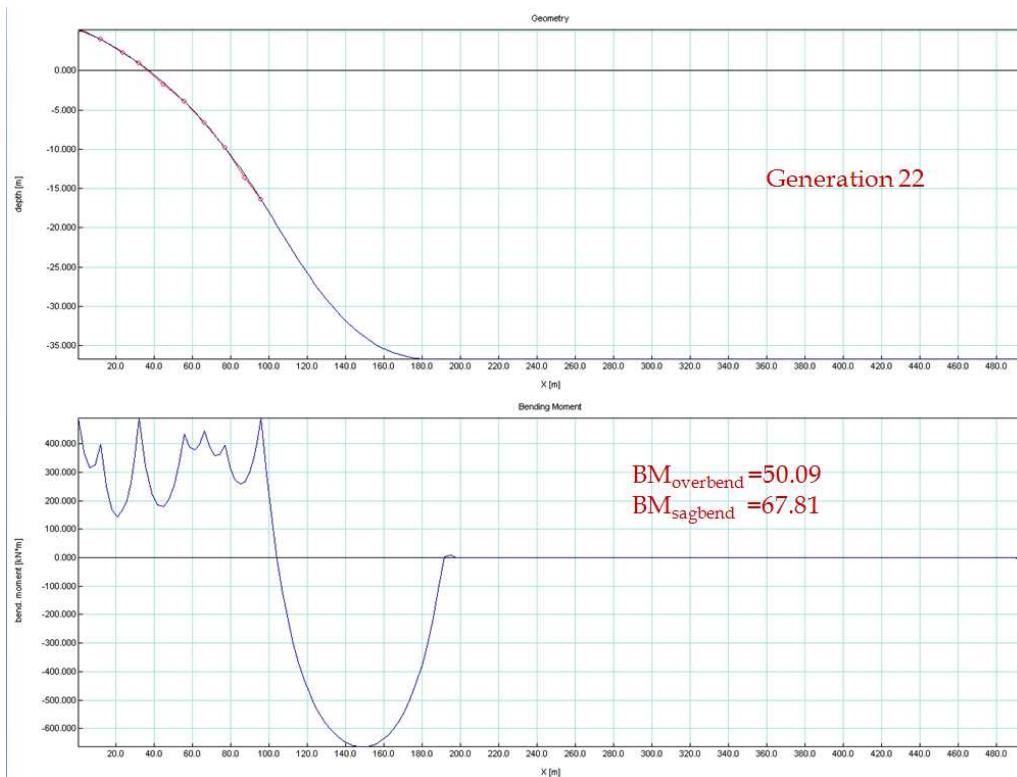
Sl. 7.1. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 1



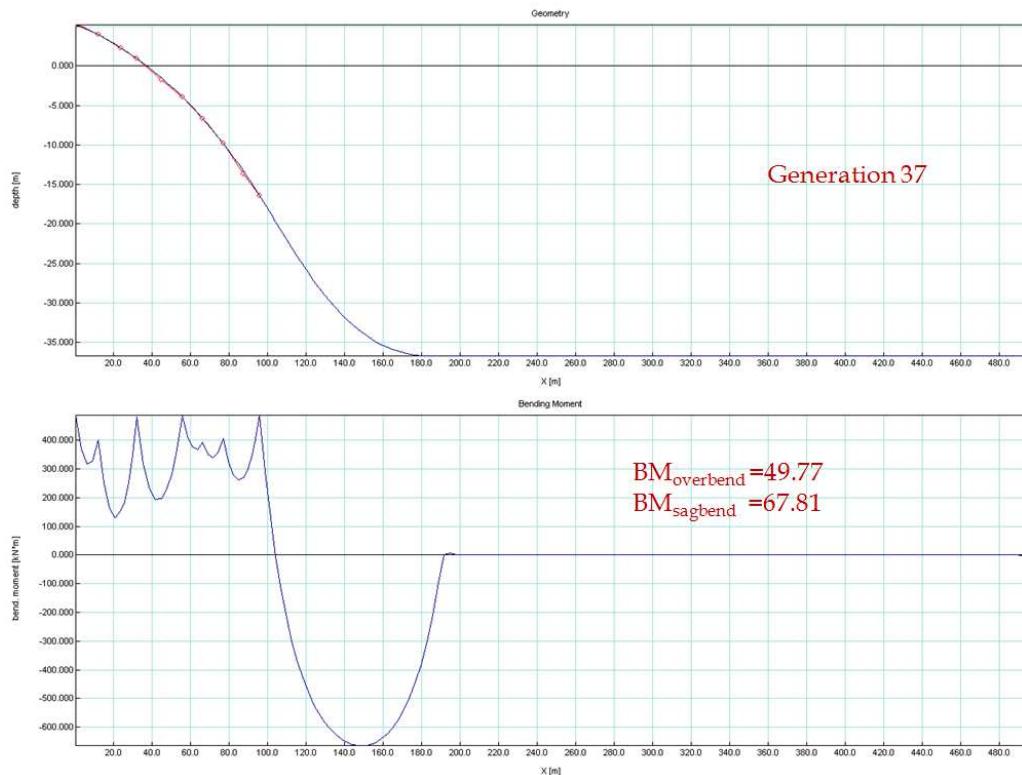
Sl. 7.2. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 5



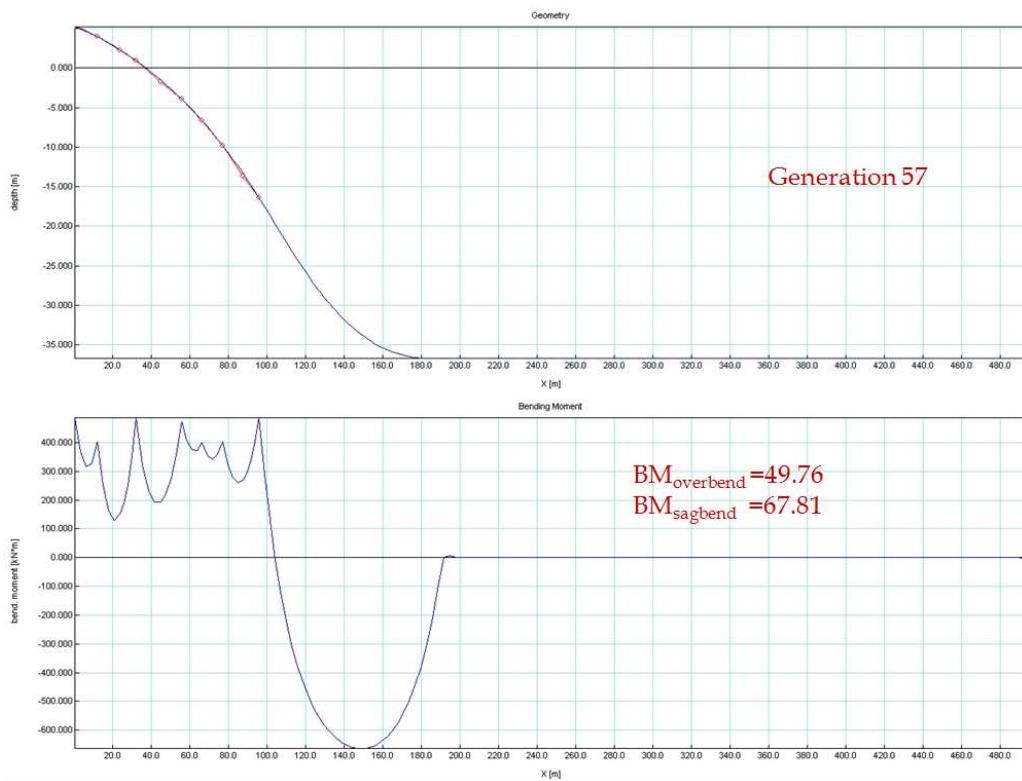
Sl. 7.3. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 10



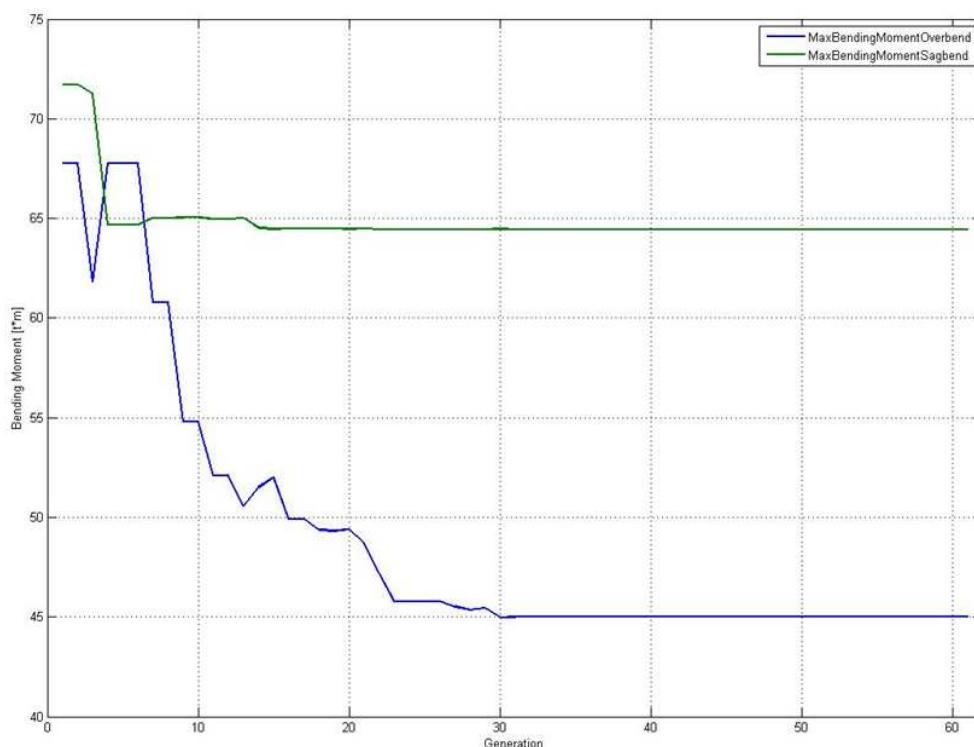
Sl. 7.4. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 22



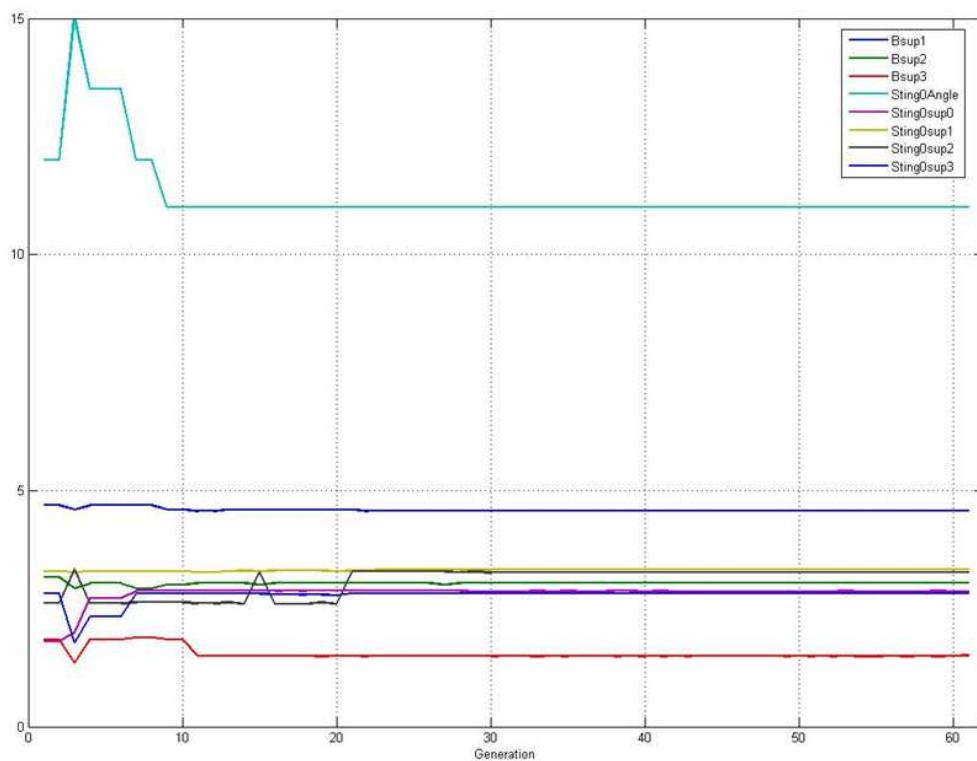
Sl. 7.5. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 37



Sl. 7.6. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 57



Sl. 7.7. Testni primjer 1 - Prikaz promjene maksimalnog momenta savijanja najbolje jedinke tijekom GA optimizacije



Sl. 7.8. Testni primjer 1 - Prikaz promjene visina pojedinačnih oslonaca najbolje jedinke tijekom GA optimizacije

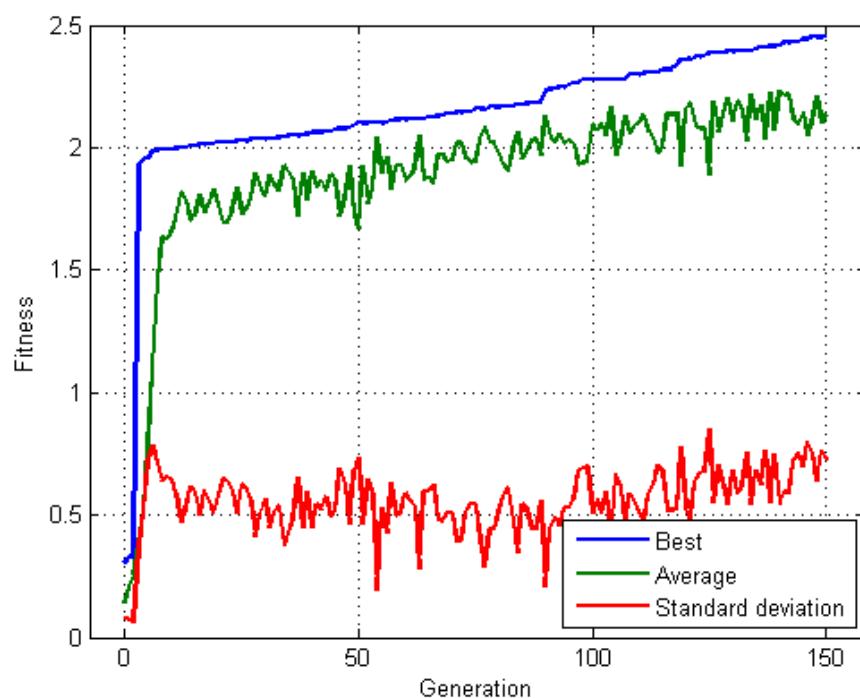
## 7.2 Testni primjer 2

Testni primjer 2 također prikazuje postupak optimizacije za testirani brod cjevopolagač Crawler iz Saipemove flote. Parametri polaganja su uzeti iz projektne prakse.

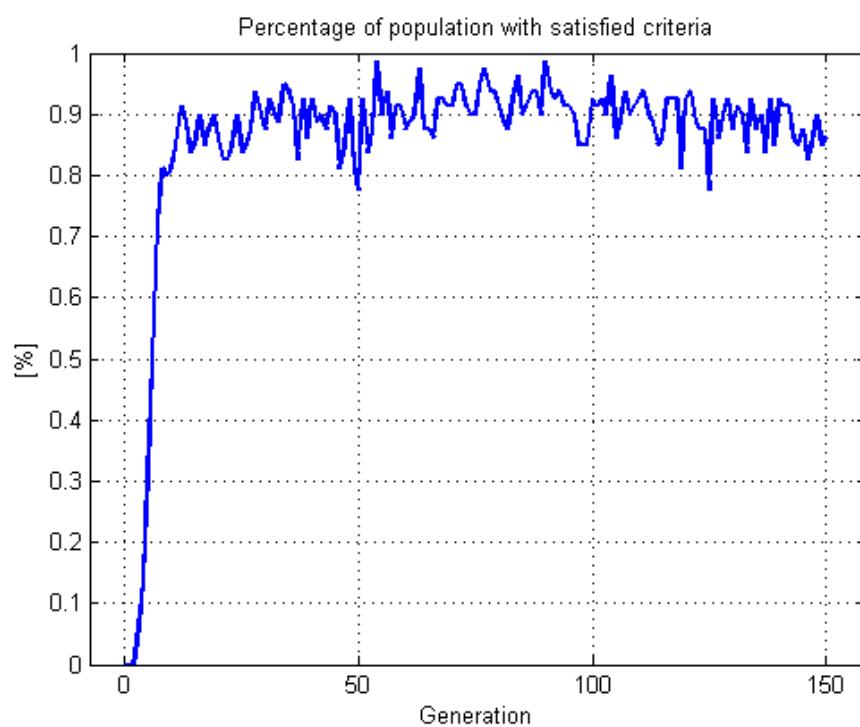
|   |             |
|---|-------------|
| Vjerojatnost križanja                                     | 0.75        |
| Ukupna vjerojatnost mutacije                              | 0.65        |
| Vjerojatnost jake mutacije                                | 0.05        |
| Vjerojatnost slabe mutacije                               | 0.4         |
| Veličina populacije                                       | 80          |
| Maksimalan broj generacija                                | 150         |
| Diskretizacijski korak visina oslonaca                    | 5 mm        |
| Diskretizacijski korak sile napinjača                     | 5 t         |
| Diskretizacijski korak kuta stinger-a                     | 0.5 deg     |
| Raspon kutova stinger-a                                   | 0...20 deg  |
| Raspon sile napinjača                                     | 10...50 ton |
| Težinski faktor ukupnog maksimalnog momenta savijanja     | 1.0         |
| Težinski faktor maksimalnog momenta savijanja u overbendu | 0.1         |
| Težinski faktor maksimalnog momenta savijanja u sagbendu  | 0.1         |

Tab. 7.3. Parametri GA optimizacije za Testni primjer 2

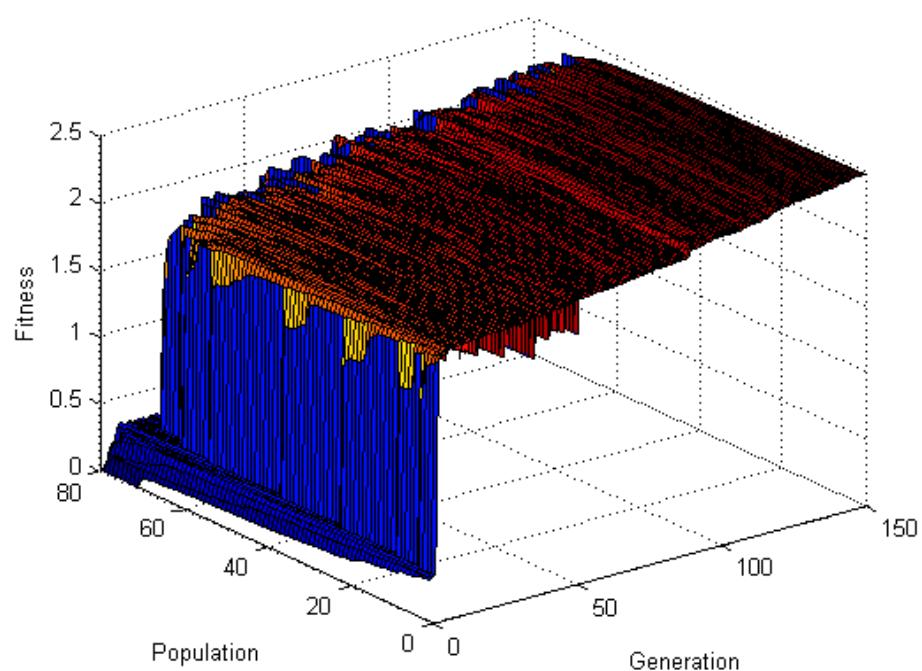
Kod ovog primjera su korištene izmijenjene vjerojatnosti operatora križanja i mutacija. U ovom slučaju dat je prikaz kretanja rezultat GA optimizacije kroz cijelu populaciju. Na slici 7.9 prikazano je kretanje funkcije kvalitete najbolje jedinke, prosjeka vrijednosti funkcije kvalitete za cijelu populaciju te kretanje standardne devijacije funkcije kvalitete cijele populacije tijekom GA optimizacije. Na slici 7.10 vidi se kretanje udjela populacije sa zadovoljenim kriterijima (ograničenjima) tijekom GA optimizacije. Slike 7.11, 7.12 i 7.13 daju 3D grafički pregled kretanja funkcije kvalitete, sile napinjača i kuta stinger-a kroz cijelu generiranu populaciju tijekom GA optimizacije (kroz promjenu generacija).



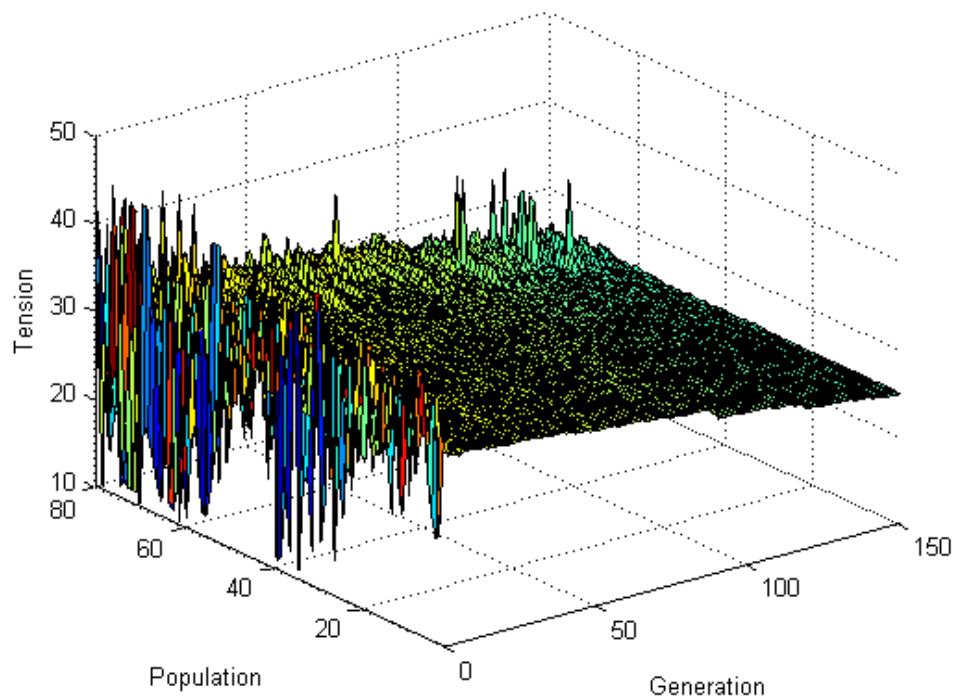
Sl. 7.9. Testni primjer 2 – Kretanje funkcije kvalitete najbolje jedinke, prosjeka cijele populacije te njene standardne devijacije tijekom GA optimizacije



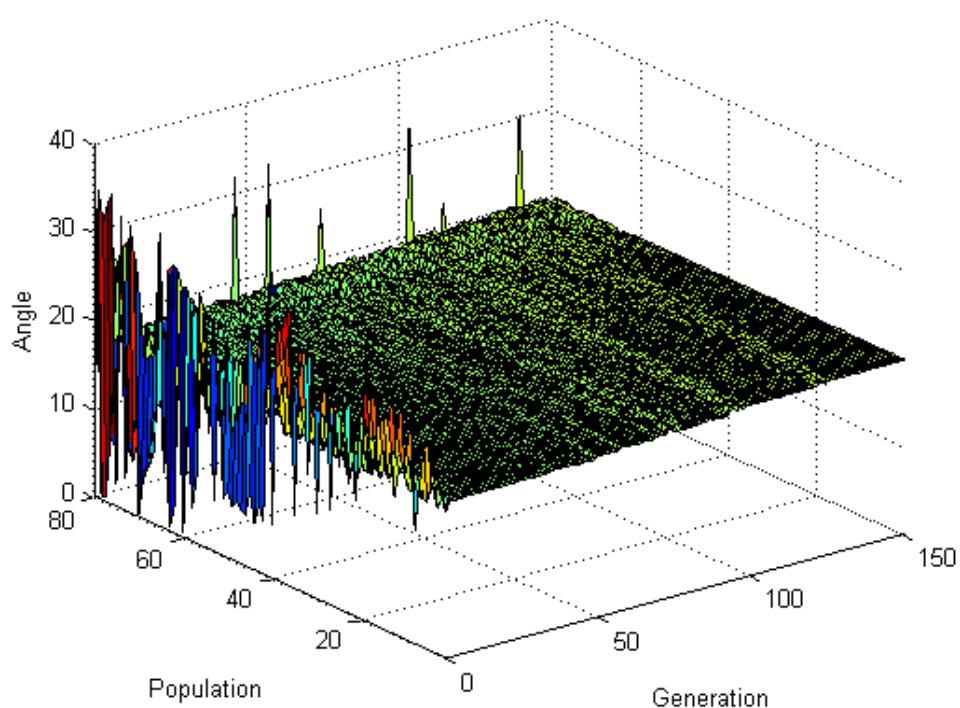
Sl. 7.10. Testni primjer 2 – Kretanje udjela populacije sa zadovoljenim kriterijima (ograničenjima) tijekom GA optimizacije



Sl. 7.11. Testni primjer 2 – Prikaz kretanja funkcije kvalitete kroz cijelu populaciju tijekom GA optimizacije



Sl. 7.12. Testni primjer 2 – Prikaz kretanja sile napinjачa kroz cijelu populaciju tijekom GA optimizacije



Sl. 7.13. Testni primjer 2 – Prikaz kretanja kuta stingera kroz cijelu populaciju tijekom GA optimizacije

## 8 ZAKLJUČAK

U radu je prikazana optimizacija konfiguracije S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda primjenom genetskog algoritma. Definirani postupak optimizacije implementiran je u softveru za analizu i optimizaciju S-Lay postupka polaganja SLayOpti. SLayOpti softver je razvijen u sklopu projekta za gospodarstvo pod nazivom “Optimization of Pipe Laying Stress Analysis” (Optimizacija analize naprezanja kod polaganja cjevovoda) čiji je naručitelj bila tvrtka Saipem Mediteran Usluge d.o.o. Autor ovog rada je vodio tim za istraživanje i razvoj softvera.

Prikazan je prvi korak – analiza i sistematizacija metodologije inženjerske instalacijske analize S-Lay postupka polaganja. Na osnovu definiranih postupaka i ciljeva te metodologije, određeni su uvjeti koje treba ispuniti optimizacijski postupak te je postavljen optimizacijski problem. Definirani optimizacijski problem pripada u grupu općih problema nelinearne optimizacije sa miješanim kontinuiranim i diskretnim varijablama. Povrh toga, funkcije cilja i ograničenja se ne mogu prikazati u analitičkom obliku, već predstavljaju rezultate numeričke simulacije postupka polaganja. Numeričke simulacije izvode se pomoću N-Lay softvera za analizu S-Lay postupka polaganja (softver razvijen u tvrtki Saipem) te se na osnovu rezultata simulacija izračunavaju vrijednosti pojedinih komponenti funkcije cilja i provjeravaju narušavanja funkcija ograničenja.

Zatim je opisan postupak optimizacije genetskim algoritmom. GA je posebno prilagođen problemu polaganja cjevovoda S-Lay postupkom kako bi ispunio sve zahtjeve koji se postavljaju prilikom analize i određivanja konfiguracije postupka polaganja u projektnoj praksi. Operatori GA posebno razvijeni u tu svrhu omogućuju efikasno pronalaženje optimalne kombinacije svih utjecajnih postavki S-Lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda. Ovo je prva poznata primjena optimizacije genetskim algoritmom na problem optimizacije postupka polaganja podmorskih cjevovoda. Prethodna istraživanja spomenuta u uvodu (Ref. [1], [2], [3], [4]) provode optimizaciju samo nekoliko utjecajnih parametara polaganja, dok razvijena optimizacija sa GA omogućava istovremenu optimizaciju svih utjecajnih parametara bez obzira na njihov broj i tip (kontinuirani ili diskontinuirani).

Razvijena aplikacija SlayOpti je profesionalan inženjerski softver koji omogućuje efikasnu analizu i optimizaciju S-Lay postupka polaganja na osnovu rezultata pokretanja softvera NLay. Osim same optimizacije uvedena su mnogobrojna poboljšanja u rukovanju s NLay softverom i njegovim rezultatima, kao što je npr. analiza s plutajućim stingerom te analiza s postavljanjem uzgonskih tankova. SlayOpti koristi vlastitu bazu u XML (*eng. eXtensible Markup Language*) formatu sa svim potrebnim ulaznim podacima koji opisuju brodove za polaganje te pripadne stingere.

Implementacija GA je izvedena istovremeno na fleksibilan način, te je nevidljiva za korisnika. Parametri GA se u svrhu testiranja i istraživanja mogu mijenjati preko ulaznih postavki, dok, s druge strane, korisnik inženjer analitičar instalacije cjevovoda može koristiti optimizaciju bez poznavanja funkcioniranja genetskog algoritma. To je omogućeno fleksibilnom implementacijom definiranja parametara genetskog algoritma koji se mogu postavljati i posredno preko standardnih postavki inženjerske analize instalacije podmorskih cjevovoda koje se preko posebnih relacija preračunavaju u odgovarajuće parametre GA.

Razvijeni softverski alat SlayOpti je jedinstven po tome što predstavlja softver za inženjerske analize koji sadrži GA optimizaciju implementiranu kao dio komercijalne aplikacije koju koriste korisnici inženjeri, a ne sami istraživači koji razvijaju i primjenjuju optimizaciju sa genetskim algoritmom.

Daljnja istraživanja mogu ići u više smjerova. Prvi bi bio daljnje usavršavanje primijenjenog genetskog algoritma kroz detaljnije istraživanje utjecaja pojedinih parametara uz eventualno dodavanje adaptacije vlastitih parametara (eng. Adaptive Genetic Algorithm – AGA), te razvijanje novih operatora. Efikasnost optimizacije mogla bi se poboljšati upotrebom hibridnog genetskog algoritma koji bi pred kraj optimizacije koristio determinističku metodu lokalnog pretraživanja. Drugi smjer bi bio proširenje cjelokupnog postupka optimizacije sa GA na istovremenu optimizaciju više sekcija duž rute cjevovoda, što predstavlja zamjetno složeniji problem. Treći smjer bi bio poboljšanje brzine izvođenja same optimizacije, što se najefikasnije može postići ugradnjom postupka S-Lay analize u SLayOpti softver koji bi zamijenio upotrebu softvera NLay. Ugrađeni postupak analize mogao bi biti kompletan numerički rješavač nelinearnog problema ili bi mogao biti pojednostavljena analitička metoda koja bi omogućila vrlo brzo približno određivanje funkcije kvalitete genetskog algoritma.

## 9 LITERATURA

1. Daley, Gregory C : Optimization of Tension Level and Stinger Length for Offshore pipeline Installation, Offshore Technology Conference (OTC 1875), 1973.
2. Maier G., Corradi L., Mazzoli A., Michelini R.: Optimization of Stinger Geometry for Deepsea Pipelaying, Transactions of ASME, Vol. 104, December 1982.
3. Bhavikatti, S.S., Ravichandran, T.V.: Minimization of maximum moment in offshore pipeline during installation, Applied Ocean Research, Vol. 8, No. 3, 1986.
4. Zhu, D.S., Cheung Y.K.: Optimization of buoyancy of an articulated stinger on submerged pipelines laid with a barge, Ocean Engineering, Vol. 24, No. 4, pp 301-311, 1997.
5. Wang B.P., Chen J.L.: Application of genetic algorithm for the support location optimization of beams, Computers & Structures, Vol. 58, No. 4, pp797-800, 1996.
6. Chiba T., Okado S., Fujii I., Itami, K., Hara F.: Optimum support arrangement of piping systems using genetic algorithm, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 118, November 1996.
7. Tabakov, P. Y.: Multi-dimensional design optimization of laminated structures using an improved genetic algorithm, Composite Structures 54, 349-354, 2001.
8. Vieira, L.T., de Lima, B.S.L.P., Evsukoff, A.G., Jacob, B.P.: Application of genetic algorithms to the synthesis of riser configurations, Proceedings of OMAE 2003.
9. Gantovnik, V.B.: An Improved Genetic Algorithm for the Optimization of Composite Structures, Doktorska disertacija, Virginia Polytechnic Institute, 2005.
10. Shafieefar, M., Rezvani, A.: Mooring optimization of floating platforms using a genetic algorithm, Ocean Engineering 34, 1413–1421., 2007.

11. Boulogouris, E. K, Papanikolaou, A. D.: Multi-objective optimisation of a floating LNG terminal, *Ocean Engineering* 35, 787–811, 2008.
12. Vieira, I.N., Silva, A.J.M., de Lima, B.S.L.P., Jacob, B.P.: A comparative study applied to risers optimization using bio-inspired algorithms, *Intl. Journal Of Modeling And Simulation For The Petroleum Industry*, Vol. 3, No.1, June 2009
13. Clauss, G.F., Birk, L.: Hydrodynamic shape optimization of large offshore structures, *Applied ocean research* 18, pp 157-171, 1996.
14. Birk, L., Clauss, G.F., Lee, J.Y.: Practical Application of Global Optimization to the Design of Offshore Structures, *Proceedings of OMAE 2004*.
15. Lee, J.Y. , Clauss, G.F.: Automated development of floating offshore structures in deepwater with verified global performances by coupled analysis, *Proceedings of 17th ISOPE*, 2007.
16. Gerwick, B.C. Jr.: *Construction of Marine and Offshore Structures*, 2<sup>nd</sup> edition; CRC Press, University of California, Berkley 1999.
17. Wilson, J.F.: *Dynamics of offshore structures* , John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey 2003.
18. Bai, Y.: *Pipelines and Risers*; Elsevier Ocean Engineering Book Series; London 2001.
19. Palmer, A.C., King, R.A.: *Subsea pipeline engineering*, PenWell Corporation, Tulsa, Oklahoma, 2004.
20. Mousselli, A.H.: *Offshore pipeline, design, analysis and methods*, PenWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1981.
21. Braestrup, M.W. et al.: *Design and installation of marine pipelines*, Blackwell Science Ltd. 2005.

22. Guo B., Song S., Chacko J., Ghalambor A.: Offshore Pipelines, Gulf Professional Publishing, Elsevier, Oxford, 2005.
23. DNV Offshore Standard DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems, 2005.
24. Frisch-Fay, R., Flexible bars, Butterworth, London 1962.
25. Chen W.F., Han D.J.: Tubular members in offshore structures, Pitman Advanced Publishing Program, London 1985.
26. Plunkett, R.: Static Bending Stresses in catenaries and Drill Strings, Journal of Engineering for Industry, February 1967.
27. Wilhoit, J.C, Merwin J.E.: Pipe stresses induced in laying offshore pipeline, Journal of engineering for industry, February 1967.
28. Dixon D.A., Rutledge, D.R.: Stiffened catenary calculations in pipeline laying problem, Journal of engineering for industry, February 1968.
29. Powers, J.T., Finn, L.D.: Stress analysis of offshore pipelines during installation, Offshore technology conference, 1969.
30. Wilkins, J. R.: Offshore Pipeline Stress Analysis, Offshore Technology Conference (OTC 1227), 1970.
31. Palmer, A.C., Hutchinson, G., Ells, J.W.: Configuration of submarine pipelines during laying operations, Transactions of ASME, November 1974.
32. Larsen, C.M., Kavlie, D.: Nonlinear analysis of oil pipelines by potential minimization, Computers & Structures Vol.8, pp. 733-743, 1977.
33. Yan, J., Pedersen, P.T.: 3-D Static Analysis of Pipelines During Laying, Offshore Technology Conference (OTC 5297), 1986.

34. Rienstra, S.W.: Analytical approximations for offshore pipelaying problems, Proceedings ICIAM 1987.
35. Shin, H., Kim, J. B., Hara, S., Yamakawa, K: Study of the Offshore Pipeline Installation Based on the Pipeline Experiment, Proceedings of the Sixth (1996) – International Offshore and Polar Engineering Conference, 1996.
36. Datta, T. K., Basu, A. K.: Stress analysis of submarine pipelines, Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, 63, 833-841, Dec. 1997.
37. Guerracino, F., Mallardo, V.: A refined analytical analysis of submerged pipelines in seabed laying, Applied ocean research 21, pp 281-293, 1999.
38. Jensen, G.A.: Offshore Pipelaying Dynamics, Doktorska disertacija, NTNU, Trondheim 2010.
39. Ramberg, W., Osgood, W. R.: Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC, 1943
40. Bruschi, R., Ercoli Malacari, L., Troselletti, E., Vitali, L.: Concrete coated submarine pipelines: Further advances in strain concentration at field joints and relevant implications on strain based design, Offshore Technology Conference (OTC 7858), 1995.
41. NLAY2D - JUMP START, korisnički priručnik, Saipem 2001.
42. RAO, S.S.: Engineering optimization, New York, Wiley & Sons, 1996.
43. Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning, Addison-Wesley Inc., 1989.
44. Gen, M., Cheng, R.: Genetic Algorithms And Engineering Design, Wiley & Sons, New York, 1997.

45. Gen, M., Cheng, R.: Genetic Algorithms and Engineering optimization, Wiley & Sons, New York, 2000.
46. Sivanandam, S. N., Deepa, S. N.: Introduction To Genetic Algorithms, Springer – Verlag Berlin Heildeberg 2008.
47. Haupt, R. L., Haups, S.E.: Practical Genetic Algorithms, John Wiley & Sons, 2004.
48. Michalewicz, Z., Schoenauer, M: Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems, Evolutionary Computation, Volume 4, Number 1, 1996.



## 10 POPISI SKRAĆENICA, OZNAKA, SLIKA I TABLICA

### 10.1 Popis skraćenica

|      |   |
|------|---|
| 2D   | Dvodimenzionalan  |
| DCC  | <i>Displacement Controlled Condition</i> (Stanje pod utjecajem pomaka)        |
| LCC  | <i>Load Controlled Condition</i> (Stanje pod utjecajem opterećenja)           |
| GA   | Genetski Algoritam  |
| SMYS | <i>Specified Mean Yield Stress</i> (Specificirano srednje naprezanje tečenja) |
| ULS  | <i>Ultimate Limit State</i> (Lonačno granično stanje)                         |

## 10.2 Popis oznaka

|                |  |
|----------------|--|
| $c$            | funkcija ograničenja                                     |
| $cw$           | težinski faktor komponente ograničenja                   |
| $D$            | vanjski promjer čelične cijevi                           |
| $E$            | Youngov modul elastičnosti                               |
| $EI$           | krutost na savijanje                                     |
| $F$            | apsolutna funkcija kvalitete                             |
| $H$            | visina oslonca   |
| $I$            | moment inercije presjeka cijevi                          |
| $M_b$          | moment savijanja   |
| $M_d$          | projektni moment savijanja                               |
| $M_E$          | moment savijanja uslijed djelovanja okolišnih uvjeta     |
| $M_F$          | funkcionalni moment savijanja                            |
| $M_p$          | moment savijanja na granici plastičnosti materijala      |
| $N_{CRIT\_OV}$ | broj kriterija u overbendu                               |
| $N_S$          | ukupan broj oslonaca                                     |
| $N_{S\_OV}$    | broj oslonaca u overbendu                                |
| $N_{S\_SAG}$   | broj oslonaca u sagbendu                                 |
| $N_C$          | broj funkcija ograničenja                                |
| $oa$           | uključenost (aktivnost) kriterija u overbendu i sagbendu |
| $o$            | relativna vrijednost komponente cilja                    |
| $ow$           | težinski faktor komponente cilja                         |
| $O$            | funkcija cilja   |
| $P$            | funkcija kažnjavanja (narušavanje ograničenja)           |
| $p$            | komponenta funkcije kažnjavanja                          |
| $p_b$          | otpornost na izdržavanje pritiska                        |

---

|               |  |
|---------------|--|
| $p_c$         | karakteristični pritisak popuštanja              |
| $p_e$         | vanjski tlak (hidrostatski tlak oko cijevi)      |
| $p_i$         | unutarnji tlak u cjevovodu                       |
| $R$           | sila reakcija na osloncu; radijus zakrivljenosti |
| $S_d$         | projektna aksijalna sila u cijevi                |
| $S_p$         | sila u cijevi na granici plastičnosti            |
| $T$           | sila napinjača; aksijalna sila                   |
| $t$           | debljina stijenke cijevi                         |
| $\alpha$      | parametar naprezanja; kut stingera               |
| $\varepsilon$ | deformacija                                      |
| $\sigma_e$    | ekvivalentno naprezanje                          |
| $\sigma_0$    | naprezanje na granici tečenja                    |

### 10.3 Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Sl. 2.1. Postupci polaganja podmorskih cjevovoda .....                                     | 9  |
| Sl. 2.2. S-Lay postupak polaganja podmorskih cjevovoda .....                               | 10 |
| Sl. 2.3. Prikaz radnih stanica S-Lay proizvodne linije .....                               | 11 |
| Sl. 2.4. Raspored opreme na brodu za polaganje S-Lay postupkom (Ref. [16]) .....           | 12 |
| Sl. 2.5. Castoro 6 brod cjevopolagač tvrtke Saipem.....                                    | 13 |
| Sl. 2.6. Prikaz valjkastog oslonca na brodu Crawler.....                                   | 14 |
| Sl. 2.7. Nacrt valjkastog oslonca na brodu Crawler .....                                   | 14 |
| Sl. 2.8. Prikaz stingera broda Crawler.....  | 15 |
| Sl. 2.9. Nacrt stingera broda Crawler .....  | 15 |
| Sl. 2.10. Napinjač cijevi na brodu Crawler tvrtke Saipem .....                             | 16 |
| Sl. 3.1. Distribucija moment savijanja preko oslonaca cijevi (Ref. [18]) .....             | 18 |
| Sl. 3.2. Područja stanja pod utjecajem opterećenja i pod utjecajem pomaka .....            | 22 |
| Sl. 3.3. Ravnoteža sila na elementarni segment cijevi duljine ds .....                     | 26 |
| Sl. 3.4. Primjer grafičkog prikaza rezultata simulacije S-Lay postupka softverom NLay..... | 30 |
| Sl. 3.5. Struktura sustava datoteka softvera NLay (Ref.[41]).....                          | 31 |
| Sl. 3.6. Koordinatni sistem broda softvera NLay .....                                      | 32 |
| Sl. 3.7. Koordinatni sistem stingera softvera NLay .....                                   | 32 |
| Sl. 3.8. Globalni koordinatni sistem softvera NLay.....                                    | 33 |
| Sl. 4.1. Parametri S-Lay konfiguracije polaganja.....                                      | 36 |
| Sl. 5.1. Opći dijagram toka genetskog algoritma .....                                      | 46 |
| Sl. 5.2. Kreiranje nove populacije .....   | 48 |
| Sl. 5.3. Uniformno križanje.....   | 50 |
| Sl. 5.4. Križanje s jednom točkom dijeljenja .....   | 50 |
| Sl. 5.5. Diskretizacija decimalne varijable .....  | 51 |
| Sl. 5.6. Kodiranje kromosoma za optimizaciju polaganja .....                               | 52 |
| Sl. 6.1. Dijagram toka sa osnovnim funkcionalnostima aplikacije SLayOpti.....              | 66 |
| Sl. 6.2. Dijagram toka poziva softvera NLay u svrhu izračuna funkcije kvalitete GA .....   | 67 |
| Sl. 6.3. UML dijagram klase modula Fix Database .....                                      | 68 |
| Sl. 6.4. UML dijagram podatkovnih klasa.....   | 69 |
| Sl. 6.5. UML dijagram klase optimizacijskih varijabli.....                                 | 70 |
| Sl. 6.6. UML dijagram klase parametara polaganja.....                                      | 71 |
| Sl. 6.7. UML dijagram klase analize polaganja .....  | 72 |
| Sl. 6.8. UML dijagram klase modula Optimization Manager .....                              | 73 |

---

|  |     |
|--|-----|
| <i>Sl. 6.9. UML dijagram klasa modula Optimizer .....</i>  | 74  |
| <i>Sl. 6.10. UML dijagram klasa genetskog algoritma.....</i>   | 75  |
| <i>Sl. 6.11. Prozor projekta (Project form) .....</i>  | 77  |
| <i>Sl. 6.12. Prozor sekcija (Sections form) .....</i>  | 78  |
| <i>Sl. 6.13. Prozor analize (Analysis form) .....</i>  | 79  |
| <i>Sl. 6.14. Tablica nelinearnog materijala.....</i>   | 80  |
| <i>Sl. 6.15. Prozor konfiguracija (Configurations Form) .....</i>  | 82  |
| <i>Sl. 6.16. Prozor sa tablicom postavki NLay softvera .....</i>   | 84  |
| <i>Sl. 6.17. Prozor za pokretanje analize sekcije.....</i>   | 85  |
| <i>Sl. 6.18. Dijagram toka analize sa plutajućim stingerom .....</i>   | 87  |
| <i>Sl. 6.19. Prozor rezultata analize (Analysis Results Form )za određenu silu napinjača .....</i>   | 88  |
| <i>Sl. 6.20. Prozor rezultata analize (Analysis Results Form ) – sažetak rezultata sekcije.....</i>  | 89  |
| <i>Sl. 6.21. Prozor sa zapisom analize .....</i>   | 89  |
| <i>Sl. 6.22. Prozor sa grafičkim prikazom rezultata.....</i>   | 90  |
| <i>Sl. 6.23. Prozor za analizu svih sekcija.....</i>   | 92  |
| <i>Sl. 6.24. Prozor za pokretanje optimizacije.....</i>  | 94  |
| <i>Sl. 6.25. Prozor sa postavkama optimizacije.....</i>  | 99  |
| <i>Sl. 6.26. Prozor sa logom optimizacije.....</i>   | 101 |
| <i>Sl. 7.1. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 1 .....</i>  | 107 |
| <i>Sl. 7.2. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 5 .....</i>  | 107 |
| <i>Sl. 7.3. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 10 .....</i>   | 108 |
| <i>Sl. 7.4. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 22 .....</i>   | 108 |
| <i>Sl. 7.5. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 37 .....</i>   | 109 |
| <i>Sl. 7.6. Testni primjer 1 – rezultati najbolje jedinke, Generacija 57 .....</i>   | 109 |
| <i>Sl. 7.7. Testni primjer 1 - Prikaz promjene maksimalnog momenta savijanja najbolje jedinke tijekom GA optimizacije .....</i>  | 110 |
| <i>Sl. 7.8. Testni primjer 1 - Prikaz promjene visina pojedinačnih oslonaca najbolje jedinke tijekom GA optimizacije .....</i>   | 110 |
| <i>Sl. 7.9. Testni primjer 2 – Kretanje funkcije kvalitete najbolje jedinke, prosjeka cijele populacije te njene standardne devijacije tijekom GA optimizacije .....</i> | 112 |
| <i>Sl. 7.10. Testni primjer 2 – Kretanje udjela populacije sa zadovoljenim kriterijima (ograničenjima) tijekom GA optimizacije .....</i>                                 | 112 |
| <i>Sl. 7.11. Testni primjer 2 – Prikaz kretanja funkcije kvalitete kroz cijelu populaciju tijekom GA optimizacije .....</i>  | 113 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Sl. 7.12. Testni primjer 2 – Prikaz kretanja sile napinjača kroz cijelu populaciju tijekom GA optimizacije.....</i> | 113 |
| <i>Sl. 7.13. Testni primjer 2 – Prikaz kretanja kuta stinger-a kroz cijelu populaciju tijekom GA optimizacije.....</i> | 114 |

## **10.4 Popis tablica**

|   |     |
|---|-----|
| <i>Tab. 4.1. Parametri S-Lay konfiguracije polaganja.....</i>                 | 36  |
| <i>Tab. 5.1. Indeksi i razmaci uzoraka užgorskih tankova .....</i>            | 58  |
| <i>Tab. 7.1. Parametri S-Lay postupka polaganja za Testni primjer 1 .....</i> | 105 |
| <i>Tab. 7.2. Parametri GA optimizacije za Testni primjer 1 .....</i>          | 105 |
| <i>Tab. 7.3. Parametri GA optimizacije za Testni primjer 2 .....</i>          | 111 |