

Statička strukturalna analiza instalacije podmorskog cjevovoda

Mešanović, Miralem

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:267258>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli



Miralem Mešanović

Statička strukturalna analiza instalacije podmorskog cjevovoda

Diplomski rad

Pula, rujan, 2023.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli



Miralem Mešanović

Statička strukturalna analiza instalacije podmorskog cjevovoda

Diplomski rad

JMB: 0233006894, izvanredan student

Studijski smjer: Strojarsstvo – Konstruiranje i mehatronika

Predmet: Objekti morske tehnologije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Znanstvena grana: Strojarsstvo

Mentor: doc.dr.sc. Marko Kršulja

Komentor: dr.sc. Damir Karabaić, pred.

Pula, rujna, 2023.

dr.sc. Damir Karabaić, pred.
(Ime i prezime nastavnika)

Objekti morske tehnologije
(Predmet)

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
TEHNIČKI FAKULTET U PULI
ZADATAK TEME DIPLOMSKOG RADA

Pristupnik: Miralem Mešanović

MBS: 0233006894

Studentu sveučilišnog diplomskog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za diplomski rad – tema diplomskog rada pod nazivom:

Statička strukturalna analiza instalacije podmorskog cjevovoda

Sadržaj zadatka: Proučiti i opisati postojeće najzastupljenije metode instalacije podmorskih cjevovoda.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Prikazati dostupne matematičke modele instalacije podmorskih cjevovoda te odabrati prikladan pojednostavljeni model
2. Implementirati algoritam za rješavanje odabranog matematičkog modela unutar programskog paketa MATLAB
3. Primjenom MATLAB programa prikazati utjecaje sile napinjača, dubine morske vode i debljine stijenke cijevi na sile i momente u cjevovodu tokom instalacije, za sljedeće parametre:
 - Vanjski promjer cijevi 820mm
 - Debljina stijenke cijevi 10mm
 - Vlačna čvrstoća 300 MPa
 - Modul elastičnosti $2 \cdot 10^5$ MPa
 - Sila napinjača 30 000 N
 - Gustoća čelika 7700 kg/m^3
 - Dubina morske vode 40 m

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

Strojarstvo izvanredni

Datum:

Potpis nastavnika _____



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Miralem Mešanović kandidat za magistar inženjer / magistra inženjerka strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio diplomskog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

U Puli, rujan 2023. godine



IZJAVA
o korištenju autorskog djela

Ja, Miralem Mešanović dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom „Statička strukturalna analiza instalacije podmorskog cjevovoda“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 07.09.2023.

Student

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru dr.sc. Damiru Karabaiću na stručnom vodstvu tijekom izrade rada, svesrdnoj pomoći i stručnim savjetima pruženim tijekom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima, kolegama i profesorima koji su mi bili potpora za vrijeme studiranja.

Zahvaljujem se mojim roditeljima koji su me podržavali i ohrabivali tijekom cijelog mog akademskog putovanja i života.

Na kraju, posebno zahvaljujem svojoj supruzi Fatimi, na bezrezervnoj podršci, velikom razumijevanju i bezuvjetnoj podršci tijekom studiranja i izrade rada.

SAŽETAK

U diplomskom radu opisane su najzastupljenije metode instalacije podmorskih cjevovoda sa svojim karakterističnim obilježjima. Navedene su analitičke metode za provedbu analize naprezanja sa popratnim jednažbama i opisane analize koje se provode u svrhu ostvarenja strukturalnog integriteta cjevovoda. Primjenom programskog paketa MATLAB izrađuje se skripta za provedbu strukturalne analize instalacije cjevovoda sa naglaskom na glavne sile i naprezanja koja se javljaju tokom instalacije, a na osnovu odabranog matematičkog modela instalacije.

Ključne riječi: instalacija podmorskog cjevovoda, S-lay tip polaganja, strukturalna analiza

ABSTRACT

The master's thesis describes the most prevalent methods for the installation of submarine pipelines along with their characteristic features. Analytical methods for stress analysis are listed, including accompanying equations, and the type of structural analyses to ensure the structural integrity of the pipeline are described. By utilizing the MATLAB software package, algorithm for the numerical solution is developed. Algorithm is performing structural analysis of pipeline installation, focusing on the main forces and stresses that occur during installation, and based on the selected mathematical model.

Key words: submarine pipeline installation, S-lay, structural analysis

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 Hipoteza rada	2
1.2 Predmet istraživanja	2
1.3 Problem istraživanja	2
1.4 Ciljevi istraživanja	2
1.5 Metodologija istraživanja	3
1.6 Struktura rada.....	3
2. METODE POLAGANJA CJEVOVODA	5
2.1 S-lay metoda	5
2.2 J-lay metoda.....	7
2.3 Reel-lay metoda	8
2.4 Metoda povlačenja po dnu	9
2.5 Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna	10
2.6 Metoda površinskog tegljenja	11
3. CIJEVI ZA PODMORSKE CJEVOVODE	13
3.1 Čelične cijevi	14
3.2 Polietilenske cijevi	16
3.3 Stakloplastične cijevi	16
3.4 Spajanje čeličnih cijevi.....	16
4. METODE ZA PROVEDBU ANALIZE NAPREZANJA CJEVOVODA.....	18
4.1 Metoda linearne grede.....	20
4.2 Nelinearna metoda grede	22
4.3 Metoda lančanice	22
4.4 Metoda krute lančanice	24
4.5 Metoda konačnih elemenata	24
4.6 Kriteriji analize naprezanja u cjevovodu	25

5.	ANALIZA STRUKTURNOG INTEGRITETA CJEVOVODA.....	26
5.1	Analiza radijalnog naprezanja	26
5.2	Analiza uzdužnog naprezanja	27
5.3	Analiza ekvivalentnog naprezanja	28
5.4	Analiza slobodnog raspona	28
5.5	Analiza stabilnosti na morskom dnu	29
5.6	Analiza uzdužnog širenja na dnu.....	31
5.7	Problem krutosti čeličnog cjevovoda obloženog cementnom oblogom.....	32
5.8	Zakrivljenost morskog dna.....	34
6.	MATEMATIČKI MODEL CJEVOVODA.....	35
6.1	Numeričko rješavanje modela unutar MATLAB-a.....	42
7.	PRIMJENA MATEMATIČKOG MODELA.....	44
7.1	Utjecaj sile napinjača.....	50
7.2	Utjecaj dubine morske vode	53
7.3	Utjecaj debljine stijenke cijevi	56
8.	ZAKLJUČAK	60
	LITERATURA	61
	POPIS SLIKA	62
	POPIS TABLICA.....	64
	POPIS OZNAKA.....	65
	PRILOZI.....	68

1. UVOD

Podmorski cjevovodi imaju ključnu ulogu u prijenosu fluida, kao što su plin, nafta ili voda, preko velikih udaljenosti, često u zahtjevnim okolišnim uvjetima. Cjevovodi položeni na morsko dno predstavljaju osnovni dio transportne mreže između mnogih platformi, spremnika i obalnih rafinerija. Kako se industrije energetike i naftnih derivata nastavljaju razvijati, sve veća pažnja posvećuje se projektiranju i analizi ovih struktura kako bi se osigurala njihova sigurnost, pouzdanost i ekonomičnost. Statička strukturalna analiza instalacije podmorskog cjevovoda predstavlja važan korak u projektiranju i izgradnji tih sustava kako bi se osigurala njihova sigurnost, pouzdanost i dugotrajnost. Statička strukturalna analiza obuhvaća proučavanje naprezanja, deformacija i opterećenja kojima je cjevovod izložen, kao i procjenu performansi materijala i postupaka popravka oštećenja.

Prvi korak u statičkoj strukturalnoj analizi podmorskog cjevovoda je proučavanje različitih metoda polaganja cjevovoda na morskom dnu. Svaka metoda ima svoje prednosti, nedostatke i primjenu ovisno o dubini i uvjetima polaganja. Odabir odgovarajuće metode polaganja ključan je za osiguranje strukturnog integriteta cjevovoda. Razumijevanje različitih metoda polaganja, odabira cijevi, analize naprezanja, analize strukturnog integriteta i matematičkog modeliranja ključno je za osiguranje sigurnosti, pouzdanosti i dugotrajnosti podmorskih cjevovoda.

Odabir pravih cijevi za polaganje podmorskog cjevovoda ima veliki utjecaj na strukturalnu analizu. Različite vrste cijevi imaju različita svojstva, prednosti i ograničenja. Stoga je važno razumjeti karakteristike cijevi i odabrati prikladnu vrstu cijevi za specifičnu primjenu.

Analiza naprezanja je ključna za utvrđivanje opterećenja i sila koje djeluju na cjevovod. Metode analize naprezanja mogu biti analitičke ili numeričke, a uzimaju u obzir unutarnji tlak, vanjska opterećenja i temperaturne promjene. Precizno određivanje naprezanja ključno je za osiguranje strukturne sigurnosti cjevovoda.

Strukturni integritet podmorskog cjevovoda važan je za održavanje sigurnosti tijekom njegovog vijeka trajanja. Analiza strukturnog integriteta uključuje identifikaciju i

procjenu oštećenja cjevovoda te mjere za prevenciju i popravak oštećenja. Pravovremena identifikacija i intervencija oštećenja ključna je za osiguranje pouzdanosti i sigurnosti cjevovoda.

Matematičko modeliranje cjevovoda omogućuje precizno proračunavanje opterećenja, deformacija i naprezanja. Pravilno postavljanje granica i uvjeta za analizu ključno je za stvaranje točnog matematičkog modela. Matematičko modeliranje omogućuje simuliranje različitih scenarija i pruža važne informacije za projektiranje i analizu podmorskog cjevovoda.

1.1 Hipoteza rada

Za odabrani pojednostavljeni matematički model cjevovoda za S-lay metodu instalacije napraviti program u MATLAB-u pomoću kojeg se mogu izvesti jednostavni proračuni.

1.2 Predmet istraživanja

Pomoću pojednostavljenog matematičkog modela napraviti strukturalnu analizu i procjenu strukturnog integriteta za zadane ulazne parametre cjevovoda.

1.3 Problem istraživanja

Problem koji se javlja tokom istraživanja jest procjena strukturnog integriteta cjevovoda pomoću odabranog matematičkog modela. Na osnovu ulaznih podataka cjevovoda potrebno je procijeniti koji su najoptimalniji parametri za instalaciju (sila napinjača, dubina morske vode, debljina stijenke cijevi), a s obzirom na sile koje se javljaju u cjevovodu.

1.4 Ciljevi istraživanja

Ciljevi istraživanja ovog rada jesu:

- Prikaz odabranog matematičkog modela za strukturalnu analizu instalacije cjevovoda pomoću S-lay metode
- Izrada MATLAB programske skripte na osnovu odabranog matematičkog modela
- Uvidjeti razlike u dobivenim parametrima tokom instalacije, a na osnovu utjecaja:

- sile napinjača
- dubine morske vode
- debljine stijenke cijevi

1.5 Metodologija istraživanja

Tijekom izrade ovog rada koristit će se više različitih metoda istraživanja. Matematička metoda bit će korištena tokom prikaza odabranog matematičkog modela S-lay instalacije.

Metoda analize i komparacije koristit će se u sedmom dijelu rada koji se bavi primjenom odabranog matematičkog modela kod proučavanja utjecaja sile napinjača, dubine morske vode i debljine stijenke cijevi.

1.6 Struktura rada

Diplomski rad podijeljen je u sedam poglavlja.

U prvom dijelu rada razrađena je hipoteza rada, opisani problemi i ciljevi istraživanja te navedene metode istraživanja koje su korištene tokom izrade.

U drugom dijelu su navedene i opisane aktualne metode polaganja cjevovoda koje su zastupljene u industriji. Opisana su glavna obilježja i prednosti, odnosno nedostaci metoda za instalaciju.

U trećem dijelu rada opisuju se cijevi, odnosno materijali koji se koriste za izradu cijevi. Opisuju se karakteristike najzastupljenijih materijala za izradu te se opisuje i način spajanja čeličnih cijevi.

Četvrti dio rada bavi se metodama za provedbu analize naprezanja u cjevovodu. Navedene su glavne formule koje opisuju prikazane metode i područja primjene istih.

U petom dijelu rada navode se analize koje se provode u svrhu procjene strukturnog integriteta cjevovoda tokom instalacije, testiranja i operativnog rada, a unutar definiranih projektnih kriterija.

Prikaz odabranog matematičkog modela sustava tokom S-lay instalacije, a na osnovu postavljenih diferencijalnih jednažbi, dan je u šestom dijelu rada.

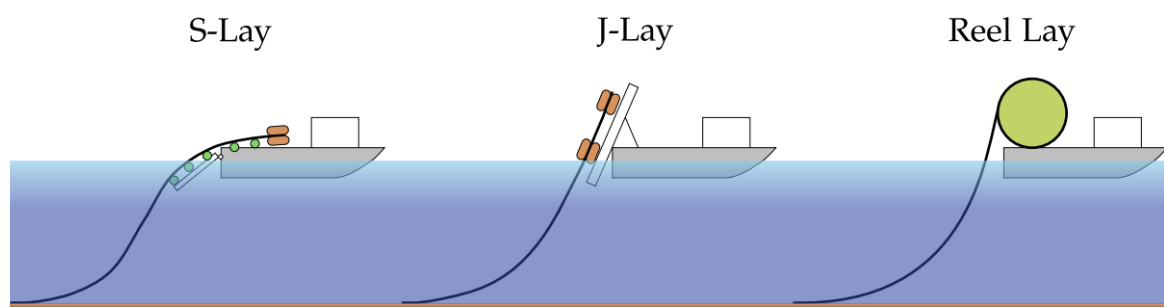
Sedmi dio rada bavi se primjenom matematičkog modela unutar programskog paketa MATLAB.

U osmom dijelu rada izveden je zaključak provedene analize.

2. METODE POLAGANJA CJEVOVODA

Polaganje cjevovoda izvode specijalizirane barže (eng. *pipelay vessel*) za polaganje, a osnovne metode jesu:

- S-lay (primjena od plitkih do dubokih voda)
- J-lay (primjena u srednje dubokim do dubokim vodama)
- Reel-lay (primjena u srednje dubokim do dubokim vodama)



Slika 2.1: Metode polaganja cjevovoda [4]

Ovisno o metodi polaganja, cjevovod je izložen različitim opterećenjima tokom instalacije. Opterećenja koja se javljaju jesu: hidrostatske sile, savijanje cijevi, sila napetosti cijevi, poprečna i aksijalna sila.

Ostale metode koje pripadaju pod metode tegljenja jesu:

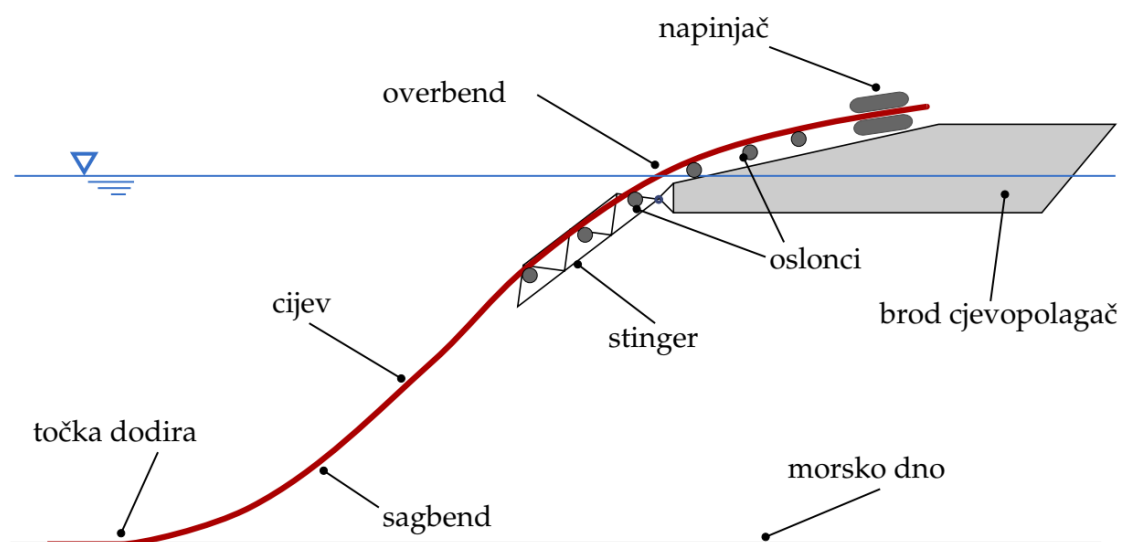
- Metoda povlačenja po dnu
- Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna
- Metoda površinskog tegljenja

Metode tegljenja mogu se primjenjivati od plitkih do dubokih voda, ovisno o zahtjevima projekta u kojima se koriste.

2.1 S-lay metoda

Metoda instalacije je dobila naziv po izgledu krivulje koju cjevovod poprima tokom instalacije (Slika 2.2). U gornjem dijelu (eng. *overbend*) zakrivljenost cjevovoda se kontrolira pomoću radijusa podupirača (eng. *stinger*) koji utječe na smanjenje naprezanja cijevi na savijanje. Za općenitu referentnu vrijednost uzima se radijus zakrivljenosti, koji mora biti takav da maksimalno naprezanje na savijanje cijevi ne premašuje vrijednost višu od 85% minimalne granice popuštanja. Izvijanje cjevovoda se sprječava pomoću nateznog valjka (eng. *tensioner*) koji osigurava odgovarajuću vlačnu silu. Natezni valjak povećava ili smanjuje silu napetosti cijevi ovisno o dubini

morskog dna, uronjenoj težini cjevovoda, dozvoljenoj zakrivljenosti cjevovoda u overbend i sagbend području i kutu polaganja. Na palubi cjevopolagača nalaze se stanice za zavarivanje, kontrolu zavarenih spojeva NDT metodama (uobičajeno ultrazvučna kontrola) i omatanje cijevi. Obloge cijevi prvenstveno imaju namjenu da služe kao antikorozivna zaštita, mehanička zaštita zavarenog spoja i kao toplinska izolacija medija koji se transportira. Cjevovod se postepeno pušta prema dnu kako se barža kontrolirano pomiče u smjeru polaganja. Mehanika pomicanja barže regulira se pomoću sidara, kojih je obično između 8 i 12 komada. Velik broj sidara osigurava da se pozicioniranje cjevopolagača može vršiti u svim smjerovima sa velikom preciznošću.



Slika 2.2: Instalacija cjevovoda S-lay metodom [4]

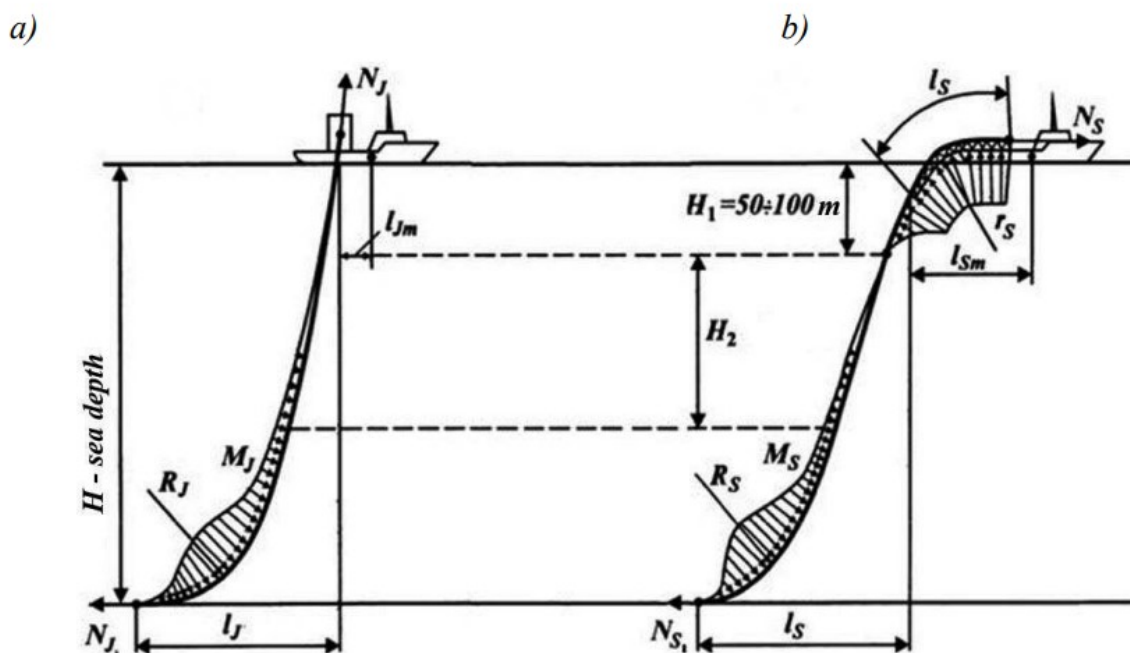
Kod instalacije, cjevovod dijelimo na dva područja, a promatrajući zakrivljenost cijevi:

- Overbend područje (konveksno savijena cijev) – ograničeno na dio cijevi od napinjača do posljednjeg nosača cjevovoda na lansirnoj liniji (eng. *firing line*) cjevopolagača
- Sagbend područje (konkavno savijena cijev) – dio cjevovoda od posljednjeg nosača na lansirnoj liniji preko podupirača pa sve do mjesta gdje cjevovod dotiče morsko dno (eng. *touch down point*)

Točka infleksije odvaja overbend od sagbend područja te se redovito nalazi neposredno nakon kraja podupirača (nakon posljednjeg oslonca na podupiraču) i u toj točki je moment savijanja jednak nuli i mijenja predznak.

2.2 J-lay metoda

Kod J-lay metode cijev gotovo vertikalno napušta baržu i krivulja cjevovoda poprima oblik slova J tokom instalacije. Primjenom navedene metode izostaje overbend dio tokom polaganja, što dovodi do manjih momenata savijanja u cijevi i uvelike pojednostavljuje problem strukturalnih ograničenja prilikom polaganja. J-lay metoda koristi zglobno vezanu rampu, koja je blago nagnuta u odnosu na vertikalnu, a na kojoj se spajaju prethodno spojeni tro ili četverosegmentni spojevi cijevi. Kako bi se postigla zadovoljavajuća brzina polaganja, moraju se koristiti napredne metode za automatsko zavarivanje segmenata. J-lay metoda je najskuplja i najsporija od ostalih osnovnih metoda polaganja, no jedina omogućava polaganje cjevovoda na ekstremnim morskim dubinama, upravo zbog svoje konfiguracije.



Slika 2.3: Dijagrami momenata savijanja kod instalacije [9]

a) J-lay metoda b) S-lay metoda

2.3 Reel-lay metoda

Ova metoda je primjenjiva za cjevovode manjih promjera kao što su pomoćni cjevovodi, kablovi ili fleksibilne cijevi. Kako se cijev namata na bubanj, tako je izložena plastičnoj deformaciji, te je iz tog razloga ova metoda pogodna za cijevi nazivnih promjera do 0,4m. Moguće je polagati i cijevi većih promjera, no one su zbog svoje geometrije kruće i sklonije izvijanju poprečnog presjeka. Ograničavajući faktor veličine promjera cijevi utječe na to da se na cjevovode koji se polažu ovom metodom ne mogu koristiti betonski omotači koji služe za neutraliziranje sile uzgona cjevovoda i zaštite od mehaničkih oštećenja. Metoda se izvodi na način da se cijev odmata s bubnja koji se nalazi na brodu cjevopolagaču i spušta polagano u more. Na bubnju se nalazi obložena cijev koja je već prethodno spojena na obali. Iz tog razloga se brod za polaganje mora svaki put vraćati u luku po novi namotaj cjevovoda. Cjevopolagači koji izvode polaganje reel-lay metodom mogu se dijeliti na dvije vrste:

- sa horizontalnim bubnjem (polažu se cijevi u konfiguraciji S-lay polaganja) – primjena od plitkih do srednje dubokih voda
- sa vertikalnim bubnjem (polažu se cijevi u konfiguraciji J-lay polaganja) – primjena od plitkih do dubokih voda



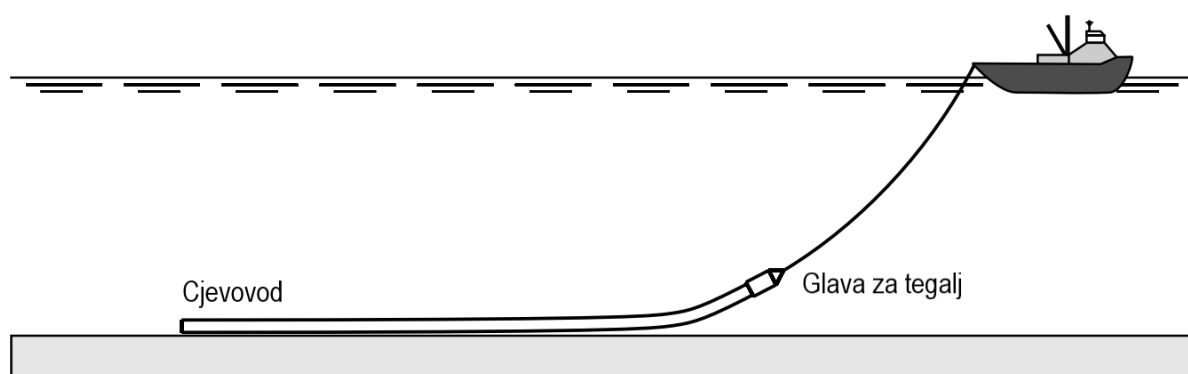
Slika 2.4: Prikaz barže za reel-lay instalaciju [14]

2.4 Metoda povlačenja po dnu

Metoda povlačenja po dnu razvijena je za polaganje cjevovoda u priobalnom području. Nužno je u projektnoj fazi detaljno isplanirati trasu povlačenja kako bi se izbjegla oštećenja tokom instalacije. Obloga mora biti otporna na abrazivno trošenje i tipično se koriste betonske obloge na cijevima.

Na čelo cjevovoda se zavaruje oprema na koju se pričvršćuje čelična sajla koju povlači plovilo ili vitlo sa suprotne strane obale. Na početak segmenta instalira se plovak koji služi za signalizaciju položaja vrha cijevi. Ovisno o čvrstoći cjevovoda, trenju podloge, vučnoj sili vitla i utjecaja zone valova, duljina povlačenja može dostići više tisuća metara. Vučna vitla za instalaciju moraju imati veliku vučnu silu (do 1300 kN).

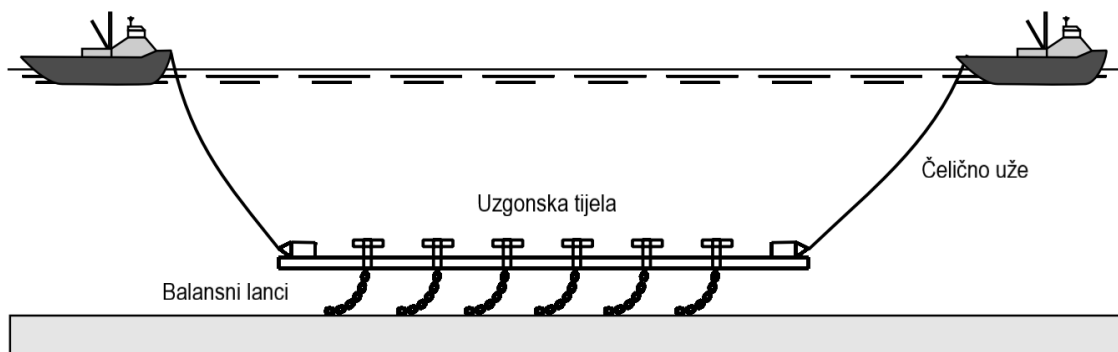
Koeficijenti trenja koji se javljaju tokom povlačenja između dna i cijevi iznose od 0,4 do 0,5 za vrijeme instalacije te od 0,6 do 0,8 na početku instalacije. Kako bi se održala lateralna stabilnost u proračunu se osigurava da cijev ima malen negativni uzgon. Negativan uzgon uzrokuje rast otpora trenja sa duljinom, a što predstavlja limitirajući faktor.



Slika 2.5: Metoda povlačenja po dnu [3]

2.5 Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna

Metoda se zasniva na približnoj neutralnoj ravnoteži gravitacijskih i uzgonskih sila koje djeluju na cjevovod, odnosno na malom pozitivnom uzgonu cjevovoda.



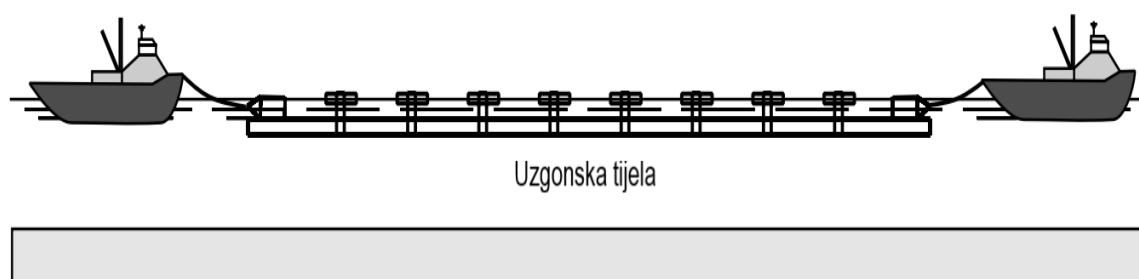
Slika 2.6: Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna [3]

Uronjeni lanac koji služi kao balastno tijelo, sastoji se od kratkih segmenata koji su ovješeni na odgovarajućim intervalima o cjevovod i čine negativni uzgon konstrukcije, a dio lanca je položen na morsko dno. Na ovaj način lanac automatski kontrolira uronjenu težinu sustava lanca i cijevi, pri tome povećavajući gravitacijsko opterećenje konstrukcije samo u slučaju pokušaja izranjanja, tj. vertikalnog pomaka cijevi od morskog dna. Ukoliko cijev potone, smanjuje se dio težine ovješeno lanca te se uspostavlja ravnoteža gravitacijskog i uzgonskog opterećenja.

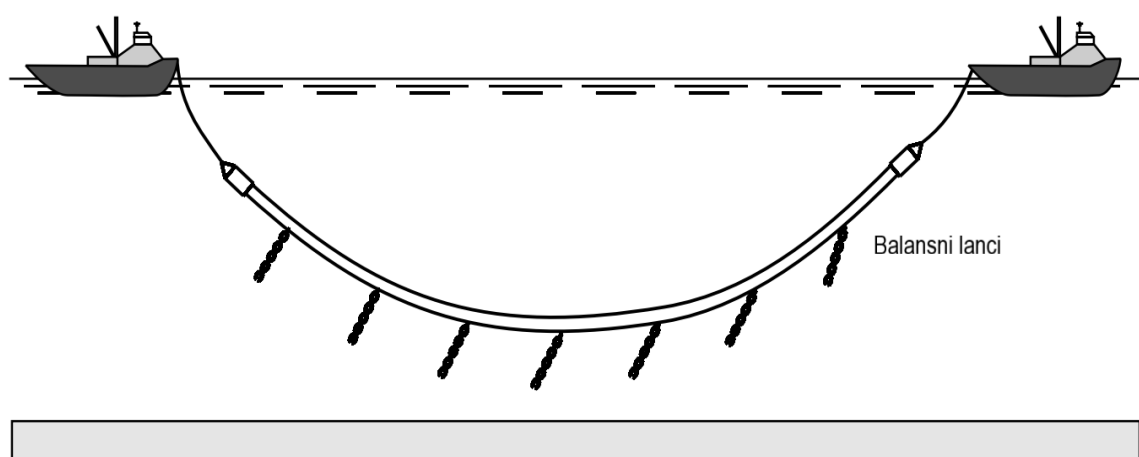
Sila trenja se javlja između repova lanaca i morskog dna i određena je njihovom uronjenom težinom. Duljina lanca se mijenja prema promjeni dubine morskog dna na trasi polaganja i savitljivosti cjevovoda pod opterećenjem (razlika gravitacijskog i uzgonskog opterećenja). Tokom polaganja cjevovod nema dodira s morskim dnom što dovodi do smanjenja horizontalne sile povlačenja i smanjenja rizika oštećenja cementne obloge o hrapavo morsko dno.

2.6 Metoda površinskog tegljenja

Metoda površinskog tegljenja se izvodi u dvije varijante. U jednoj metodi se cijev povlači po površini vode, dok se u drugoj metodi cijev održava na zadanoj dubini.



Slika 2.7: Metoda povlačenja cjevovoda po površini [3]



Slika 2.8: Metoda povlačenja cjevovoda ispod površine [3]

Glavni nedostatak prve metode jest osjetljivost na utjecaj morskih valova, a iz razloga što se cijev pri valovitom moru jako opterećuje što može dovesti do otpadanja cementnih ili drugih obloga koje se nalaze na cijevi. Iz tog razloga ova metoda je primjenjiva za plitke vode ili kod odgovarajuće povoljnih vremenskih uvjeta.

Najsloženija metoda tegljenja je povlačenje cjevovoda ispod površine morske vode iz razloga što zahtijeva da cjevovod ima nezatno negativan uzgon i što se dubina tegljenja regulira brzinom tegljača. Razvijena je kako bi se izbjegli nedostaci metode povlačenja po samoj površini. Cijev povlačimo na dubini od oko 5 metara kako bi se izbjegao utjecaj morskih valova. Utjecaj vjetra nije umanjen zbog plutača kojima se

vršci nalaze tik iznad površine. Plutače su konstruirane s ciljem smanjenja presjeka vodne linije.

Period poniranja recipročan je presjeku vodne linije, kako slijedi:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{A_{VL} \cdot g \cdot \rho}} \quad (2.1)$$

gdje je:

T – period poniranja

m – masa sustava

A_{VL} – presjek vodne linije

g – gravitacijsko ubrzanje

ρ – gustoća mora

Poznata je i relacija za ubrzanje iz izraza:

$$a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 X \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2.2)$$

gdje je:

T – period poniranja

X – amplituda poniranja

a – ubrzanje

t - vrijeme

Iz navedenih izraza moguće je zaključiti da što više povećamo period poniranja, to će ubrzanje, a time i inercijske sile biti manje što rezultira manjim naprezanjima u sustavu.

3. CIJEVI ZA PODMORSKE CJEVOVODE

U ovom poglavlju dan je prikaz različitih materijala koji se koriste u konstrukciji podmorskih cjevovoda. Materijal cijevi ima ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti, trajnosti i pouzdanosti cjevovoda u zahtjevnim uvjetima podmorske okoline. Svrha ovog poglavlja je pružiti sveobuhvatan uvid u karakteristike i primjenu različitih materijala cijevi kako bi se olakšao odabir najprikladnijeg materijala za instalaciju podmorskog cjevovoda. Kod odabira materijala nužno je uzeti u obzir okolinu, uvjete rada te vrstu instalacije. Prilikom odabira materijala je navedena svojstva potrebno uzeti u obzir:

- Mehanička svojstva
- Svojstva fluida i njihova radna temperatura
- Korozivna svojstva
- Utjecaj okoline i opterećenja
- Instalacijske metode i procedure
- Težina
- Zavarljivost
- Otpornost na lom
- Zamor materijala

Najčešće korišteni materijali za podmorske cjevovode jesu:

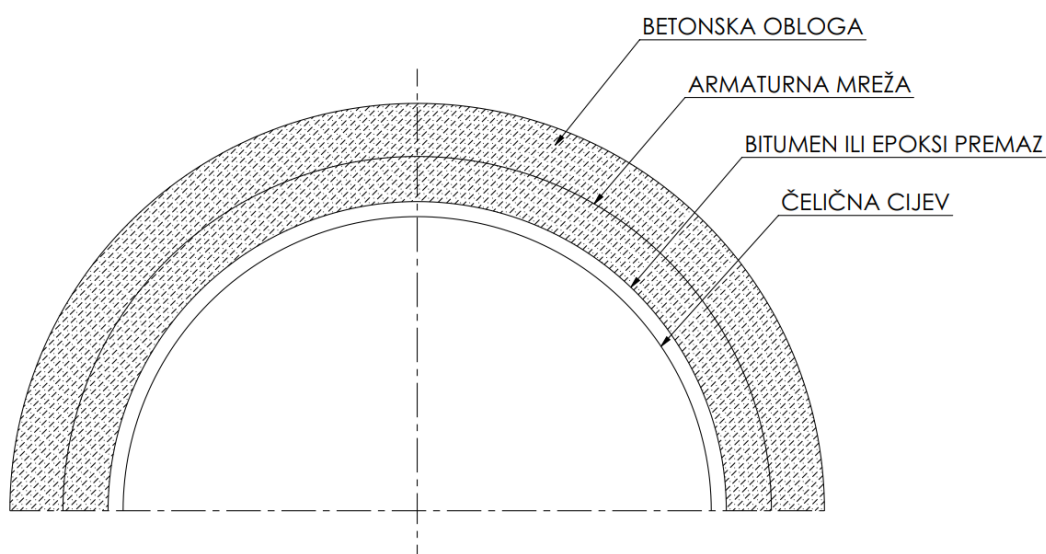
- Čelik (i njegove legure)
- Polietilen
- Stakloplastika
- Beton
- Kompozitni materijali

3.1 Čelične cijevi

Čelik je najrašireniji materijal koji se koristi u izradi cjevovoda. Obično se koriste cijevi promjera od 75 mm do 1800 mm. Čelik koji se koristi za prijenos ugljikovodika obično ima visoku vlačnu čvrstoću (od 350 do 500 MPa) i odabire se zbog svoje lakoće zavarivanja. Većina cjevovoda ima puni zavar (do unutarnje stjenke), a tlakovi se obično kreću oko 10 MPa, pri čemu je bilo kakvo propuštanje nafte ili plina neprihvatljivo. Budući da se cijevi obično polažu prazne, izložene su velikim tlakovima i kombiniranim opterećenjima koja mogu izazvati savijanje. Stoga se prilikom proračuna polaganja uzima u obzir uzdužna sila i tolerancije cijevi (ekscentricitet i debljina stjenke).

Postoje međunarodni standardi (norme) koji definiraju svojstva čeličnih cijevi za primjenu u izvedbi cjevovoda. Najčešće su u uporabi američki standard API 5 L, njemačka norme DIN 17 172, norma DnV-OS-F101 i u zadnje vrijeme EN 10208. U tablici 3.1 prikazana su mehanička svojstva čeličnih cijevi prema ISO 3183-3.

Da bi se zaštitila od vanjske korozije, cijevi se obično premazuju bitumenom ili epoksidnom smolom, a koriste se i cink-protektori i anode. Unutarnja strana cijevi može biti nezaštićena ako se koristi za prijenos plina, dok se za prijenos vode ili korozivnih tvari može koristiti premaz od epoksidne smole, poliuretanske smole, polietilena ili cementa.



Slika 3.1: Tipičan poprečni presjek obložene cijevi

Vanjski omotač cijevi može biti zaštićen od abrazije pomoću betonskog ili stakloplastičnog obložnog materijala. Cijevi koje se moraju prazniti tijekom radnog vijeka ili prenose plinove trebaju imati negativan uzgon, što je još jedna svrha cementnog obloge. Međutim, u praksi se pokazalo da cementna obloga može erodirati i stvoriti pozitivan uzgon na određenim dijelovima cijevi, što rezultira izdizanjem cijevi iznad dna. Erozijska cementna obloga može se spriječiti odabirom prikladne armaturne mreže.

Steel grade	Pipe body of SMLS and welded pipes						Weld seam of HFW, SAW and COW pipes
	Yield strength $R_{t0,5}$ MPa (psi)		Tensile strength R_m MPa (psi)		Ratio $R_{t0,5}/R_m$	Elongatio- n ^a A_F %	Tensile strength R_m MPa (psi)
	min	max	min	max	max	min	min
L245NE or BNE	245 (35 500)	440 (63 800)	415 (60 200)	655 (95 000)	0,80	22	415 (60 200)
L245ME or BME	245 (35 500)	440 (63 800)	415 (60 200)	655 (95 000)	0,85	22	415 (60 200)
L290NE or X42NE L290ME or X42ME	290 (42 100)	440 (63 800)	415 (60 200)	655 (95 000)	0,85	21	415 (60 200)
L360NE or X52NE L360ME or X52ME	360 (52 200)	510 (74 000)	460 (66 700)	760 (110 200)	0,85	20	460 (66 700)
L360QE or X52QE	360 (52 200)	510 (74 000)	460 (66 700)	760 (110 200)	0,88	20	460 (66 700)
L415NE or X60NE L415ME or X60ME	415 (60 200)	565 (81 900)	520 (75 400)	760 (110 200)	0,85	18	520 (75 400)
L415QE or X60QE	415 (60 200)	565 (81 900)	520 (75 400)	760 (110 200)	0,88	18	520 (75 400)
L450QE or X65QE	450 (65 300)	570 (82 700)	535 (77 600)	760 (110 200)	0,90	18	535 (77 600)
L450ME or X65ME	450 (65 300)	570 (82 700)	535 (77 600)	760 (110 200)	0,87	18	535 (77 600)
L485QE or X70QE L485ME or X70ME	485 (70 300)	605 (92 100)	570 (82 700)	760 (110 200)	0,90	18	570 (82 700)
L555QE or X80QE L555ME or X80ME	555 (79 800)	675 (97 900)	625 (90 600)	825 (110 200)	0,90	18	625 (90 600)

^a These values apply to transverse test pieces taken from the pipe body. When longitudinal test pieces are tested [see API Spec 5L, 46th edition (2018), Table 20], the values of elongation shall be 2 units higher.

Tablica 3.1: Zahtijevana mehanička svojstva čeličnih cijevi prema ISO 3183-3

3.2 Polietilenske cijevi

Za izradu visoko fleksibilnih cijevi otpornih na kemijske medije s malim koeficijentom trenja koristi se polietilen. Polietilen ima manju gustoću od morske vode, stoga se pri postavljanju cijevi moraju koristiti balasti. Budući da su balasti teški, posebno na određenim intervalima, cijevi su pod stalno velikim naprežanjem na tim područjima, stoga se moraju dodatno ojačati. Pri spuštanju cijevi (s velikim iznosima balasta), dolazi do postupnog savijanja, ali cijev zadržava svoj kružni presjek, pa na kraju polaganja nema trajnih deformacija. Važno je izbjeći koncentraciju naprežanja kod polietilenskih cijevi, jer visoka stalna naprežanja mogu dovesti do zamora materijala.

Još jedna prednost polietilenskih cijevi je da ne reagiraju s željeznim ionima (za razliku od čeličnih cijevi), što ih čini prikladnima za upotrebu u akvakulturnim aktivnostima.

Dodatno, kod odabira materijala za podmorske cjevovode, važno je uzeti u obzir i dugoročnu održivost. Održivi materijali koji se mogu reciklirati ili imaju minimalan negativni utjecaj na okoliš sve više se koriste u konstrukciji podmorskih cjevovoda. Primjena tih materijala ne samo da smanjuje ekološki otisak, već također pridonosi očuvanju morskog ekosustava i dugoročnoj zaštiti okoliša.

3.3 Stakloplastične cijevi

Uobičajena primjena ovih cijevi je za ispuštanje kanalizacije, a promjeri se kreću do 2 metra. Ove cijevi se mogu koristiti pri različitim radnim temperaturama, od -30 °C do 150 °C, te mogu izdržati tlakove do 3000 bara. Također imaju izvrsnu otpornost na razne kemijske tvari i korozivne tvari poput otapala, sumporovodika i soli. Međutim, njihovo polaganje može biti izazovno jer zbog male gustoće cijevi zahtijevaju balastiranje. Kao i kod polietilenskih cijevi, ključno je pažljivo projektirati podloške za balaste kako bi se izbjegla prekomjerna lokalna naprežanja.

3.4 Spajanje čeličnih cijevi

Cijevi se povezuju u cjevovod putem zavarivanja po opsegu. Zavarivanje se može izvršiti na obali, na brodu za polaganje cjevovoda ili na morskom dnu uz upotrebu hiperbarične komore. Kako bi se unutarinja strana cijevi zaštitila od korozije, koristi se termoplastična folija koja se može montirati na dva načina. Prva metoda uključuje

korištenje folije nešto veće od unutarnjeg promjera cijevi koja se umetne u cijev nakon smanjenja promjera. Nakon rasterećenja, folija se širi i priljubljuje uz stijenku cijevi. Druga metoda uključuje foliju nešto manjeg promjera od unutarnjeg promjera cijevi koja se lako uvuče u cijev, a zatim se širi pomoću vruće vode pod tlakom. Ova metoda se primjenjuje kod cjevovoda duljine do 1000 metara. Za dodatnu antikorozivnu zaštitu, cementna pasta se može ubrizgati između termoplastične folije i stijenke cijevi.

Za opsežno zavarivanje cijevi, potrebno je pripremiti krajeve cijevi kako bi zavarivanje bilo učinkovito i brzo. To se obično radi na obali, gdje se pripremljene cijevi spajaju, iako je to također dio postupka instalacije na brodu za polaganje.

Najpouzdanije metode zavarivanja podmorskih cijevi uključuju:

- Zavarivanje pod troskom (SAW - submerged arc welding)
- Elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (SMAW - shielded metal arc welding)
- MIG - elektrolučno zavarivanje tankom žicom u zaštiti inertnim plinom (GMAW - gas metal arc welding)

Nakon zavarivanja, važno je provesti kontrolu zavara koja obično uključuje rendgensko snimanje zavara, ultrazvučno ispitivanje i nerazorna ispitivanja bojanjem zavara kako bi se otkrile eventualne mikropukotine. Kontrola zavara ključna je za osiguravanje kvalitete i integriteta zavarenih spojeva.

4. METODE ZA PROVEDBU ANALIZE NAPREZANJA CJEVOVODA

Tokom instalacije cjevovoda, cijev je savijena u oblik krivulje pod utjecajem vlastite težine, što uzrokuje naprezanja u cijevi. Zakrivljenost cijevi, a kao što je prethodno spomenuto u radu, dijeli se na dva područja: overbend i sagbend područje. Područje overbenda generalno se proteže od podupirača na palubi cjevopolagača, preko rampe do posljednje točke na podupiraču gdje se cijev odvaja i gdje nema nikakav oslonac. Područje sagbenda kreće od točke infleksije zakrivljenosti cjevovoda pa sve do točke dodira sa morskim dnom. Zakrivljenost cijevi u overbend području se kontrolira odgovarajućim pozicioniranjem oslonaca na rampi cjevopolagača i radijusom zakrivljenosti podupirača. Općenito, radijus zakrivljenosti u navedenom području se odabire tako da maksimalni moment savijanja u cijevi ne prelazi vrijednost od 85% iznosa minimalne granice popuštanja cijevi (eng. *Specified minimum yield strength, SMYS*). Deformacija uslijed savijanja je data izrazom:

$$\varepsilon = \frac{D}{2R} \quad (4.1)$$

gdje je:

D – vanjski promjer cijevi

R – radijus zakrivljenosti u overbend području

Odgovarajuće aksijalno naprezanje uslijed savijanja dano je izrazom:

$$\sigma = \frac{ED}{2R} \quad (4.2)$$

gdje je:

E – modul elastičnosti

Stoga, minimalni radijus zakrivljenosti u overbend području može se dobiti pomoću izraza:

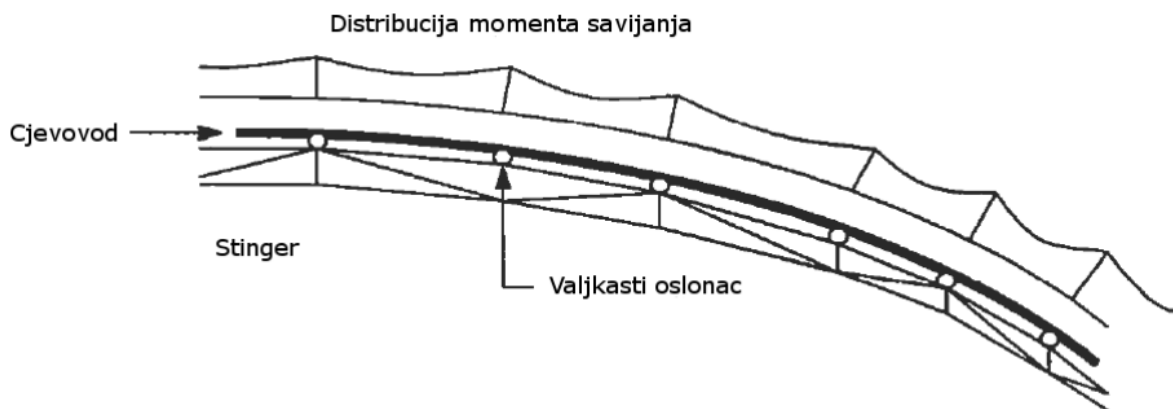
$$R = \frac{ED}{2\sigma_0\gamma_{DF}} \quad (4.3)$$

gdje je:

σ_0 – minimalna granica popuštanja cijevi (SMYS)

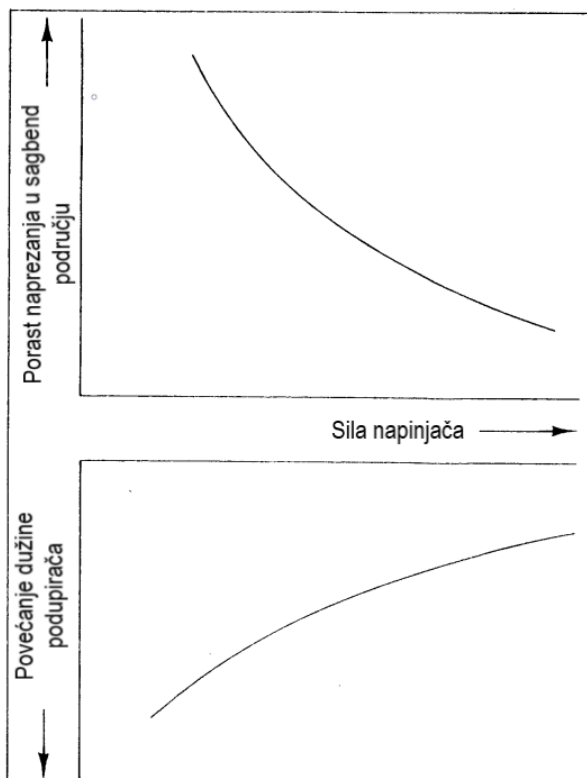
γ_{DF} – faktor sigurnosti (uobičajeno iznosi 0.85)

Gornji izraz podrazumijeva da je radijus zakrivljenosti jednolik na osloncima na brodu i podupiraču, dok u stvarnosti se cijev više savija preko oslonaca nego između njih te se naprezanje u overbend području povećava na osloncima, a smanjuje između njih.



Slika 4.1: Distribucija momenata savijanja [1]

Analiza naprezanja u sagbend području se provodi prvenstveno kako bi se odredila potrebna sila napinjača i dužina podupirača. Općenito gledajući, što je veća sila napinjača to je potrebna manja duljina podupirača. Varijacija odnosa sile napinjača i potrebne dužine podupirača je prikazana niže (Slika 4.2).



Slika 4.2: Tipična varijacija odnosa sile napinjača i dužine podupirača [1]

Postoje nekoliko metoda za analizu napreznja u sagbend području tokom instalacije cjevovoda, kao što su [1]:

- Metoda linearne grede
- Nelinearna metoda
- Metoda lančanice
- Metoda ukrućene lančanice
- Metoda konačnih elemenata

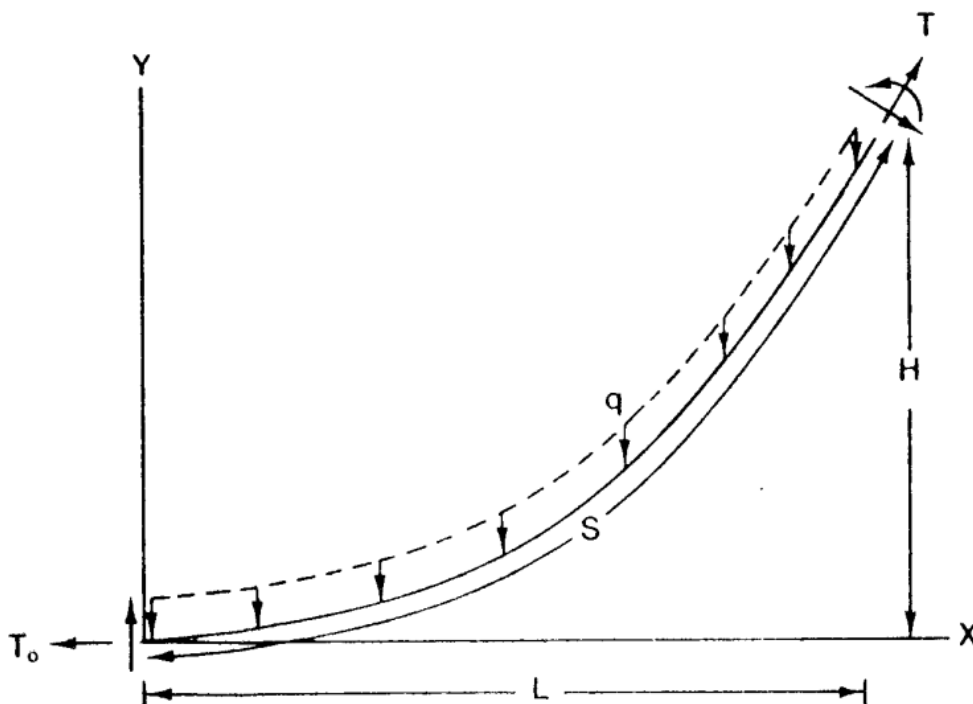
Kratka usporedba spomenutih metoda sa svojim karakteristikama je dana u tablici 3.1.

Metoda	Primjena	Rubni uvjeti	Mogućnost primjene
Metoda linearne grede	Plitke vode	Zadovoljeni	Mali progibi
Nelinearna metoda	Sve dubine	Zadovoljeni	Općenito
Metoda lančanice	Duboke vode	Nisu zadovoljeni	Područja cjevovoda udaljena od krajeva (područja male krutosti cijevi)
Metoda ukrućene lančanice	Duboke vode	Zadovoljeni	Mala krutost
Metoda konačnih elemenata	Sve dubine	Zadovoljeni	Općenito

Tablica 4.1: Usporedba metoda za analizu napreznja u cjevovodu

4.1 Metoda linearne grede

U ovoj metodi, uzima se položena savijena cijev u sagbend području kao segment linearne grede (Slika 4.3).



Slika 4.3 Dijagram slobodnih tijela (eng. FBD) [1]

U ovoj metodi za pretpostavku se uzimaju mali progibi:

$$\frac{dy}{dx} \ll 1 \quad (4.4)$$

Jednadžba savijanja poprima sljedeći oblik [1]:

$$-q = EI \frac{d^4 y}{dx^4} - T_0 \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4.5)$$

gdje je:

q – uronjena težina cijevi po jedinici duljine

EI – krutosti cijevi na savijanje

T_0 – efektivna sila napinjača na kraju cijevi

Rubni uvjeti glase:

$$y(0) = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{dy}{dx}(0) = \theta \text{ (nagib morskog dna)} \quad (4.7)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2}(0) = 0 \quad (4.8)$$

$$y(L) = H \quad (4.9)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2}(L) = M \text{ (} M=0 \text{ u točki infleksije)} \quad (4.10)$$

$$T = T_0 + qH \quad (4.11)$$

gdje je:

T – sila napinjača

H – dubina morskog dna

Metoda linearne grede je primjenjiva za male progibe, kao što je to slučaj u plitkim vodama.

4.2 Nelinearna metoda grede

Ova metoda koristi nelinearnu jednadžbu savijanja grede kako bi opisala savijanje cijevi u promatranom rasponu, a pod utjecajem vlastite težine. Metoda je primjenjiva u plitkim i dubokim vodama kao i za velike progibe. Nelinearna diferencijalna jednadžba koja ju opisuje glasi [1]:

$$-q = EI \frac{d}{ds} \left(\sec \theta \frac{d^2 \theta}{ds^2} \right) - T_0 \sec^2 \theta \frac{d\theta}{ds} \quad (4.12)$$

gdje je:

s – lučna duljina polegnute cijevi

θ – kut između tangente na krivulju s i osi x

$$\sin \theta = \frac{dy}{ds} \quad (4.13)$$

Budući da rubni uvjeti uključuju pomake na oba kraja cijevi, gornja diferencijalna jednadžba (4.12) može se izraziti u ovisnosti o y , umjesto upotrebljenog kuta θ . Zamjenom varijable θ sa varijablom y u jednadžbi 4.12 dolazimo do složenijeg izraza diferencijalne jednadžbe. Za rješavanje takve jednadžbe potrebno je definirati četiri rubna uvjeta i uvesti dodatnu jednadžbu za rješavanje polegnute dužine cijevi, pošto ona nije početno zadana i nepoznata je varijabla. Metoda konačnih razlika se upotrebljava kako bi se dobila zadovoljavajuća rješenja spomenute jednadžbe. Ova metoda je primjenjiva u plitkim i dubokim vodama i daje točne rezultate i za male i za velike progibe.

4.3 Metoda lančanice

Ova metoda je klasični primjer nelinearnog rješenja statičkog progiba savitljivog kabela pod utjecajem vlastite težine (Slika 4.4). Kablovi, teoretski imaju izuzetno malenu fleksijsku krutost te se za pretpostavku uzima da posjeduju samo geometrijsku krutost (fleksijska krutost se u tom slučaju ignorira). Uz spomenuto, metoda donosi dobru aproksimaciju izgleda savinute cijevi u području sagbenda kada je aksijalna napetost uvelike veća od fleksijske krutosti. Metoda lančanice ima nekoliko prednosti [5]:

- predstavlja dobru odredišnu točku za složenije metode rješavanja
- konceptualno je jednostavna metoda za rješavanje
- rješenje se može izraziti pomoću jednostavne formule

$$y(x) = \frac{T_0}{q} \left[\cosh \left(\frac{xq}{T_0} \right) \right] - 1 \quad (4.14)$$

gdje je:

x – horizontalna udaljenost od dodirne točke

y – visina iznad morskog dna

T_0 – horizontalna sila pri morskome dnu

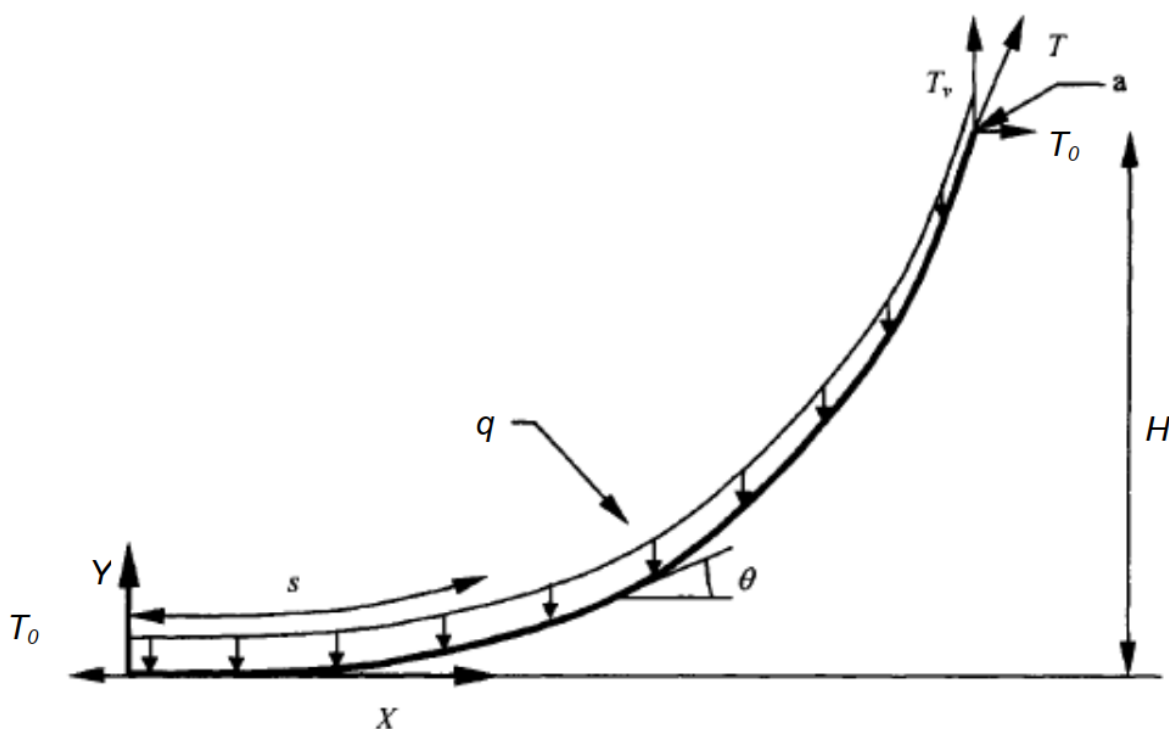
q – težina uronjene cijevi po jedinici duljine

- rješenja su točna za raspon između krajnjih točaka polegnute cijevi (udaljeno od podupirača i točke dodira sa morskim dnom)

Glavni nedostaci ove metode jesu:

- netočna je za područja raspona blizu točke dodira i podupirača
- ne uzima u obzir utjecaje dinamičkih sila
- moment savijanja je diskontinuiran u točki dodira sa morskim dnom

Ova metoda je primjenjiva za cjevovode u dubokim vodama ili gdje je sila napinjača izuzetno velika u takvoj mjeri da je dominantna u odnosu na krutost.



Slika 4.4: Metoda lančanice [5]

4.4 Metoda krute lančanice

Metoda se razlikuje od spomenute metoda lančanice, u toj mjeri što su rubni uvjeti kod metode krute lančanice zadovoljeni. Diferencijalna jednadžba nelinearne grede se rješava asimptotski uz pretpostavku da je bezdimenzijski član (α^2) vrlo malen [1]:

$$\alpha^2 = \frac{EI}{qS^3} \ll 1 \quad (4.15)$$

Gdje je u gornjem izrazu varijabla S duljina raspona cijevi (karakteristična duljina). Ova metoda daje zadovoljavajuće rezultate i na krajevima cijevi te je primjenjiva u dubokim vodama ili gdje je krutost cijevi mala.

4.5 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je pristup gdje fizikalni sustav, kao što je u ovom slučaju cjevovod, diskretiziramo na odgovarajući broj podkontinuumata ili konačnih elemenata (eng. *finite elements*). Konačni elementi su međusobno povezani pomoću jednog ili više čvorova (eng. *nodes*) u mrežu (eng. *mesh*) konačnih elemenata. Primjenom određenih aproksimacija dovode se u vezu pomaci (sile) u polju konačnog elementa s pomacima (silama) u čvorovima konačnog elementa. Pomoću interpolacijskih funkcija pomaci u polju konačnog elementa izražavaju se preko čvornih pomaka. U formulaciji konačnih elemenata, a koristeći princip virtualnog rada zajedno sa odgovarajućom interpolacijskom funkcijom, dolazimo do transformacija diferencijalnih jednadžbi ravnoteže sustava u algebarske jednadžbe. Kao što je slučaj i kod metode nelinearne grede, metoda konačnih elemenata je primjenjiva za sve dubine i za velike i male progibe. Jednadžbe savijanja izvedene su za svaki element cijevi, a rubni uvjeti između elemenata su usklađeni. Sustav jednadžbi je razvijen u matričnom obliku i riješen pomoću matričnih metoda. Ukoliko se prikladno odaberu duljine elemenata cijevi, progibi svakog elementa zadržavaju se u okvirima, a s obzirom na lokalni koordinatni sustav. Ovo omogućuje da se koristi linearni oblik diferencijalne jednadžbe savijanja za svaki element cijevi, a kao što je to opisano u poglavlju metode linearne grede. Modelirana cijev je na ovaj način izložena tlaku, longitudinalnim silama i savijanju u svrhu postizanje deformiranog oblika cijevi blizu kritične točke. Na ovaj način uvodimo u sustav geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Upravo iz razloga što imamo dvostruku nelinearnost u sustavu, metoda konačnih elemenata je superiorna u odnosu na analitičke metode za procjenu strukturnog integriteta cjevovoda.

4.6 Kriteriji analize naprezanja u cjevovodu

Kriteriji analize naprezanja u cjevovodu propisani su međunarodnim industrijskim normama te se mogu razlikovati od projekta do projekta. Međunarodne norme jesu sljedeće:

- DNV-ST-F101 – Submarine Pipeline Systems - 2021
- British Standard – BS8010 Part 3 – Pipelines subsea
- ASME B31.8 – Gas Transmission and Distribution Piping Systems - 2022
- ASME B31.4 – Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries - 2022
- Statoil Specification F-SD-101

Zahtjevi kod instalacije u industrijskim standardima mogu biti vezani za iznos zakrivljenosti cjevovoda u overbend i sagbend području. Tipičan kod, a koji daje smjernice za spomenutu zakrivljenost, je Statoil Specification F-SD-101 u kojem za ugljični čelik, zahtjevi glase:

- zakrivljenost 0.20% u overbend području
- zakrivljenost 0.15% u sagbend području

Kako bi se generalno povećala sigurnost kod projektiranja uzima se smjernica omjera granice elastičnosti naprema vlačnoj čvrstoći materijala cijevi (DnV Rules for Submarine Pipeline Systems, točka 5.2.6.2), a za koju se uzima omjer koji minimalno treba iznositi 0.85.

5. ANALIZA STRUKTURNOG INTEGRITETA CJEVOVODA

Analiza čvrstoće cjevovoda se provodi kako bi se verificiralo jesu li naprezanja koja se javljaju tokom instalacije, testiranja i operativnog rada, unutar definiranih kriterija, a prema industrijskim standardima ili zahtjevima klijenta. Postupak analize naprezanja sastoji se od niza analiza [7]:

- analiza radijalnog naprezanja
- analiza uzdužnog naprezanja
- analiza ekvivalentnog naprezanja
- analiza slobodnog raspona
- analiza stabilnosti na morskome dnu
- analiza uzdužnog širenja na dnu
- analiza problema krutosti čeličnog cjevovoda obloženog cementnom oblogom
- analiza zakrivljenosti morskog dna

5.1 Analiza radijalnog naprezanja

Radialno naprezanje u cijevi određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D - t}{2t} \quad (5.1)$$

gdje je:

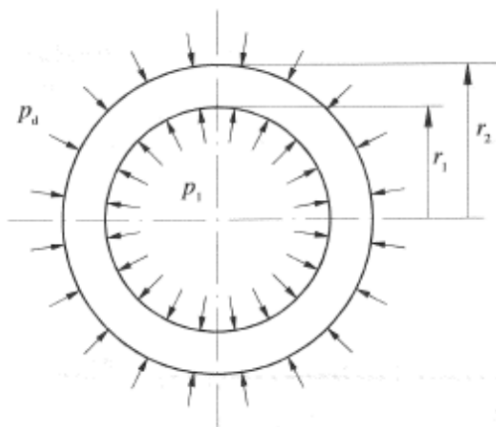
p_i – unutrašnji tlak

p_e – vanjski tlak

D – vanjski promjer cijevi

t – minimalna debljina stijenke

Ovisno o projektnim zahtjevima i upotrebe određenog industrijskog standarda, radialno naprezanje ne smije iznositi više od određenog postotka minimalne granice popuštanja materijala cijevi (SMYS).



Slika 5.1: Radialno opterećenje cijevi

5.2 Analiza uzdužnog naprezanja

Uzdužno naprezanje nastaje kao posljedica sljedećih utjecaja:

- radijalnog naprezanja
- naprezanja uslijed savijanja
- termičkih naprezanja
- naprezanja uzrokovano završetkom cijevi

Normalno uzdužno naprezanje dobiva se pomoću sljedećeg izraza:

$$\sigma_l = 0,3\sigma_h + \sigma_b + \sigma_t + \sigma_{ec} \quad (5.2)$$

gdje je:

σ_l – normalno uzdužno naprezanje

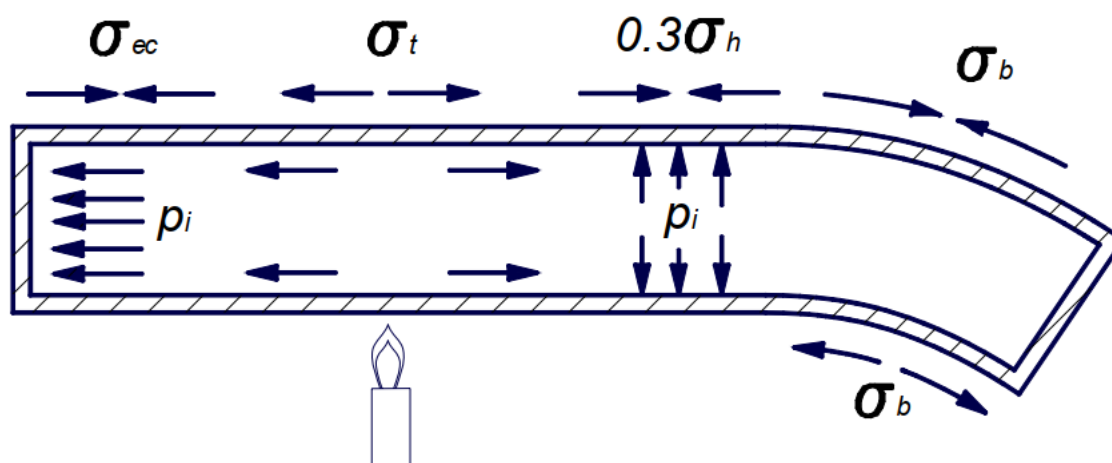
σ_h – normalno radijalno naprezanje

σ_b – normalno savojno naprezanje

σ_t – termičko naprezanje

σ_{ec} – normalno naprezanje uslijed utjecaja završetka cijevi

Nužno je obratiti pozornost da je predznak vlačnog naprezanja u ovom izrazu pozitivan.



Slika 5.2: Utjecaji na normalna uzdužna naprezanja [7]

5.3 Analiza ekvivalentnog naprezanja

Izraz za ekvivalentno naprezanje se razlikuje ovisno o upotrebi određenog industrijskog standarda/norme u projektu, no može se koristiti sljedeći izraz:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2 - \sigma_h \sigma_l + \tau_{lh}^2} \quad (5.3)$$

gdje je:

σ_e – normalno ekvivalentno naprezanje

σ_h – normalno radijalno naprezanje

σ_l – normalno uzdužno naprezanje

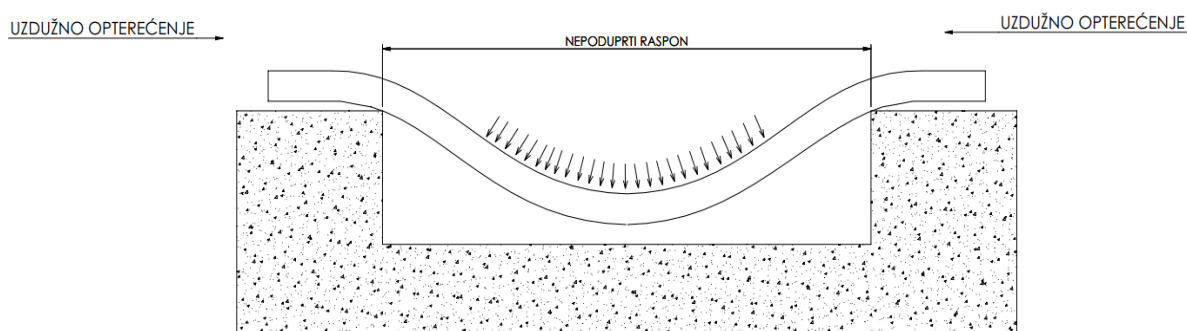
τ_{lh} – tangencijalno smično naprezanje

5.4 Analiza slobodnog raspona

Uslijed polaganja cijevi na morsko dno, a ako je tlo neravno i grubo, moguća je pojava nepoduprtog raspona cjevovoda, a zbog gubitka kontakta između cjevovoda i morskog dna. U tim okolnostima, cjevovod se ispituje na sljedeće efekte:

- puzanje materijala
- zamor materijala
- ljudski utjecaj (sidrenje)

Ukoliko dužina pravog (in situ) nepoduprtog raspona prelazi dozvoljene limite, potrebno je izvršiti određene korekcije kako bi se izbjegla strukturalna oštećenja na cjevovodu. Nužno je tokom izrade projekta izvršiti što je moguće točnije analizu nepoduprtog raspona, pošto su instalacijski radovi za korekciju istih skupi.



Slika 5.3: Nepoduprti raspon cijevi

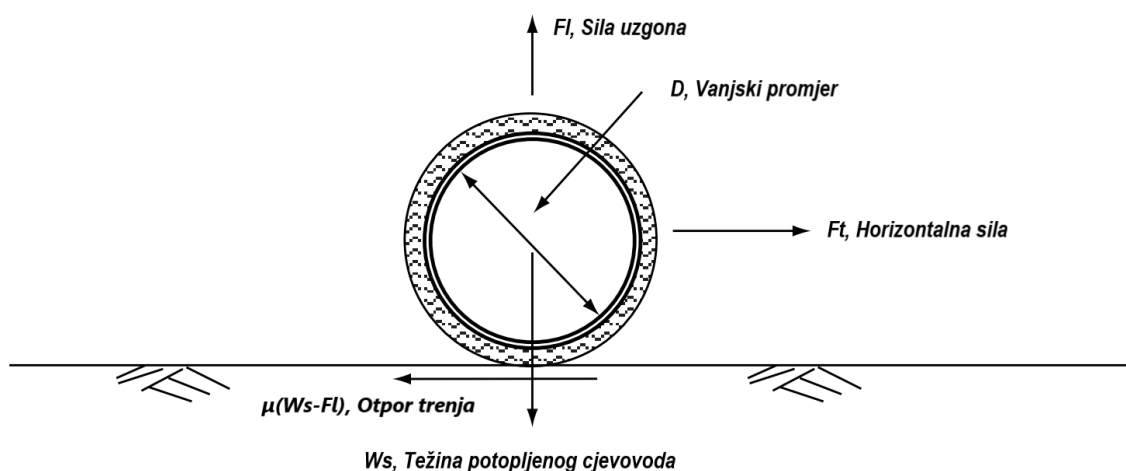
Morske struje i valovi koje djeluju oko cjevovoda, ili bilo kojeg cilindričnog tijela, mogu rezultirati stvaranjem vrtloga (Slika 5.4). Ovi periodično otpušteni vrtlozi (eng. *vortex shedding*) se izmjenjuju između gornjeg i donjeg sloja cijevi i stvaraju oscilatorno gibanje. Ukoliko se frekvencija periodično otpuštenih vrtloga izjednači sa prirodnom frekvencijom cjevovoda na nepoduprtom rasponu, dolazi do pojave rezonancije. Rezonancija može izazvati strukturalno pucanje cijevi uslijed zamora materijala ili padanje cementne obloge na cijevi.



Slika 5.4: Pojava vrtloženja uslijed morskih struja [7]

5.5 Analiza stabilnosti na morskom dnu

Cjevovodi položeni na morskom dnu su izloženi utjecaju valova i morskih struja. U područjima morskog dna gdje bi moglo doći do vertikalnih ili lateralnih pomaka, nužno je osigurati dovoljnu težinu, odnosno veći negativni uzgon. U većini slučajeva težina se osigurava upotrebom cementnih obloga na cijevima. U nekim slučajevima dozvoljavaju se lateralni pomaci cjevovoda, a ukoliko se ne prekorače dozvoljene vrijednosti naprezanja.



Slika 5.5: Sile koje djeluju na cjevovod pri morskom dnu [2]

Uvjet stabilnosti na morskom dnu glasi:

$$\frac{\mu(W_s - F_L)}{F_T} > 1 \quad (5.4)$$

gdje je:

μ - faktor trenja između cijevi i morskog tla

W_s – težina uronjenog cjevovoda

F_L – sila uzgona

F_T – ukupna horizontalna sila valova i morskih struja

Promatrajući gornji izraz (5.4) uočavamo da što je veća težina uronjenog cjevovoda, to je otpor trenja veći. To nije u potpunosti točno, jer je potrebno uzeti u obzir i dubinu uranjanja cjevovoda. Dodatni otpor trenja dolazi od morskog dna, što ujedno i smanjuje potrebnu težinu uronjenog cjevovoda. Karakteristika morskog dna igra značajnu ulogu u lateralnoj, ali i u vertikalnoj stabilnosti cjevovoda. Vertikalna stabilnost je izrazito važna kod ukopanih cjevovoda u tlima koja imaju visok potencijal likvifikacije. Računanje sile otpora F_D uzimajući u obzir otpor vode, vrši se pomoću izraza 5.5.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D (U + V)^2 \quad (5.5)$$

gdje je:

F_D – sila otpora po jedinici duljine

ρ – gustoća morske vode

C_d – koeficijent otpora

D – vanjski promjer cijevi

U – brzina mora uslijed valova

V – brzina struje

Sila uzgona F_L može se računati po istoj jednadžbi, zamjenjujući samo koeficijent otpora C_D sa koeficijentom uzgona C_L , a izraz poprima sljedeći oblik:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D (U + V)^2 \quad (5.6)$$

Nadalje, silu inercije F_i , uslijed djelovanja ubrzanja vodnih čestica, računamo po izrazu:

$$F_i = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} \quad (5.7)$$

gdje je:

F_i – sila inercije po jedinici duljine

ρ – gustoća morske vode

C_M – koeficijent otpora

D – vanjski promjer cijevi

du/dt – ubrzanje vodnih čestica uslijed valova

Generalne, jednostavne metode određivanja stabilnosti, koriste Morison-ovu jednadžbu za određivanje ukupne horizontalne sile F_T kao sumu sile otpora i inercije:

$$F_T = F_D + F_i \quad (5.8)$$

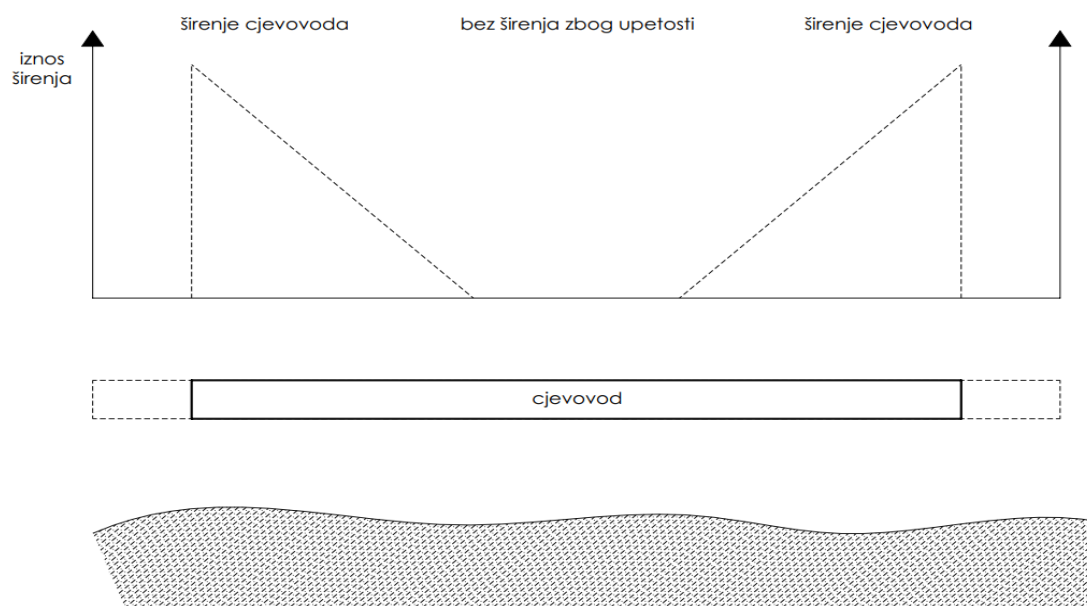
5.6 Analiza uzdužnog širenja na dnu

Analizom određujemo maksimalno izduženje cijevi između dviju čvrste točke cijevi i maksimalna uzdužna opterećenja kod najvećih eksploatacijskih opterećenja.

Navedene činjenice značajno utječu u aspekte proračuna, a kako slijedi:

- uzdužno opterećenje – pokazuje mogućnost dolaska do izvijanja uslijed eksploatacije te ima li potrebe za dodatnim analizama i ograničenjima
- širenja između krajnjih točaka – pokazuju da li granični uvjeti odgovaraju ili ih je potrebno ponovno analizirati i prilagoditi

Stupanj širenja cjevovoda je funkcija operativnih parametara i postavljenih ograničenja kretanja (sidrenja u točkama).



Slika 5.6: Širenje cijevi na morskom dnu uslijed utjecaja strujanja i eksploatacijskih parametara

5.7 Problem krutosti čeličnog cjevovoda obloženog cementnom oblogom

Zbog različitih utjecaja savijanja cijevi, dio je omotača izložen rastezanju dok je drugi dio izložen sabijanju. S obzirom na zanemarivu vlačnu čvrstoću betona, dio omotača izložen rastezanju ne utječe na ukupnu čvrstoću, već uzrokuje pomak neutralne osi kompozitnog presjeka koji se sastoji od čeličnog i cementnog dijela. Kao rezultat toga, maksimalno normalno naprezanje u cijevi se povećava na vlačnoj strani, dok se smanjuje na tlačnoj strani (Slika 5.7). Pomak neutralne osi a se izračunava uzimajući u obzir ravnotežu svih sila na presjeku (Slika 5.7). Uzdužna sila duž poprečnog presjeka cijevi se računa prema sljedećoj formuli:

$$\sum F_x = \int_{A_s} \sigma_s dA_s + \int_{A_c} \sigma_c dA_c + \int_{A_s} \frac{E_s}{R_p} (z + a) dA_s + \int_{A_c} \frac{E_c}{R_p} (z + a) dA_c = 0 \quad (5.9)$$

gdje je:

z – vertikalna ordinata presjeka,

a – pomak neutralne osi presjeka,

R_p – radijus zakrivljenosti presjeka,

A_s – površina poprečnog presjeka čelične cijevi,

E_s – modul elastičnosti čelika,

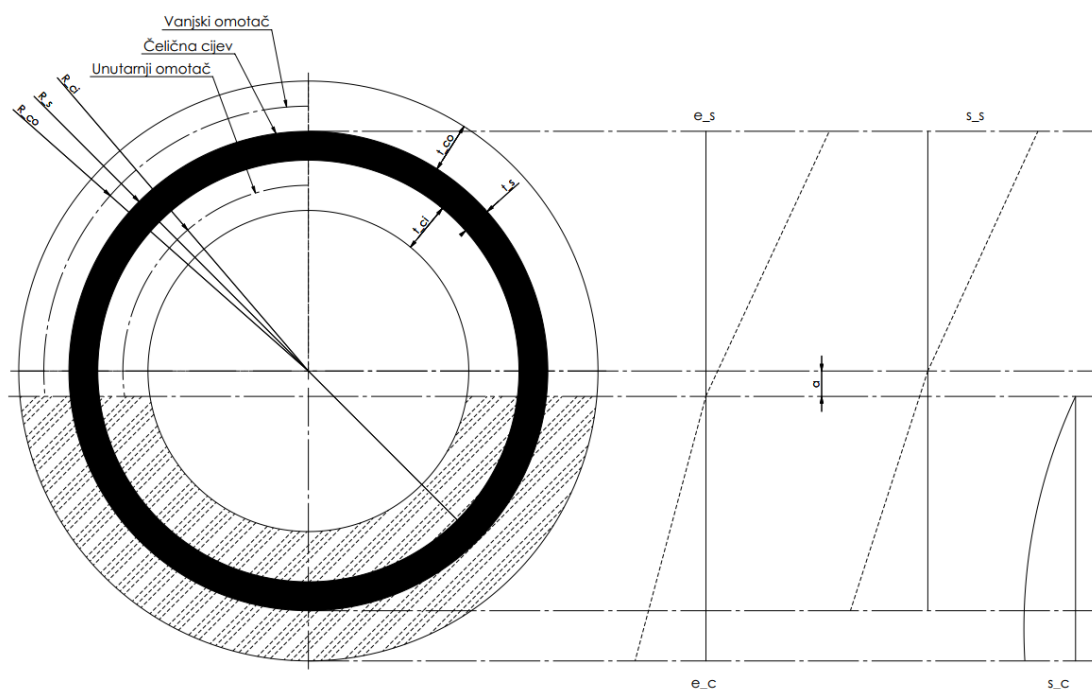
A_c – površina poprečnog presjeka betonske obloge izloženog tlačnom naprezanju čelične cijevi,

E_c – modul elastičnosti betonske obloge.

Modul elastičnosti i radijus zakrivljenosti su faktori koji određuju naprezanje:

$$\sigma_s = \frac{z + a}{R} E_s \quad (5.10)$$

$$\sigma_c = \frac{z + a}{R} E_c \quad (5.11)$$



Slika 5.7: Geometrijske karakteristike čelične cijevi obložene cementom

gdje su na slici:

s_c – raspored smičnih naprezanja,

e_s – raspored normalnih vlačnih naprezanja u čeličnoj cijevi (bez utjecaja cemente obloge),

e_c – raspored normalnih tlačnih naprezanja i čeličnog i cementnog dijela cijevi,

s_s – stvarni raspored normalnih naprezanja.

Da bi uzdužna unutarnja sila bila nula, površine tlačnih i vlačnih naprezanja cjevovoda moraju biti jednake. Kako bi se postiglo to ravnotežno stanje, koristi se iterativni pristup u potrazi za rješenjem s određenom točnošću. Traži se površina pomicanjem neutralne osi u smjeru vlačnih naprezanja, jer su naprezanja veća u tom području.

5.8 Zakrivljenost morskog dna

Kriterij polaganja podmorskog cjevovoda uključuje minimalni radijus globalne zakrivljenosti dna, označen kao R_{dmin} . Krutost cijevi na savijanje (EI) omogućuje prevladavanje lokalnih neravnina u datim uvjetima polaganja. Pretpostavljajući da su uzdužna sila F_x , zakrivljenost morskog dna i elastična deformacija cjevovoda zanemarivi u presjeku podmorskog cjevovoda, moguće je postaviti sljedeći odnos:

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{d^2}{dx^2} w(x) = -\frac{M(x)}{EI} \quad \frac{1}{R(x)} = \frac{(1 + w'^2)^{\frac{2}{3}}}{w''} \approx \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (5.12)$$

gdje su:

$M(x)$ – moment savijanja,

$w(x)$ – progibna linija,

$R(x)$ – radijus zakrivljenosti.

Dozvoljeni minimalni radijus zakrivljenosti cijevi određuje se na temelju dozvoljenog naprezanja σ_d , a koje je propisano prema kriterijima naprezanja ili izvijanja:

$$\frac{1}{R_{\text{min}}(x)} \geq \frac{EI}{W_{\text{min}} \cdot \sigma_d} \quad (5.13)$$

6. MATEMATIČKI MODEL CJEVOVODA

Prije nego što se pristupi statičkoj strukturalnoj analizi podmorskog cjevovoda, potrebno je izvršiti matematičko modeliranje procesa polaganja cjevovoda. Matematički model omogućava simulaciju ponašanja cjevovoda pod različitim uvjetima opterećenja tijekom polaganja, što je ključno za razumijevanje i optimizaciju dizajna cjevovoda.

Matematičko modeliranje polaganja podmorskog cjevovoda uključuje analizu različitih aspekata procesa polaganja, uključujući hidrodinamičke sile, mehanička opterećenja i interakciju cjevovoda s morskim dnom. Ovisno o složenosti analize i preciznosti rezultata, mogu se koristiti različite matematičke metode i alati za modeliranje.

Jedan od pristupa matematičkom modeliranju polaganja cjevovoda je korištenje metode konačnih elemenata (MKE) ili numeričkih metoda za postavljene jednadžbe sustava. MKE je numerička metoda koja diskretizira analizirani prostor na manje elemente kako bi se riješile jednadžbe koje opisuju ponašanje materijala i struktura. Kada se primijeni na polaganje cjevovoda, MKE može uzeti u obzir kompleksne faktore poput hidrodinamičkih opterećenja, otpora tla i interakcije između cijevi i podloge.

Prilikom matematičkog modeliranja polaganja cjevovoda, ključno je odabrati prikladan geometrijski model cjevovoda, materijalne parametre i uvjete opterećenja koji će biti simulirani. Na primjer, geometrijski model može uključivati duljinu, promjer i debljinu cijevi, kao i položaj podupirača i njegova duljina. Parametri materijala obuhvaćaju elastična svojstva cijevi i tla, kao i parametre prianjanja između cijevi i podloge.

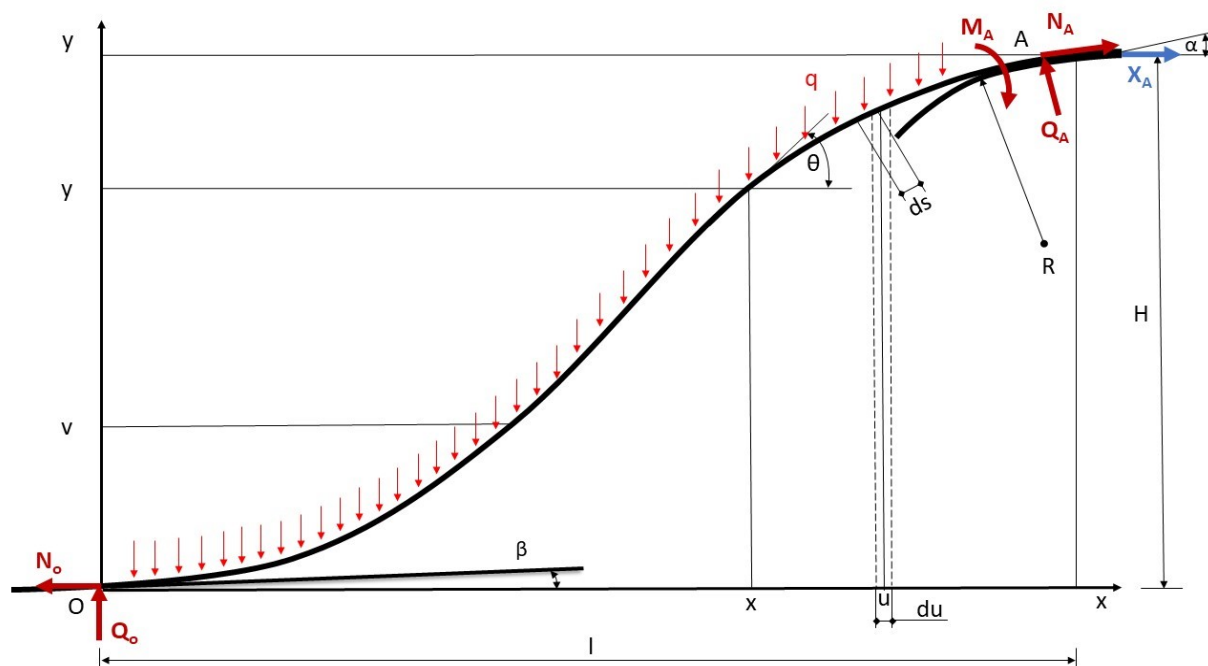
Nakon što su definirani geometrijski model, parametri materijala i uvjeti opterećenja, može se izvršiti simulacija polaganja cjevovoda. Ova simulacija može pružiti uvid u ponašanje cjevovoda tijekom procesa polaganja, uključujući deformacije, naprezanja i stabilnost. Rezultati simulacije mogu se koristiti za identifikaciju potencijalnih problema ili slabih točaka u dizajnu cjevovoda te za optimizaciju dizajna kako bi se osigurala sigurnost i dugovječnost instalacije.

Matematičko modeliranje polaganja cjevovoda također može pružiti informacije o optimalnoj metodologiji polaganja, kao što su potrebne snage i uvjeti polaganja. Ovi podaci mogu biti od ključnog značaja prilikom planiranja i izvođenja radova na polaganju podmorskog cjevovoda.

Ukratko, matematičko modeliranje polaganja cjevovoda igra važnu ulogu u statičkoj strukturalnoj analizi podmorskog cjevovoda. Kroz upotrebu numeričkih metoda, moguće je simulirati ponašanje cjevovoda pod različitim uvjetima opterećenja tijekom polaganja. Ovi modeli omogućuju detaljnu analizu i optimizaciju dizajna cjevovoda, što rezultira sigurnijom i pouzdanijom instalacijom.

Za prikaz pojednostavljenog matematičkog modela S-lay instalacije, odabran je model dostupan iz članka Kotov, A.A. et al., An approximate calculation of the S-lay method offshore pipeline, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 302, 2019.

Prilikom izrade matematičkog modela, koristi se S-lay instalacijska metoda polaganja sa svim svojim karakterističnim odnosima. Cjevovod započinje instalaciju odavajanjem od podupirača u točki A, sa kutem podupirača α u odnosu na horizontalu te naližeže na morsko dno u točki O (Slika 6.1).



Slika 6.1: Prikaz karakterističnih veličina i sila kod S-lay polaganja

Ulazni parametri koji su zadani, a promatrajući gornji prikaz (Slika 6.1), jesu:

- dubina morske vode H
- kut podupirača α
- kut morskog dna u odnosu na horizontalu β
- uronjena težina cijevi po jedinici duljine q
- zakrivljenost cjevovoda u točki O (jednaka je nuli)

Nepoznati parametri jesu:

- savijeni oblik cjevovoda tokom instalacije
- horizontalna dužina polaganja l
- reakcijske sile na podupiraču Q_A, N_A
- reakcijski moment savijanja na podupiraču M_A
- reakcijske sile na morskom dnu Q_o, N_o

Za statičku analizu polaganja primjenjuje se pojednostavljeni model nelinearnog savijanja u vertikalnoj ravnini x-y (gdje je x horizontalna i y vertikalna koordinatna os) [6]. Cjevovod se aproksimira sa homogenim napetim štapom konstantnog poprečnog presjeka. Budući da je zakrivljenost $\kappa = d\theta/ds$ analitički povezana sa momentom savijanja preko Euler-Bernoullijevog linearnog zakona ponašanja savijanja štapa, za početnu baznu jednadžbu u formiranju matematičkog modela uzima se diferencijalni omjer:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M}{EJ} \quad (6.1)$$

gdje je:

M – moment savijanja u vertikalnoj ravnini

J – moment inercije poprečnog presjeka štapa (cijevi)

Domena S ($0 \leq s \leq S$) u definiciji problema nije definirana te to predstavlja problem u dobivanju praktičnih rezultata tokom izračuna. Rezultati se stoga moraju pronalaziti na način da se implementira u svakom koraku metoda konačnih razlika za sistem diferencijalnih jednadžbi. Kako bi se navedeni problem riješio, uvodi se diferencijalna jednadžba elastične linije savijanja grede, koja glasi:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EJ} \quad (6.2)$$

U izrazu se moment savijanja uzima sa takvim predznakom, da pozitivni moment dovodi do konveksnog izgleda krivulje. No, prilikom uvođenja gornje jednadžbe (izraz 6.2) nije moguće adekvatno dobiti krivulju polegnutog cjevovoda, iz razloga što je svojstvena greška jednaka omjeru kutu nagiba tangente naprema kutu od 45° . Iz slike 6.1. vidljivo je da taj omjer može doseći približnu vrijednost od 1, što znači da greška može iznositi 100%.

Iz navedenog razloga uvodi se egzaktna diferencijalna jednadžba, a koja je izvedena iz izraza 6.1[8]:

$$\frac{y''}{(1 + (y')^2)^{1,5}} = -\frac{M}{EJ} \quad (6.3)$$

Promatrajući glavne parametre i skicu polaganja S-lay metodom, izraz za moment savijanja poprima oblik:

$$M(x) = M_A - Q_A \cos \alpha (l - x) - Q_A \sin \alpha (H - y) + N_A \cos \alpha (H - y) - N_A \sin \alpha (l - x) + \int_x^l q ds (u - x) \quad (6.4)$$

Kako bi se gornji izraz pojednostavio, integralni dio u njemu, može se zapisati kao:

$$\int_x^l q ds (u - x) = q(S - s) \cdot 0,5(l - x) \quad (6.5)$$

U gornjem izrazu, vrijednost (S-s) jednaka je dužini između promatrane točke i točke A na podupiraču, a s obzirom na apscisu. Spomenuta lučna dužina može se izraziti pomoću horizontalne dužine (l-x), ukoliko u izraz uvedemo bezdimenzijski parameter a:

$$s = a(l - x) \quad (6.6)$$

Vrijednost bezdimenzijskog parametra je varijabilna duž raspona polegnutog cjevovoda te veća od jedan. Ukoliko se u izraz 6.4 primjene izrazi 6.5 i 6.6, on poprima sljedeći oblik:

$$M(x) = M_A - Q_A((l - x) \cos \alpha + \sin \alpha (H - y)) + N_A((H - y) \cos \alpha - (l - x) \sin \alpha) + 0,5qa(l - x)^2 \quad (6.7)$$

Uzimajući u obzir početnu pretpostavku, a to da je zakrivljenost cjevovoda u točki dodira sa cjevovodom jednaka nuli, odnosno da vrijedi:

$$M(x)|_{x=0} = 0 \quad (6.8)$$

Sukladno tome, izražavamo moment u točki odvajanja cjevovoda od podupirača (točka A), a pomoću ostalih sila koje se javljaju i linearnog opterećenja:

$$M_A = Q_A(l \cos \alpha + H \sin \alpha) - N_A(H \cos \alpha - l \sin \alpha) - 0,5qal^2 \quad (6.9)$$

Sile Q_A i N_A određuju interakciju cjevovoda sa brodom cjevopolagačem. Vertikalna komponenta navedene interakcije uvijek će biti prisutna, a horizontalna komponenta sile X_A kontrolira se pomoću parametara brodskog motora.

Promatrajući skicu polaganja (slika 6.1), dolazimo do geometrijskog izraza:

$$N_A \cos \alpha - Q_A \sin \alpha = X_A \quad (6.10)$$

Ukoliko iz navedenog izraza želimo dobiti silu N_A , on poprima oblik:

$$N_A = \frac{X_A}{\cos \alpha} + Q_A \tan \alpha \quad (6.11)$$

Daljnijim uvrštavanjem jednadžbi 6.11. u 6.9, dolazimo do izraza:

$$M_A = \frac{Q_A l}{\cos \alpha} - X_A(H - l \tan \alpha) - 0,5qal^2 \quad (6.12)$$

Iz jednadžbe 6.12 moguće je dobiti silu Q_A , za koju izraz glasi:

$$Q_A = \frac{M_A \cos \alpha}{l} + \frac{X_A}{l} (H \cos \alpha - l \sin \alpha) + 0,5qal \cos \alpha \quad (6.13)$$

Ukoliko jednadžbu 6.13. uvrstimo u 6.11, dolazimo do jednadžbe za silu N_A :

$$N_A = \frac{M_A \sin \alpha}{l} + X_A \left(\frac{H}{l} \sin \alpha + \cos \alpha \right) + 0,5qal \sin \alpha \quad (6.14)$$

Koristeći dobivene jednadžbe 6.13. i 6.14. za sile Q_A i N_A , izraz 6.7. možemo zapisati u sljedećem obliku:

$$M(x) = M_A \frac{x}{l} - X_A H \left(\frac{y}{H} - \frac{x}{l} \right) - 0,5aqal^2 \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \quad (6.15)$$

Nadalje, koristeći izraz 6.15. za moment i uvrštavajući ga u diferencijalnu jednadžbu 6.3. i riješavajući se nazivnika, izraz glasi:

$$y'' = \left[-\frac{M_A x}{EJ l} + \frac{X_A H}{EJ} \left(\frac{y}{H} - \frac{x}{l} \right) + 0,5a \frac{ql^2 x}{EJ l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right] [1 + (y')^2]^{1,5} \quad (6.16)$$

Kako bi se izraz pojednostavio, uvode se sljedeće bezdimenzijske koordinate:

$$\frac{x}{l} = \xi, \quad \frac{y}{H} = \eta \quad (6.17)$$

Derivacije funkcije y u novim parametrima ξ i η , a prema izrazu 6.17:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{H}{l} \frac{d\eta}{d\xi}; \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{H}{l^2} \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} \quad (6.18)$$

Upotrebom bezdimenzijskih parametara, jednadžba 6.16 glasi:

$$\eta'' = \left[0,5a \frac{ql^3}{EJ H} \xi(1 - \xi) + \frac{X_A l^2}{EJ} (\eta - \xi) - \frac{M_A l}{EJ H} \xi \right] \left[1 + \left(\frac{H}{l} \right)^2 (\eta')^2 \right]^{1,5} \quad (6.19)$$

Ponovno, radi pojednostavljenja, uvodimo bezdimenzijske parametre:

$$\frac{ql^3}{EJ} = \kappa; \quad \frac{X_A l^2}{EJ} = \chi; \quad \frac{M_A l}{EJ} = m; \quad \frac{l}{H} = \lambda \quad (6.20)$$

Uvodeći bezdimenzijske parametre u jednadžbu 6.19, dobijamo izraz:

$$\eta'' = [0,5a\kappa\lambda\xi(1 - \xi) + \chi(\eta - \xi) - m\lambda\xi] \left[1 + \frac{(\eta')^2}{\lambda^2} \right]^{1,5} \quad (6.21)$$

Pri tome, nužno je uzeti u obzir rubne uvjete:

$$\eta|_{\xi=0} = 0; \quad \eta'|_{\xi=0} = \lambda \tan \beta \quad (6.22)$$

Parametri χ , κ i m u jednadžbi 6.21, označavaju vanjske sile koje djeluju na cjevovod. Geometrijski bezdimenzijski parametar a može se izračunati sa dovoljnom točnošću iz sljedećeg izraza:

$$\sqrt{l^2 + H^2} \approx al \quad (6.23)$$

Prema čemu je parametar a približno jednak:

$$a \approx \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2}} \quad (6.24)$$

Poznavajući sve spomenute odnose i parametre, jedina slobodna varijabla ostaje parametar λ . Prilikom rješavanja diferencijalne jednačbe 6.21, potrebno je uzeti u obzir rubni uvjet na vrhu podupirača, a to je u točki A:

$$\eta|_{\xi=1} = 1 \quad (6.25)$$

Numeričko rješenje jednačbe 6.21 rješivo je u formi interpolacijske funkcije $\eta(\xi)$. Iz toga se izvodi interpolacijska funkcija za moment savijanja, a iz izraza 6.3. i 6.18, koji glasi:

$$M(\xi) = - \frac{EJ\eta''(\xi)}{H\lambda^2 \left(1 + \left(\frac{\eta'(\xi)}{\lambda}\right)^2\right)^{1,5}} \quad (6.26)$$

Poprečna sila u cijevi se dobiva deriviranjem izraza za moment savijanja:

$$Q(\xi) = \frac{1}{\lambda H} \frac{dM(\xi)}{d\xi} \quad (6.27)$$

Aksijalnu silu se može aproksimativno izračunati iz omjera:

$$N(\xi) \approx N_A - q \sin \alpha (S - s) \quad (6.28)$$

Primjenjujući izraze 6.6, 6.17. te 6.23, jednačba za $N(\xi)$ glasi:

$$N(\xi) \approx N_A - qH(1 - \xi) \quad (6.29)$$

6.1 Numeričko rješavanje modela unutar MATLAB-a

Matlab je interaktivni program za znanstvene i inženjerske proračune. Skup Matlab-ovih programa uključuje osnovni program i različite toolbox-ove (programe specijalizirane za rad u određenim znanstvenim područjima).

Jedan od ključnih aspekata numeričkog rješavanja običnih diferencijalnih jednadžbi (*eng. Ordinary Differential Equation*) je odabir odgovarajuće metode integracije koja omogućava precizno i učinkovito aproksimiranje rješenja. Pošto odabrani matematički model sadrži običnu diferencijalnu jednadžbu drugog stupnja, potrebno je odabrati adekvatnu metodu numeričke integracije.

Izvedena jednadžba rješavat će se numeričkom metodom Runge-Kutta. Algoritam funkcije „ode45“ spada u familiju upravo Runge-Kutta metoda. Namijenjen je za rješavanje problema početnih uvjeta običnih diferencijalnih jednadžbi (*engl. Ordinary Differential Equation*) kakav je i problem analiziran u ovome radu. Baziran je na Dormand-Prince metodi koja koristi formule četvrtog i petog stupnja za automatsko koračno integriranje.

Dormand-Prince metoda je adaptivna Runge-Kutta metoda visokog reda koja se koristi za rješavanje problema običnih diferencijalnih jednadžbi. Metoda radi tako da korak po korak prilagođava veličinu koraka kako bi održala željenu razinu preciznosti. U svakom koraku, metoda „ode45“ izračunava dvije aproksimacije rješenja: jednu koristeći četvrti red Runge-Kutta aproksimacije i drugu koristeći peti red. Uspoređujući ove dvije aproksimacije, metoda odlučuje hoće li koristiti niži ili viši red aproksimacije za sljedeći korak.

Funkcija ode45 koristi sljedeći pristup:

1. Na početku, zadajemo početne uvjete i opis ODE-a koju želimo rješavati
2. Zadajemo vremenski interval za koji želimo rješavati ODE
3. Pozivamo „ode45“ funkciju s navedenim početnim uvjetima, ODE-om i vremenskim intervalom
4. „ode45“ koristi Dormand-Prince metodu da korak po korak prilagodi veličinu koraka kako bi osigurala točnost i pouzdanost rješenja

5. Na kraju izvođenja, ode45 vraća vektor vremena i vektor rješenja ODE-a na tom vremenskom intervalu

Funkcija „ode45“ nudi niz prednosti, uključujući visoku preciznost, sposobnost prilagodbe koraka za različite dijelove vremenskog intervala te učinkovitu upotrebu informatičkih resursa. Međutim, važno je napomenuti da za neke ODE-ove s vrlo oštrim promjenama u rješenju, „ode45“ može postati manje efikasan zbog učestalih prilagodbi koraka.

7. PRIMJENA MATEMATIČKOG MODELA

Problem polaganja podmorskog cjevovoda, a kao što je spomenuto u prethodnim poglavljima, je dvostruko nelinearni problem sa dva krajnja rubna uvjeta gdje samu analizu dodatno komplicira nepoznata duljina l polegnutog cjevovoda. Utjecaji valova i morskih struja te kretanja i pomicanje barže za polaganje jesu dinamičke prirode i stoga su zanemareni u ovoj analizi. Analiza se provodi u svrhu dobivanja sljedećih vrijednosti:

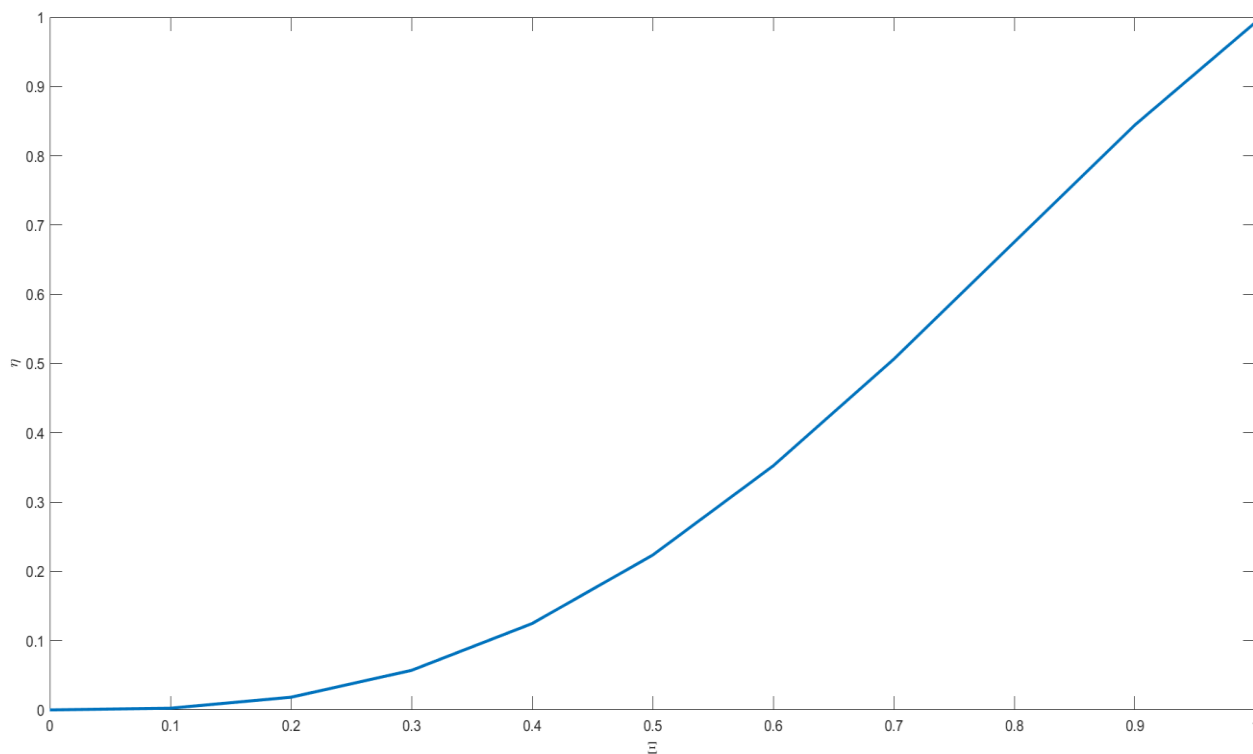
- Horizontalna duljina polegnutog cjevovoda l
- Moment savijanja M
- Poprečna sila Q
- Aksijalna sila N

Osnovni parametri cjevovoda za polaganje, a koji su korišteni unutar analize jesu sljedeći:

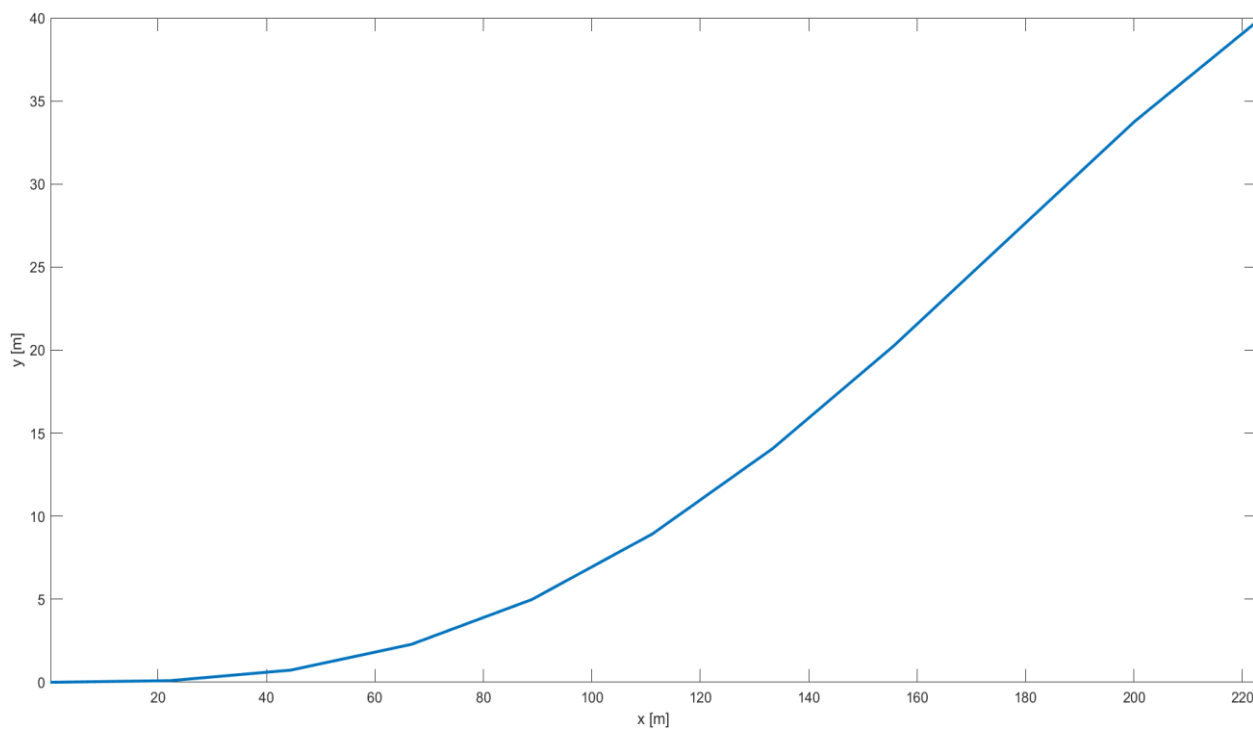
Parametar	Vrijednost
Vanjski promjer cijevi, D	820 mm
Debljina stijenke, δ	10 mm
Vlačna čvrstoća, σ	300 MPa
Modul elastičnosti, E	$2 \cdot 10^5$ MPa
Sila napinjača, X_A	30 000 N
Gustoća čelika, ρ_{st}	7700 kg/m ³
Gustoća morske vode, ρ_w	1000 kg/m ³
Dubina morske vode, H	40 m

Tablica 7.1: Parametri cjevovoda

Prikaz linije cjevovoda je vidljiv na slici 7.1 u bezdimenzijskim varijablama η (zamjena za y koordinatu) i ξ (zamjena za x koordinatu), odnosno na slici 7.2. u dimenzijskim koordinatama x i y.



Slika 7.1: Linija cjevovoda u bezdimenzijskim koordinatama η i ξ



Slika 7.2: Linija cjevovoda u dimenzijskim koordinatama x i y

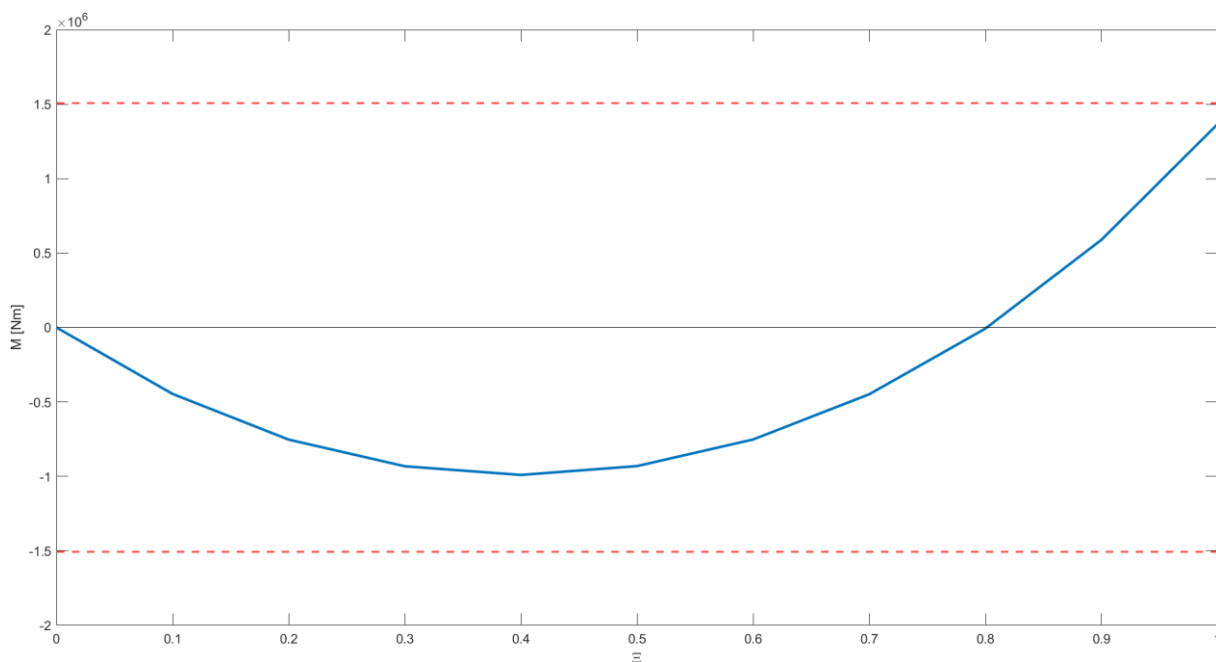
Prema jednadžbi 6.26. dobivaju se rezultati za moment savijanja, a čiji iznos je limitiran sa maksimalnom dopuštenom vrijednošću M_d . Maksimalna dopuštena vrijednost momenta savijanja u cjevovodu M_d se dobija iz izraza koji glasi:

$$M_d = \pi \cdot r^2 \cdot \delta \cdot \sigma_d \quad (7.1)$$

$$M_d = \pi \cdot (0,4)^2 \cdot 0,01 \cdot 300000000$$

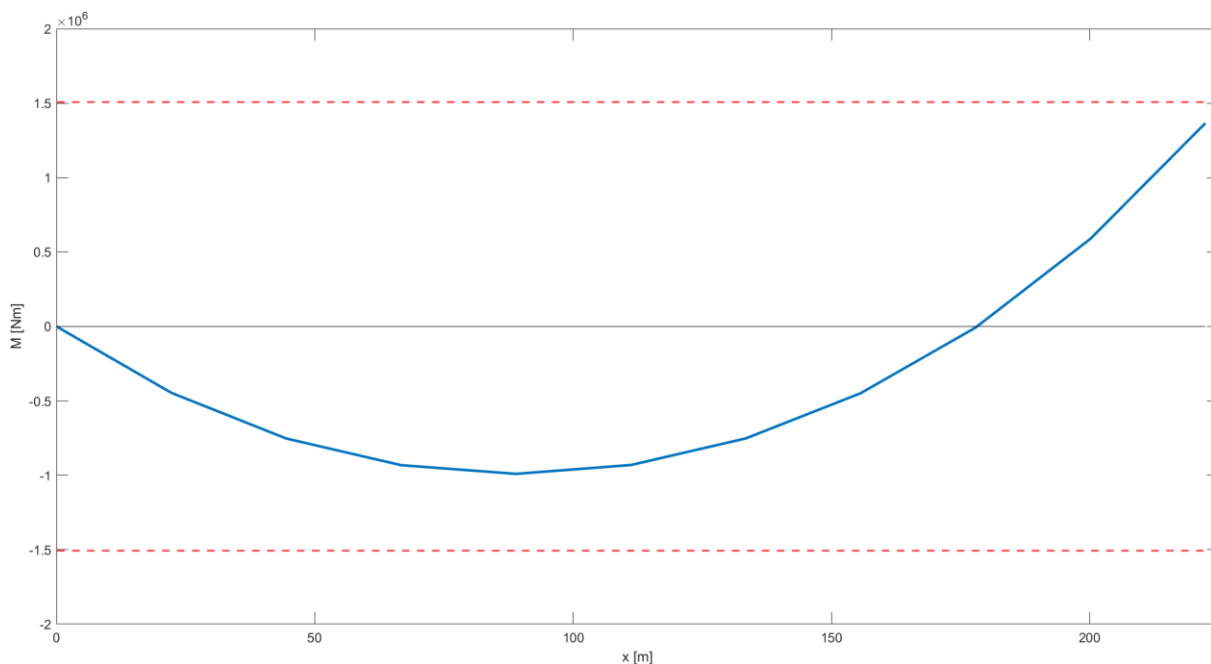
$$M_d = 1.5072 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

Graf momenta savijanja vidljiv je na slikama 7.3 i 7.4. Maksimalni moment koji se javlja u cjevovodu iznosi $1.37 \cdot 10^6 \text{ Nm}$, pri $\xi = 1$, odnosno pri $x = 222,4\text{m}$, ukoliko promatramo graf ovisnosti momenta savijanja o dimenzijskoj koordinati x .



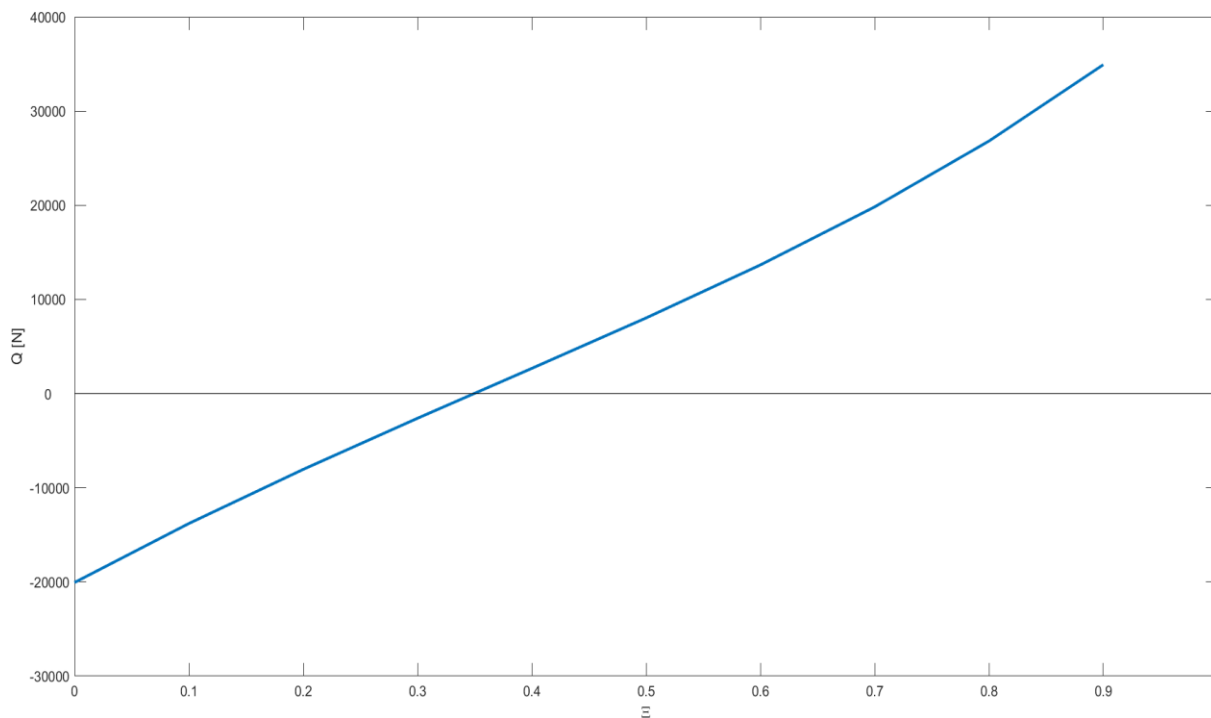
Slika 7.3: Graf momenta savijanja u ovisnosti o bezdimenzijskoj koordinati ξ

Na grafu su prikazane gornja i donja maksimalna vrijednost dopuštenog momenta savijanja u cjevovodu M_d , a koja je izračunata pod izrazom 7.1 za zadane parametre cjevovoda.

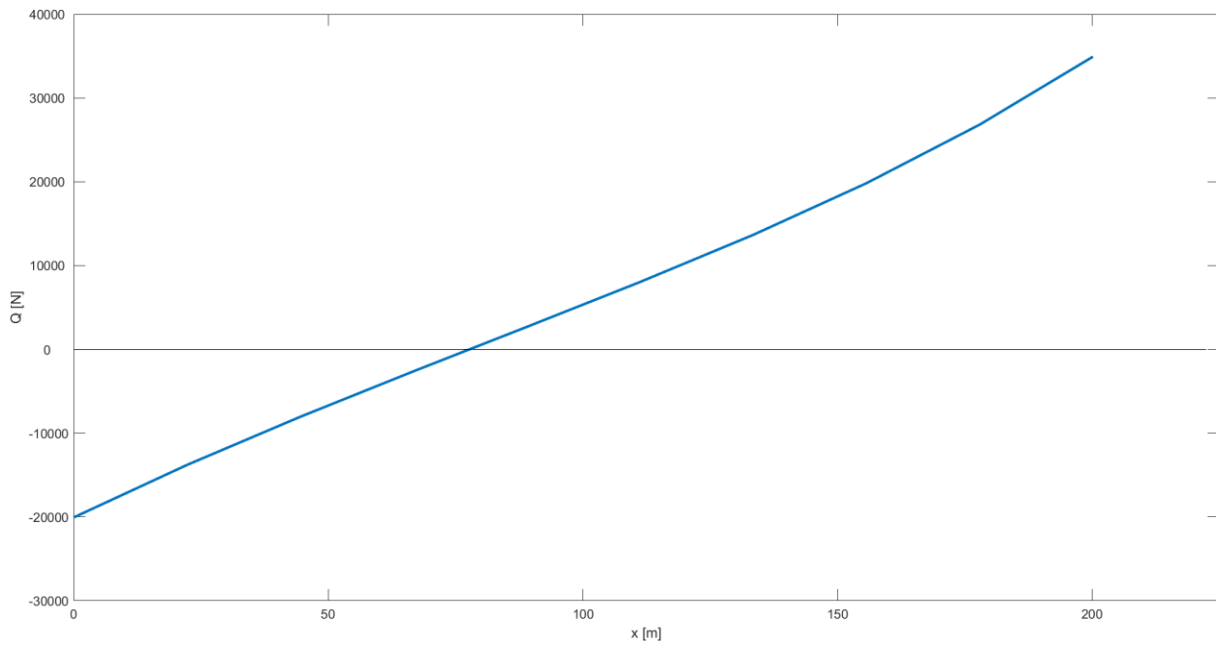


Slika 7.4: Graf momenta savijanja u ovisnosti o dimenzijskoj koordinati x

Prema jednadžbi 6.27 dobiveni su rezultati za poprečnu silu Q u cjevovodu. Prikaz rezultata vidljiv je na slikama 7.5 i 7.6. Vidljivo je da se maksimalne vrijednosti poprečne sile javljaju na vrhu podupirača i u polegnutom položaju na morskom dnu.

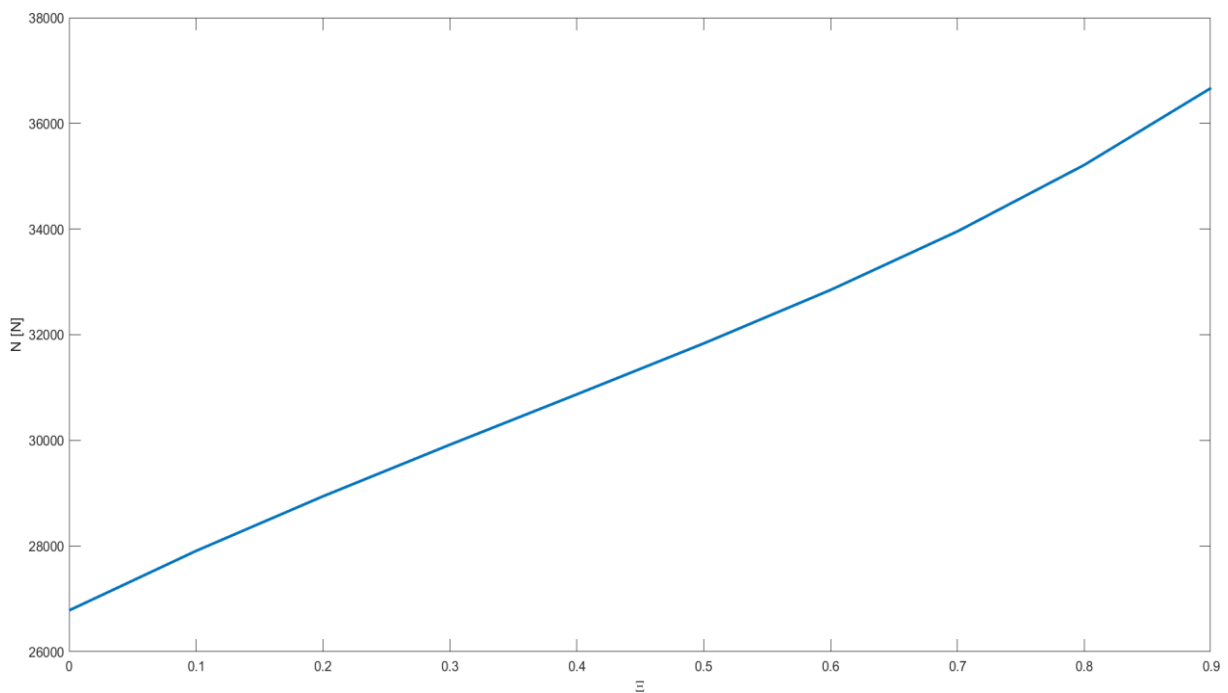


Slika 7.5: Graf poprečne sile Q u ovisnosti o bezdimenzijskoj koordinati ξ

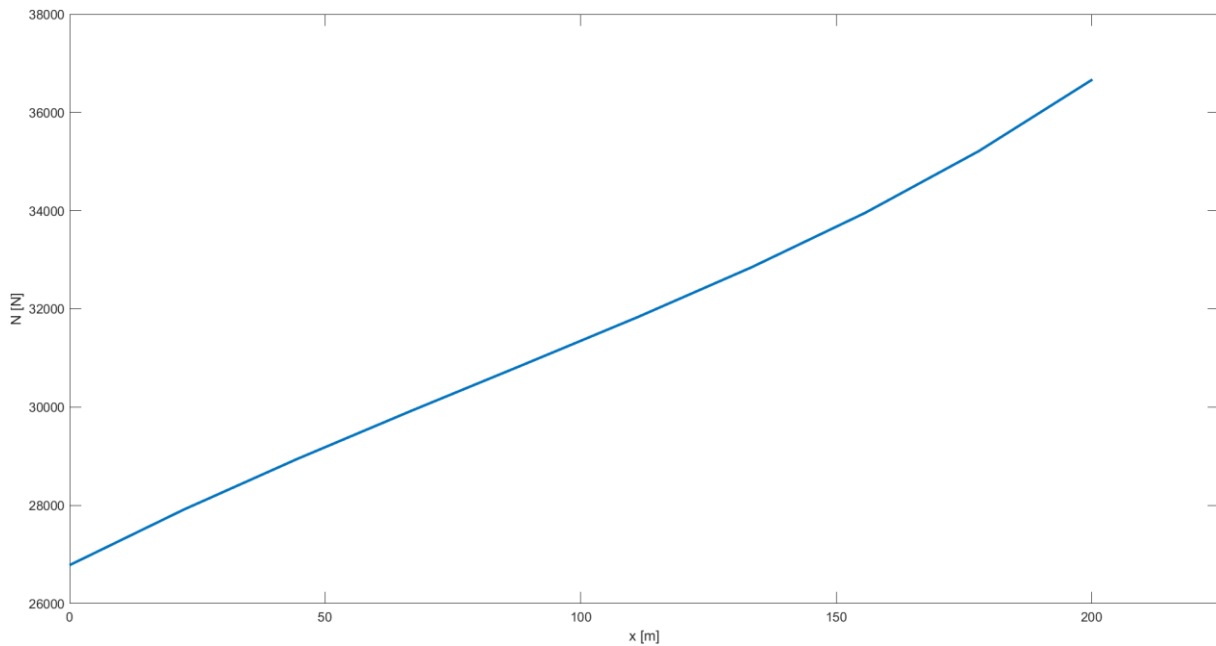


Slika 7.6: Graf poprečne sile Q u ovisnosti o dimenzijskoj koordinati x

Prema jednadžbi 6.29 dobiveni su rezultati za aksijalnu silu N u cjevovodu. Prikaz rezultata vidljiv je na slikama 7.7 i 7.8.



Slika 7.7: Graf aksijalne sile N u ovisnosti o bezdimenzijskoj koordinati ξ



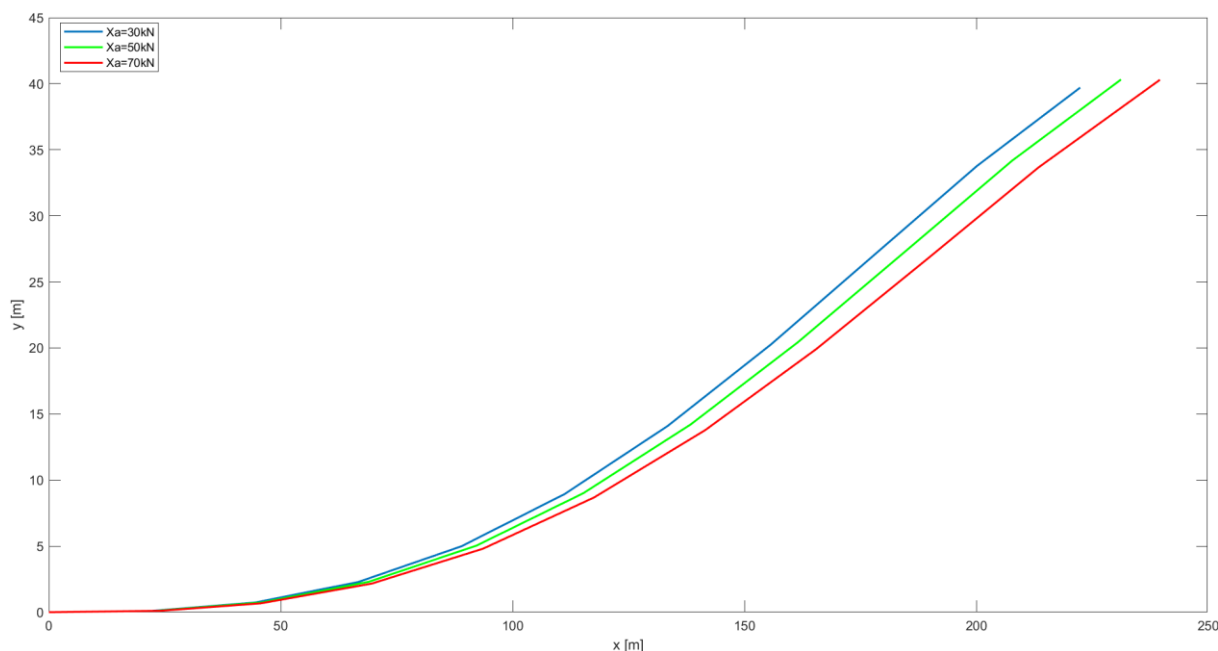
Slika 7.8: Graf aksijalne sile N u ovisnosti o dimenzijskoj koordinati x

Iz priloženih grafova izvedena su sljedeća zapažanja:

- Moment savijanja jednak je nuli u točki dodira sa morskim dnom, te ova vrijednost raste sve do maksimalne vrijednosti u pozitivnom djelu u overbend području. U točki infleksije koja razdvaja overbend i sagbend područje, moment savijanja poprima vrijednost nule.
- Poprečna sila poprima maksimalne vrijednosti u dvije točke: točki dodira sa morskim dnom i na kraju podupirača
- Iznos aksijalne sile započinje od određene vrijednosti u točki dodira sa morskim dnom i raste sve do izlaza cjevovoda sa podupirača

7.1 Utjecaj sile napinjača

Utjecaj različitih vrijednosti sile napinjača na izgled zakrivljenosti cijevi tokom polaganja vidljiv je na slici 7.9.



Slika 7.9: Utjecaj sile napinjača na zakrivljenost cjevovoda i horizontalnu projekciju. Povećanjem sile napinjača dolazimo do dulje horizontalne projekcije tokom instalacije, a zakrivljenost cjevovoda u sagbend području se smanjuje, dok su u overbend području vrijednosti jednake. Promatrajući tablicu 7.2 vidljivo je kako se horizontalna duljina l mijenja sa veličinom sile napinjača.

Sila napinjača X_A (kN)	Horizontalna duljina l (m)
30	222,4
50	231,2
70	239,6

Tablica 7.2: Prikaz horizontalnih duljina l za različite veličine sile napinjača X_A

Ukoliko se promatra graf momenta savijanja, vidljivo je da se točka infleksije sa povećanjem sile napinjača pomiče prema overbend djelu. Uočljivo je da su rezultati najbolji sa silom napinjača u iznosu od 70kN, gdje se javlja najmanji moment savijanja u negativnom i pozitivnom djelu raspona rezultata.

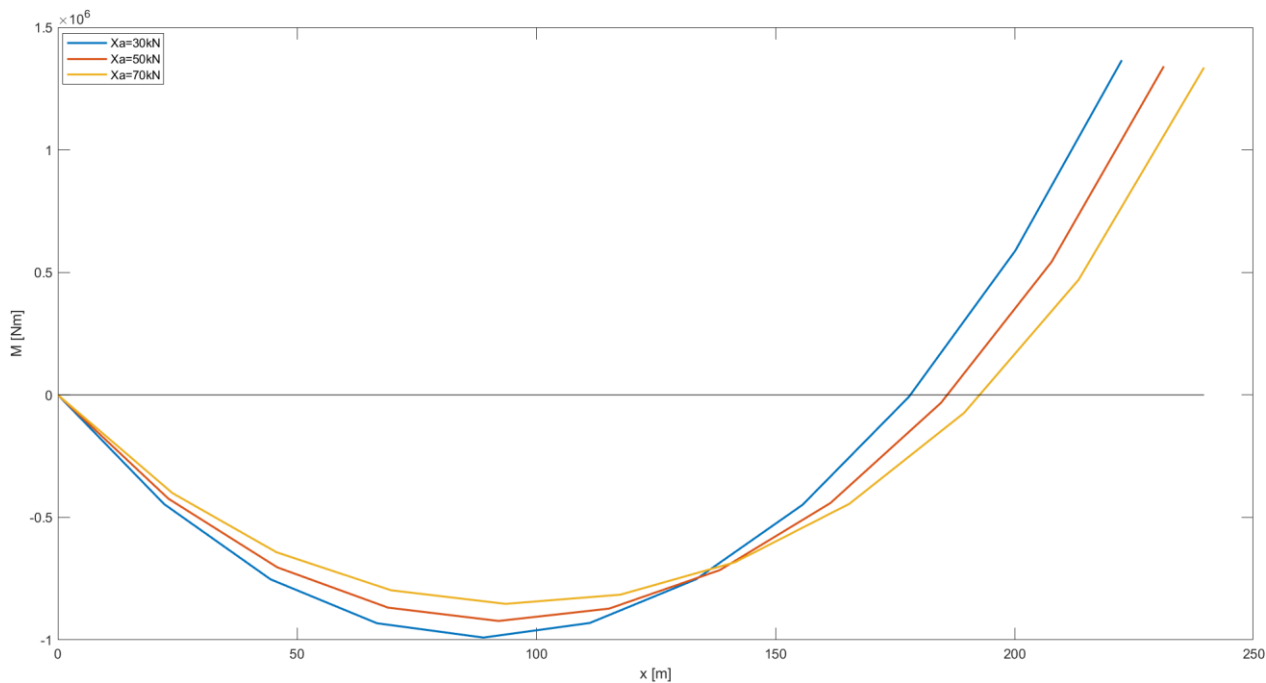
Vrijednosti maksimalnih momenata u ovisnosti o sili napinjača te položaj u odnosu na x koordinatu dan je u tablici 7.3

Sila napinjača X_A (kN)	Položaj maksimalnog momenta savijanja - x koordinata	Maksimalni moment savijanja (Nm)
30	222,4	1.365×10^6
50	231,2	1.341×10^6
70	239,6	1.336×10^6

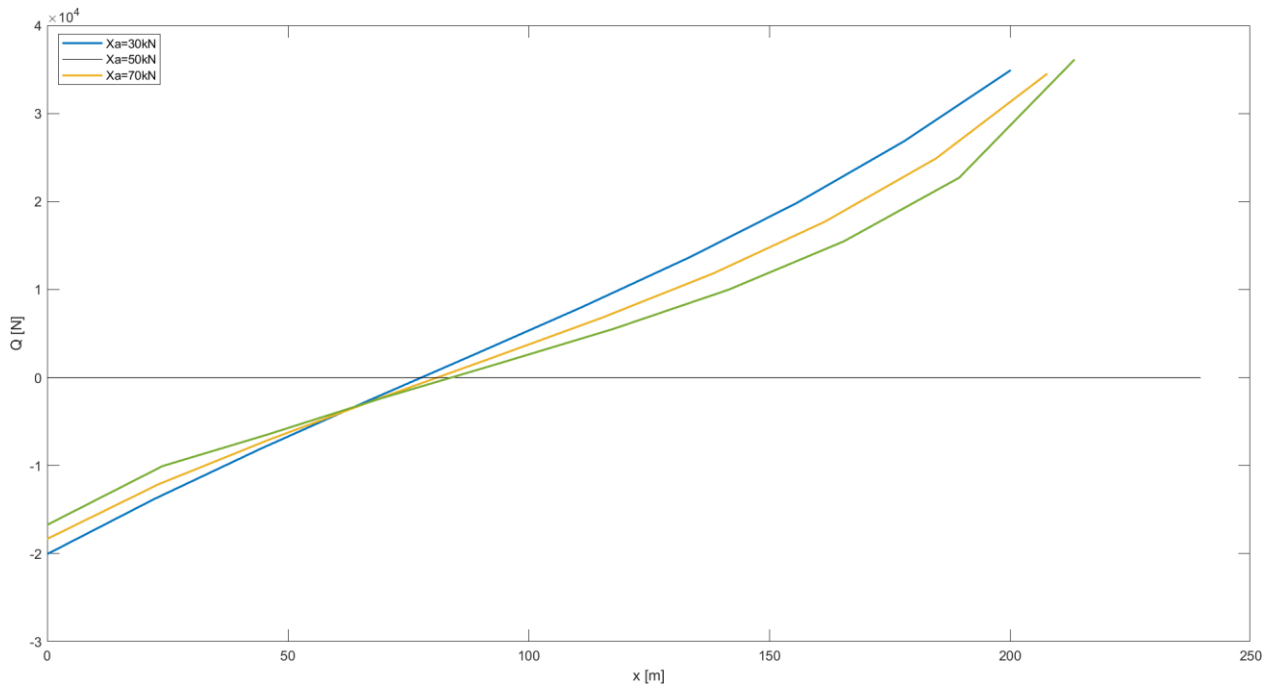
Tablica 7.3: Vrijednost i položaj maksimalnih momenata savijanja u ovisnosti o sili napinjača X_A

Graf 7.11. ukazuje da se najmanji iznos poprečne sile tokom instalacije javlja ukoliko se koristi sila napinjača u iznosu od 70kN.

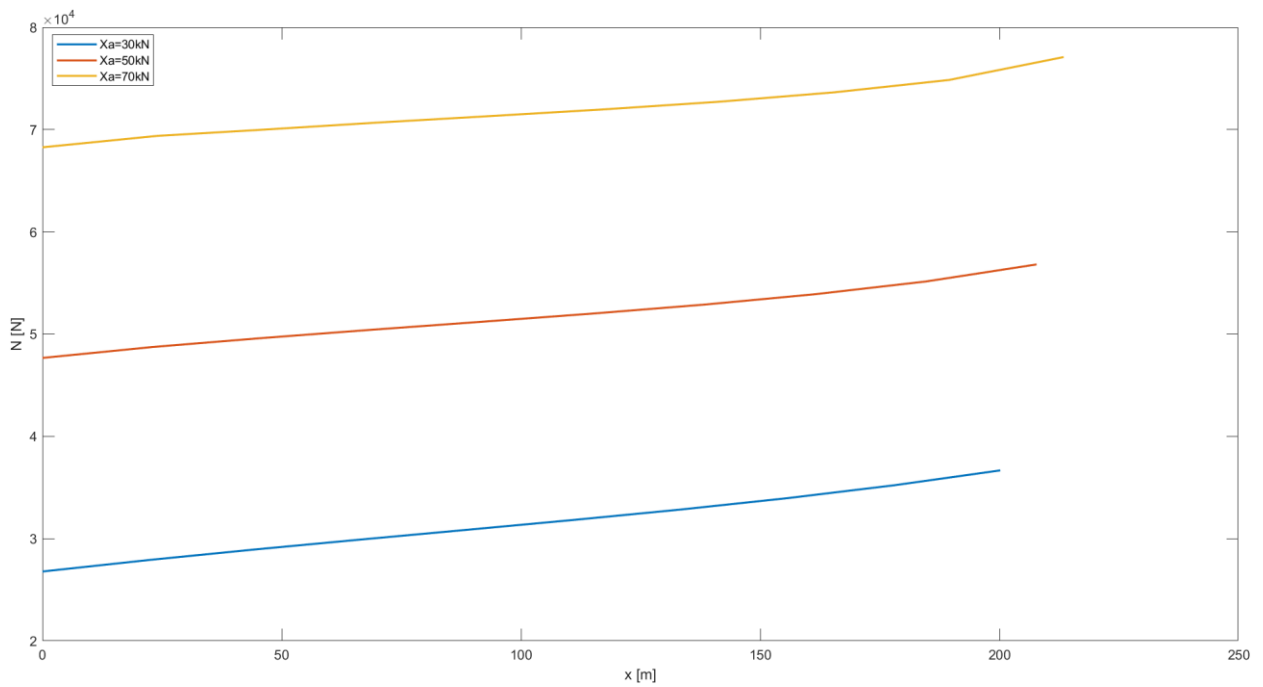
Na grafu 7.12. vidljivo je da se aksijalna sila N povećava sa upotrebljenom silom napinjača na brodu cjevopolagaču.



Slika 7.10: Utjecaj sile napinjača na moment savijanja M



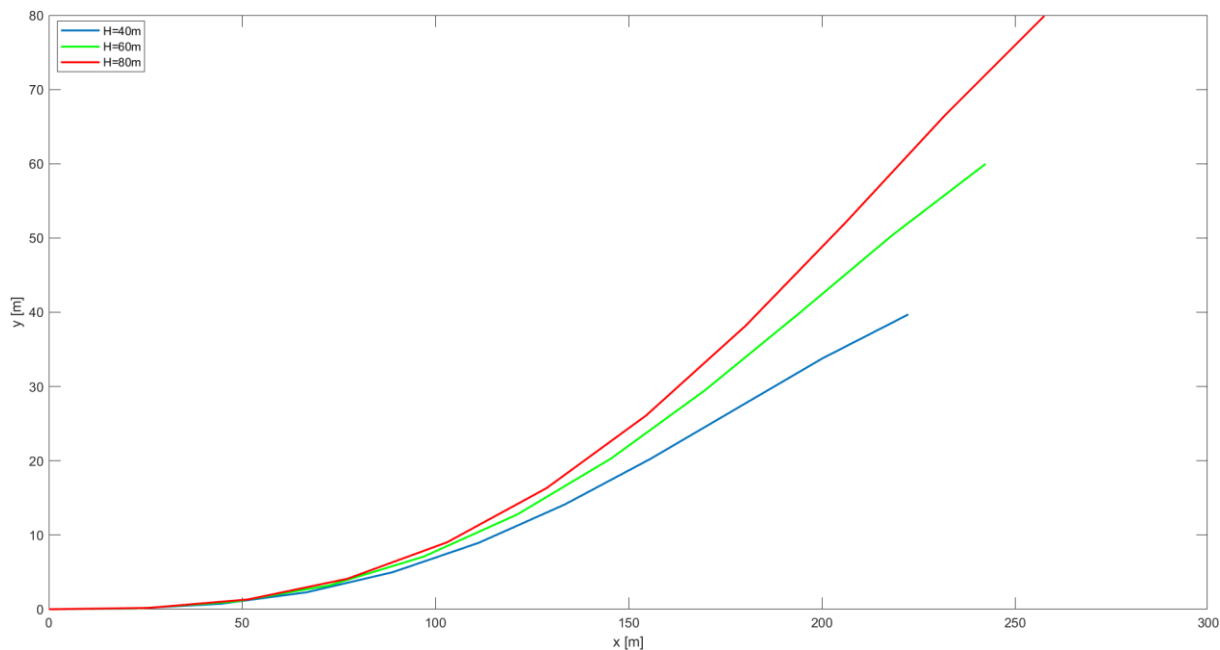
Slika 7.11: Utjecaj sile napinjača na poprečnu silu Q



Slika 7.12: Utjecaj sile napinjača na aksijalnu silu N

7.2 Utjecaj dubine morske vode

Korištene su različite dubine morske vode (40, 60, 80m), gdje je je korištena sila napinjača bila konstantna u iznosu od 40 kN. Na slici 7.13. vidljiv je utjecaj na dužinu horizontalne projekcije i zakrivljenost cjevovoda.



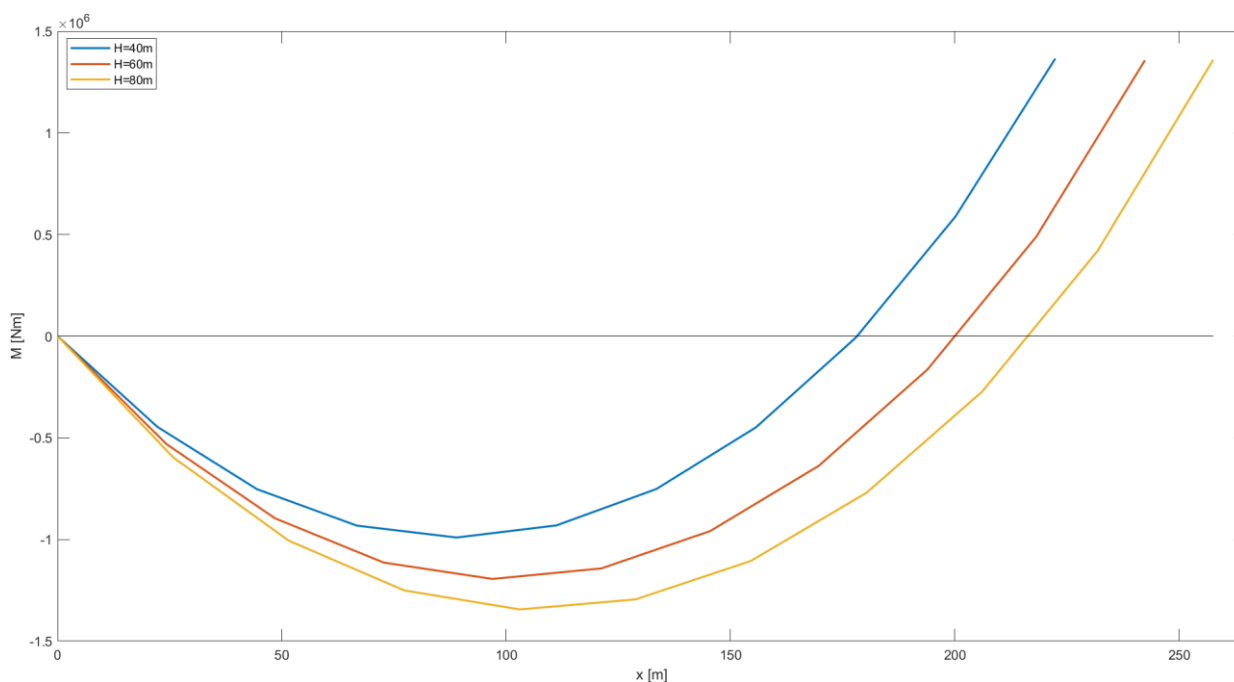
Slika 7.13: Utjecaj dubine morske vode na zakrivljenost cjevovoda i horizontalnu projekciju

Vidljivo je iz priložene slike 7.13. da je od točke dodira sa morskim dnom do određene udaljenosti na horizontali, zakrivljenost cjevovoda jednaka za sva tri slučaja te se zatim mijenja prema podupiraču. Horizontalna projekcija se povećava sa povećanjem instalacijske dubine morske vode. Promatrajući tablicu 7.4 vidljivo je kako se horizontalna duljina l mijenja sa promjenom instalacijske dubine morske vode.

Dubina morske vode H (m)	Horizontalna duljina l (m)
40	222,4
60	242,4
80	257,6

Tablica 7.4 Prikaz horizontalnih duljina l za različite dubine morske vode H

Na slici 7.14. vidljivo je da se iznos negativnog momenta savijanja povećava sa povećanjem dubine morske vode. Ukoliko se poveća dubina morske vode sa 40 na 80m, inducirani iznos negativnog momenta savijanja u cijevi se povećava za 35%.



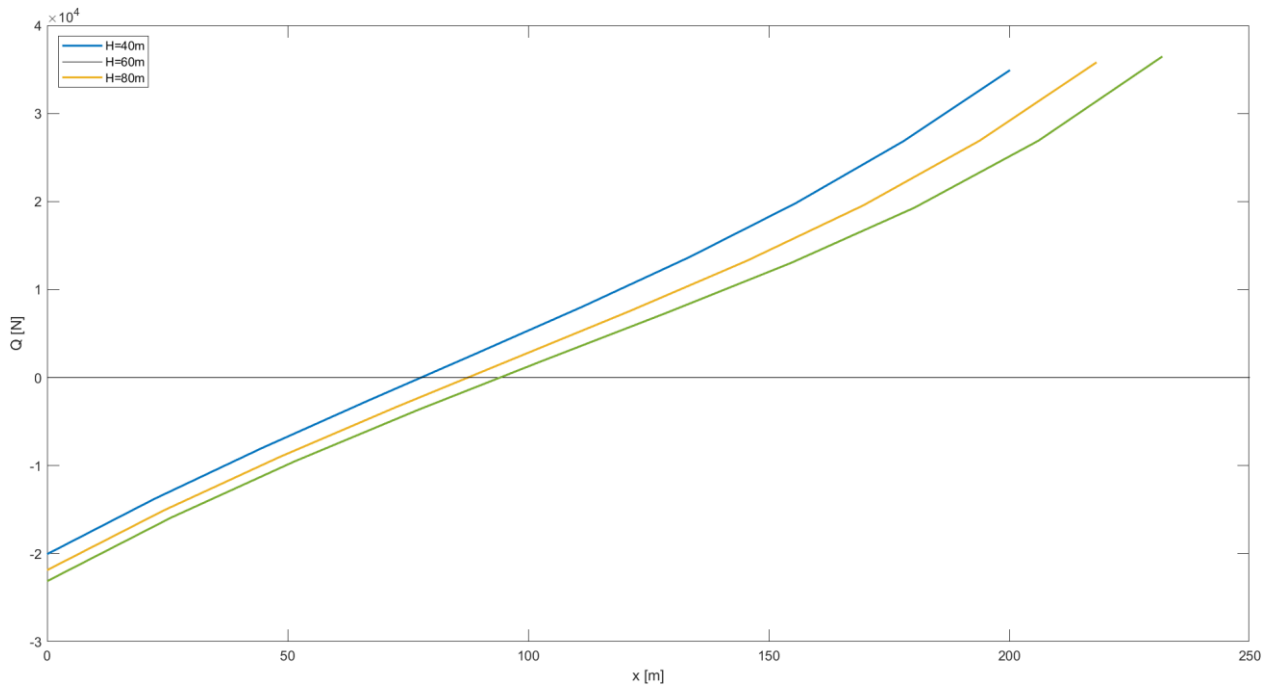
Slika 7.14: Utjecaj dubine morske vode na moment savijanja M

Vrijednosti maksimalnih momenata za različite dubine morske vode te položaj u odnosu na x koordinatu dan je u tablici 7.5.

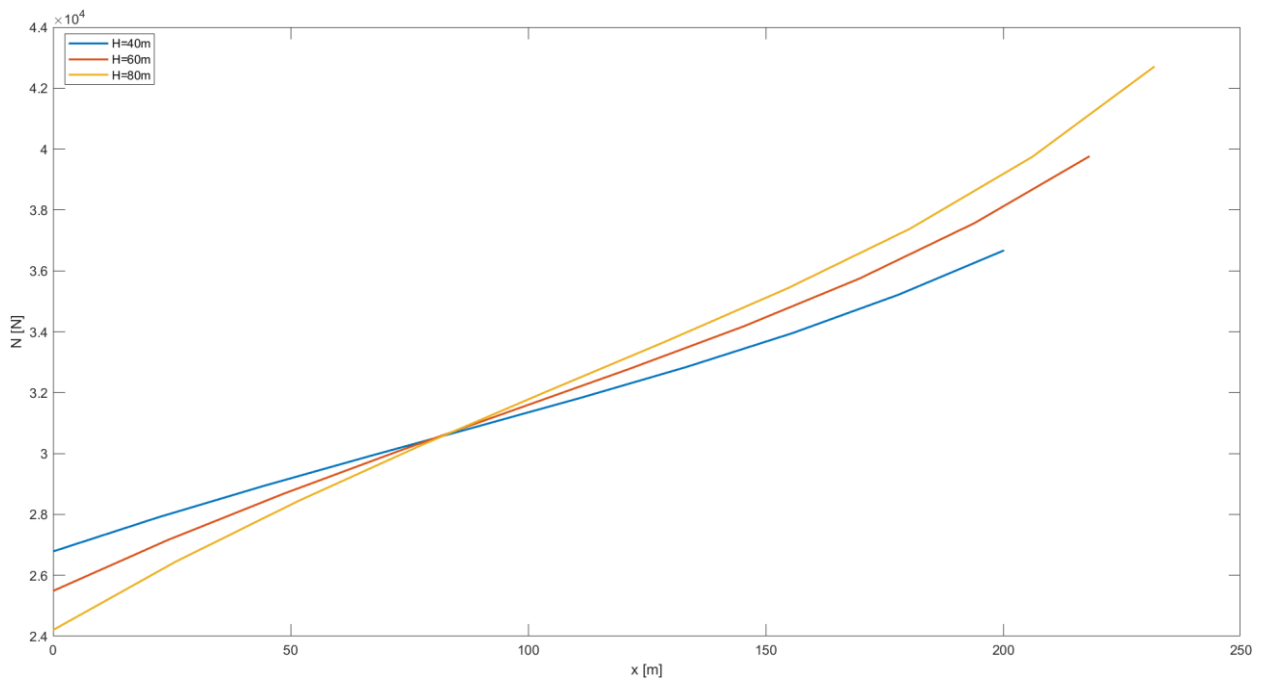
Dubina morske vode H (m)	Položaj maksimalnog momenta savijanja - x koordinata	Maksimalni moment savijanja (Nm)
40	222,4	1.365×10^6
60	242,4	1.357×10^6
80	257,6	1.359×10^6

Tablica 7.5 Vrijednost i položaj maksimalnih momenata savijanja u ovisnosti o dubini morske vode H

Sa promjenom dubine morske vode, iznos poprečne sile koja se javlja u cjevovodu se neznatno povećava i u pozitivnom i u negativnom djelu, a što je vidljivo na slici 7.15.



Slika 7.15: Utjecaj dubine morske vode na poprečnu silu Q



Slika 7.16: Utjecaj dubine morske vode na aksijalnu silu N

Promatrajući ovisnost aksijalne sile N o dubini morske vode vidljivo je:

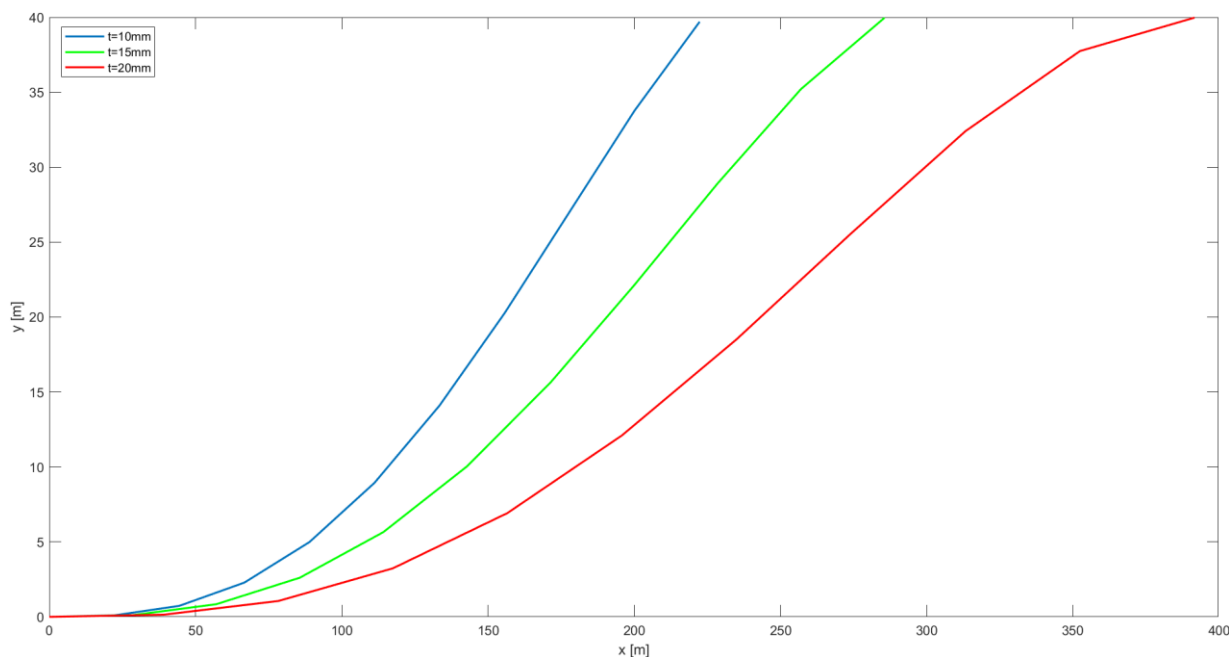
- sa povećanjem dubine morske vode, aksijalna sila se u točki dodira sa morskim dnom povećava
- sa povećanjem dubine morske vode, aksijalna sila se povećava na vrhu podupirača

7.3 Utjecaj debljine stijenke cijevi

Odabir debljine stijenke cijevi predstavlja jednu od značajnijih točaka tokom projektiranja instalacije podmorskog cjevovoda. Kako bi se odabrala optimalna debljina stijenke, postupak je sljedeći:

- odabir minimalne debljine stijenke za projektni unutarnji tlak u cijevi
- odabir minimalne debljine stijenke za projektni vanjski tlak koji djeluje na cijev
- definiranje debljine obloge
- provjera odabrane debljine stijenke koja zadovoljava sve sile koje se javljaju tokom instalacije cjevovoda

Na slici 7.17. vidljiv je utjecaj debljine stijenke na duljinu horizontalne projekcije i zakrivljenost cjevovoda tokom instalacije. Sa porastom stijenke duljina se višestruko povećava, pa tako sa stijenkom od 20mm, u odnosu na početnu od 10mm, duljina se povećala za 169,2m, a shodno tome se i zakrivljenost u overbend i sagbend području značajno povećala, a što je utjecaj povećanja uronjene težine cjevovoda.



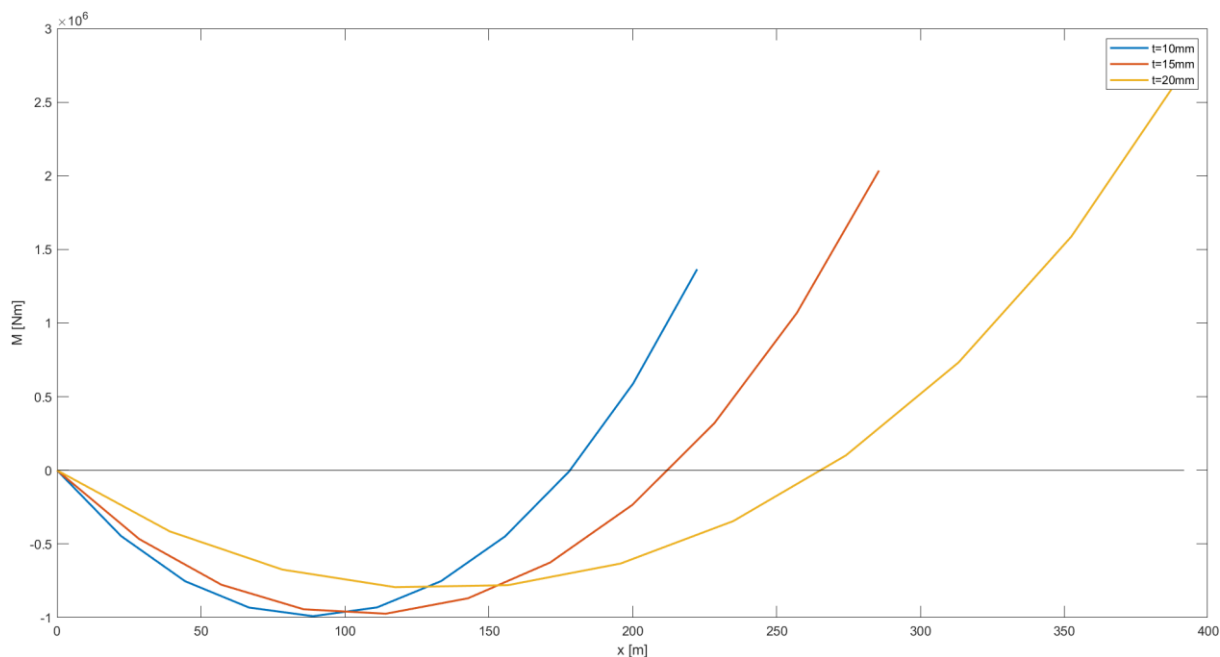
Slika 7.17: Utjecaj debljine stijenke cijevi na zakrivljenost cjevovoda i horizontalnu projekciju

Promatrajući tablicu 7.6 vidljivo je kako se horizontalna duljina l mijenja sa promjenom debljine stijenke cijevi.

Debljina stijenke cijevi (mm)	Horizontalna duljina l (m)
10	222,4
15	285,6
20	391,6

Tablica 7.6 Prikaz horizontalnih duljina l za različite debljine stijenke cijevi

Vidljivo je na slici 7.18. da se sa povećanjem debljine stijenke, moment savijanja u pozitivnom djelu značajno povećao, dok je u negativnom djelu (sagbend područje) on nešto manji sa povećanjem debljine stijenke.



Slika 7.18: Utjecaj debljine stijenke cijevi na moment savijanja M

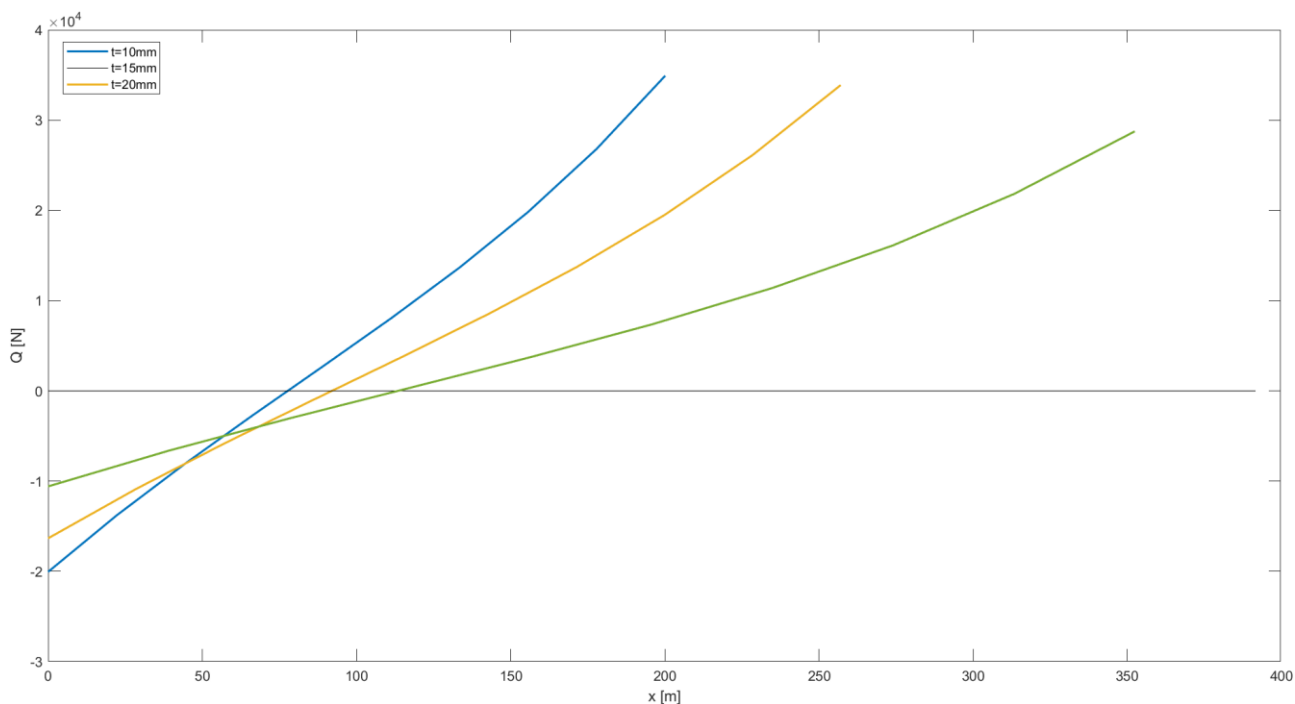
Vrijednosti maksimalnih momenata za različite debljine stijenke cijevi te položaj u odnosu na x koordinatu dan je u tablici 7.7.

Debljina stijenke cijevi (mm)	Položaj maksimalnog momenta savijanja - x koordinata	Maksimalni moment savijanja (Nm)
10	222,4	1.365×10^6
15	285,6	2.036×10^6
20	391,6	2.714×10^6

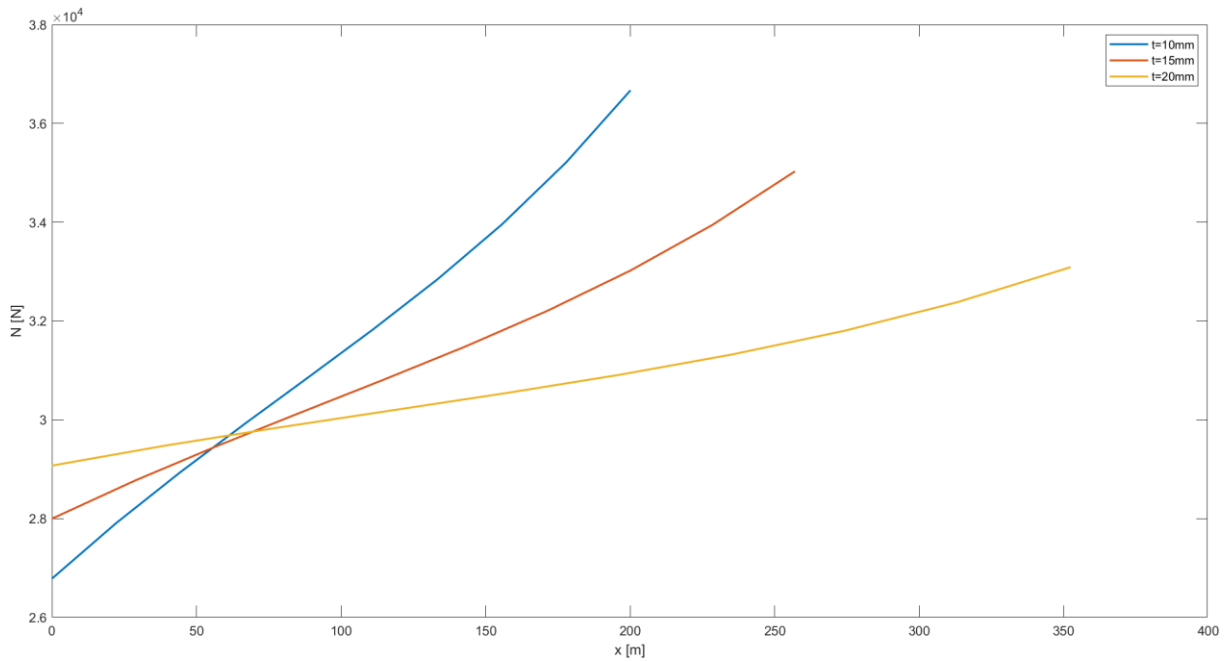
Tablica 7.7 Vrijednost i položaj maksimalnih momenata savijanja u ovisnosti o debljini stijenke cijevi

Iznosi maksimalnih dopuštenih momenata savijanja u ovom slučaju su drugačiji, pošto su promijenjeni parametri cijevi, te prema tome za debljinu stijenke cijevi od 15mm iznosi $M_d = 2.261 \cdot 10^6$ Nm, odnosno $M_d = 3.014 \cdot 10^6$ Nm za debljinu stijenke cijevi od 20mm.

Promatrajući poprečnu silu Q, vidljivo je da je u točki dodira sa morskim dnom, sila najmanja kod debljine stijenke od 15mm, što je slučaj i na vrhu podupirača.



Slika 7.19: Utjecaj debljine stijenke cijevi na poprečnu silu Q



Slika 7.20: Utjecaj debljine stijenke cijevi na aksijalnu silu N

Ukoliko se promatra utjecaj debljine stijenke na aksijalnu silu N, vidljivo je da je ona najmanja kod najveće debljine stijenke (20mm), što se javlja zbog povećanja površine na koju sila djeluje.

8. ZAKLJUČAK

Proces projektiranja u kompleksnim inženjerskim zahvatima, kao što je instalacija podmorskog cjevovoda, zahtijeva značajna ulaganja vremena i resursa kako bi se osigurala sigurnost, stabilnost i funkcionalnost cjevovodnog sustava. Prilikom projektiranja, nužno je detaljno razmotriti različite aspekte, kao što su hidraulički uvjeti, geotehničke karakteristike morskog dna, mehanička svojstva materijala cijevi te interakciju s okolinom. Učinkovito modeliranje i simulacija uz pomoć suvremenih alata za numeričku analizu doprinose razumijevanju ponašanja cjevovoda pod različitim opterećenjima i uvjetima, čime se osiguravaju kvalitetni rezultati i optimizirani projektantski pristupi.

U ovom radu prikazan je odabrani pojednostavljeni matematički model instalacije podmorskog cjevovoda koji je služio kao podloga za algoritam za rješavanje numeričkog problema diferencijalne jednadžbe, te koji je implementiran unutar programskog paketa MATLAB. U radu su prikazani rezultati polegnutog cjevovoda za S-lay tip polaganja, a za zadane ulazne parametre cjevovoda te prikazani grafovi momenta savijanja, poprečne i aksijalne sile koje se javljaju u cjevovodu tokom instalacije. Ovaj rad također je istražio utjecaje sile napinjača, dubine morske vode i debljine stijenke cijevi na navedene karakteristične veličine sila i momenta koji se javljaju u cjevovodu tokom instalacije. Prikazani odabrani model pruža mogućnost nadogradnje kako bi se obuhvatili dodatni zahtjevi i okolišni utjecaji koji se javljaju pri planiranju polaganja podmorskih cjevovoda.

Hipoteza diplomskog rada potvrđena je kroz analizu i interpretaciju dobivenih rezultata. Temeljito je prikazano da je moguće pomoću odabranog matematičkog modela izvesti skriptu unutar programskog alata MATLAB, a koja služi za praktično dobivanje rezultata.

LITERATURA

- [1] Mousselli, A.H., Offshore pipeline design, analysis and methods, PennWell Books, 1981.
- [2] Guo, B. et al., Offshore pipelines, Gulf Professional Publishing, Elsevier, Oxford, 2005.
- [3] Braestrup, W.M. et al., Design and instalation of marine pipelines, Blackwell Science Ltd., 2005.
- [4] Ivić, S., Modeliranje i optimizacija polaganja podmorskih cjevovoda, doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2014.
- [5] Karabaić, D., Optimizacija konfiguracije S-lay postupka polaganja podmorskih cjevovoda, doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2012.
- [6] Jabbar Mawat, M., Static analysis of stresses induced in suspended submarine pipeline during installation using finite element method, diplomski rad, University of Basrah, 2012.
- [7] Kablar, I., Tehnologije polaganja podmorskih cjevovoda u priobalnom području, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2007.
- [8] Kotov, A.A. et al., An approximate calculation of the S-lay method offshore pipeline, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 302, 2019.
- [9] P 412-81 Recommendations for the design and construction of offshore underwater oil and gas pipelines, VNIIST, Moscow, 1981.
- [10] DNV, Submarine Pipeline Systems, DNV-ST-F101, 2021.
- [11] British Standards Institution (BSI), Code of Practice for Pipelines Part 3: Pipelines Subsea: Design, Construction and Installation, , BS 8010-3, 1993.
- [12] American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems, 2022.
- [13] American Society of Mechanical Engineers , ASME B31.4: Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries, 2022.
- [14] Reel-lay vessels, Royal IHC (<https://www.royalihc.com/offshore-energy/offshore-vessels/pipe-lay-vessels/reel-lay-vessels>, pristupljeno 23.07.2023.)

POPIS SLIKA

Slika 2.1: Metode polaganja cjevovoda [4]	5
Slika 2.2: Instalacija cjevovoda S-lay metodom [4].....	6
Slika 2.3: Dijagrami momenata savijanja kod instalacije [9].....	7
Slika 2.4: Prikaz barže za reel lay instalaciju [14]	8
Slika 2.5: Metoda povlačenja po dnu [3]	9
Slika 2.6: Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna [3].....	10
Slika 2.7: Metoda povlačenja cjevovoda po površini [3]	11
Slika 2.8: Metoda povlačenja cjevovoda ispod površine [3].....	11
Slika 3.1: Tipičan poprečni presjek obložene cijevi.....	14
Slika 4.1: Distribucija momenata savijanja [1].....	19
Slika 4.2: Tipična varijacija odnosa sile napinjača i dužine podupirača [1]	19
Slika 4.3 Dijagram slobodnih tijela (eng. FBD) [1]	20
Slika 4.4: Metoda lančanice [5].....	23
Slika 5.1: Radijalno opterećenje cijevi	26
Slika 5.2: Utjecaji na normalna uzdužna naprezanja [7]	27
Slika 5.3: Nepoduprti raspon cijevi	28
Slika 5.4: Pojava vrtloženja uslijed morskih struja [7]	29
Slika 5.5: Sile koje djeluju na cjevovod pri morskom dnu [2]	29
Slika 5.6: Širenje cijevi na morskom dnu uslijed utjecaja strujanja i eksploatacijskih parametara	32
Slika 5.7: Geometrijske karakteristike čelične cijevi obložene cementom	33
Slika 6.1: Prikaz karakterističnih veličina i sila kod S-lay polaganja.....	36
Slika 7.1: Linija cjevovoda u bezdimenzijskim koordinatama η i ξ	45
Slika 7.2: Linija cjevovoda u dimenzijskim koordinatama x i y	45
Slika 7.3: Graf momenta savijanja u ovisnosti o bezdimenzijskoj koordinati ξ	46
Slika 7.4: Graf momenta savijanja u ovisnosti o dimenzijskoj koordinati x	47
Slika 7.5: Graf poprečne sile Q u ovisnosti o bezdimenzijskoj koordinati ξ	47
Slika 7.6: Graf poprečne sile Q u ovisnosti o dimenzijskoj koordinati x	48
Slika 7.7: Graf aksijalne sile N u ovisnosti o bezdimenzijskoj koordinati ξ	48
Slika 7.8: Graf aksijalne sile N u ovisnosti o dimenzijskoj koordinati x	49
Slika 7.9: Utjecaj sile napinjača na zakrivljenost cjevovoda i horizontalnu duljinu l ..	50
Slika 7.10: Utjecaj sile napinjača na moment savijanja M	51

Slika 7.11: Utjecaj sile napinjača na poprečnu silu Q	52
Slika 7.12: Utjecaj sile napinjača na aksijalnu silu N	52
Slika 7.13: Utjecaj dubine morske vode na zakrivljenost cjevovoda i horizontalnu duljinu l	53
Slika 7.14: Utjecaj dubine morske vode na moment savijanja M	54
Slika 7.15: Utjecaj dubine morske vode na poprečnu silu Q.....	55
Slika 7.16: Utjecaj dubine morske vode na aksijalnu silu N	55
Slika 7.17: Utjecaj debljine stijenke cijevi na zakrivljenost cjevovoda i horizontalnu duljinu l	56
Slika 7.18: Utjecaj debljine stijenke cijevi na moment savijanja M.....	57
Slika 7.19: Utjecaj debljine stijenke cijevi na poprečnu silu Q.....	58
Slika 7.20: Utjecaj debljine stijenke cijevi na aksijalnu silu N.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 3.1: Zahtijevana mehanička svojstva čeličnih cijevi prema ISO 3183-3	15
Tablica 4.1: Usporedba metoda za analizu naprezanja u cjevovodu	20
Tablica 7.1: Parametri cjevovoda	44
Tablica 7.2: Prikaz horizontalnih duljina l za različite veličine sile napinjača X_A	50
Tablica 7.3: Vrijednost i položaj maksimalnih momenata savijanja u ovisnosti o sili napinjača X_A	51
Tablica 7.4 Prikaz horizontalnih duljina l za različite dubine morske vode H	53
Tablica 7.5 Vrijednost i položaj maksimalnih momenata savijanja u ovisnosti o dubini morske vode H	54
Tablica 7.6 Prikaz horizontalnih duljina l za različite debljine stijenke cijevi.....	57
Tablica 7.7 Vrijednost i položaj maksimalnih momenata savijanja u ovisnosti o debljini stijenke cijevi	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica (SI)	Opis
a	m/s^2	Ubrzanje
a	m	Pomak neutralne osi presjeka
A_c	m^2	Površina poprečnog presjeka betonske obloge izloženog tlačnom naprezanju čelične cijevi
A_{VL}	m^2	Presjek vodne linije
A_s	m^2	Površina poprečnog presjeka čelične cijevi
C_D	-	Koeficijent sile otpora
C_L	-	Koeficijent sile dizanja
C_M	-	Koeficijent inercijske sile
D	m	Vanjski promjer cijevi
du/dt	m/s^2	Ubrzanje vodnih čestica uslijed valova
e_c	N/m^2	Raspored normalnih tlačnih naprezanja i čeličnog i cementnog dijela cijevi
e_s	N/m^2	Raspored normalnih vlačnih naprezanja u čeličnoj cijevi (bez utjecaja cementne obloge)
E	N/m^2	Modul elastičnosti
E_c	N/m^2	Modul elastičnosti betonske obloge
E_s	N/m^2	Modul elastičnosti čelika
F_D	N/m	Sila otpora po jedinici duljine
F_I	N/m	Sila inercije po jedinici duljine
F_L	N	Sila uzgona
F_T	N	Ukupna horizontalna sila valova i morskih struja
F_X	N	Uzdužna sila duž poprečnog presjeka cijevi
g	m/s^2	Gravitacijsko ubrzanje
H	m	Dubina morske vode
I	m^4	Moment inercije poprečnog presjeka
l	m	Horizontalna duljina polegnutog cjevovoda
m	kg	Masa sustava
m	-	Bezdimenzijski moment savijanja
M	Nm	Moment savijanja u vertikalnoj ravnini
M_A	Nm	Reakcijski moment savijanja na podupiraču
N	N	Aksijalna sila u cijevi
N_A	N	Reakcijska sila na podupiraču

N_D	N	Reakcijska sila na morskom dnu
p_e	Pa	Vanjski tlak
p_i	Pa	Unutarnji tlak
q	N/m	Uronjena težina cijevi po jedinici duljine
q	N/m	Jednoliko raspoređeno opterećenje
Q	N	Poprečna sila na cijev
Q_A	N	Reakcijska sila na podupiraču
Q_D	N	Reakcijska sila na morskom dnu
R	m	Radijus zakrivljenosti
R_p	m	Radijus zakrivljenosti presjeka
s	m	Lučna duljina polegnute cijevi
t	s	Vrijeme
t	m	Minimalna debljina stijenke
T	s	Period poniranja
T	N	Sila napinjača
T_D	N	Efektivna sila napinjača na kraju cijevi
U	m/s	Brzina mora uslijed valova
V	m/s	Brzina struje
w_s	N/m	Težina uronjenog cjevovoda
X	m	Amplituda poniranja
X_A	N	Sila napinjača
z	m	Vertikalna ordinata presjeka
α	$^\circ$	Kut podupirača
β	$^\circ$	Kut morskog dna u odnosu na horizontalu
γ_{DF}	-	Faktor sigurnosti
δ	mm	Debljina stijenke cijevi
ε	-	Deformacija
θ	$^\circ$	Kut između tangente na krivlju s i osi x
κ	-	Bezdimenzijska dužinska težina cijevi
μ	-	Faktor trenja između cijevi i morskog tla
ρ	kg/m^3	Gustoća morske vode
ρ_{st}	kg/m^3	Gustoća čelika
ρ_w	kg/m^3	Gustoća morske vode
σ	N/mm^2	Aksijalno naprezanje
σ	N/mm^2	Vlačna čvrstoća

σ_b	N/mm^2	<i>Normalno savojno naprezanje</i>
σ_e	N/mm^2	<i>Normalno ekvivalentno naprezanje</i>
σ_{ec}	N/mm^2	<i>Normalno naprezanje uslijed utjecaja završetka cijevi</i>
σ_h	N/mm^2	<i>Normalno radijalno naprezanje</i>
σ_h	N/mm^2	<i>Radijalno naprezanje u cijevi</i>
σ_l	N/mm^2	<i>Normalno uzdužno naprezanje</i>
σ_t	N/mm^2	<i>Termičko naprezanje</i>
σ_0	N/mm^2	<i>Minimalna granica popuštanja cijevi</i>
τ_{lh}	N/mm^2	<i>Tangencijalno smično naprezanje</i>
χ	-	<i>Bezdimenzijska horizontalna napetost</i>

PRILOZI

Prilog 1. MATLAB programski kod

Prilog 1. MATLAB programski kod S-lay solver.mlx

```
H = 40.0;
E1 = 200000000000.0;
r = 0.40;
R = 0.41;
delta = R - r;
J = 3.14*delta*r^3;
fprintf('H = %.1f E1 = %.1f r = %.2f R = %.2f delta = %.2f J = %.2f\n', H, E1,
r, R, delta, J);

sigma_d = 300000000.0;
M_d = 3.14*delta*r^2*sigma_d;
EJ = E1*J;
fprintf('sigma_d = %.1f M_d = %.1f EJ = %.1f\n', sigma_d, M_d, EJ);

rho = 77000.0;
rho_v = 10000.0;
A = 2*3.14*delta*r;
A_br = 3.14*r^2;
q_v = rho_v*A_br - rho*A;
kq = 0.1;
q = kq*q_v;
k = 0.9;
M_a = k*M_d;
X_a = 30000.0;
fprintf('rho = %.1f rho_v = %.1f A = %.2f A_br = %.2f q_v = %.2f kq = %.1f q =
%.2f\n', rho, rho_v, A, A_br, q_v, kq, q);

lambda = 5.0; % početna vrijednost lambde
counter = 0;
while true
    counter = counter + 1;
    l = lambda*H;
    a = sqrt(1. + 1/lambda^2);
    fprintf('lambda = %.2f l = %.1f a = %.2f k = %.1f M_a = %.1f X_a =
%.1f\n', lambda, l, a, k, M_a, X_a);

    kappa = q*l^3/EJ;
    chi = X_a*l^2/EJ;
    m = M_a*l/EJ;
    fprintf('kappa = %.2f chi = %.2f m = %.2f\n', kappa, chi, m);

    fcn = @(x, y) [y(2); (0.5*a*kappa*lambda*x*(1. - x) + chi*(y(1) - x) -
m*lambda*x)*(1 + y(2)^2/lambda^2)^1.5];
    init_cond = [0; 0];
    sol = ode45(fcn, [0, 1], init_cond);
```

```
% izvadak parametra eta i njenih derivacija iz rješenja jednačbe
eta = sol.y(1,:);
eta1 = sol.y(2,:);
eta2 = zeros(size(eta));
for i = 1:length(sol.x)
    dy = fcn(sol.x(i), sol.y(:,i));
    eta2(i) = dy(2);
end

% provjera rubnih uvjeta sa zadanom tolerancijom
eta_1 = sol.y(1, end);
if abs(eta_1) >= 0.99 && abs(eta_1) <= 1.01
    break
end

% update vrijednosti lambde i pokretanje petlje
lambda = lambda + 0.01;
if lambda >= 10.0
    fprintf('Nije moguće pronaći odgovarajuću vrijednost lambde.\n')
    break
end
end
fprintf('Broj iteracija iznosi %d.\n', counter);

% graf rješenja eta
plot(sol.x, sol.y(1,:), 'LineWidth', 2);
xlabel('\Xi');
ylabel('\eta');
fprintf('eta(1) = %.3f\n', eta_1);
fprintf('lambda = %.3f\n', lambda);
xlim([0.000 1.000])
ylim([0.00 1.00])

% izračun M i Q
M = -EJ .* eta2 ./ (H .* lambda.^2 .* (1 + (eta1./lambda).^2).^1.5);
Q = 1 / (lambda*H) * (diff(M,1)) / (sol.x(2) - sol.x(1));

% graf momenta savijanja M
plot(sol.x, M, 'LineWidth', 2);
hold on
yline(M_d, '--r', 'LineWidth', 1.5);
yline(-M_d, '--r', 'LineWidth', 1.5);
plot([sol.x(1), sol.x(end)], [0, 0], '-k')
xlabel('\Xi')
ylabel('M [Nm]')
xlim([0,1])
hold off
```

```
% graf poprečne sile Q
plot(sol.x(1:end-1), Q, 'LineWidth', 2);
xlabel('\Xi')
ylabel('Q [N]')
hold on
plot([sol.x(1), sol.x(end)], [0, 0], '-k')
set(gca, 'YTickLabel', get(gca, 'YTick'))
hold off

Qa = subs(Q, eta_1, 1);
Na = 1/lambda * (sqrt(lambda^2 + 1)*X_a + Qa);
N = Na - q*H*(1-eta_1);
fprintf('Qa = %.3f Na = %.3f N = %.3f\n', Qa, Na, N);

% graf aksijalne sile N
plot(sol.x(1:end-1), N, 'LineWidth', 2);
xlabel('\Xi');
ylabel('N [N]');
set(gca, 'YTickLabel', get(gca, 'YTick'))

length_exact = sol.x * 222.40;
height_exact = sol.y(1,:) * 40;

plot(length_exact, height_exact, 'LineWidth', 2);
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
xlim ([0 222.5])

plot(length_exact, height_exact, 'LineWidth', 2);
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');

% graf momenta savijanja M u dimenzijskim varijablama
plot(length_exact, M, 'LineWidth', 2);
hold on
yline(M_d, '--r', 'LineWidth', 1.5);
yline(-M_d, '--r', 'LineWidth', 1.5);
plot([length_exact(1), length_exact(end)], [0, 0], '-k')
xlabel('x [m]')
ylabel('M [Nm]')
xlim ([0 225])
hold off

% graf poprečne sile Q u dimenzijskim varijablama
plot(length_exact(1:end-1), Q, 'LineWidth', 2);
```

```
xlabel('x [m]')
ylabel('Q [N]')
hold on
plot([length_exact(1), length_exact(end)], [0, 0], '-k')
set(gca, 'YTickLabel',get(gca,'YTick'))
xlim ([0 225])
hold off

% graf aksijalne sile N u dimenzijskim varijablama
plot(length_exact(1:end-1), N, 'LineWidth', 2);
xlabel('x [m]');
ylabel('N [N]');
set(gca, 'YTickLabel',get(gca,'YTick'))
xlim ([0 225])
```