

# Procjena strukturnog integriteta podmorskog cjevovoda

---

Ćustić, Lamia

Master's thesis / Diplomski rad

2015

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:087104>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Lamia Ćustić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:

Doc.dr.sc. Ivan Čatipović

Student:

Lamia Čustić

Zagreb, 2015

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se voditelju rada Doc.dr.sc. Ivanu Čatipoviću na odvojenom vremenu i pomoći tijekom izrade rada.

Lamia Čustić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Lamia Čustić** Mat. br.: 0035176860

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROCJENA STRUKTURNOG INTEGRITETA PODMORSKOG CJEVOVODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF SUBSEA PIPELINE**

Opis zadatka:

Efikan transport ugljikovodika ostvaruje se cjevovodima. Ovakav tip cjevovoda može biti čitavom svojom duljinom ili samo jednim dijelom instaliran na morsko dno. U ovom diplomskom radu razmatrat će se podmorska dionica cjevovoda za transport nafte.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Dimenzionirati cjevovod tj. definirati gabarite čelične stjenke i betonske obloge.
2. Predložiti korekciju profila podmorske trase (u čitavoj njezinoj duljini) s ciljem smanjenja opterećenja na razmatrani cjevovod.
3. Provesti proračun naprezanja cjevovoda u uvjetima eksploatacije.
4. Provesti procjenu strukturnog integriteta prema pravilima Det Norske Veritas-a.

Napomena: U radu koristiti pravila DNV-a: Offshore Standard, DNV-OS-F101, Submarine Pipeline Systems, October 2010.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predvideni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

*Čatipović*  
Doc. dr. sc. Ivan Čatipović

Predsjednica Povjerenstva:

*Nasija Degiuli*  
Prof. dr. sc. Nasija Degiuli

**SADRŽAJ**

SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1.UVOD .....	1
2. PODMORSKI CJEVOVODI.....	2
2.1 Materijali cjevovoda.....	2
2.1.1 Čelične cijevi.....	3
2.1.2 Polietilenske cijevi .....	4
2.1.3 Stakloplastične cijevi.....	4
2.2 Spajanje čeličnih cijevi.....	5
2.3 Načini polaganja cjevovoda .....	6
2.3.1 S-tip polaganja cjevovoda .....	7
2.3.2 J-tip polaganja cjevovoda.....	8
2.3.3 Polaganje pomoću bubnja za namatanje .....	9
2.4 Posebne metode polaganja cjevovoda.....	10
2.4.1 Metoda povlačenja po dnu .....	10
2.4.2 Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna .....	11
2.4.3 Metoda površinskog tegljenja .....	12
3. OPTEREĆENJA NA PODMORSKI CJEVOVOD .....	14
3.1 Stalna (operativna) opterećenja.....	15
3.1.1 Unutarnji statički tlak.....	15
3.1.2 Udarni tlak.....	16
3.1.3 Operativne temperature .....	16

---

3.2 Promjenjiva (okolišna) opterećenja.....	17
3.2.1 Hidrodinamička sila od stacionarne morske struje .....	17
3.2.2 Odvajanje graničnog sloja .....	19
3.2.3 Interakcija valova i morske struje .....	20
3.2.4 Koeficijenti sila .....	22
3.3 Slučajna opterećenja.....	22
3.4 Opterećenja prilikom instalacije cjevovoda .....	23
4. MODELI PODMORSKOG CJEVOVODA .....	24
4.1 Opis modela.....	24
4.2 Programski paket LS-DYNA .....	25
4.3 Teorija Belytschkove grede.....	25
4.4 Cjevovod na morskom dnu .....	26
4.4.1 Veliki pomaci .....	27
4.4.2 Kontakt cjevovoda i morskog dna.....	27
4.5 Podmorske trase cjevovoda.....	28
4.6 Optimizacija podmorske trase cjevovoda .....	29
5. ANALIZA MODELA .....	30
5.1 Karakteristike cjevovoda.....	30
5.2 Originalni profil podmorske trase .....	39
5.2.1 Usporedba profila morskog dna i progibne linije.....	40
5.2.2 Moment savijanja .....	41
5.3 Korigirani profil podmorske trase .....	43
5.3.1 Usporedba korigiranog profila morskog dna i progibne linije .....	44
5.3.2 Moment savijanja .....	45

---

6. PRORAČUN NAPREZANJA .....	46
6.1 Opis postupka.....	46
6.2 Proračun naprezanja za originalni profil podmorske trase.....	48
6.2.1 Ukupna normalna naprezanja.....	52
6.2.2 Ekvivalentna naprezanja .....	53
6.3 Proračun naprezanja za korigirani profil podmorske trase.....	54
6.3.1 Ukupna normalna naprezanja.....	55
6.3.2 Ekvivalentna naprezanja .....	56
6.4 Procjena strukturnog integriteta .....	57
6.4.1 Rezultati za originalni profil .....	64
6.4.2 Rezultati za korigirani profil .....	66
7. ZAKLJUČAK .....	67
8. LITERATURA.....	69
PRILOG A- <i>Smična sila i reakcija podloge za originalni i korigirani profil</i> .....	70
PRILOG B- <i>Trokutasti i testni optimizirani profil podmorske trase</i> .....	74
PRILOG C- <i>Cirkularna, aksijalna i savojna naprezanja za originalni i korigirani profil</i> .....	78



**POPIS SLIKA**

Slika 1. Shematski prikaz S-tipa polaganja cjevovoda .....	7
Slika 2. Shematski prikaz J-tipa polaganja cjevovoda .....	8
Slika 3. Shematski prikaz barže s namotanim cjevovodom .....	9
Slika 4. Metoda povlačenja po dnu .....	11
Slika 5. Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna .....	12
Slika 6. Metoda povlačenja cjevovoda po površini .....	13
Slika 7. Metoda povlačenja cjevovoda ispod površine .....	13
Slika 8. Granični sloj .....	20
Slika 9. Model cjevovoda na morskom dnu .....	39
Slika 10. Usporedna originalnog profila i progibne linije .....	40
Slika 11. Moment savijanja .....	42
Slika 12. Usporedba korigiranog profila i progibne linije .....	44
Slika 13. Moment savijanja za korigirani profil .....	45
Slika 14. Omjer normalnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda .....	52
Slika 15. Omjer ekvivalentnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda .....	53
Slika 16. Omjer normalnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda .....	55
Slika 17. Omjer ekvivalentnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda .....	56
Slika 18. Smična sila za originalni profil .....	70
Slika 19. Reakcija podloge za originalni profil .....	71
Slika 20. Smična sila za korigirani profil .....	72
Slika 21. Reakcija podloge za korigirani profil .....	73
Slika 22. Usporedba trokutastog profila i progibne linije .....	74
Slika 23. Moment savijanja za trokutasti profil .....	75
Slika 24. Usporedba testnog optimiziranog profila i progibne linije .....	76
Slika 25. Moment savijanja za testni optimizirani profil .....	77
Slika 26. Cirkularna naprezanja za originalni profil .....	78

Slika 27. Aksijalna naprezanja za originalni profil .....	79
Slika 28. Savojna naprezanja za originalni profil .....	80
Slika 29. Cirkularna naprezanja za korigirani profil .....	81
Slika 30. Aksijalna naprezanja za korigirani profil .....	82
Slika 31. Savojna naprezanja za korigirani profil .....	83

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Zadane karakteristike cjevovoda .....	30
Tablica 2. Izračunati promjeri .....	32
Tablica 3. Izračunate površine presjeka .....	33
Tablica 4. Distribuirane mase za cijevi .....	35
Tablica 5. Distribuirane mase za teret i napunjene cijevi .....	36
Tablica 6. Distribuirani uzgon i težine .....	37
Tablica 7. Distribuirano opterećenje .....	38
Tablica 8. Granični momenti .....	41
Tablica 9. Opće karakteristike cjevovoda .....	46
Tablica 10. Ekstremne vrijednosti naprezanja .....	51
Tablica 11. Ekstremne vrijednosti naprezanja .....	54
Tablica 12. Ulazni podatci .....	64
Tablica 13. Rezultati proračuna .....	65
Tablica 14. Rezultati proračuna .....	66

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_D$	N	sila otpora morske struje
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća morske vode
$C_D$		koeficijent otpora
$D$	m	vanjski promjer cjevovoda
$U$	m/s	horizontalna komponenta brzine morske struje
$F_L$	N	sila hidrodinamičkog uzgona
$C_L$		koeficijent hidrodinamičkog uzgona
$F_M$	N	inercijska sila
$C_M$		inercijski koeficijent
$D_o$	m	vanjski promjer čelične cijevi
$D_i$	m	unutarnji promjer čelične cijevi
$t$	m	debljina stijenke
$D_{op}$	m	vanjski promjer plastične obloge
$t_p$	m	debljina plastične obloge
$D_{oc}$	m	vanjski promjer cementne obloge
$t_c$	m	debljina cementne obloge
$\rho_{\check{c}}$	$\text{kg/m}^3$	gustoća čelika
$\rho_p$	$\text{kg/m}^3$	gustoća plastične obloge
$\rho_c$	$\text{kg/m}^3$	gustoća cementa
$\rho_n$	$\text{kg/m}^3$	gustoća nafte
$\rho_v$	$\text{kg/m}^3$	gustoća slatke vode
$g$	$\text{m/s}^2$	gravitacijska akceleracija
$A_i$	$\text{m}^2$	površina unutarnjeg presjeka
$A_{\check{c}}$	$\text{m}^2$	površina presjeka čelika
$A_p$	$\text{m}^2$	površina presjeka plastične obloge
$A_c$	$\text{m}^2$	površina presjeka cementne obloge
$A_{sve}$	$\text{m}^2$	površina vanjskog presjeka
$m_{\check{c}}$	kg/m	distribuirana masa čelika
$m_p$	kg/m	distribuirana masa plastične obloge

Oznaka	Jedinica	Opis
$m_c$	kg/m	distribuirana masa cementne obloge
$m_{uk}$	kg/m	ukupna distribuirana masa
$m_n$	kg/m	distribuirana masa nafte
$m_{napn}$	kg/m	distribuirana masa cijevi napunjene naftom
$q_b$	N/m	distribuirani uzgon
$q_{praz}$	N/m	distribuirana težina prazne cijevi
$q_{naf}$	N/m	distribuirana težina cijevi napunjene naftom
$M$	Nm	moment savijanja
$R(x)$	m	radijus zakrivljenosti dna
$E$	N/m <sup>2</sup>	Youngov modul elastičnosti
$I$	m <sup>4</sup>	moment inercije
$M_{dg}$	Nm	donji granični moment
$M_{gg}$	Nm	gornji granični moment
$p$	Pa	maksimalni manometarski tlak na ulazu u cjevovod
$SYMS$	N/m <sup>2</sup>	minimalna granica popuštanja
$\alpha_U$		faktor čvrstoće materijala
$f_y$	N/m <sup>2</sup>	granica popuštanja
$W$	m <sup>3</sup>	moment otpora
$S$	m <sup>2</sup>	smična površina
$p_i$	Pa	unutarnji tlak
$p_e$	Pa	vanjski tlak
$y_s$	m	koordinata cjevovoda
$T_R$	N	efektivna aksijalna sila
$F_a$	N	aksijalna sila
$\sigma_h$	N/m <sup>2</sup>	cirkularno naprezanje
$\sigma_a$	N/m <sup>2</sup>	aksijalno naprezanje
$\sigma_b$	N/m <sup>2</sup>	savojno naprezanje
$\sigma_l$	N/m <sup>2</sup>	ukupno normalno naprezanje
$\tau$	N/m <sup>2</sup>	smično naprezanje
$\sigma_e$	N/m <sup>2</sup>	ekvivalentno Von-Misesovo naprezanje
$f_u$	N/m <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$SMTS$	N/m <sup>2</sup>	minimalna vlačna čvrstoća

Oznaka	Jedinica	Opis
$t_1$	m	karakteristična debljina stijenke
$t_{fab}$	m	tolerancija za debljinu
$p_{bt1}$	Pa	tlak koji uzrokuje puknuće cjevovoda
$p_{lx}$	Pa	lokalni tlak
$\gamma_m$		faktor otpora materijala
$\gamma_{SC}$		faktor sigurnosti
$p_{elt1}$	Pa	granični vanjski tlak za lokalno izvijanje u elastičnom području
$\nu$		Poissonov koeficijent
$p_{pt1}$	Pa	granični vanjski tlak za lokalno izvijanje u plastičnom području
$\alpha_{fab}$		faktor izrade
$p_{ct1}$	Pa	karakteristični vanjski tlak koji uzrokuje lokalno izvijanje
$f_o$		ovalnost
$M_{sd}$	Nm	moment uslijed kombiniranog opterećenja
$M_F$	Nm	moment od operativnih opterećenja
$M_{gg}$	Nm	gornji granični moment
$\gamma_F$		faktor utjecaja operativnog opterećenja
$\gamma_C$		faktor stanja
$\gamma_E$		faktor utjecaja okolišnih opterećenja
$M_E$	Nm	moment uslijed okolišnih opterećenja
$S_{sd}$	N	sila uslijed kombiniranog opterećenja
$S_F$	N	sila uslijed operativnog opterećenja
$M_{pt2}$	Nm	granični moment
$S_{pt2}$	N	granična aksijalna sila

## **SAŽETAK**

Cjevovodi predstavljaju efikasan način transporta ugljikovodika. Ovakav tip cjevovoda može biti čitavom svojom duljinom ili samo jednim dijelom instaliran na morsko dno.

U ovom diplomskom radu razmatrana je podmorska dionica cjevovoda za transport nafte. Za položen podmorski cjevovod napravljene su analize u programskom paketu LS-DYNA, za dva različita profila morskog dna. Dobivenim rezultatima napravljena je procjena strukturnog integriteta prema pravilima Det Norske Veritasa. Prvi profil predstavlja zatečeno morsko dno na zadanoj ruti, a drugi profil je dobiven optimizacijom. Korekcija profila je napravljena s ciljem smanjenja troškova podmorskih radova.

U radu je korišten pojednostavljen trokutasti oblik profila za testiranje navedenog optimizacijskog postupka. Rezultati testiranja prikazani su u Prilogu B.

ključne riječi: podmorski cjevovod; LS-DYNA; strukturni integritet; morsko dno; korekcija dna

## **SUMMARY**

Pipelines represent an efficient way to transport hydrocarbons . This type of pipe can be installed on the seabed all over its length or only partially .

This master thesis is about subsea section of the pipeline for oil transport . For laid submarine pipeline analysis was done in the software package LS - DYNA , for two different profile of the seabed . Calculation of the structural integrity was made using rules of Det Norske Veritas . The first profile is taken as existing state of the seabed at the given route , and the second profile is obtained by optimization . The correction profile is done to reduce the cost of the underwater work.

In the thesis simplified triangular shape of the profile is used to test mentioned optimization procedure . Testing results are shown in Annex B.

keywords: subsea pipeline; LS-DYNA; structural integrity; seabed ; correction of seabed



## 1.UVOD

Podmorski cjevovodi su položeni na morsko dno i predstavljaju efikasan način transporta ugljikovodika. Mogu se koristiti i za transport otpadnih voda u priobalnom području.

Razvojem tehnologije uvedene su tehnike instalacije cjevovoda u gotovo svim uvjetima i raznih dimenzija. Primjer podmorskog cjevovoda je plinovod Langeled koji prenosi plin od Norveške do Ujedinjenog Kraljevstva po dnu Sjevernog mora duljine 1166 kilometara.

U ovom radu razmatrana je podmorska dionica cjevovoda za transport nafte za koju je napravljena procjena strukturnog integriteta. Proračun je proveden za položen cjevovod koji dolazi u stanje statičke ravnoteže pod djelovanjem gravitacijskih i hidrostatskih sila, ali bez utjecaja sila trenja koje se javljaju u kontaktu cjevovoda s morskim dnom. Za analize modela cjevovoda korišten je program LS-DYNA. Analize su napravljene za dva različita profila morskog dna.

Prvi profil predstavlja zatečeno morsko dno na zadanoj ruti. Drugi profil dobiven je optimizacijom te sadrži korekcije koje su potrebne da bi se osigurao strukturni integritet cjevovoda.

Nakon što su dobiveni rezultati iz programskog paketa LS-DYNA napravljen je proračun naprezanja i procjena strukturnog integriteta prema pravilima Det Norske Veritasa (DNV-OS-F101).

## 2. PODMORSKI CJEVOVODI

Podmorski cjevovodi odnosno cjevovodi koji su položeni na morsko dno predstavljaju jedan od načina transporta nafte, zemnog plina i vode. Oni su osnovni dio transportne mreže između platformi, obalnih rafinerija i spremnika. Također se mogu koristiti za ispušt otpadnih voda u priobalnom području. U tom slučaju potrebno je cjevovod postaviti na minimalnu dubinu od 35 do 40 metara kako ne bi došlo do miješanja otpadnih voda i gornjeg sloja morske vode. [1]

Sredinom 20. stoljeća povećala se potražnja za fosilnim energentima i pojavila se potreba za podmorskim cjevovodima. Eksploatacija naftnih derivata u sve daljim i dubljim morima predstavljala je nove zahtjeve za polaganje cjevovoda. Razvojem tehnologije uvedene su i usavršene tehnike polaganja i instalacije cjevovoda u gotovo svim uvjetima.

### 2.1 Materijali cjevovoda

Prilikom odabira materijala potrebno je uzeti u obzir okolinu, uvjete rada i načine instalacije cjevovoda. Pri tom je važno obratiti pažnju na:

- mehanička svojstva materijala
- svojstva fluida i njihovu radnu temperaturu
- korozivna svojstva
- utjecaj okoline i opterećenja
- instalacijske metode i procedure
- težinu
- zavarljivost
- otpornost lomu te na zamor materijala

Za podmorske cjevovode se najčešće koriste:

- čelik (te razne legure)
- polietilen
- stakloplastika
- beton
- kompoziti čelika i neoprena i dr. [2]

### **2.1.1 Čelične cijevi**

Čelične cijevi su najzastupljenije, a promjeri im se kreću od 75 mm do 1800 mm. Čelik korišten u transportu ugljikohidrata je najčešće veće vlačne čvrstoće (350 do 500 MPa) te je pogodan zbog lake zavarljivosti. Gotovo svi cjevovodi su zavareni punim zavarom (do unutarnje stijenke) gdje se tlakovi kreću obično oko 10 MPa, a bilo kakvo curenje nafte ili plina je nedopustivo.

Kako se cijevi najčešće polažu prazne, izložene su velikim tlačnim te kombiniranim opterećenjima koja mogu rezultirati izvijanjem. Zbog toga se pri proračunu polaganja vodi računa o uzdužnoj sili te o tolerancijama cijevi (ekscentricitet i debljina stijenke).

Od vanjske korozije cijevi su najčešće zaštićene bitumenom ili epoxy smolom i cink protektor anodama. S unutarnje strane mogu biti bez zaštite ako se transportira plin ili mogu biti obložene epoxy smolom, poliuretanskom smolom, polietilenom ili cementom ukoliko služe za transport vode ili korozivne supstance. Vanjski omotač može biti zaštićen od abrazije sa betonskim ili stakloplastičnim omotačem. Cijevi koje se za svog radnog vijeka moraju prazniti ili prenose plinove, moraju imati negativan uzgon što je još jedan cilj cementne obloge. U praksi se pokazalo da cementne obloge znaju erodirati te stvoriti pozitivan uzgon na dijelovima cijevi rezultirajući dizanjem cijevi iznad dna. Erozijska cementna obloga se sprječava pravilnim odabirom armaturnih mreža. [2]

### **2.1.2 Polietilenske cijevi**

Polietilenske cijevi su visoko fleksibilne cijevi koje su postojane na kemijske medije te imaju mali koeficijent trenja. Pogodne su za različite radne temperature, od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Imaju malu gustoću pa ih je prilikom instalacije potrebno balastirati. Težine balasta su velike pa je potrebno izvesti dodatna ojačanja na određenim dijelovima cjevovoda. Pri potapanju cijevi dolazi do postupnog izvijanja, ali još uvijek se zadržava cirkularni presjek tako da na kraju polaganja nema nikakve trajne deformacije. Koncentracije naprezanja se nastoje izbjeći jer pri konstatno visokim naprezanjima dolazi do zamora materijala.

### **2.1.3 Stakloplastične cijevi**

Najčešće se koriste za kanalizacijske ispuste, a promjeri su im do 2 metra. Primjenjuju se za razne radne temperature, od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , i tlakove do 3000 bar. Imaju dobru otpornost na različite kemijske i korozivne tvari (otapala, sumoporovodik, sol). Zahtjevne su za polaganje jer ih je zbog male gustoće potrebno balastirati. Kao i kod polietilenskih cijevi, sedla za balaste je potrebno dobro projektirati kako ne bi došlo do prekomjernih lokalnih naprezanja. [2]

## 2.2 Spajanje čeličnih cijevi

Pojedinačne cijevi spajaju se u cjevovod zavarivanjem po opsegu. Zavarivanje se može vršiti na obali, na brodu za polaganje cjevovoda i na morskom dnu za što je neophodna hiperbarična komora.

Kako bi se cijevi zaštitile od korozije sa unutarnje strane koristi se termoplastična folija koja se može montirati pomoću dvije metode. U prvoj metodi je promjer folije nešto veći od unutarnjeg promjera cijevi i folija se nakon smanjenja promjera uvuče u cijev. Nakon rasterećenja folije ona se širi i zauzima položaj tik uz stijenku cijevi. U drugoj metodi je folija malo manjeg promjera od unutarnjeg promjera cijevi koja se s lakoćom uvuče u cijev i nakon toga se širi uz pomoć vruće vode pod tlakom. Ova metoda koristi se kod cjevovoda duljine do 1000 m. Zaštita od korozije s unutarnje strane cijevi najčešće se koristi u slučaju prijenosa vode cjevovodom. Kako bi se povećala antikorozivna zaštita moguće je još između termoplastične folije i stijenke cijevi ubrizgati cementnu pastu.

Za zavarivanje po opsegu cijevi potrebno je pripremiti krajeve cijevi kako bi zavarivanje bilo što efikasnije i brže. To je moguće napraviti na obali pa spajati tako pripremljene cijevi, ali najčešće je i to dio procesa instalacije na brodu za polaganje.

Najpouzdanije metode zavarivanja podmorskih cijevi su slijedeće:

- zavarivanje pod troskom (eng. *SAW-submerged arc welding*)
- elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (eng. *SMAW- shielded metal arc welding*)
- MIG- elektrolučno zavarivanje tankom žicom u zaštiti inertnim plinom (eng. *GMAW- gas metal arc welding*) [2]

Nakon zavarivanja potrebno je izvršiti kontrolu zavara što najčešće obuhvaća rendgensku snimku zavara, ultrazvučno ispitivanje te nerazorna ispitivanja bojanjem zavara kako bi se vidjelo prodiranje boje u mikropukotine.

## 2.3 Načini polaganja cjevovoda

Prije samog polaganja cjevovoda potrebno je provesti temeljitu analizu i pripremu. Napretkom tehnologije moguća su polaganja cijevi sve većih promjera i u sve većim dubinama.

Današnji nauobičajeniji način polaganja cjevovoda je baržama za polaganje koje mogu biti opremljene potrebnim radionicama za spajanje cijevi na pučini, a opskrbeni brodovi ih snabdijevaju cijevima koje su pripremljene, obložene i imaju anodnu zaštitu. Ako su cijevi manjeg promjera moguće ih je spojiti na obali i namotati na kolut određenog promjera koji se instalira na baržu.

Barže za polaganje se dijele na:

- barže prve generacije
- barže druge generacije
- barže treće generacije
- barže četvrte generacije

Generacije se razlikuju u kvaliteti tehnološkog procesa i dubini mora. Do sada su se polagale cijevi do dubine od oko 600 metara i to kod Sicilije te na Sjevernom moru.

Postoji više metoda polaganja cjevovoda, a 3 osnovne su:

- S-tip polaganja cjevovoda
- J-tip polaganja cjevovoda
- polaganje pomoću bubnja za namatanje

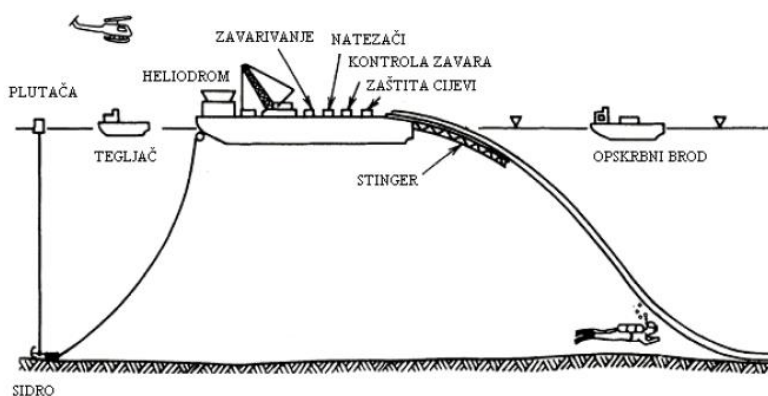
### 2.3.1 S-tip polaganja cijevoda

Osnovno svojstvo ove metode je da cijev kreće sa barže horizontalno te se savija u obliku slova S, nakon čega se pozicionira na morsko tlo. Takav način polaganja koristi se za dubine do oko 700 metara. Radijus zakrivljenosti na gornjem dijelu cijevovoda (na barži) se postiže stingerom odnosno čeličnim nosačem smještenim na krmi koji valjcima omogućuje spuštanje cijevovoda. Zakrivljenost donjeg dijela cijevovoda blizu morskog dna osigurava se prenošenjem napetosti koju stvara natezač na barži.

Zavarivanje, kontrola zavora, obrada zavora te zaštita spojeva cijevi vrši se na barži sa zavarivačkim postajama koje omogućuju zavarivanje u zaštićenom prostoru.

Cijev se pušta na dno kako se barža pomiče u smjeru polaganja. Barže se u novije vrijeme pozicioniraju GPS, laserskim i raznim navigacijskim uređajima zbog velike zahtijevane točnosti polaganja. U trenutku kada sidro dotakne dno, njegova lančanica počinje služiti kao nit za koju se barža povlači i napreduje. Natezni valjak i kontrolirani potisak prema naprijed primjenjuju se da se ostvari odgovarajuća vlačna sila u cijevovodu kako ne bi došlo do izvijanja cijevi.

Brzina i efikasnost polaganja cijevi ovisi o veličini cijevovoda, promjeru cijevi i uvjetima zavarivanja. U optimalnim uvjetima barža dnevno može postaviti 4 do 5 kilometara cijevovoda. Na Slici 1. prikazan je shematski S-tip polaganja cijevovoda

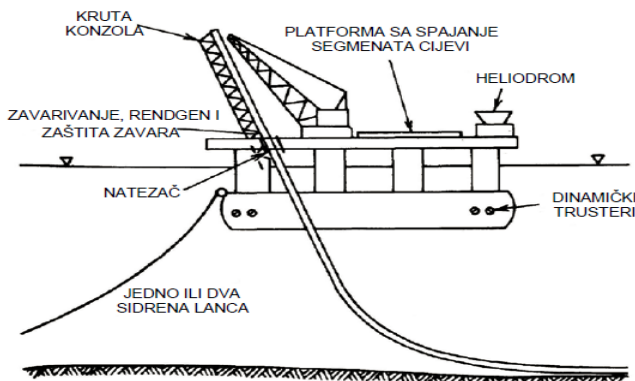


Slika 1. Shematski prikaz S-tipa polaganja cijevovoda [2]

### 2.3.2 J-tip polaganja cjevovoda

Za ovaj način polaganja koriste se barže četvrte generacije i pogodan je za velike dubine, preko 2000 m. Ovom metodom izbjegavaju se neke poteškoće koje se javljaju kod S-tipa polaganja, kao što su vlačno opterećenje i potisak prema naprijed.

Cijev gotovo vertikalno napušta baržu pa prema tome nema ni pregiba preko kojega cijev prelazi. Koristi se kruta rampa koja je malo pomaknuta iz vertikalnog položaja i na njoj se spajaju prethodno spojeni višesegmentni dijelovi cijevi. Spajanje cjevovoda sa segmentima vrši se tek nešto iznad palube. Barža ima visoki toranj koji podupire sekciju od 3 do 4 segmenta cijevi prije nego se ona spoji sa ostatkom cjevovoda. Da bi se postigle velike brzine polaganja, moraju se koristiti napredne automatske tehnike zavarivanja (zavarivanje trenjem, laserom i snopom elektrona). Uzdužna sila se postiže čistom težinom podvodnog dijela cijevi, a time se plovilo rasterećuje od nepotrebnih sidrenih sistema te ostaju samo trusteri za pozicioniranje. Trusteri su dovoljni za svladavanje ono malo horizontalne sile u smjeru napredovanja plovila, jer cijev ne ulazi u more pod pravim kutom. Ovaj način polaganja omogućuje polaganje pri puno težim uvjetima jer više nisu bitna lateralna ubrzanja, već je brzina spajanja cijevi ograničavajući faktor. Barža dnevno može postaviti 1 do 1,5 kilometara cjevovoda. Na Slici 2. prikazan je shematski J-tip polaganja cjevovoda.



Slika 2. Shematski prikaz J-tipa polaganja cjevovoda [2]

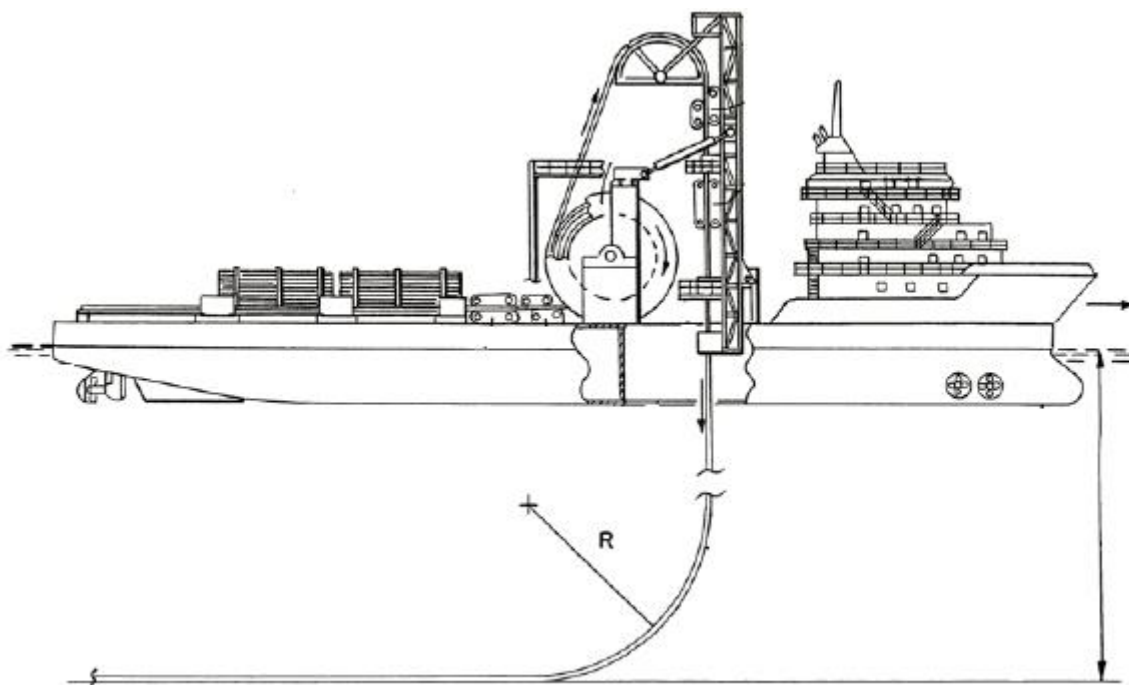


### 2.3.3 Polaganje pomoću bubnja za namatanje

Barža koja polaže cjevovod namotan na kolut slična je brodu za polaganje kablova. Cjevovod je namotan na kolut promjera 30 m i preko uređaja za stvaranje natezne sile na krmi napušta baržu. Obzirom da cjevovod ulazi u vodi pod strmim kutem zahtjev na stinger je minimalan.

Maksimalni promjer cijevi koja se može namotati na takav kolut je 40 do 50 cm. Cijevi ne mogu biti obložene betonom pa se potrebna težina postiže debljim stijenkama cijevi.

Metoda je pogodna za cjevovode izložene velikim tlakovima i u velikim dubinama. Sekcije cijevi proizvode se u radionicama na obali i cjevovod se namata na kolut. Na Slici 3. prikazana je shematski barža s namotanim cjevovodom.



Slika 3. Shematski prikaz barže s namotanim cjevovodom [2]

## 2.4 Posebne metode polaganja cjevovoda

Posebne metode polaganja koriste se najčešće iz ekonomskih razloga jer barže za polaganje cjevovoda imaju visoki dnevni najam.

Posebne metode polaganja cjevovoda su:

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

### 2.4.1 Metoda povlačenja po dnu

Metoda povlačenja cijevi po dnu je razvijena za polaganje cjevovoda u priobalnom području. Važno je detaljno istražiti trasu prolaska cjevovoda kako ne bi došlo do oštećenja. Obloga mora biti otporna na abrazivna oštećenja i najčešće je betonska.

Ulaz cijevi u more, zavarivanje, kontrola i omatanje u segmentima od tristotinjak metara vrši se na šinama koje su opremljene valjcima. Valjci služe za smanjenje trenja pri porinjavanju cijevi.

Na samo se čelo cjevovoda zavari oprema na koju se pričvrsti čelično uže koju povlači plovilo ili vitlo sa suprotne obale. Osim užeta, na početak se instalira i plovak koji signalizira položaj čela cijevi. Duljina povlačenja koja može dostići više tisuća metara ovisi o čvrstoći cjevovoda, trenju podloge, vučnoj sili vitala i utjecaja zone valova (priobalna zona male dubine). Vučna vitla moraju biti sposobna za veliku vučnu silu, čak do 1350 kN. Koeficijenti trenja pri dnu su izmjereni i u prosjeku iznose od 0,4 do 0,5 za vrijeme vuče te od 0,6 do 0,8 na početku vuče. Cijev se proračunava tako da ima malen negativan uzgon i time održi lateralnu stabilnost. Upravo taj negativan uzgon uzrokuje rast otpora trenja sa duljinom što je ograničavajući faktor. Na Slici 4. je prikazana shematski metoda povlačenja cijevi po dnu.



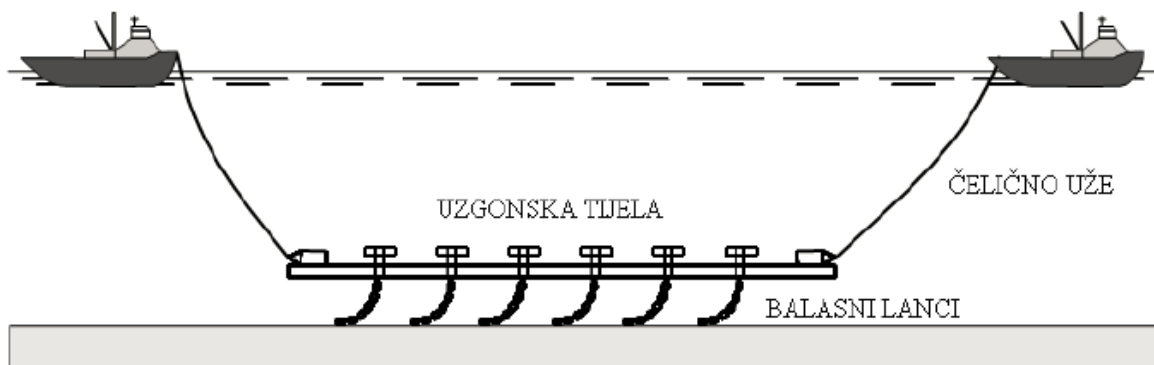
Slika 4. Metoda povlačenja po dnu [2]

#### 2.4.2 Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna

Metodu je razvio poznati inženjer u području morske tehnike R. J. Brown, a zasniva se na malom pozitivnom uzgonu samog cjevovoda tj. približnoj neutralnoj ravnoteži gravitacijskih i uzgonskih sila koje djeluju na uronjeni cjevovod.

Kratki segmenti uronjenog lanca ovješeni su na odgovarajućim intervalima o cjevovod čineći negativan uzgon konstrukcije, dok je dio lanca položen na morsko dno. Lanac automatski kontrolira uronjenu težinu kombiniranog sustava (lanci + cijev), povećavajući gravitacijsko opterećenje konstrukcije tek kod njenog pokušaja izranjanja tj. vertikalnog pomaka cijevi od morskog dna. Ako cijev potone, smanjuje se dio težine ovješnog lanca i uspostavlja se ravnoteža gravitacijskog i uzgonskog opterećenja. Sila trenja je određena uronjenom težinom repova lanca koji se vuku po morskom dnu. Duljina lanca je određena promjenom batimetrije morskog dna i savitljivosti cjevovoda pod opterećenjem (razlika gravitacijskog i uzgonskog opterećenja).

Cjevovod nema dodira s morskim dnom što rezultira sa smanjenom horizontalnom silom povlačenja i smanjenom riziku oštećenja cimente obloge o hrapavo morsko dno. Lanci se pričvršćuju slabijom karikom tako da pukne ukoliko dođe do zapinjanja o morsko dno. Na Slici 5. je prikazana shematski metoda kontroliranog povlačenja iznad dna.



Slika 5. Metoda kontroliranog povlačenja iznad dna [2]

### 2.4.3 Metoda površinskog tegljenja

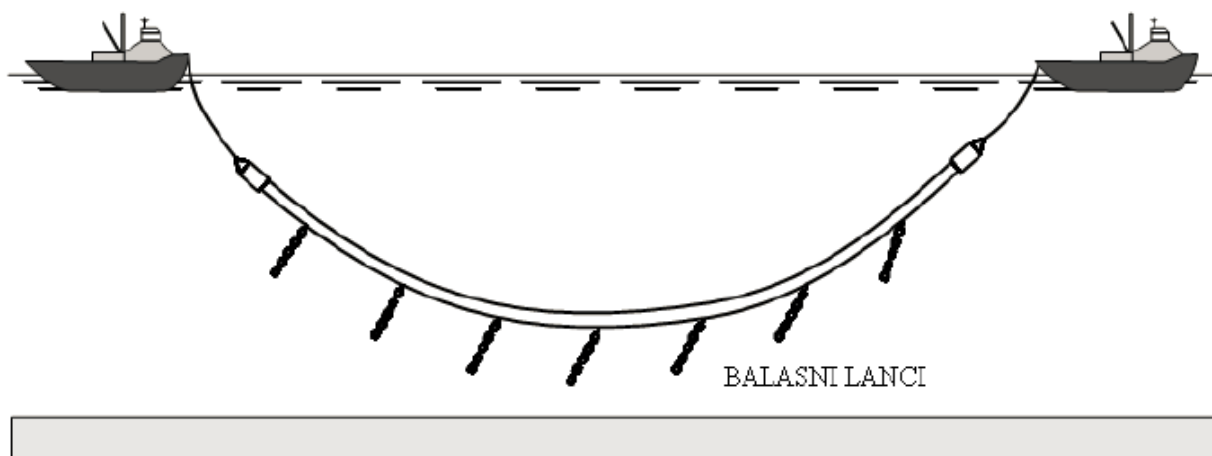
Metoda površinskog tegljenja ima dvije varijante. Jedna je da se cijev povlači po samoj površini dok se u drugoj cijev održava na određenoj dubini.

Kod površinskog tegljenja cjevovod je pričvršćen za uzgonska tijela koja mu omogućuju plutanje na površini. U takvom položaju cjevovod može biti izložen znatnijim valnim opterećenjima pa je takva metoda primjenjiva u zaštićenim vodama ili za vrijeme stabilnih vremenskih uvjeta.

Najsloženija metoda tegljenja je povlačenje cjevovoda ispod površine. Ona zahtijeva da cjevovod ima neznatno negativan uzgon. Dubina tegljenja regulira se brzinom tegljača. Na ovaj način cjevovod je zaštićen od djelovanja površinskih valova, ali i oštećenja uzrokovanih morskim dnom. Na Slici 6. je prikazana shematski metoda povlačenja cjevovoda po površini, dok je na Slici 7. prikazana metoda povlačenja cjevovoda ispod površine.



Slika 6. Metoda povlačenja cjevovoda po površini [2]



Slika 7. Metoda povlačenja cjevovoda ispod površine [2]

### **3. OPTEREĆENJA NA PODMORSKI CJEVOVOD**

Opterećenja na podmorski cjevovod mogu se podijeliti na:

- stalna (operativna)
- promjenjiva (okolišna)
- slučajna
- opterećenja prilikom instalacije cjevovoda [3]

Takva podjela nije fiksna te ovisi o pravilima klasifikacijskih društava. Primjerice vlastita težina, hidrostatički uzgon i tlak se ponekad mogu smatrati promjenjivim opterećenjem dok se prema pravilima Det Norske Veritasa (DNV-OS-F101) smatraju operativnim opterećenjem. Ispitivanje cjevovoda može se smatrati opterećenjem prilikom instalacije ali i kao operativno opterećenje.

### 3.1 Stalna (operativna) opterećenja

Definiraju se kao opterećenja koja proizlaze iz rada cjevovoda odnosno nastaju uslijed eksploatacije cjevovoda.

Operativna opterećenja uključuju djelovanja:

- unutarnjeg statičkog tlaka
- udarni tlak (eng. pressure surge)
- operativne temperature

Sile koje se mogu smatrati operativnim opterećenjem su vlastita težina i hidrostatički uzgon. Vlastita težina uključuje vlastitu težinu cijevi, težinu obloge, težinu opteživača i težinu tekućine koja se transportira cjevovodom (uglavnom nafta, voda, plin). Hidrostatički uzgon odgovara vanjskom volumenu cijevi. [4]

#### 3.1.1 Unutarnji statički tlak

Projektni tlak za određeni položaj odnosno za određenu referentnu visinu određuje se kao maksimum od navedena dva slučaja:

- maksimalan tlak u statičkim uvjetima
- maksimalan tlak u kombinaciji statičkog i udarnog tlaka

Tlakovi mogu biti viši tokom ispitivanja cjevovoda, ali takvi tlakovi spadaju u opterećenja prilikom instalacije cjevovoda.

### **3.1.2 Udarni tlak**

Udarni tlak se može pojaviti ukoliko dođe do zatvaranja ili otvaranja ventila ili promjene dotoka iz kompresora ili crpke. Sukladno tome potrebno je imati odgovarajući sustav za kontrolu tlakova u cjevovodu. Sustav za kontrolu tlakova obuhvaća sustav za regulaciju tlaka, razne alarmne sustave i instrumente koji prate rad cjevovoda.

Sustav za regulaciju tlaka osigurava vrijednost tlaka na određenoj razini. Sustav za sigurnost, nezavisno od sustava za regulaciju, omogućava da se tlak drži ispod određenih vrijednosti. [4]

### **3.1.3 Operativne temperature**

Često se pojavljuju temperaturne razlike između radnog medija i okoline. Kod projektiranja podmorskih cjevovoda potrebno je uzeti u obzir te razlike. Moguće je da zbog razlike u operativnoj temperaturi i temperaturi u trenutku postavljanja cjevovoda na morsko dno dođe do porasta deformacija i naprezanja. Temperatura uvelike utječe na opterećenja cjevovoda zato jer ona može varirati tokom samog strujanja fluida u cjevovodu.



### 3.2 Promjenjiva (okolišna) opterećenja

Definiraju se kao opterećenja koja proizlaze iz djelovanja okoline na cjevovod odnosno najviše od struja i valova. Cjevovod koji je položen na morsko dno izložen je djelovanju hidrodinamičkih sila od valova i morskih struja. Jednostavni analitički izrazi samo približno opisuju oscilacije sila jer su u pravilu poprilično kompleksne.

#### 3.2.1 Hidrodinamička sila od stacionarne morske struje

Kod računanja hidrodinamičke sile u obzir se uzima horizontalna komponenta brzine morske struje koja je okomita na cjevovod. Cjevovod koji je na morskom dnu predstavlja prepreku za nesmetan protok morske struje.

Hidrodinamička sila može se podijeliti na dvije komponente:

- horizontalna sila otpora  $F_D$
- vertikalna sila hidrodinamičkog uzgona  $F_L$

Horizontalna sila otpora je posljedica opstrujavanja i djeluje u smjeru gibanja morske struje. Analitički izraz za silu otpora glasi:

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

gdje je:

$F_D$  - sila otpora morske struje

$\rho$  - gustoća morske vode

$C_D$  - koeficijent otpora

$D$  - vanjski promjer cjevovoda

$U$  - horizontalna komponenta brzine morske struje

Vertikalna sila hidrodinamičkog uzgona posljediva je naizmjeničnog otkidanja vrtloga na gornjem i donjem rubu cjevovoda. Djeluje okomito na smjer gibanja morske struje.

Analitički izraz za silu hidrodinamičkog uzgona glasi:

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

gdje je:

$F_L$  - sila hidrodinamičkog uzgona

$\rho$  - gustoća morske vode

$C_L$  - koeficijent hidrodinamičkog uzgona

$D$  - vanjski promjer cjevovoda

$U$  - horizontalna komponenta brzine morske struje

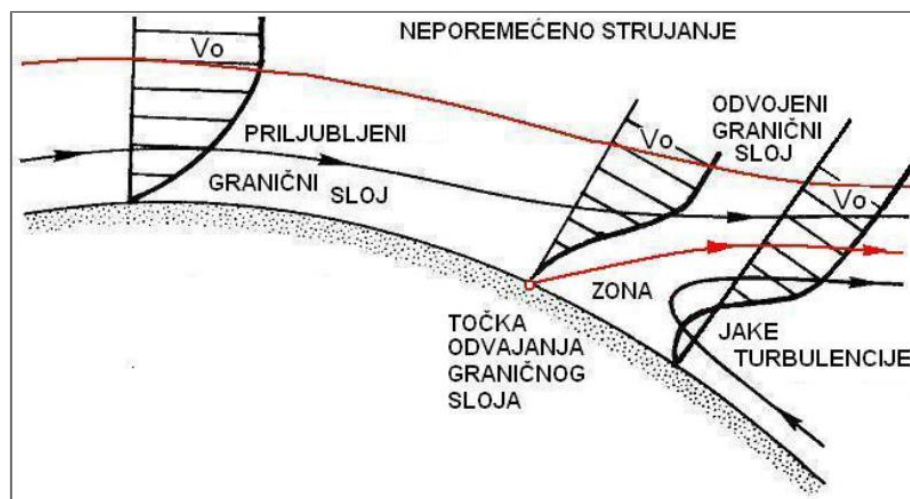
### 3.2.2 Odvajanje graničnog sloja

Kod opstrujavanja zakrivljenih površina strujanje se najprije ubrzava i dolazi do smanjenja tlaka duž strujanja te stanjivanja graničnog sloja. Na mjestu gdje gradijent tlaka mijenja predznak, strujanje se počinje usporavati, a granični sloj širiti. Uslijed toga dolazi do odvajanja graničnog sloja i pojave povratne struje. Lokacija točke odvajanja ovisi o obliku i hrapavosti tijela oko kojeg tekućina opstrujava te o Reynoldsovom broju. [3]

Kod opstrujavanja zakrivljenih kontura, povećanjem brzine strujanja, točka odvajanja se pomiče uzvodno sve dok granični sloj ne postane turbulentan kada nastupa naglo pomicanje zone odvajanja nizvodno.

Pri malim brzinama tečenja javlja se laminarno strujanje i granični sloj nije izražen. Povećanjem brzine strujanja dolazi do širenja i odvajanja graničnog sloja te stvaranja zone jake turbulencije, odnosno poremećenosti toka. Vrtlozi se produljuju povećanjem brzine toka i točka odvajanja pomiče se uzvodno. Daljnjim povećanjem brzine strujanja, točka odvajanja opet se pomiče nizvodno. U zoni jake turbulencije javlja se nesimetrično naizmjenično otkidanje vrtloga od valjka. Kod relativno velikih brzina strujanja vrtlozi se odvajaju i putuju nizvodno.

Kod cjevovoda položenog na morsko dno do odvajanja graničnog sloja dolazi na gornjem rubu cijevi. Asimetrično strujanje proizvodi silu hidrodinamičkog uzgona, koja može poprimiti relativno velike vrijednosti ako je malen razmak između morskog dna i cjevovoda. Razlikuju se sile na cijev koja je položena direktno na morsko dno i sile na izdignutu cijev. U slučaju kontakta cjevovoda i morskog dna sila hidrodinamičkog uzgona uvijek je usmjerena od dna prema gore. Ako postoji i najmanji razmak između cjevovoda i dna onda sila dinamičkog uzgona djeluje i prema dnu. Na Slici 8. prikazan je granični sloj.



Slika 8. Granični sloj [3]

### 3.2.3 Interakcija valova i morske struje

Horizontalna inercijska sila u smjeru gibanja vodnih čestica ovisi o ubrzanju. Koristeći potencijalnu teoriju strujanja inercijska sila može se zapisati:

$$F_M = \frac{\pi}{4} \rho D^2 C_M a \quad (3)$$

gdje je:

$F_M$  - inercijska sila

$\rho$  - gustoća morske vode

$C_M$  - inercijski koeficijent

$D$  - vanjski promjer cjevovoda

$a$  - ubrzanje čestica vode

Blizu morskog dna gradijent tlaka i ubrzanje vodnih čestica prate konturu dna pa oni ne pridonose vertikalnoj sili na cjevovod. Proračun ukupne sile kod utjecaja valova i morske struje označava dodavanje inercijske sile i komponente sile otpora. Komponente sile otpora se računaju za trenutnu ukupnu brzinu vodnih čestica okomito na cjevovod. To se naziva Morisonova jednadžba koja glasi:

$$F_H = F_D + F_M = \frac{1}{2} \rho C_D D U |U| + \frac{\pi}{4} \rho D^2 C_M a \quad (4)$$

gdje je:

$F_M$  - inercijska sila

$\rho$  - gustoća morske vode

$C_M$  - inercijski koeficijent

$D$  - vanjski promjer cjevovoda

$a$  - ubrzanje čestica vode

$F_D$  - sila otpora morske struje

$\rho$  - gustoća morske vode

$C_D$  - koeficijent otpora

$D$  - vanjski promjer cjevovoda

$U$  - horizontalna komponenta brzine morske struje

### **3.2.4 Koeficijenti sila**

Kako bi se moglo izračunati hidrodinamičko opterećenje na podmorski cjevovod potrebno je odrediti koeficijente sila  $C_D$ ,  $C_M$  i  $C_L$ . Koeficijenti sila ovise o brojnim parametrima kao što su: relativna hrapavost cijevi ( $k/D$ ), relativna amplituda gibanja tekućine (  $KC$ - Keulegan-Carpenterov broj), omjer brzina morske struje i valova i Reynoldsov broj.

### **3.3 Slučajna opterećenja**

Slučajna opterećenja nastaju uslijed raznih prirodnih pojava poput potresa, odrona tla i nailaska ledenjaka. Osim prirodnih nepogoda postoji opasnost od raznih oštećenja, a mogu ih uzrokovati: bačeni objekti (u blizini platformi), ribolovne aktivnosti (povlačenje mreža), brodovi ( sidrenje ) i vojne aktivnosti ( eksplozije).

Cjevovode nije moguće u potpunosti zaštititi od slučajnih opterećenja i zato je nužno izvršiti sve potrebne analize rizika. [4]

### **3.4 Opterećenja prilikom instalacije cjevovoda**

Instalacija podmorskih cjevovoda uvelike ovisi o vremenskim uvjetima i potrebno je odrediti prihvatljive uvjete ( brzina vjetra, visina valova, morska struja ) pri kojima će se vršiti instalacija.

Potrebno je izvršiti sve pripreme i odabrati najefikasnije metode za: transport sekcija cjevovoda, spajanje sekcija, instalaciju (odmotavanje, vuča, polaganje), kopanje kanala i zatrpavanje i hidrostatska testiranja. Prilikom instalacije može doći do raznih oštećenja i deformacija. Kod hidrostatskog ispitivanja veličina testnog tlaka propisana je i obično mu je vrijednost 15 % veća od vrijednosti projektnog tlaka.

## **4. MODELI PODMORSKOG CJEVOVODA**

### **4.1 Opis modela**

Razmatran je podmorski cjevovod za prijevoz nafte koji je položen na morsko dno. U okviru ovog rada napravljene su analize za dva različita profila morskog dna. Prvi profil predstavlja neravno morsko dno na zadanoj ruti. Drugi profil dobiven je optimizacijom i sadrži korekcije koje su potrebne da bi se osigurao strukturni integritet cjevovoda.

Ravnotežni položaj cjevovoda proračunava se metodom konačnih elemenata. U analizama su korištena dva tipa konačnih elemenata, gredni za definiciju cjevovoda te ljuskasti za definiciju morskog dna.

Ovakvi modeli su nelinearni pa je potrebno koristiti odgovarajuće iterativne metode kako bi se problem mogao riješiti u vremenskoj domeni. Za analize je korišten program LS-DYNA koji omogućuje rješavanje nelinearnih problema. U okviru programa LS-DYNA za rješavanje nelinearnog problema korištena je teorija Belytschkove grede koja će u daljnjem tekstu biti ukratko pojašnjena.



## 4.2 Programski paket LS-DYNA

Programski paket LS-DYNA služi za rješavanje nelinearnih problema i pruža mogućnost simulacije različitih složenih problema.

Nelinearnost problema najčešće se odnosi na:

- promjenu rubnih uvjeta (kontakt između dijelova koji je promjenjiv u vremenu)
- velike deformacije
- nelinearne materijale.

Ovakve analize i simulacije najčešće se koriste u automobilskoj industriji za simulacije sudara, ali osim toga LS-DYNA ima brojne značajke koje su u primjenjive za rješavanje različitih fizikalnih problema. [5]

## 4.3 Teorija Belytschkove grede

Teorija koja koristi ko-rotacijsku tehniku za definiranje elemenata kako bi se uklonio problem velikih rotacija. Takvom formulacijom odvaja se pomak uzrokovan deformacijom od pomaka krutog tijela koji ne utječe na istežanje i pripadajuću energiju naprezanja (potencijalna energija u tijelu zbog elastične deformacije). [5]

Trenutna konfiguracija predstavlja potpuni opis deformiranog tijela u trenutnom prostornom položaju i orijentaciji, dajući položaj svake pripadajuće točke odnosno čvora koji čine tijelo. Referentna konfiguracija može biti početna konfiguracija tijela odnosno ona u početnom trenutku ( $t=0$ ), a može biti i u nekom drugom odabranom trenutku. Izbor referentne konfiguracije određuje koji će se tip deformacija računati. Mogu se računati ukupne deformacije, uspoređuju se trenutna i

početna konfiguracija, i pojedinačne deformacije kod kojih se uspoređuju trenutna i prethodna konfiguracija.

Ko-rotacijska formulacija koristi dva tipa koordinatnih sustava: sustav koji je povezan sa svakim elementom i sustav koji je vezan za čvorove. Prema tome deformacije se odvajaju od deformacija vezanih za kruto tijelo koristeći jedan od dva tipa koordinatnih sustava:

- koordinatni sustav vezan za elemente, deformira se s elementom
- koordinatni sustav vezan za čvorove, čvrsto rotira s čvorovima

#### **4.4 Cjevovod na morskom dnu**

U prvim koracima analize pretpostavlja se da na cjevovod djeluju samo gravitacijske i hidrostatske sile. Cjevovod je prazan i polagano se spušta u vertikalnoj ravnini i problem se može pojednostaviti ako se kontakt cjevovoda i morskog dna razmatra kao sudar pri malim brzinama.

Modeli se sastoje od dva dijela: cjevovoda koji je definiran grednim konačnim elementima i morskog dna koje je definirano ljuskastim konačnim elementima. U analizama se pojavljuju dva problema:

- dijelovi cjevovoda imaju velike pomake i mala naprezanja
- definiranje rubnih uvjeta između cjevovoda i morskog dna.

#### **4.4.1 Veliki pomaci**

Potrebno je koristiti posebne gredne konačne elemente zbog velikih pomaka i malih naprezanja. Prikladni elementi su Belytschkovi gredni elementi koji su definirani ko-rotacijskom tehnikom. Gredni element može imati velike pomake i rotacije na globalnoj razini, sve dok su lokalna naprezanja mala. Za sve gredne elemente se pretpostavlja da ostaju linearno elastični.

#### **4.4.2 Kontakt cjevovoda i morskog dna**

Dva tijela, cjevovod i morsko dno, u početnoj konfiguraciji nemaju dodirnih točaka. Cjevovod se nalazi iznad morskog dna i polako se spušta prema dnu.

Unutar programa LS-DYNA koristi se metoda master/slave za definiranje odnosa između dva tijela. Ljuskasti elementi morskog dna su definirani kao glavni (eng.master), a gredni kao sporedni (eng.slave). Na osnovu međusobnog položaja čvorova glavnih i sporednih elemenata definiraju se kontaktne sile koje se uzimaju u obzir prilikom rješavanja jednadžbi gibanja u vremenskoj domeni.

#### 4.5 Podmorske trase cjevovoda

Prva stvar koju je potrebno uzeti u obzir pri konstrukciji podmorskih cjevovoda je provjera stanja podmorske trase cjevovoda, odnosno morskog dna. Morsko dno može biti glatko (relativno ravno) ili neravno ( nepravilno, s višim i nižim vrhovima). Ako je dno neravno cjevovod će nalegnuti na više vrhove dna, a dio između će ostati nepoduprt. Ukoliko je nepoduprti raspon predugačak savijanje, koje se javlja uslijed težine, može biti prekomjerno. Također se mogu pojaviti problemi i vibracije zbog vrtloga izazvanih morskim strujama.

Mjere koje se provode kako bi se smanjio nepoduprti raspon cjevovoda su poravnavanje morskog dna i stavljanje dodatne potpore nakon instalacije, kao što je nasipavanje pjeska ispod cjevovoda. Čvrstoća morskog dna je također važan parametar. Ako dno nije dovoljno čvrsto može doći do ukopavanja cjevovoda, a to otežava kontrole, provjere i postupke održavanja. Na stjenovitom morskome dnu osim savijanja može doći do oštećenja vanjskih premaza cjevovoda.

Najbolje rješenje bi bilo kada bi tlo bilo takvo da omogući cjevovodu samo malo ukopavanje što bi osiguralo bočnu stabilnost cjevovoda.

#### 4.6 Optimizacija podmorske trase cjevovoda

Na odabir trase cjevovoda utječu različiti ne-inženjerski zahtjevi stoga podmorska trasa cjevovoda zahtjeva opsežne pripreme. To je osobito čest slučaj kod prelaska uskih morskih kanala gdje je samo mali dio cjevovoda pod morem. Drugim riječima, odabir podmorske rute u potpunosti je prilagođen kopnenom dijelu cjevovoda.

Kako bi se smanjio trošak podmorskih radova postoji potreba za optimizacijom profila podmorske trase cjevovoda. Funkcija cilja u ovom slučaju postavljena je na klasičan način tako da se temelji na metodi najmanjih kvadrata odstupanja između originalnog profila i prilagođenog profila. Prilikom optimizacije u obzir se uzima dopuštena zakrivljenost cjevovoda tj. minimalni dozvoljeni radijus zakrivljenosti cijevi koji je u direktnoj vezi s razinom naprežanja uslijed savijanja.

U ovu svrhu koristi se Euler-Bernoulli teorija grede za opis odziva cjevovoda. Profil rute modeliran je po segmentima gdje svaki segment opisan polinomom 4. reda tako da se može u razmatranje uzeti ukupno distribuirano opterećenje na cjevovod. Primjer optimizacije može se vidjeti na pojednostavljenom obliku profila koji je dan u Prilogu B.

## 5. ANALIZA MODELA

### 5.1 Karakteristike cjevovoda

Za provedbu prve analize razmatran je podmorski cjevovod koji je položen na neravno morsko dno. U programu LS-DYNA definiran je FEM model koji se sastoji od dva dijela: cjevovoda koji je definiran grednim konačnim elementima i morskog dna koji je definiran ljuskastim konačnim elementima. Morsko dno zamjenjuje čelična stijenka debljine 400 milimetara. Kao ulazni podaci su bile zadane glavne dimenzije cjevovoda i koordinate profila podmorske trase. U Tablici 1. prikazani su podatci o glavnim dimenzijama cjevovoda.

Tablica 1. Zadane karakteristike cjevovoda

Ulazni podatci		
$D_o$	0,914	m
$t$	0,021	m
$t_p$	0,004	m
$t_c$	0,060	m
$\rho_{\check{c}}$	7,841	t/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	0,935	t/m <sup>3</sup>
$\rho_c$	2,5	t/m <sup>3</sup>
$\rho_m$	1,025	t/m <sup>3</sup>
$\rho_n$	0,85	t/m <sup>3</sup>
$\rho_v$	1	t/m <sup>3</sup>
$g$	9,81	m/s <sup>2</sup>

Cjevovod se sastoji od čeličnih cijevi koje imaju plastičnu i betonsku oblogu pa je prilikom proračuna bilo potrebno uzeti u obzir i gustoće i debljine obloge.

U program LS-DYNA je bilo potrebno unijeti geometrijske karakteristike materijala koje su izračunate pomoću programa Excel na temelju zadanih podataka. Najprije su određeni svi potrebni promjeri i površine poprečnog presjeka koristeći sljedeće formule.

$$D_i = D_o - 2 \cdot t \quad (5)$$

$$D_{op} = D_o + 2 \cdot t_p \quad (6)$$

$$D_{oc} = D_{op} + 2 \cdot t_c \quad (7)$$

U jednadžbama je:

$D_i$ - unutarnji promjer čelične cijevi

$D_o$ - vanjski promjer čelične cijevi

$t$ - debljina stijenke

$D_{op}$ - vanjski promjer plastične obloge

$t_p$ - debljina plastične obloge

$D_{oc}$ - vanjski promjer cementne obloge

$t_c$ - debljina cementne obloge

U Tablici 2.prikazani su dobiveni promjeri.

Tablica 2. Izračunati promjeri

Promjeri		
$D_i$	0,8732	m
$D_{op}$	0,921	m
$D_{oc}$	1,041	m

Izrazi za proračun površina presjeka su:

$$A_i = \frac{D_i^2 \cdot \pi}{4} \quad (8)$$

$$A_\xi = \frac{(D_o^2 - D_i^2) \cdot \pi}{4} \quad (9)$$

$$A_p = \frac{(D_{op}^2 - D_i^2) \cdot \pi}{4} \quad (10)$$

$$A_c = \frac{(D_{oc}^2 - D_{op}^2) \cdot \pi}{4} \quad (11)$$

$$A_{sve} = \frac{D_{oc}^2 \cdot \pi}{4} \quad (12)$$



gdje je:

$A_i$ - površina unutarnjeg presjeka

$A_{\check{c}}$ - površina presjeka čelika

$A_p$ - površina presjeka plastične obloge

$A_c$ - površina presjeka cementne obloge

$A_{sve}$ - površina vanjskog presjeka

U Tablici 3. prikazane su dobivene površine presjeka.

Tablica 3. Izračunate površine presjeka

Površine presjeka		
$A_i$	0,599	$m^2$
$A_{\check{c}}$	0,058	$m^2$
$A_p$	0,010	$m^2$
$A_c$	0,185	$m^2$
$A_{sve}$	0,852	$m^2$

Distribuirane mase su izračunate koristeći sljedeće izraze:

$$m_{\check{c}} = A_{\check{c}} \cdot \rho_{\check{c}} \quad (13)$$

$$m_p = A_p \cdot \rho_p \quad (14)$$

$$m_c = A_c \cdot \rho_c \quad (15)$$

$$m_{uk} = m_{\check{c}} + m_p + m_c \quad (16)$$

gdje je:

$m_{\check{c}}$ - distribuirana masa čelika

$m_p$ - distribuirana masa plastične obloge

$m_c$ - distribuirana masa cementne obloge

$m_{uk}$ - ukupna distribuirana masa

U Tablici 4. su prikazane distribuirane mase za cijevi.

Tablica 4. Distribuirane mase za cijevi

Distribuirane mase za cijev		
$m_{\check{c}}$	0,454	t/m
$m_p$	0,009	t/m
$m_c$	0,462	t/m
$m_{uk}$	0,926	t/m

Distribuirana masa nafte računa se:

$$m_n = A_i \cdot \rho_n \quad (17)$$

gdje je:

$m_n$ - distribuirana masa nafte

$\rho_n$ - gustoća nafte

Distribuirana masa napunjene cijevi računa se:

$$m_{napn} = m_n + m_{uk} \quad (18)$$

gdje je:

$m_{napn}$ - distribuirana masa cijevi napunjene naftom

U Tablici 5. su prikazane distribuirane mase za teret i distribuirana masa napunjene cijevi.

Tablica 5. Distribuirane mase za teret i napunjene cijevi

Distribuirane mase za teret			Distribuirana masa napunjene cijevi		
$m_n$	0,509	t/m	$m_{napn}$	1,435	t/m

Izraz za distribuirani uzgon je:

$$q_b = A_{sve} \cdot \rho_m \cdot g \quad (19)$$

gdje je:

$q_b$  - distribuirani uzgon

$A_{sve}$  - površina vanjskog presjeka

$\rho_m$  - gustoća morske vode

$g$  - gravitacijska akceleracija

Izraz za distribuirane težine je:

$$q_{praz} = m_{uk} \cdot g \quad (20)$$

$$q_{naf} = m_{napn} \cdot g \quad (21)$$

gdje je:

$q_{praz}$  - distribuirana težina prazne cijevi

$q_{naf}$  - distribuirana težina cijevi napunjene naftom

U Tablici 6. su prikazani rezultati težina i uzgona.

Tablica 6. Distribuirani uzgon i težine

Distribuirani uzgon		
$q_b$	8,565	kN/m
Distribuirane težine cijevi		
$q_{praz}$	9,083	kN/m
$q_{naf}$	14,076	kN/m

Nakon što su određene sve potrebne težine moguće je izračunati distribuirano opterećenje na cijevovod koje se određuje kao razlika težine i uzgona.

U Tablici 7. su prikazani dobiveni rezultati za distribuirano opterećenje.

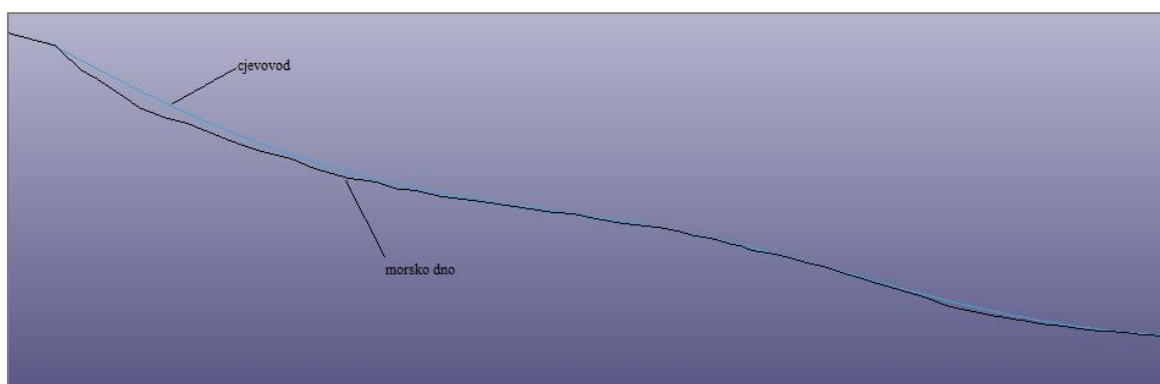
Tablica 7. Distribuirano opterećenje

Distribuirano opterećenje cijevi		
$q_{\text{praz}} - q_b$	0,518	kN/m
$q_{\text{naf}} - q_b$	5,511	kN/m

## 5.2 Originalni profil podmorske trase

U prvoj analizi razmatran je cjevovod koji je položen na nepravilno i neravno morsko dno odnosno na zatečeno stanje morskog dna. Ulazni podatci koji su bili potrebni za definiranje modela su dimenzije i geometrijske karakteristike cjevovoda te koordinate profila morskog dna.

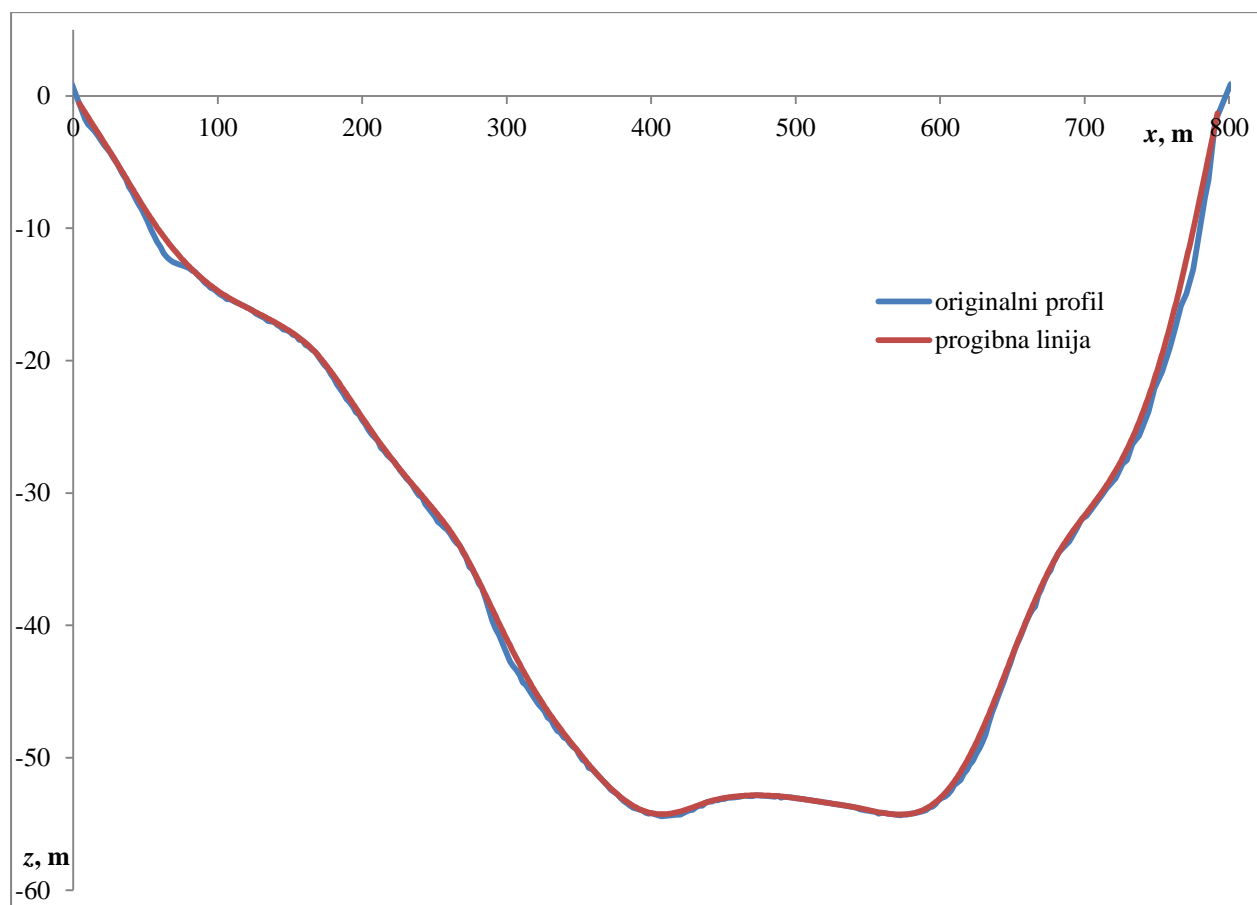
Iz programa LS-DYNA dobiveni su rezultati za progibe, smičnu silu, moment savijanja i reakciju podloge. Razmatran je zadnji vremenski trenutak odnosno korak kada je cjevovod postigao statičku ravnotežu na morskom dnu i pretpostavlja se da nema nikakvih gibanja. Na sljedećoj slici prikazan je model cjevovoda dobiven iz programa LS-DYNA i vidljivo je da cjevovod naliježe na neravnine morskog dna dok je dio između neravnine nepoduprt.



Slika 9. Model cjevovoda na morskom dnu

### 5.2.1 Usporedba profila morskog dna i progibne linije

Na Slici 10. je prikazana usporedba originalanog profila podmorske trase koji je bio zadan i progibna linija koja je dobivena iz programa LS-DYNA.



Slika 10. Usporedbna originalnog profila i progibne linije



### 5.2.2 Moment savijanja

Dobiveni momenti savijanja po duljini cjevovoda uspoređeni su s graničnim vrijednostima. Donji i gornji granični momenti su određeni na temelju minimalnog radijusa zakrivljenosti dna pomoću izraza:

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{d^2w(x)}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I} \quad (22)$$

gdje je:

M- moment savijanja

r(x)- radijus zakrivljenosti dna

E- Youngov modul elastičnosti

I- moment inercije

Za radijus zakrivljenosti dna odabrana je vrijednost 700 metara na temelju dozvoljenog naprezanja.

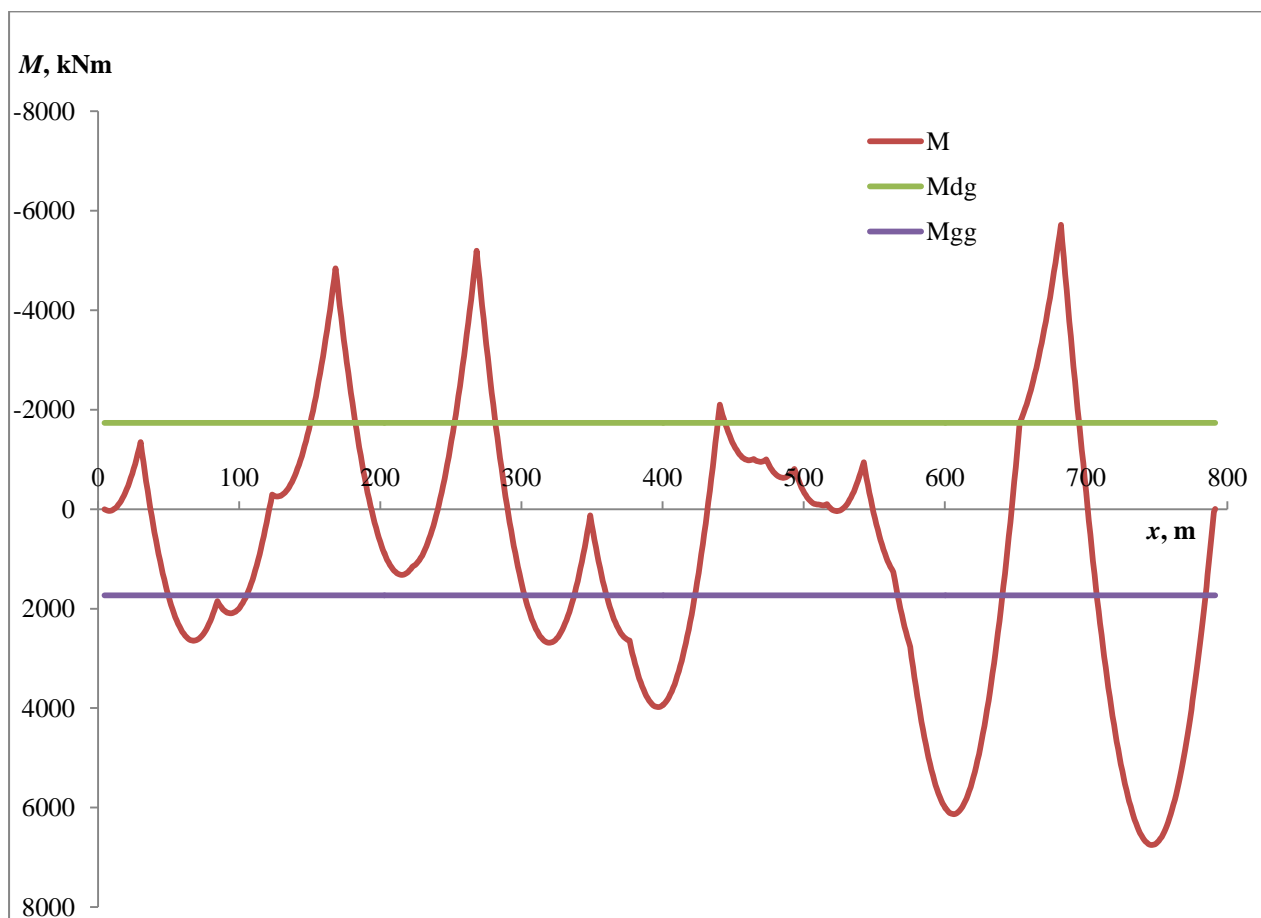
U Tablici 8. su dobivene vrijednosti graničnih momenata.

Tablica 8. Granični momenti

Granični momenti		
M <sub>dg</sub>	-1735,37	kNm
M <sub>gg</sub>	1735,37	kNm

Slika 11. prikazuje moment savijanja po duljini cjevovoda i odstupanja u odnosu na donji i gornji granični moment. Kako je originalni profil morskog dna nepravilan i neravan očekivano je da moment savijanja na pojedinim presjecima znatno prelazi donje i gornje granične momente.

Najveće vrijednosti moment savijanja postiže blizu kraja cjevovoda gdje je 6751 kNm što je mnogo veće od gornje granične vrijednosti 1735 kNm, a to je upravo zbog nepravilnosti dna koja utječe na porast moment savijanja.



Slika 11. Moment savijanja

### 5.3 Korigirani profil podmorske trase

Optimizacija profila podmorske trase se vrši kako bi se smanjilo opterećenje i trošak potrebnih podmorskih radova. Prilikom optimizacije u obzir se uzima dopuštena zakrivljenost cjevovoda tj. minimalni dozvoljeni radijus zakrivljenosti cijevi koji je u direktnoj vezi s razinom naprežanja uslijed savijanja. U ovu svrhu koristi se Euler-Bernoulli teorija grede za opis odziva cjevovoda. Profil rute modeliran je po segmentima gdje svaki segment opisanih polinom 4. reda tako da se može u razmatranje uzeti distribuirano opterećenje na cjevovod.

Distribuirano opterećenje se dobiva pomoću izraza:

$$q(x) = E \cdot I \frac{d^4 w(x)}{dx^4} \quad (23)$$

gdje je:

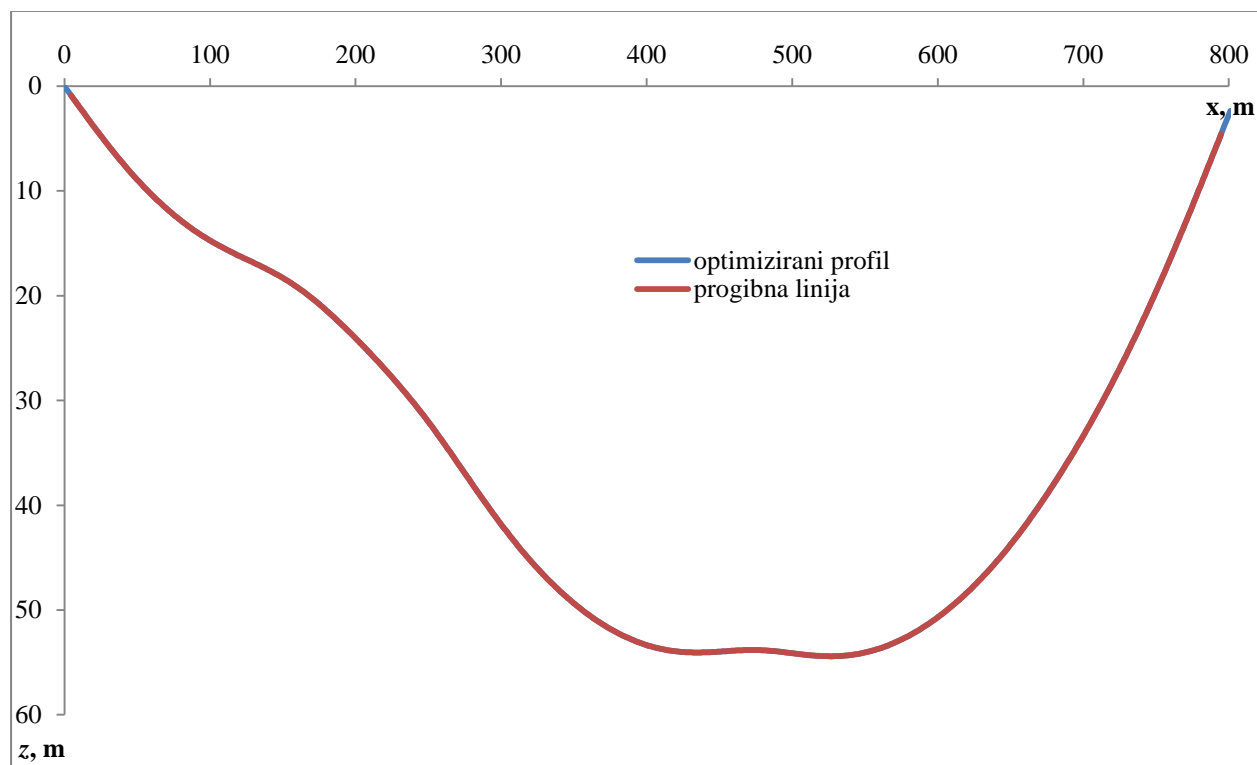
$q(x)$ - ukupno distribuirano opterećenje

$w(x)$ - progibna linija

U okviru ovog rada nije rađena detaljna razrada optimizacije već je dan prikaz korigiranog profila kako bi se prikazalo kako korekcija podmorske trase može utjecati na smanjenje opterećenja.

### 5.3.1 Usporedba korigiranog profila morskog dna i progibne linije

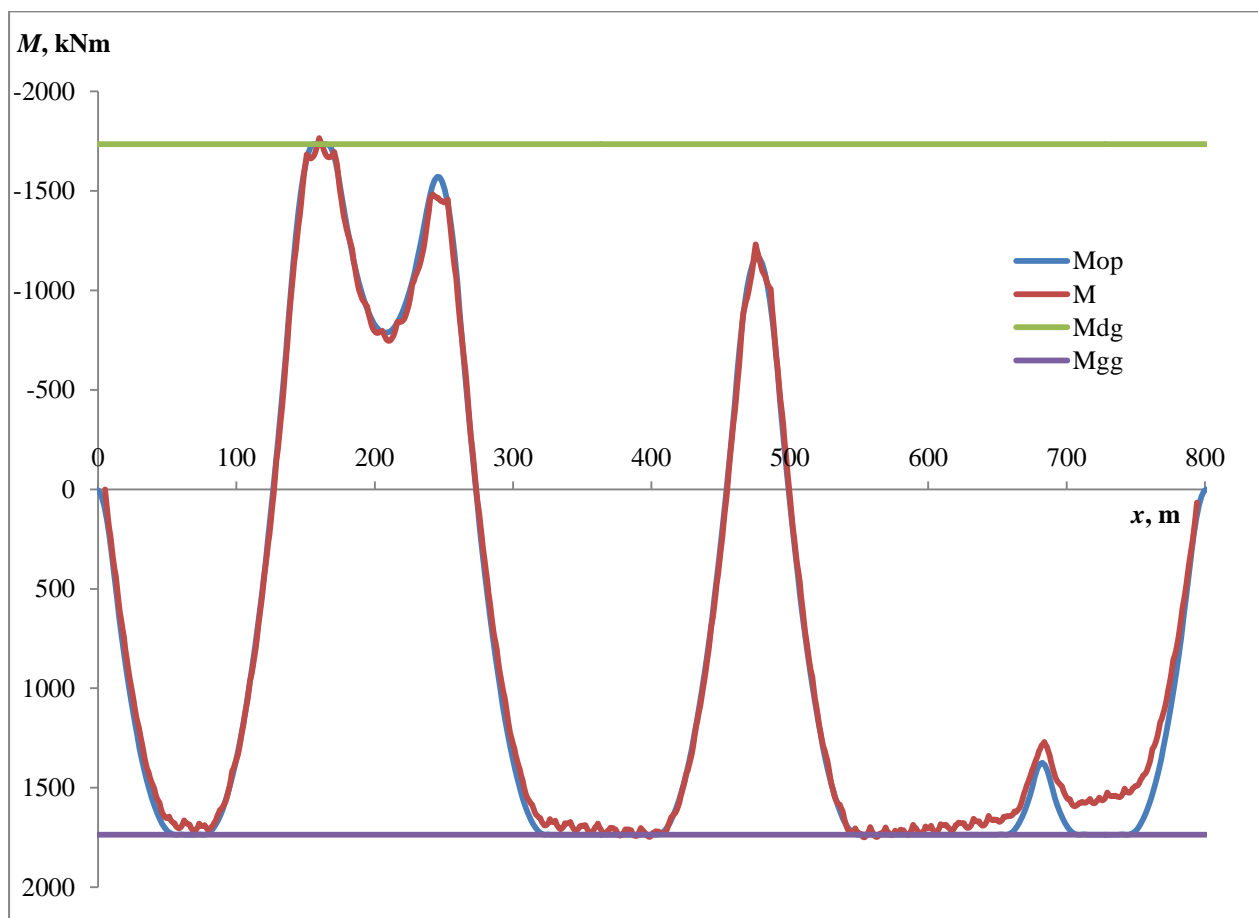
Na Slici 12. je prikazana usporedba progibne linije i korigiranog profila morskog dna.



Slika 12. Usporedba korigiranog profila i progibne linije

### 5.3.2 Moment savijanja

Slika prikazuje moment savijanja po duljini cjevovoda. Crvena linija predstavlja momente dobivene iz programa LS-DYNA, a plava linija predstavlja moment dobiven unutar optimizacijske procedure koji se dobije kao druga derivacija progiba. Sa Slike 13. se može vidjeti da su momenti unutar graničnih vrijednosti uz manja odstupanja.



Slika 13. Moment savijanja za korigirani profil

## 6. PRORAČUN NAPREZANJA

### 6.1 Opis postupka

Napravljen je proračun napreznja u fazi eksploatacije kada cjevovod leži na morskom dnu. Proračun je proveden u programu Excel za dva profila podmorske trase cjevovoda, za originalni i korigirani profil.

Iz programa LS-DYNA dobiveni su rezultati za smičnu silu, aksijalnu silu i moment savijanja koji su korišteni u proračunu napreznja. Korištene su formule za izračun napreznja prema pravilima Det Norske Veritasa (DNV-OS-F101). U Tablici 9. prikazane su zadane karakteristike cjevovoda.

Tablica 9. Opće karakteristike cjevovoda

Opći podatci		
p	84,16	bar
D <sub>o</sub>	0,9144	m
t <sub>2</sub>	0,0206	m
D <sub>i</sub>	0,8732	m
r <sub>i</sub>	0,4366	m
r <sub>o</sub>	0,4572	m
A <sub>i</sub>	0,5988	m <sup>2</sup>
A <sub>o</sub>	0,6567	m <sup>2</sup>
SMYS	359	N/mm <sup>2</sup>
α <sub>u</sub>	0,96	
f <sub>y</sub>	344,64	N/mm <sup>2</sup>
A	0,0579	m <sup>2</sup>
W	0,01074	m <sup>3</sup>
S	0,02895	m <sup>2</sup>

U Tablici 9. je:

$p$  - maksimalni manometarski tlak na ulazu u cjevovod (hidraulički udar)

$D_o$  - vanjski promjer čelične cijevi

$t_2$  - debljina stijenke

$D_i$  - unutarnji promjer čelične cijevi

$r_o$  - vanjski polumjer čelične cijevi

$r_i$  - unutarnji polumjer čelične cijevi

$A_o$  - vanjska površina poprečnog presjeka

$A_i$  - unutarnji površina poprečnog presjeka

SYMS - minimalna granica popuštanja

$\alpha_u$  - faktor čvrstoće materijala

$f_y$  - granica popuštanja

$A$  - površina poprečnog presjeka

$W$  - moment otpora

$S$  - smična površina

## 6.2 Proračun naprezanja za originalni profil podmorske trase

U proračunu naprezanja korišteni su dobiveni rezultati iz programa LS-DYNA za smičnu silu, aksijalnu silu i moment savijanja. Pomoću sljedećih izraza su izračunati unutarnji i vanjski tlakovi:

$$p_i = p + |\rho_n \cdot g \cdot y_s| \quad (24)$$

$$p_e = |\rho_m \cdot g \cdot y_s| \quad (25)$$

gdje je:

$p_i$  - unutarnji tlak

$p_e$  - vanjski tlak

$y_s$  - koordinata cjevovoda

Nakon toga izračunata je efektivna aksijalna sila pomoću izraza:

$$T_R = (p_i \cdot A_i - p_e \cdot A_o) + F_a \quad (26)$$

gdje je:



$T_r$  - efektivna aksijalna sila

$F_a$  - aksijalna sila dobivena iz LS-DYNE

Izrazi za naprezanja su:

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \cdot \frac{D - t_2}{2 \cdot t_2} \quad (27)$$

$$\sigma_a = \frac{T_r}{A} \quad (28)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} \quad (29)$$

$$\sigma_l = \sigma_a + |\sigma_b| \quad (30)$$

$$\sigma_l^{(2)} = \sigma_a - |\sigma_b| \quad (31)$$

$$\tau = \frac{F_s}{S} \quad (32)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2 - \sigma_h \cdot \sigma_l + 3 \cdot \tau^2} \quad (33)$$

$$\sigma_e^{(2)} = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^{(2)2} - \sigma_h \cdot \sigma_l^{(2)} + 3 \cdot \tau^2} \quad (34)$$

gdje je:

$\sigma_h$  - cirkularno naprezanje

$\sigma_a$  - aksijalno naprezanje

$\sigma_b$  - savojno naprezanje

$\sigma_l$  - ukupno normalno naprezanje

$\sigma_l^{(2)}$  - ukupno normalno naprezanje- druga strana presjeka

$\tau$  - smično naprezanje

$\sigma_e$  - ekvivalentno Von-Misesovo naprezanje

$\sigma_e^{(2)}$  - ekvivalentno Von-Misesovo naprezanje- druga strana presjeka

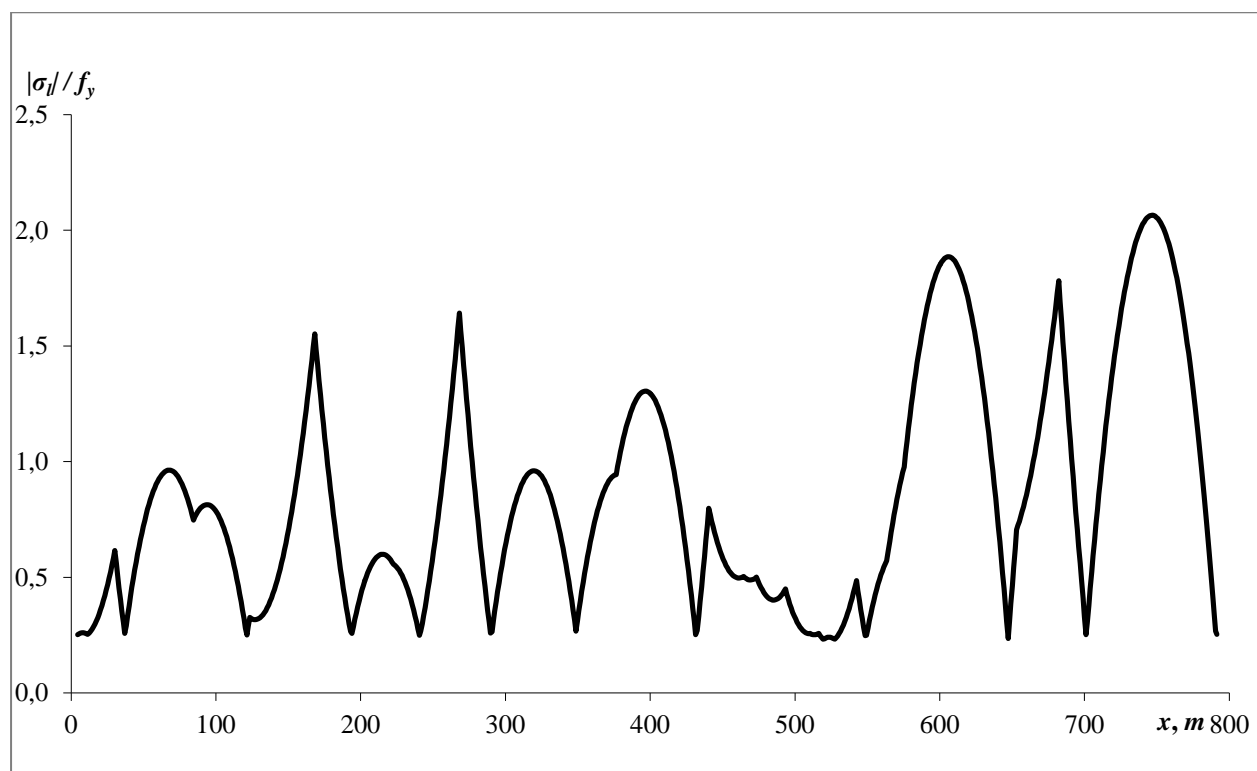
U Tablici 10. su prikazani rezultati najmanjih i najvećih vrijednosti naprezanja za originalni profil dna.

Tablica 10. Ekstremne vrijednosti naprezanja

Ekstremne vrijednosti naprezanja			
	min	max	
$p_i$	8421448	8868676	Pa
$\sigma_h$	180,377	182,373	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_a$	79,2623	87,1726	N/mm <sup>2</sup>
$s_b$	-628,31	532,262	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_l$	79,9215	711,744	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_l^{(2)}$	-544,88	86,9761	N/mm <sup>2</sup>
$t$	-11,565	10,4769	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e$	156,249	640,556	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e^{(2)}$	156,635	654,83	N/mm <sup>2</sup>
$ \sigma_h  / f_y$	0,52338	0,52917	
$ \sigma_a  / f_y$	0,22999	0,25294	
$ \sigma_b  / f_y$	1,3E-10	1,82309	
$ \sigma_l  / f_y$	0,2319	2,06518	
$ \sigma_l^{(2)}  / f_y$	0,00084	1,581	
$\sigma_e / f_y$	0,45337	1,85862	
$\sigma_e^{(2)} / f_y$	0,45449	1,90004	

### 6.2.1 Ukupna normalna naprezanja

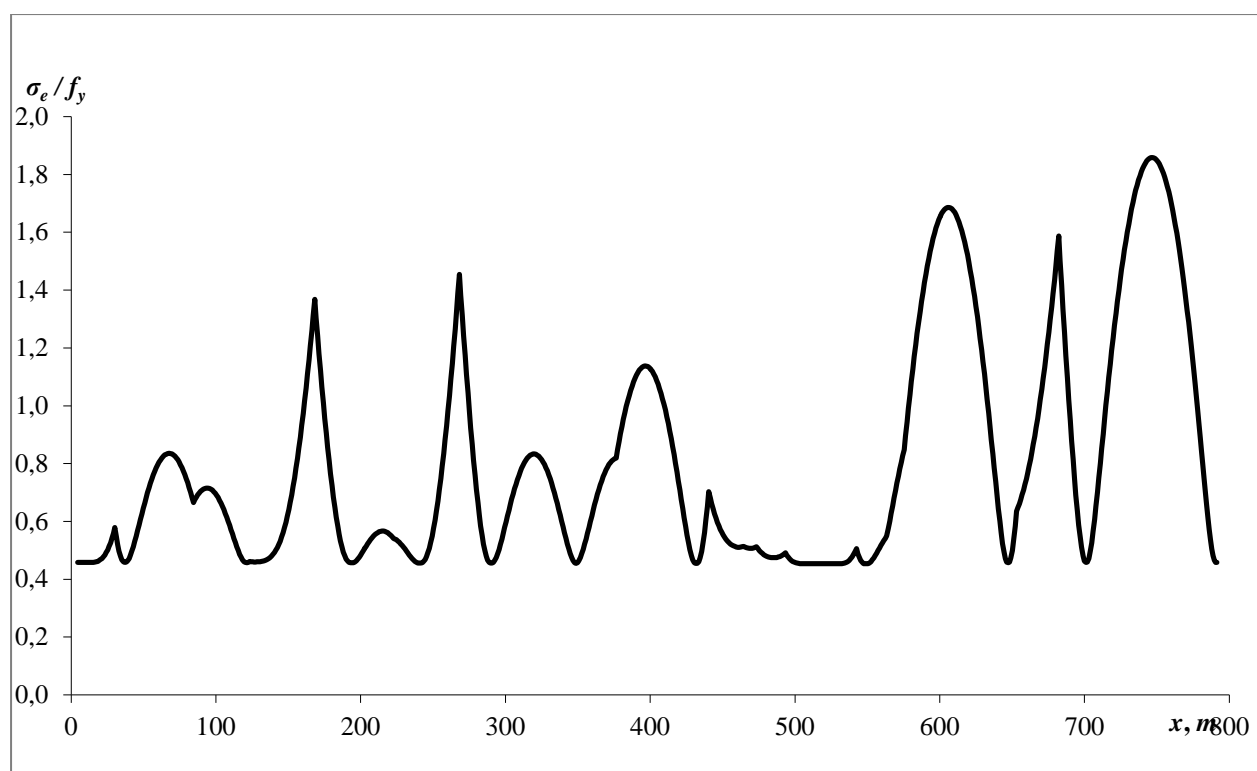
Ukupna normalna naprezanja sastoje se od aksijalnih naprezanja i savojnih naprezanja. Na slici 17. prikazan je omjer dobivenih normalnih i dozvoljenih naprezanja po duljini cjevovoda. Prema pravilima DNV-a taj omjer treba biti manji od 0,8 a na Slici 14. je vidljivo da je u ovom slučaju omjer puno veći. To znači da bi došlo do popuštanja materijala.



Slika 14. Omjer normalnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda

### 6.2.2 Ekvivalentna naprezanja

Na slici 18. je prikazan omjer ekvivalentnih Von-Misesovih i dozvoljenih naprezanja. Prema pravilima DNV-a taj omjer bi trebao biti manji od 0,8, a na Slici 15. je vidljivo da to nije slučaj. Dobivena ekvivalentna naprezanja prelaze dozvoljena naprezanja.



Slika 15. Omjer ekvivalentnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda

### 6.3 Proračun naprezanja za korigirani profil podmorske trase

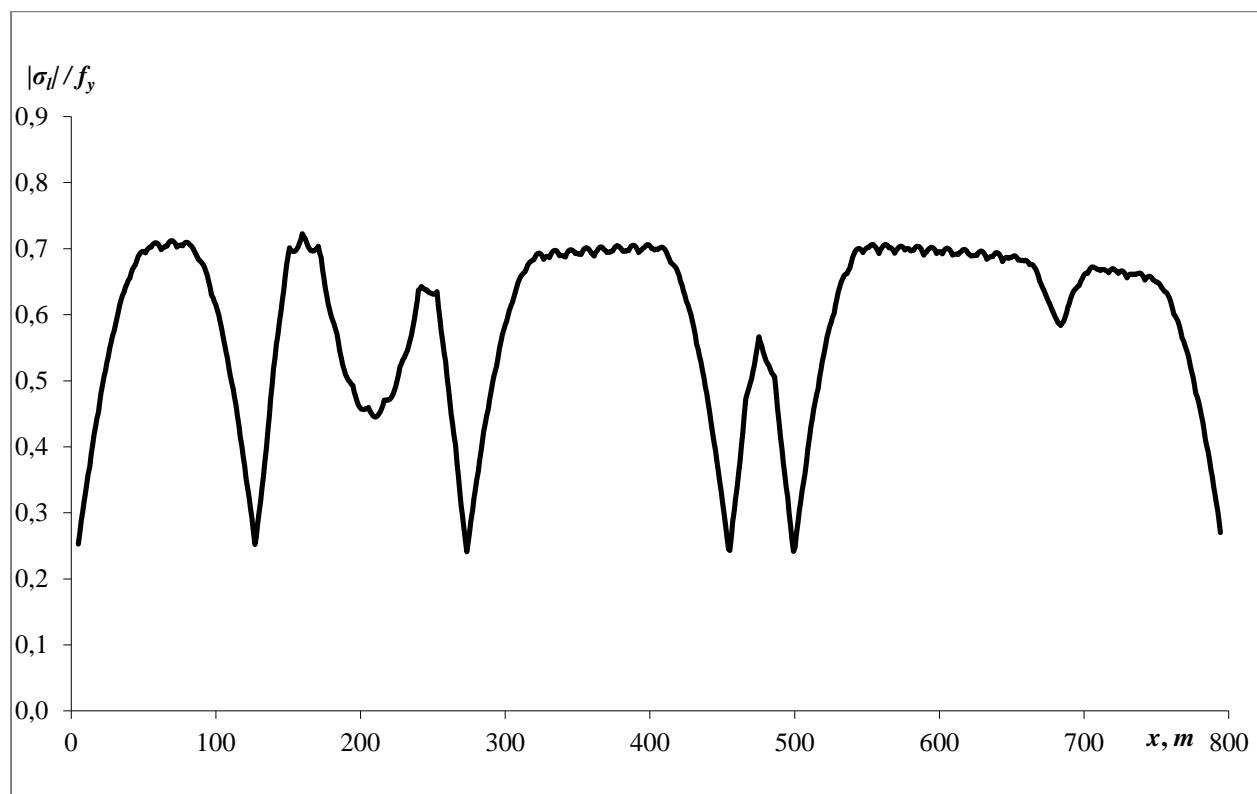
U Tablici 11. su prikazani rezultati najmanjih i najvećih vrijednosti naprezanja za korigirani profil dna.

Tablica 11. Ekstremne vrijednosti naprezanja

Ekstremne vrijednosti naprezanja			
	min	max	
$p_i$	8424172	8869698	Pa
$\sigma_h$	180,373	182,361	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_a$	80,6484	87,003	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_b$	-162,68	164,267	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_l$	83,0913	249,078	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_l^{(2)}$	-81,975	87,003	N/mm <sup>2</sup>
$t$	-3,1676	3,33064	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e$	156,271	223,151	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e^{(2)}$	156,753	232,482	N/mm <sup>2</sup>
$ \sigma_h  / f_y$	0,52337	0,52913	
$ \sigma_a  / f_y$	0,23401	0,25245	
$ \sigma_b  / f_y$	2,9E-10	0,47663	
$ \sigma_l  / f_y$	0,2411	0,72272	
$ \sigma_l^{(2)}  / f_y$	0,00049	0,25245	
$\sigma_e / f_y$	0,45343	0,64749	
$\sigma_e^{(2)} / f_y$	0,45483	0,67456	

### 6.3.1 Ukupna normalna naprezanja

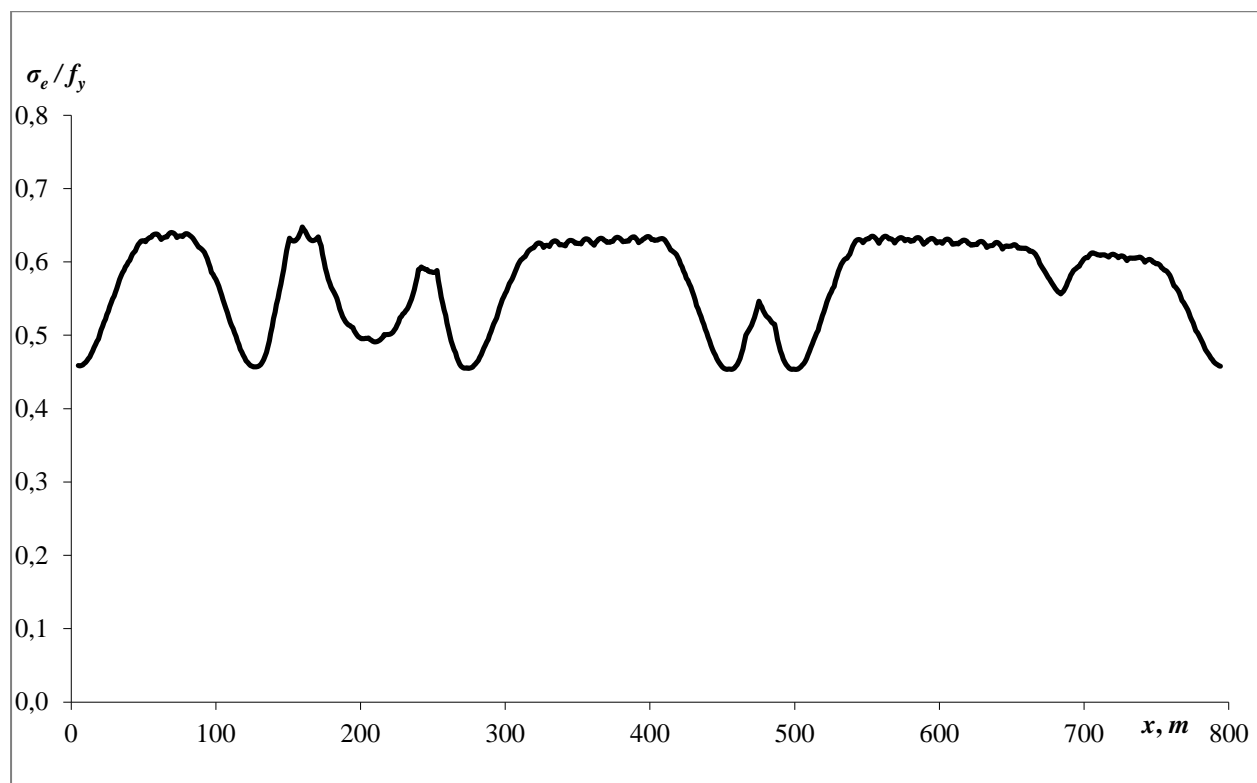
Slika 16. prikazuje omjer normalnih i dozvoljenih naprezanja po duljini cjevovoda. Na slici je vidljivo da su dobivena naprezanja unutar dozvoljenih vrijednosti, odnosno omjer dobivenih i dozvoljenih naprezanja je manji od 0,8 kao što je propisano u pravilima DNV-a.



Slika 16. Omjer normalnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda

### 6.3.2 Ekvivalentna naprezanja

Slika 17. prikazuje omjer ekvivalentnih Von-Misesovih i dozvoljenih naprezanja. Sa slike je vidljivo da su dobivena ekvivalentna naprezanja unutar dozvoljenih vrijednosti, odnosno omjer dobivenih i dozvoljenih naprezanja je manji od 0,8 kao što je propisano u pravilima DNV-a.



Slika 17. Omjer ekvivalentnog i dozvoljenog naprezanja po duljini cjevovoda



## 6.4 Procjena strukturnog integriteta

Provjera podobnosti odnosno procjena strukturnog integriteta provedena je prema pravilima Det Norske Veritasa (Offshore standard DNV-OS-F101) [6]. Proračun je rađen u programu Wolfram Mathematica.

Za početak su određene karakteristike materijala pomoću izraza:

$$f_y = SMYS \cdot \alpha_u \quad (35)$$

$$f_u = SMTS \cdot \alpha_u \quad (36)$$

gdje je:

$f_y$  - granica popuštanja

SMYS - minimalna granica popuštanja

$\alpha_u$  - faktor čvrstoće materijala

$f_u$  - vlačna čvrstoća

SMTS - minimalna vlačna čvrstoća

Zatim su određene debljine koristeći izraze:

$$t_1 = (t - t_{fab}) \quad (37)$$

gdje je.

$t_1$  - karakteristična debljina stijenke

$t$  - debljina stijenke

$t_{fab}$  - tolerancija za debljinu

Tlak koji uzrokuje puknuće cjevovoda dobije se pomoću izraza:

$$p_{bt1} = \frac{2 \cdot t_1}{D_o - t_1} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

gdje je:

$p_{bt1}$  - tlak koji uzrokuje puknuće cjevovoda

Kriterij koji mora biti zadovoljen je:

$$p_{tx} - p_e \leq \frac{p_{bt1}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (39)$$

gdje je:

$p_{lx}$ - lokalni tlak

$p_e$ - vanjski tlak

$\gamma_m$ - faktor otpora materijala

$\gamma_{SC}$ - faktor sigurnosti

Provjera pojave lokalnog izvijanja provodi se na sljedeći način:

$$p_{elt1} = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t_1}{D_o}\right)^3}{1 - \nu} \quad (40)$$

$$p_{ppt1} = f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{2 \cdot t_1}{D_o} \quad (41)$$

gdje je.

$p_{elt1}$  - granični vanjski tlak za lokalno izvijanje u elastičnom području

$\nu$  - Poissonov koeficijent

$p_{pt1}$  - granični vanjski tlak za lokalno izvijanje u plastičnom području

$\alpha_{fab}$  - faktor izrade

Kada su dobiveni navedeni tlakovi bilo je moguće izračunati kritični tlak pomoću izraza:

$$(p_{ct1} - p_{elt1}) \cdot (p_{ct1}^2 - p_{pt1}^2) = p_{ct1} \cdot p_{elt1} \cdot p_{pt1} \cdot f_o \cdot \frac{D_o}{t_1} \quad (42)$$

gdje je:

$p_{ct1}$  - karakteristični vanjski tlak koji uzrokuje lokalno izvijanje

$f_o$  - ovalnost

Kriterij koji treba biti zadovoljen je:

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_{ct1}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (43)$$

Sve navedene formule vrijede i za debljinu  $t_2$  i za tu debljinu su također računane.

Formula kojom se provjerava pojava propagacije lokalnog izvijanja cjevovoda je:

$$p_{prt2} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \left(\frac{t_2}{D_o}\right)^{2,5} \quad (44)$$

Kriterij koji mora biti zadovoljen je:

$$p_e < \frac{p_{prt2}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (45)$$

Proračun lokalnog izvijanja kod kombiniranog opterećenja računa se iz jednadžbe za uvjet kada je unutarnji tlak veći od vanjskog ( $p_i > p_e$ ):

$$p_b = \frac{2 \cdot t}{D_o - t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (46)$$

Za daljni proračun korištene su vrijednosti maksimalnog momenta i efektivne aksijalne sile koji su dobiveni iz programa LS-DYNA.

Koristi se izraz:

$$M_{sd} = M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + M_E \cdot \gamma_E \quad (47)$$

gdje je:

$M_{sd}$  - moment uslijed kombiniranog opterećenja

$M_F$  - moment od operativnih opterećenja

$\gamma_F$  - faktor utjecaja operativnog opterećenja

$\gamma_C$  - faktor stanja

$\gamma_E$  - faktor utjecaja okolišnih opterećenja

$M_E$  - moment uslijed okolišnih opterećenja

Izraz za silu je:

$$S_{sd} = S_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C \quad (48)$$

gdje je:

$S_{sd}$  - sila uslijed kombiniranog opterećenja

$S_F$  - sila uslijed operativnog opterećenja

Na kraju se računaju momenti i sile pomoću izraza:

$$M_{pt2} = f_y \cdot (D_o - t_2)^2 \cdot t_2 \quad (49)$$

$$S_{pt2} = f_y \cdot \pi \cdot (D_o - t_2) \cdot t_2 \quad (50)$$

gdje je:

$M_{pt2}$  – granični moment

$S_{pt2}$  – granična aksijalna sila

Uvjeti koji moraju biti zadovoljeni su:

$$\frac{p_{li} - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \quad (51)$$

$$\left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{M_{sd}}{\alpha_c} + \left( \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c} \right)^2 \right)^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_{li} - p_e}{\alpha_c \cdot p_b} \right)^2 \leq 1 \quad (52)$$

Ukoliko je unutarnji tlak manji od vanjskog ( $p_i < p_e$ ) mora biti zadovoljen sljedeći kriterij:

$$\left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{M_{sd}}{\alpha_c} + \left( \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c} \right)^2 \right)^2 + \left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{\alpha_c \cdot p_{ct2}} \right)^2 \leq 1 \quad (53)$$

### 6.4.1 Rezultati za originalni profil

U Tablici 12. su navedeni ulazni podatci potrebni za proračun.

Tablica 12. Ulazni podatci

Ulazni podatci		
SMYS	359000	kN/m <sup>2</sup>
SMTS	455000	kN/m <sup>2</sup>
$\alpha_u$	0,96	
$t_{fab}$	0,001	m
$\gamma_m$	1,15	
$\gamma_{sc}$	1,308	
$p_e$	537,19168	kPa
$p_{li}$	8869,9992	kPa
E	210000000	kN/m <sup>2</sup>
$\nu$	0,3	
$p_{min}$	0	kPa
$\alpha_{fab}$	0,93	
$f_o$	0,005	
$\gamma_F$	1,2	
$\gamma_c$	1,07	
$\gamma_E$	0,7	

Maksimalne vrijednosti momenta i aksijalne sile su dobiveni iz LS-DYNE i iznose  $M=6751$  kNm i  $F_a=363,8$  kN.

Proračun je rađen u programu Wolfram Mathematica.

U Tablici 13. dan je prikaz dobivenih rezultata.



Tablica 13. Rezultati proračuna

Rezultati		
$p_{bt1}$	17452,1	kPa
$p_{elt1}$	4559,28	kPa
$p_{pt1}$	13754,4	kPa
$p_{ct1}$	3298,53	kPa
$p_{elt2}$	5292,55	kPa
$p_{pt2}$	14455,4	kPa
$p_{ct2}$	3857,68	kPa
$p_{prt2}$	856,639	kPa
$p_b$	18362,1	kPa
$M_{sd}$	8668,28	kNm
$S_{sd}$	467,119	kN
$M_{pt2}$	5676,96	kNm
$S_{pt2}$	19954,2	

Iz rezultata je dobiveno da su zadovoljeni kriteriji navedeni u jednadžbama (39), (43) i (45).

No kriteriji izvijanja izraženi jednadžbama (52) i (53) nisu zadovoljeni što znači da će doći do izvijanja cjevovoda.

$$\left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{M_{sd}}{\alpha_c} + \left( \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c} \right)^2 \right)^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_{li} - p_e}{\alpha_c \cdot p_b} \right)^2 \leq 1$$

$$4,95007 > 1$$

$$\left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{M_{sd}}{\alpha_c} + \left( \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c} \right)^2 \right)^2 + \left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{\alpha_c \cdot p_{ct2}} \right)^2 \leq 1$$

$$4,86178 > 1$$

### 6.4.2 Rezultati za korigirani profil

Maksimalne vrijednosti momenta i aksijalne sile su dobiveni iz LS-DYNE i iznose  $M=1748$  kNm i  $F_a=282,7$  kN. U Tablici 14. dan je prikaz dobivenih rezultata.

Tablica 14. Rezultati proračuna

Rezultati 2.profil		
$p_{bt1}$	17452,1	kPa
$p_{elt1}$	4559,28	kPa
$p_{pt1}$	13754,4	kPa
$p_{ct1}$	3298,53	kPa
$p_{elt2}$	5292,55	kPa
$p_{pt2}$	14455,4	kPa
$p_{ct2}$	3857,68	kPa
$p_{prt2}$	856,639	kPa
$p_b$	18362,1	kPa
$M_{sd}$	2244,43	kNm
$S_{sd}$	362,987	Kn
$M_{pt2}$	5676,96	kNm
$S_{pt2}$	19954,2	

Iz rezultata je dobiveno da su zadovoljeni svi kriteriji što znači da neće doći do izvijanja.

$$\left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{M_{sd}}{\alpha_c} + \left( \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c} \right)^2 \right)^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_{li} - p_e}{\alpha_c \cdot p_b} \right)^2 \leq 1$$

$$0,452022 < 1$$

$$\left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{M_{sd}}{\alpha_c} + \left( \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}}{\alpha_c} \right)^2 \right)^2 + \left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{\alpha_c \cdot p_{ct2}} \right)^2 \leq 1$$

$$0,363737 < 1$$

## 7. ZAKLJUČAK

Podmorski cjevovodi predstavljaju efikasan način transporta ugljikovodika te je razvojem i napretkom tehnologije omogućeno polaganje cjevovoda raznih dimenzija.

Zadatak ovog rada bio je izvršiti procjenu strukturnog integriteta položenog podmorskog cjevovoda. Provedene su analize za cjevovod koji je položen na dva različita profila morskog dna, originalni te korigirani profil. Ovakvi modeli su nelinearni pa je potrebno koristiti odgovarajuće iterativne metode. Modeli su napravljeni u programskom paketu LS-DYNA koji omogućuje rješavanje nelinearnih problema. Za svaki profil morskog dna definiran je FEM model koji se sastoji od cjevovoda koji je definiran grednim konačnim elementima i morskog dna koji je definiran ljuskastim konačnim elementima.

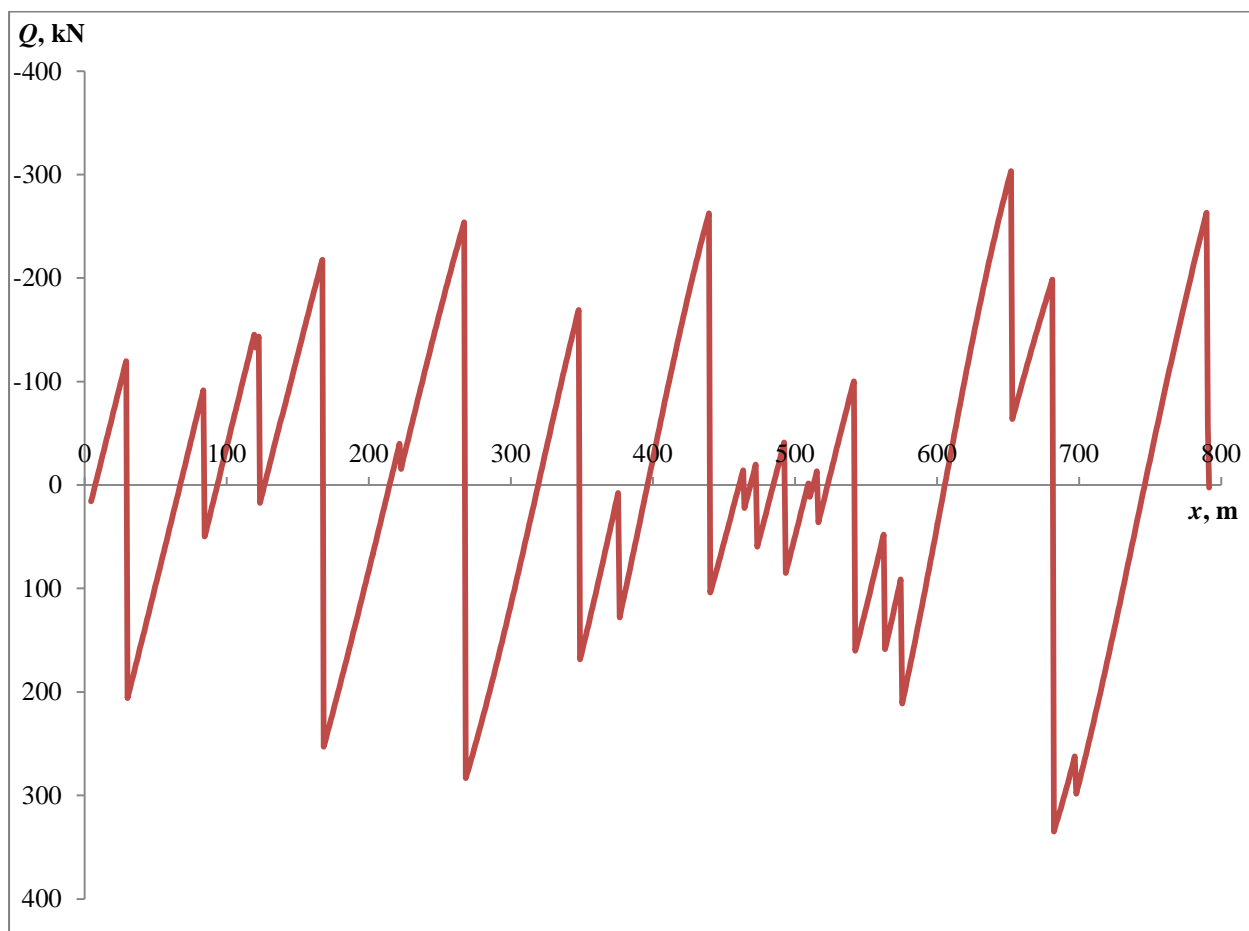
Za originalan profil podmorske trase razmatrano je neravno i nepravilno morsko dno. Ako je dno neravno cjevovod će nalegnuti na više vrhove dna, a dio između će ostati nepoduprt i može doći do prevelikog savijanja cjevovoda. To pokazuju i dobiveni rezultati nakon provedene analize. Momenti savijanja su puno veći od graničnih vrijednosti odnosno maksimalan moment savijanja koji se pojavljuje iznosi 6751 kNm što je mnogo veće od gornje granične vrijednosti koja iznosi 1735 kNm. Naravno zbog utjecaja momenta savijanja i naprezanja su mnogo veća od dozvoljenih te bi došlo do popuštanja materijala cjevovoda.

Za drugi model je razmatran korigirani profil podmorske trase, a optimizacija profila je rađena kako bi se prikazao utjecaj korekcije profila na smanjenje opterećenja. Korištena je Euler-Bernoulli teorija grede za opis odziva cjevovoda, a profil rute modeliran je po segmentima gdje svaki segment opisan polinomom 4. reda tako da se može u razmatranje uzeti ukupno distribuirano opterećenje na cjevovod. Dobiveni rezultati pokazuju da se korekcijom profila može znatno utjecati na smanjenje momenta savijanja. Maksimalni moment za korigirani profil iznosi 1748 kNm što je mnogo manje od originalnog profila. Naprezanja su manja od dozvoljenih i zadovoljeni su kriteriji popuštanja materijala te izvijanja.

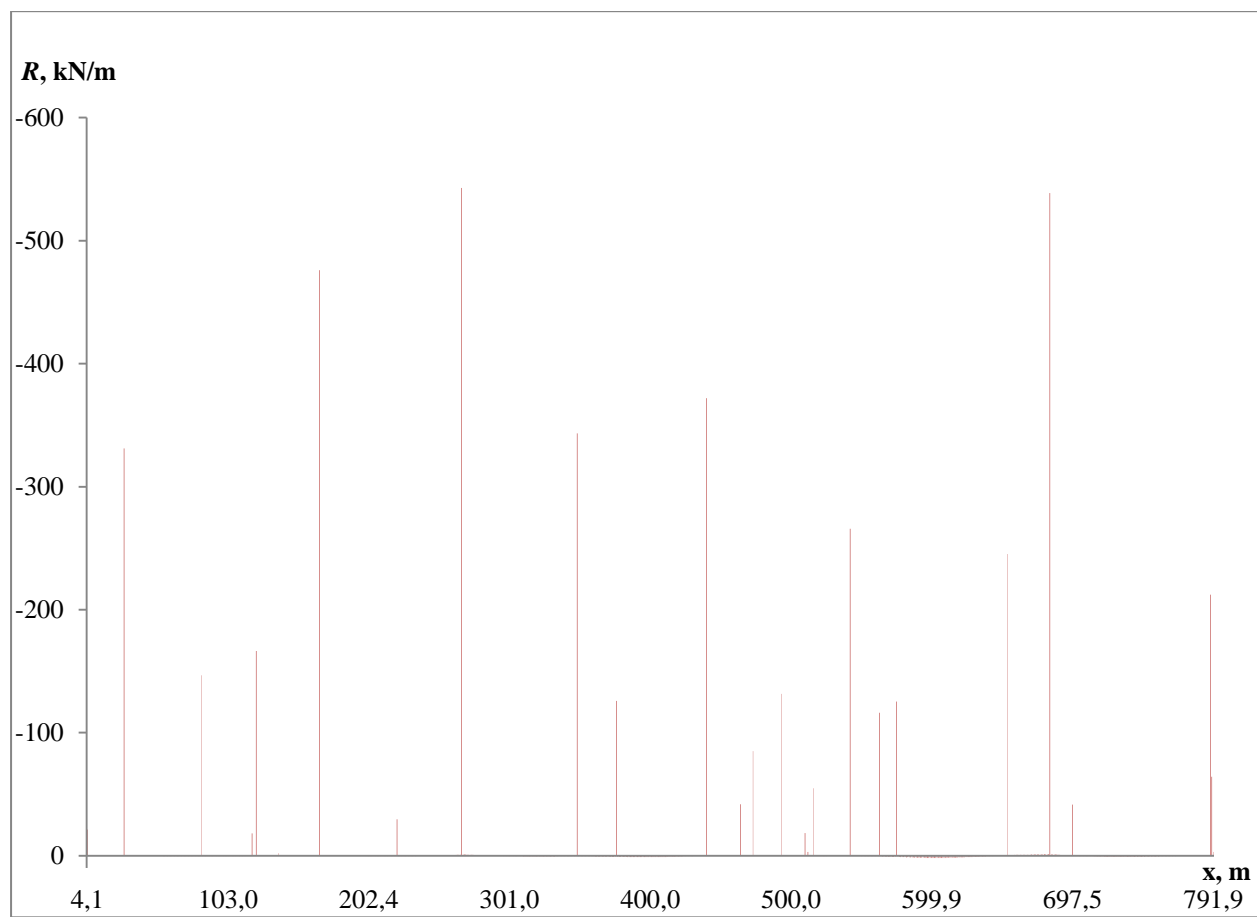
U ovom radu je pokazano da je često potrebno provoditi korekciju profila morskog dna kako bi se izbjegla velika opterećenja i osigurala hidrodinamička stabilnost i otpornost na izvijanje. U stvarnosti se to postiže poravnavanjem morskog dna ili se cjevovod polaže u iskopani rov koji se djelomično zatrpava ili oko njega nasipava pjesak ili neki drugi materijal.

## 8. LITERATURA

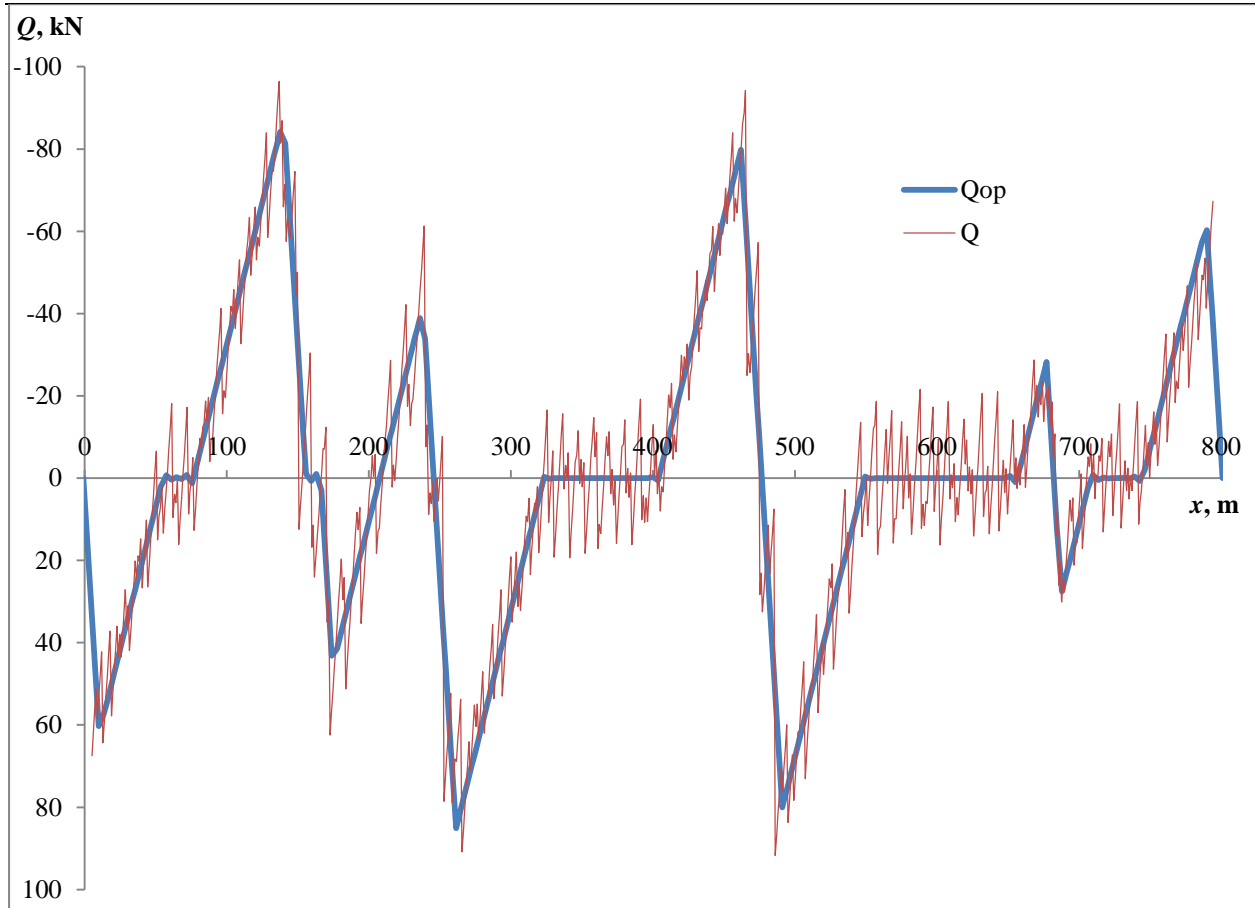
- [1] Šivić, S.: MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA; Doktorska disertacija; Sveučilište u Rijeci; Tehnički fakultet; Rijeka 2012.
- [2] TEHNOLOGIJA MORA, Polaganje podmorskih cjevovoda; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.
- [3] Pršić M; Pomorske građevine , Pogl.2 Podmorski cjevovodi, Zagreb 2013.
- [4] Braestrup, M. W.; Andersen, J. B.; Andersen, L. W.; Bryndum, M.; Christensen, C. J.; Rishøj Nielsen, N. J.: Design and Installation of Marine Pipelines; Blackwell Science Ltd; 2005.
- [5] Hallquist J. ;LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore software technology corporation, 1998.
- [6] Det Norske Veritas: Offshore Standard DNV-OS-F101, Submarine Pipeline Systems, 2010.
- [7] Čorić V. ,Čatipović, I., Radanović J.: Subsea pipe laying in coastal area; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2012.
- [8] Kablar, I.: TEHNOLOGIJE POLAGANJA PODMORSKIH CJEVOVODA U PRIOBALNOM PODUČJU – Diplomski rad; Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb 2007.
- [9] LS-DYNA Keyword User`s Manual, Livermore software technology corporation, 2006.
- [10] Wikipedia: submarine pipeline; [http://en.wikipedia.org/wiki/Submarine\\_pipeline](http://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_pipeline)

**PRILOG A- Smična sila i reakcija podloge za originalni i korigirani profil**

Slika 18. Smična sila za originalni profil

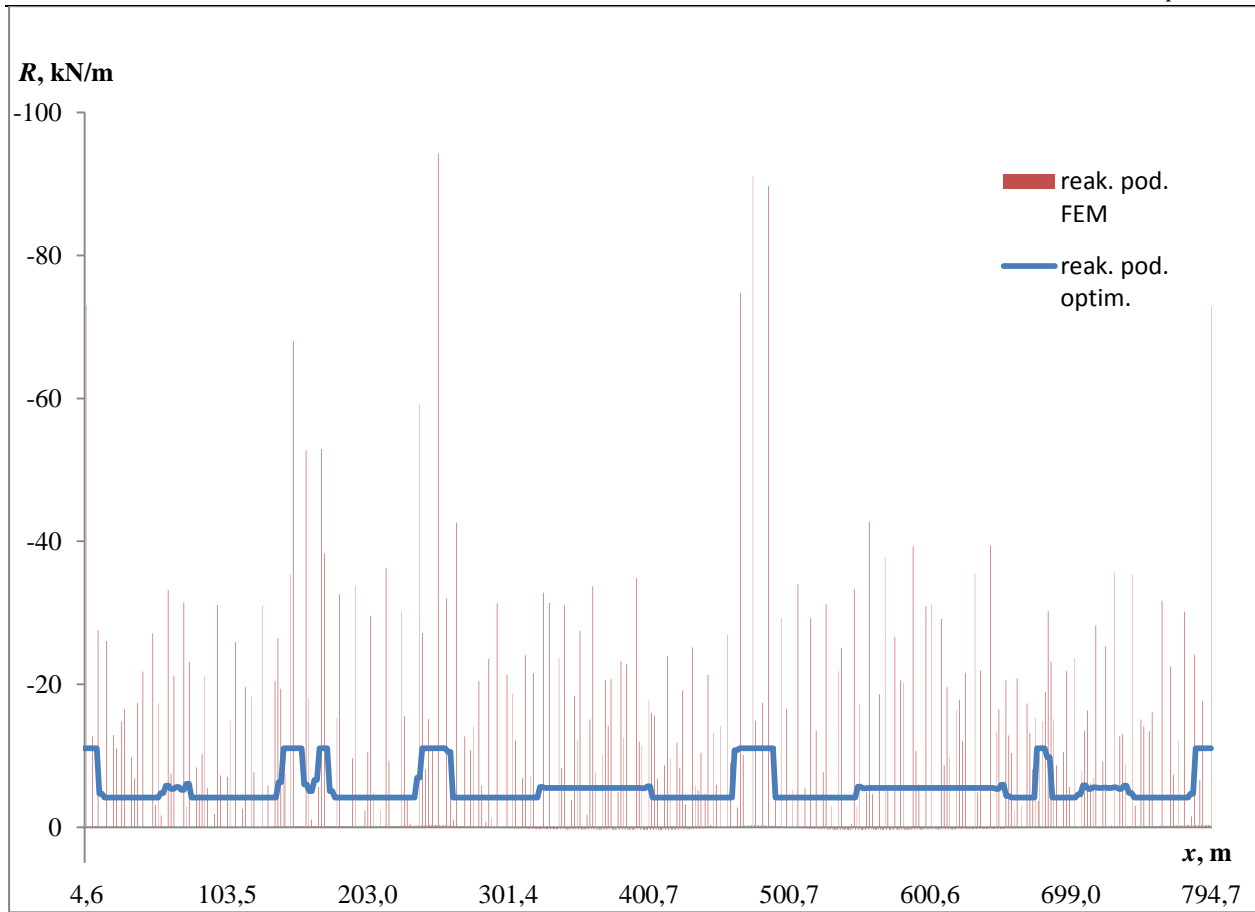


Slika 19. Reakcija podloge za originalni profil



Slika 20. Smična sila za korigirani profil

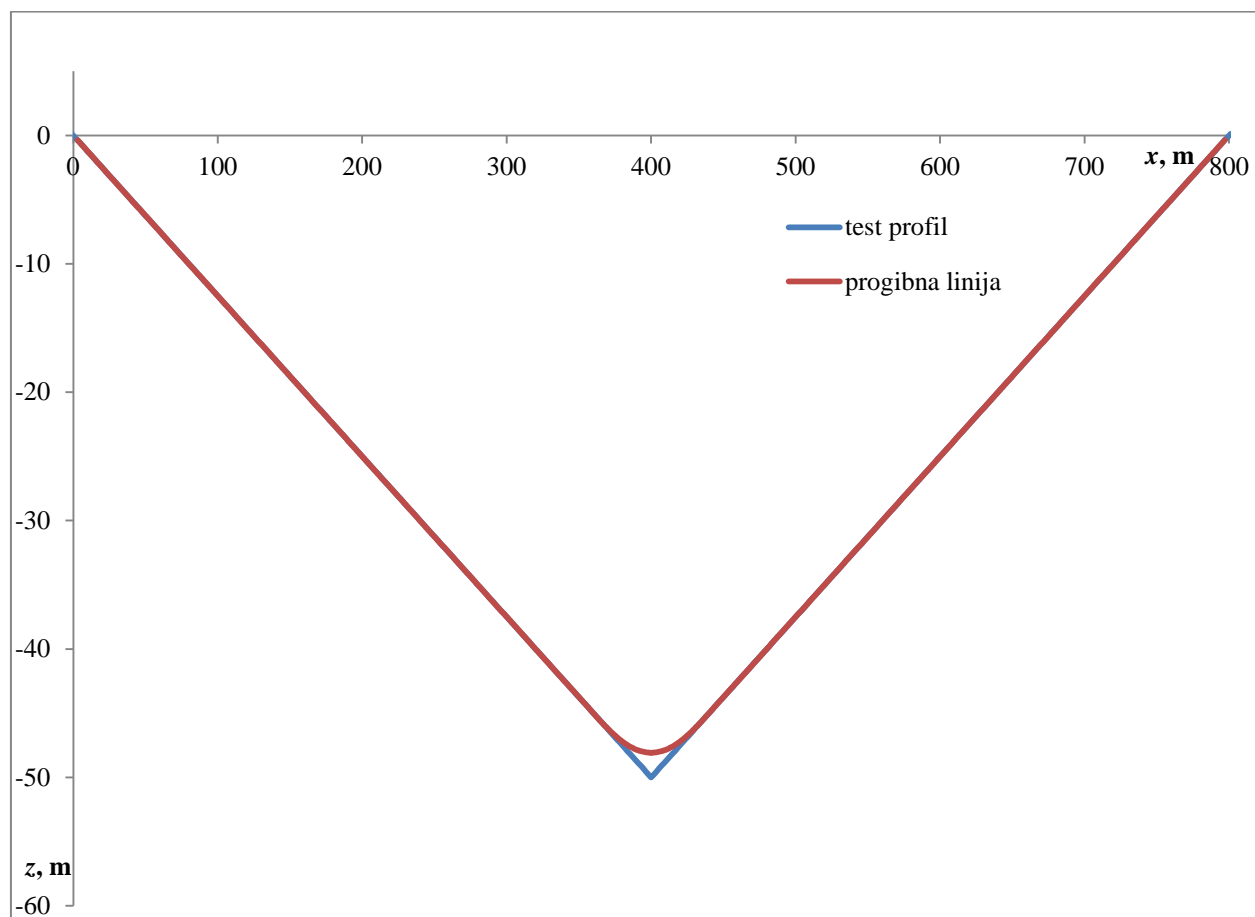




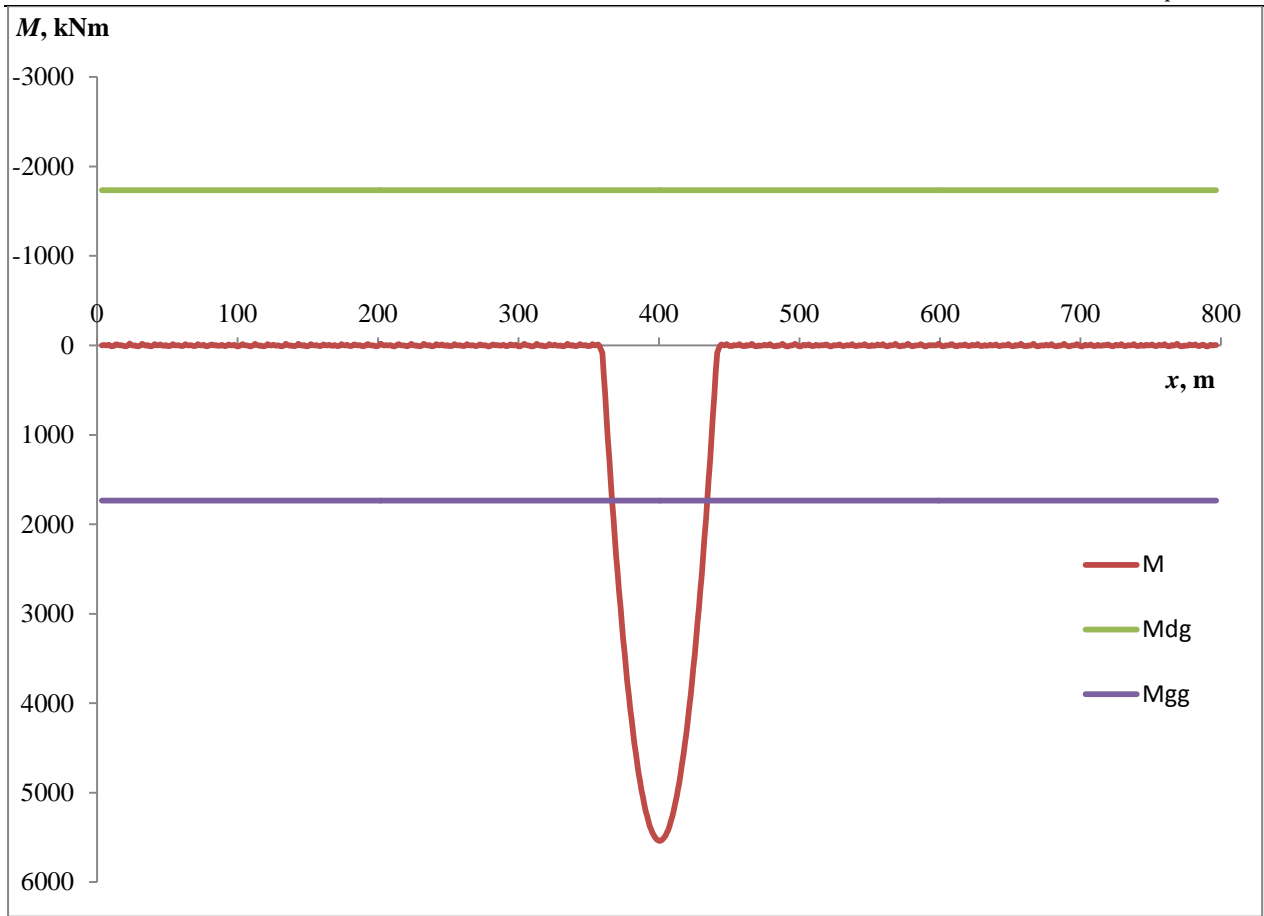
Slika 21. Reakcija podloge za korigirani profil

**PRILOG B- Trokutasti i testni optimizirani profil podmorske trase**

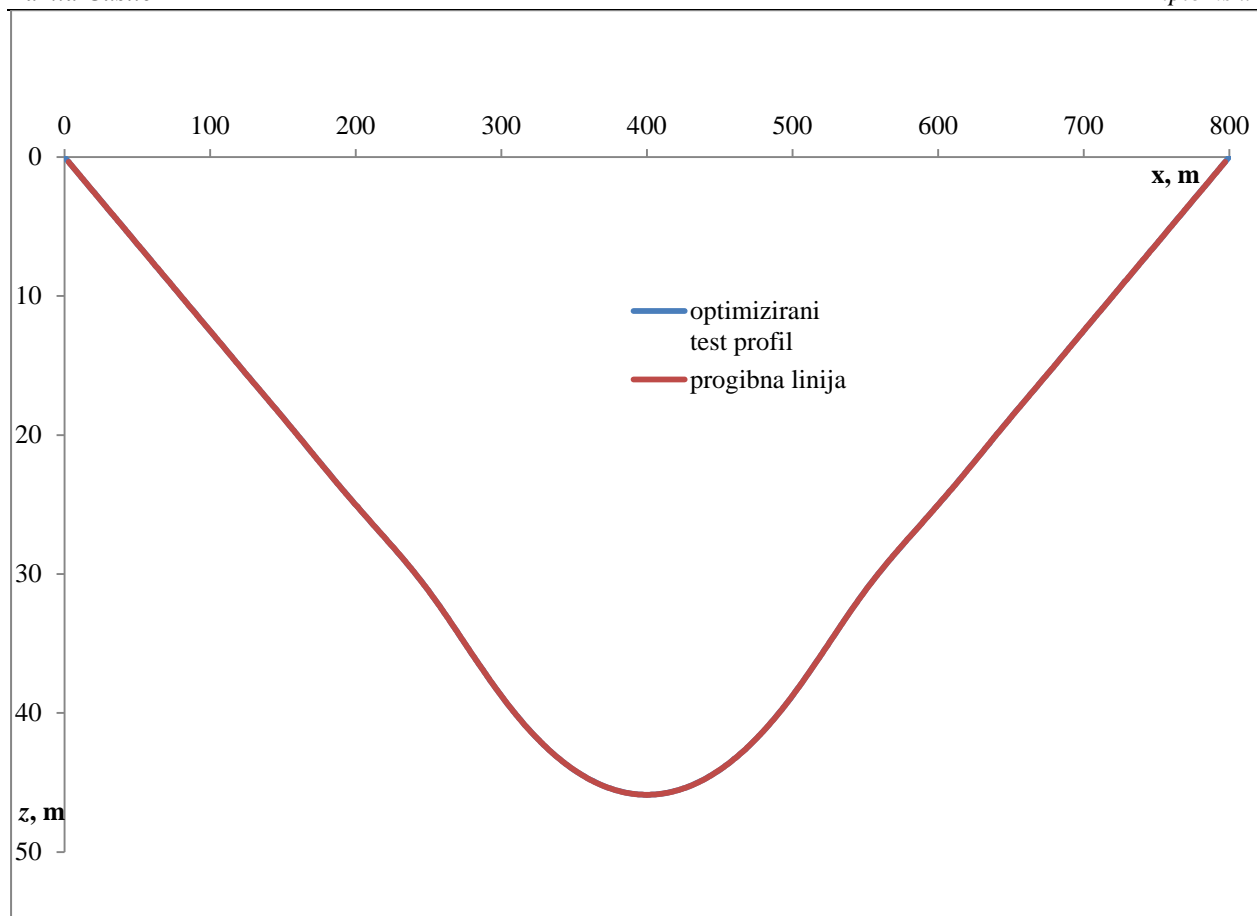
Korištena optimizacijska procedura testirana je na analitički definiranom profilu trokutastog oblika. U prvom koraku proveden je proračun progibne linije i momenta savijanja pomoću programa LS-DYNA. Nakon toga proveden je isti proračun ali nakon optimizacije prikazanog trokutastog profila.



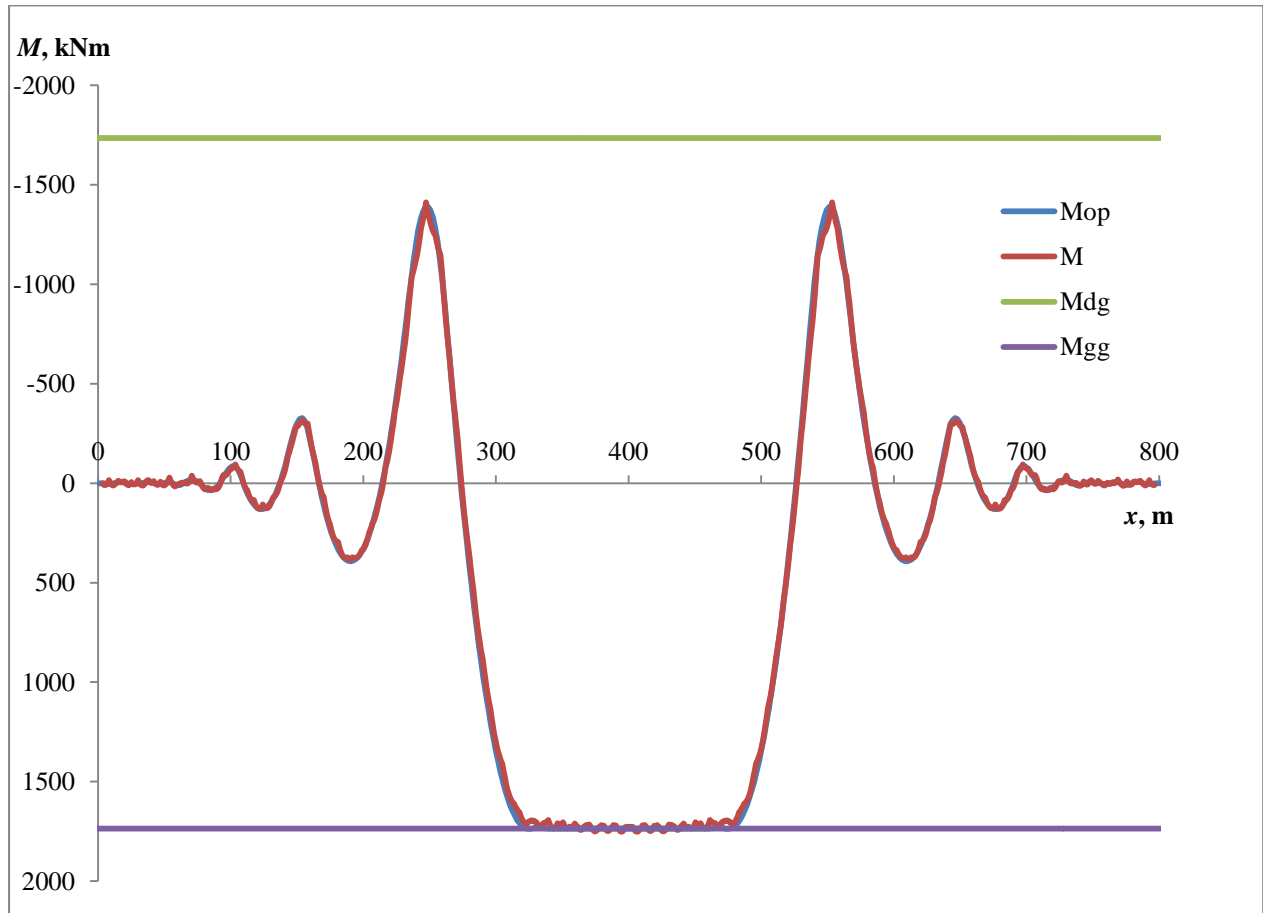
Slika 22. Usporedba trokutastog profila i progibne linije



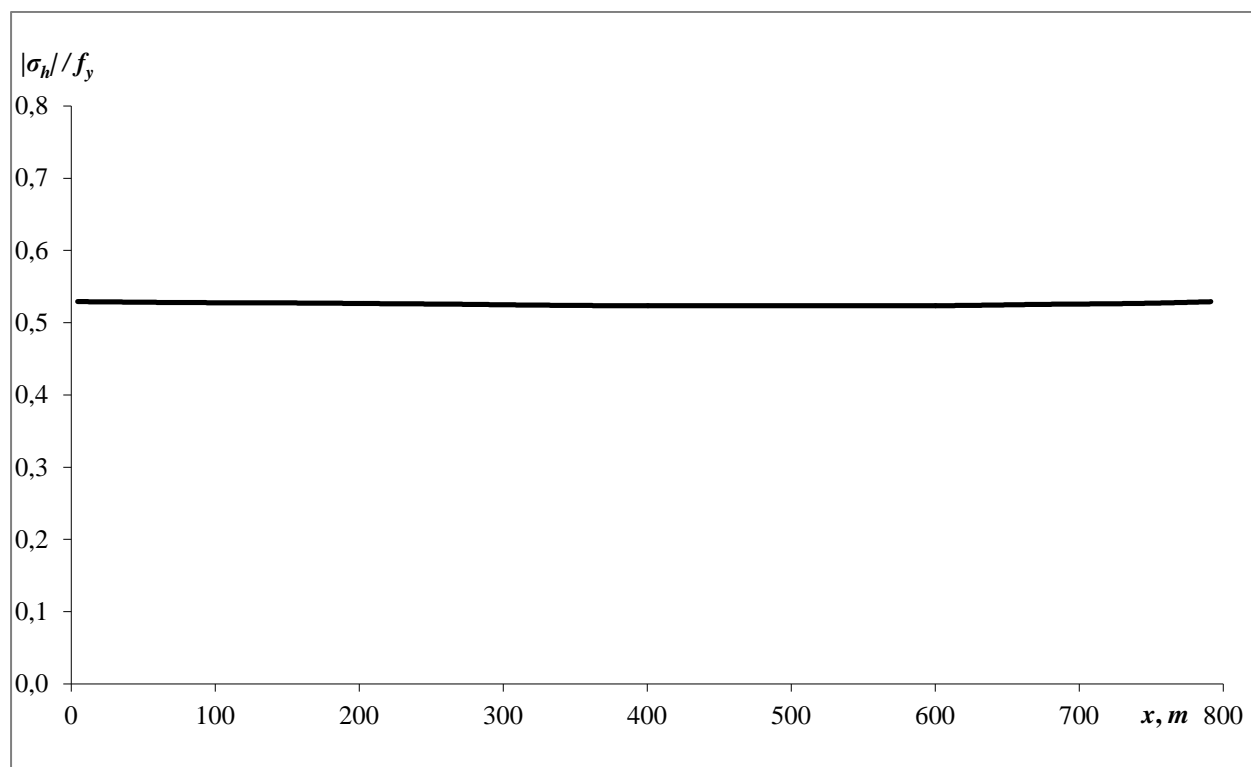
Slika 23. Moment savijanja za trokutasti profil



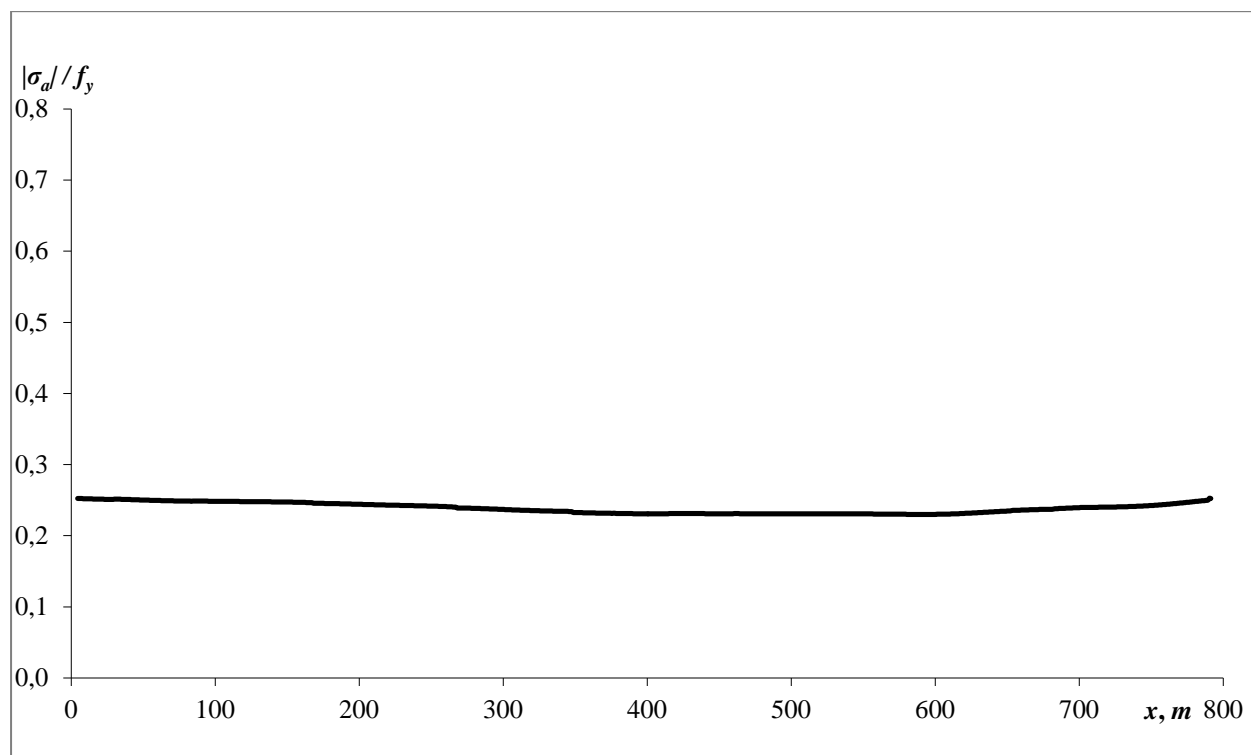
Slika 24. Usporedba testnog optimiziranog profila i progibne linije



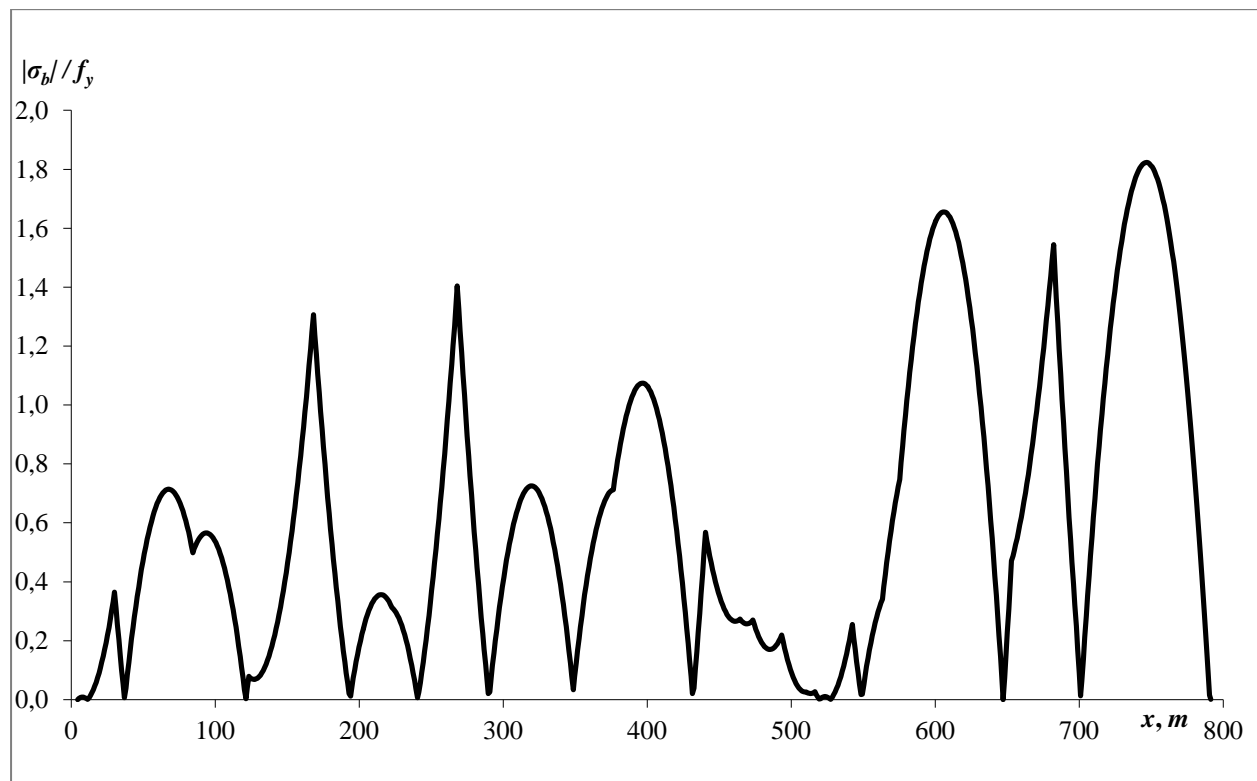
Slika 25. Moment savijanja za testni optimizirani profil

**PRILOG C- Cirkularna, aksijalna i savojna naprezanja za originalni i korigirani profil**

Slika 26. Cirkularna naprezanja za originalni profil

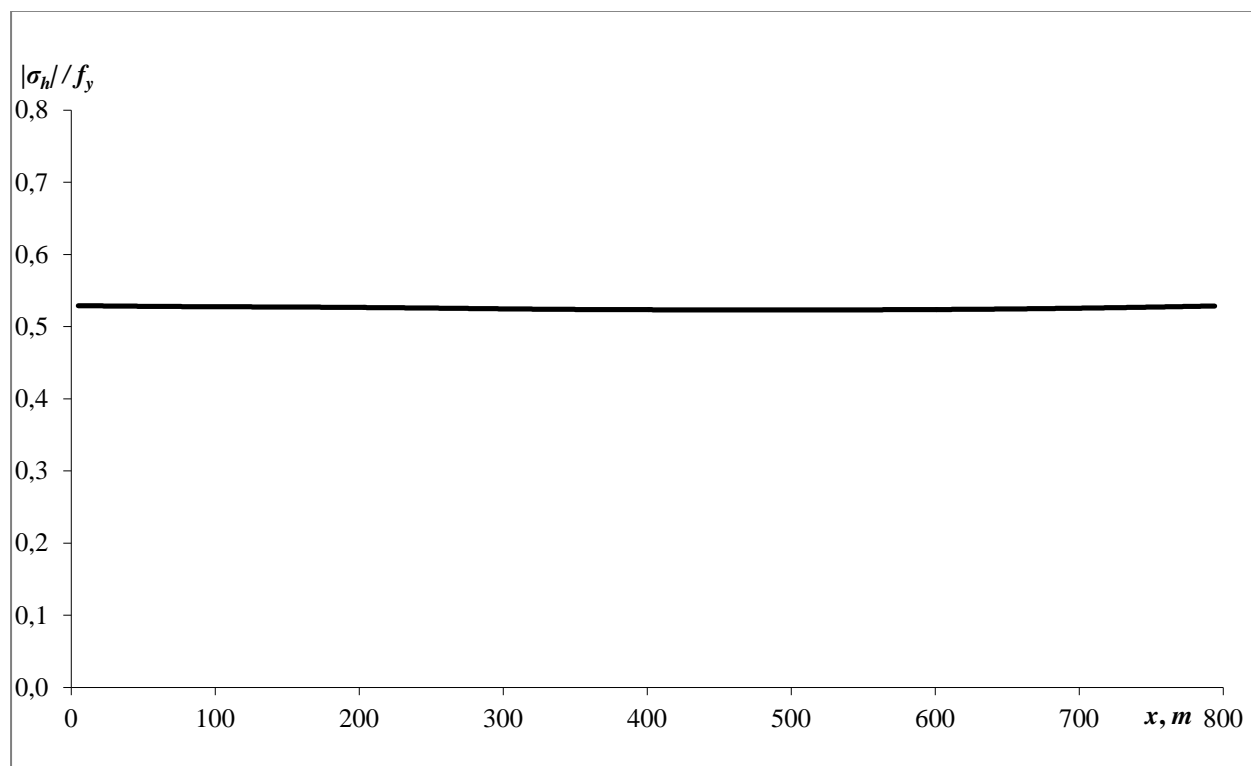


Slika 27. Aksijalna naprezanja za originalni profil

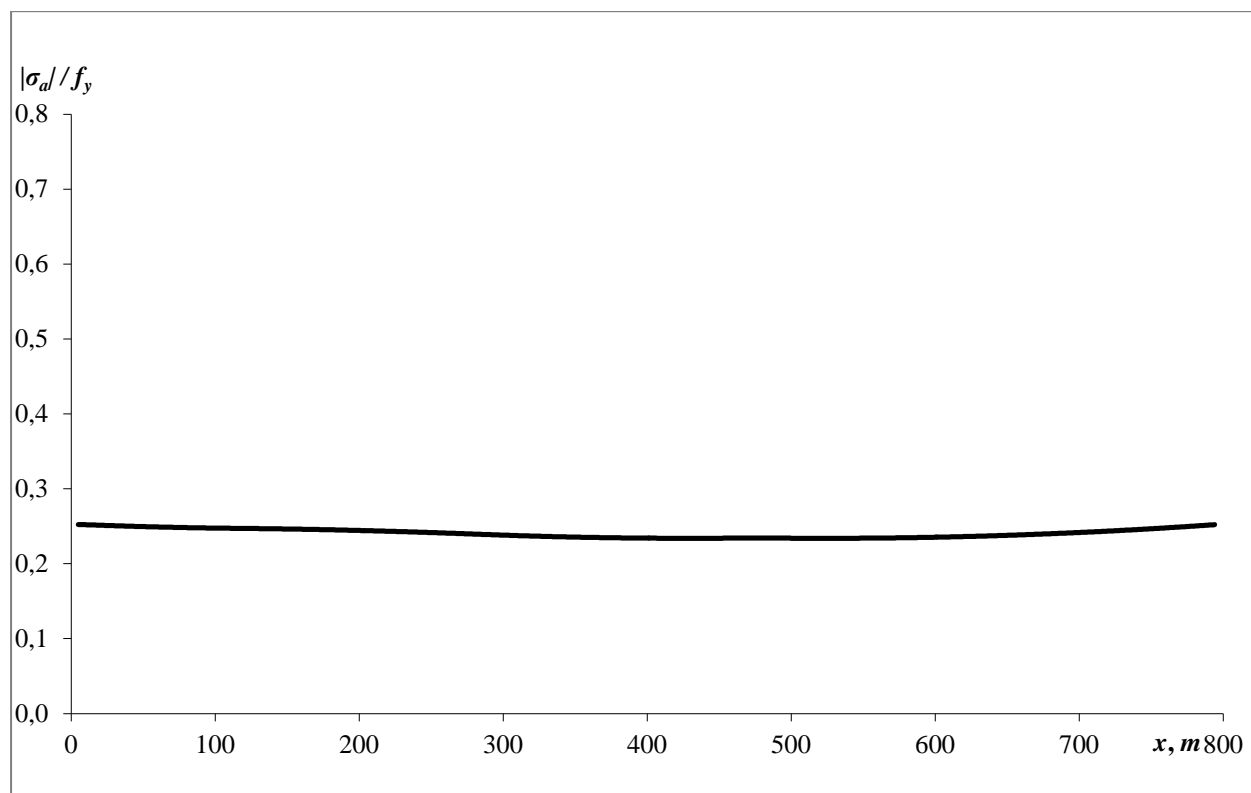


Slika 28. Savojna naprezanja za originalni profil

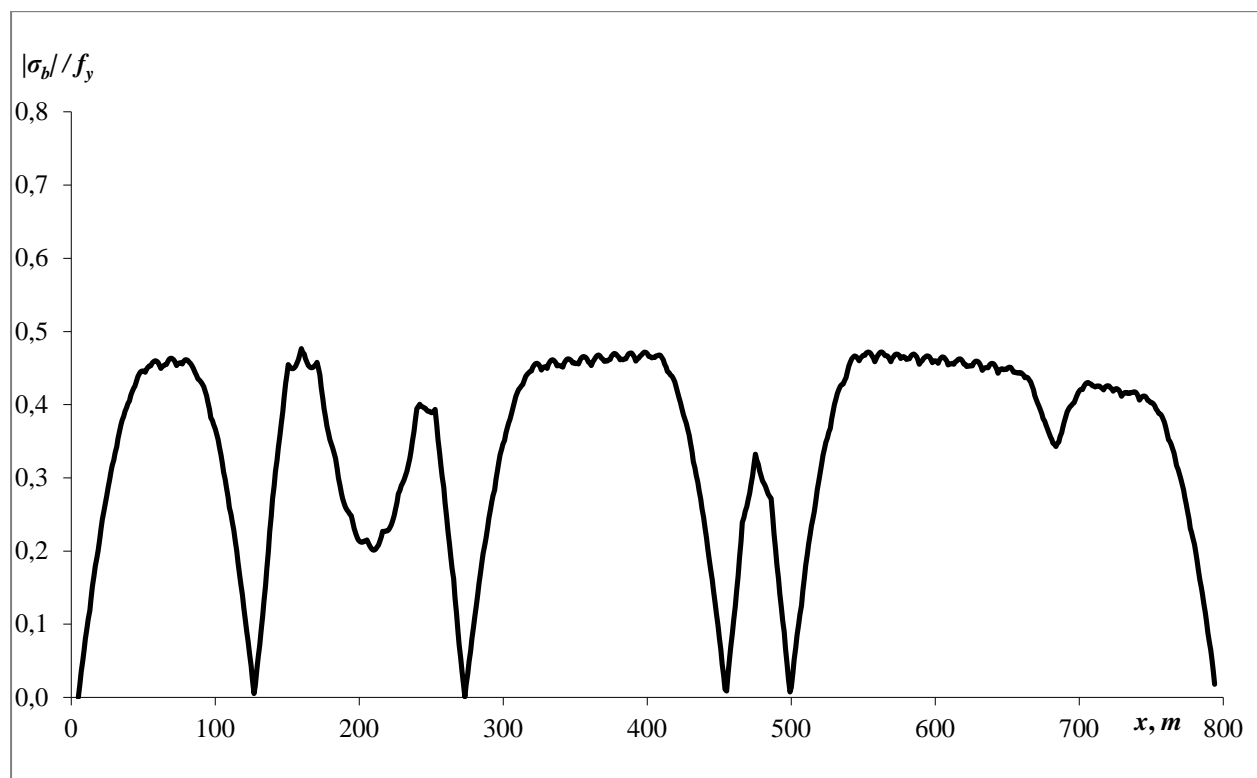




Slika 29. Cirkularna naprezanja za korigirani profil



Slika 30. Aksijalna naprezanja za korigirani profil



Slika 31. Savojna naprezanja za korigirani profil