

Osnivanje sidrenog sustava pomorskog objekta za proizvodnju, skladištenje i istovar ugljikovodika

Burazer, Frane

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:917404>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Frane Burazer**

Mat. br.: 0035177868

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

OSNIVANJE SIDRENOG SUSTAVA POMORSKOG OBJEKTA ZA PROIZVODNJU, SKLADIŠTENJE I ISTOVAR UGLJIKOVODIKA

Naslov rada na engleskom jeziku:

DESIGN OF MOORING SYSTEM FOR FLOATING PRODUCTION, STORAGE AND OFFLOADING (FPSO) VESSEL

Opis zadatka:

Pomorski objekti za proizvodnju, skladištenje i istovar ugljikovodika (*eng. Floating Production, Storage And Offloading - FPSO*) pokazali su se vrlo učinkoviti u svojoj primjeni. Prvi objekt ovog tipa proizveden je 1977. godine dok ih se danas može pronaći preko 270 na svim svjetskim morima. Sastavni dio ovog objekta je sidreni sustav koji služi za pozicioniranje i održavanje zadane lokacije. U ovom diplomskom radu pristupit će se osnivanju navedenog sidrenog sustava.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Napraviti pregled dostupnih sličnih projektnih rješenja sidrenog sustava za zadani tip objekta.
2. Za zadanu lokaciju prikupiti dostupne podatke o stanju okoliša tj. podatke o vjetru, valovima i morskoj struji.
3. Definirati projektna stanja okoliša prema pravilima odabranoga klasifikacijskog društva te odrediti ukupna opterećenja na zadani pomorski objekt.
4. Definirati osnovne parametre sidrenog sustava te provesti proračun odziva i opterećenja.
5. Usporediti dobivene razine opterećenja sidrenog sustava s dopuštenim razinama (prema pravilima odabranog klasifikacijskog društva).

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

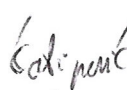
Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

Predviđeni datumi obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ivan Čatipović

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Frane Burazer

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Čatipović, dipl. ing.

Student:

Frane Burazer

Zagreb, 2016.

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

Hvala mojoj obitelji na podršci, strpljenju te velikoj potpori i razumijevanju koje su pokazivali za čitavo vrijeme mog studija.

Zahvaljujem se svojem mentoru Doc.dr.sc Ivanu Čatipoviću, dipl.ing. na vodstvu i savjetima koji su mi uvelike pomogli pri izradi ovog rada.

Na kraju hvala i svim profesorima koji su mi za vrijeme studija prenijeli svoja znanja i iskustva o brodogradnji.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | VI |
| SUMMARY | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ODABIR FORME | 2 |
| 3. TEORIJA POTENCIJALNOG STRUJANJA I GIBANJE BRODA NA VALOVIMA . | 4 |
| 3.1. TEORIJA POTENCIJALNOG STRUJANJA..... | 4 |
| 4. NUMERIČKO MODELIRANJE I PRORAČUN | 12 |
| 4.1. OPIS MODELIRANJA FPSO BRODA..... | 13 |
| 5. PRORAČUN SIDRENOG SUSTAVA | 15 |
| 5.1. OPTEREČENJA USIDRENOG OBJEKTA..... | 16 |
| 5.2. MATEMATIČKI MODEL SIDRENE LINIJE..... | 18 |
| 6. REZULTATI NUMERIČKOG PRORAČUNA..... | 24 |
| 6.1. POMORSTVENOST PLATFORME..... | 25 |
| 6.2. SIDRENI SUSTAV..... | 29 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 35 |
| LITERATURA..... | 36 |
| PRILOG..... | 38 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Sevan 1000 [2]..... | 2 |
| Slika 2. | Glavne geometrijske značajke FPSO SEVAN 1000 [2] | 3 |
| Slika 3. | Stupnjevi slobode gibanja broda na valovima [1]..... | 8 |
| Slika 4. | Prikaz forme FPSO broda za gaz $T=20m$ | 14 |
| Slika 5. | Prikaz forme FPSO broda za gaz $T=22m$ | 14 |
| Slika 6. | Skica pridneni lanac-obična lančanica | 8 |
| Slika 7. | Skica pridneni lanac+nerastezljivo uže bez težine..... | 20 |
| Slika 8. | Skica pridneni lanac+rastezljivouže bez težine | 13 |
| Slika 9. | Prijenosna funkcija odziva za poniranje | 25 |
| Slika 10. | Prijenosna funkcija odziva za posrtanje | 26 |
| Slika 11. | Prijenosna funkcija odziva za zalijetanje | 26 |
| Slika 12. | Spektar odziva za poniranje | 27 |
| Slika 13. | Spektar odziva za posrtanje..... | 28 |
| Slika 14. | Spektar odziva za zalijetanje..... | 28 |
| Slika 15. | Skica sidrenog sustava..... | 29 |
| Slika 16. | Ovisnost horizontalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=20m$ | 31 |
| Slika 17. | Ovisnost vertikalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=20m$ | 32 |
| Slika 18. | Ovisnost tlačne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=20m$ | 32 |
| Slika 19. | Profil sidrene linije za $T=20m$ | 33 |
| Slika 20. | Ovisnost horizontalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=22m$ | 33 |
| Slika 21. | Ovisnost vertikalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=22m$ | 34 |
| Slika 22. | Ovisnost tlačne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=22m$ | 34 |
| Slika 23. | Profil sidrene linije za $T=22m$ | 35 |

POPIS TABLICA

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| <i>Tablica 1.</i> | <i>Karakteristika pridnenog lanca</i> | <i>29</i> |
| <i>Tablica 2.</i> | <i>Karakteristika rastezljivog užeta</i> | <i>30</i> |
| <i>Tablica 3.</i> | <i>Podaci o brzini vjetra i morske struje</i> | <i>30</i> |
| <i>Tablica 4.</i> | <i>Vrijednosti sila</i> | <i>30</i> |
| <i>Tablica 5.</i> | <i>Karakteristične vrijednosti sidrenog sustava</i> | <i>31</i> |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------|----------|---|
| A_{jk} | | Matrica pridruženih masa vode |
| B_{jk} | | Matrica hidrodinamičkog prigušenja |
| C_{jk} | | Matrica krutosti povratnih sila |
| M_{jk} | | Matrica mase tijela |
| v_n | m/s | Brzina strujanja u smjeru normale |
| F_C | N | Vektor hidrostatičke sile |
| F_U | N | Vektor rezultirajuće uzbudne sile |
| M_C | Nm | Vektor hidrostatičkog momenta |
| M_U | Nm | Vektor rezultirajućeg uzbudnog momenta |
| d_s | m | Dubina sidrenja |
| s | m | Duljina lančanice |
| x_s | m | Duljina horizontalne projekcije lančanice |
| g | m/s^2 | Gravitacijska konstanta |
| H | m | Visina vala |
| k | rad/m | Valni broj |
| D_0 | M | Promjer FPSO broda |
| p | Pa | Konstantni tlak |
| R_{aw} | N | Dodatni otpor valova |
| A_T | m^2 | Površina poprečnog presjeka broda |
| T | m | Gaz broda |
| q | N/m | Distribuirana težina lančanice |
| σ | m | Pomak broda |
| Δ | m^3 | Istisnina trupa |
| ζ_a | m | Valna amplituda |
| η_3 | m | Amplituda poniranja |

| | | |
|-----------|-------------------|--|
| η_5 | m | Amplituda postranja |
| Φ | | Potencijal brzine strujanja |
| Φ_w | | Potencijal brzine strujanja vala |
| Φ_0 | | Potencijal brzine strujanja nailaznog vala |
| Φ_7 | | Potencijal brzine strujanja difrakcijske komponente vala |
| α | m/m | Valna strmina |
| ζ | m | Elevacija slobodne površine |
| ρ | kg/m ³ | Gustoća |
| ω | rad/s | Kružna valna frekvencija |
| $H_{1/3}$ | m | Značajna valna visina |
| F_w | N | Sila vjetra |
| C_w | | Koeficijent sile vjetra |
| V_w | m/s | Brzina vjetra |
| F_c | N | Sila morske struje |
| C_c | | Koeficijent sile morske struje |
| V_c | m/s | Brzina morske struje |
| D | m | Horizontalni pomak hvatišta |
| a | | Karakteristična vrijednost lančanice |

SAŽETAK

FPSO brod usidren je na velikim dubinama te služi za crpljenje, rafiniranje, skladištenje i prekrcavanje nafte i plina. U ovom radu proveden je proračun matematičkog modela sidrene linije. Prvo je bilo potrebno proračunati dinamički odziv pučinskog plutajućeg proizvodnog objekta (eng. Floating Production Storage and Off-loading).

Proračunat je odziv broda na pravilnim valovima za definirano stanja mora i to za različite gazove.

Proračun je proveden u programskom paketu *HydroSTAR* (Bureau Veritas). Osim odziva broda na valovima proračunate su i sile dodatnog otpora. Amplitude odziva broda prikazane su pomoću prijenosnih funkcija. Nakon toga se pristupilo proračunu matematičkog modela sidrene linije preko dobivenih komponenata otpora i karakteristika sidrenih linija. Na samom kraju prikazani su dobiveni rezultati pomorstvenosti, pomaka platforme te geometrijske značajke sidrenog sustava.

Ključne riječi: FPSO, pomorstvenost, potencijalno strujanje, metoda rubnih elemenata, sidreni sustav

SUMMARY

FPSO ship is anchored to great depths and is used for extraction, refinement process, storage and offloading oil and natural gas. This thesis deals with mathematical model of mooring line. Firstly, dynamical response of FPSO was calculated. Structural response was calculated for linear waves, waves for defined sea conditions and all of that for different draughts. Calculation was done in Hydrostar (BV) programme package. Added resistance forces were calculated in addition to structural response. Structural response amplitudes were shown with transfer functions. Afterwards, the calculation of the mooring line mathematical model have begun with processed resistance components and the mooring line characteristics. Finally, seakeeping results, platform movement and mooring line characteristics were shown.

Key words: FPSO, seakeeping, potential flow theory, boundary element method, mooring system

1. UVOD

Nafta je danas glavni pokretač svjetskog gospodarstva. Zbog sve veće potrošnje a i potražnje za ovim resursom naftne kompanije primorane su je crpiti na velikim dubinama. Tako su u taj proces uključeni i brodovi koji služe za crpljenje, rafiniranje, skladištenje i prekrcaj nafte. Nazivaju se FPSO brodovi (eng. *Floating Production Storage and Off-loading*) tj. pučinski plutajući proizvodni objekti. Plutajuća proizvodnja, skladištenje i iskrcaj posebno su učinkoviti na mjestima gdje postavljanje cjevovoda nije profitabilno. FPSO eliminira potrebu postavljanja cijevi velikih udaljenosti te se mogu koristiti u manjim naftnim poljima koja mogu biti iscrpljena u nekoliko godina. FPSO brodovi zadanu poziciju pri radu ostvaruju sidrenim sustavom većinom zvjezdastog tipa. Na usidreni FPSO djeluju opterećenja kao što su: vjetar, valovi i morska struja.

Projektiranje ovih brodova se temelji na racionalnim modelima. Razlog tome je nagli razvoj te nedostatak relevantnih propisa od strane registra brodova.

Cjelokupna fizika modela broda i njegovog sidrenog sustava dosta je složen problem . Stoga, cilj ovoga rada je definirati model, i uz određene pretpostavke istražiti ponašanje u eksploataciji, u ovom slučaju karakteristike sidrenja FPSO broda.

2. ODABIR FORME

Nafta i plin se u off-shore-u buše od 50-ih godina prošlog stoljeća. Prvotno sve platforme bile su smještene uz obalu, ali kako je iskorištavanje morskog dna raslo i selilo se u dublje vode i na udaljenije lokacije u 70-im godinama prošlog stoljeća počinje korištenje plutajućih konstrukcijskih sustava.

Prvi FPSO je bio Shell Castellon izgrađen u Španjolskoj 1977.godine.

Za proračun sidrenog sustava odabran je circular FPSO brod. Radi se o brodu SEVAN 1000 napravljenog za projekt Goliat. Radi se o novom naftnom polju u Barentsovom moru blizu Norveške.



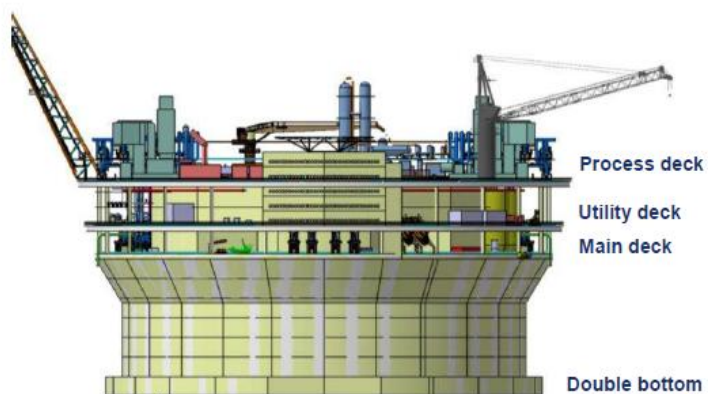
Slika 1. SEVAN 1000 [2]

Glavne geometrijske značajke odabranog broda prikazane su na sljedećoj slici.

SEVAN FLNG Main Dimensions

Based on Sevan Cylindrical Hull

| | |
|-------------------------|----------|
| Hull diameter: | 106 m |
| Main deck diameter: | 120 m |
| Process deck diameter: | 130 m |
| Main deck elevation: | 37 m |
| Process deck elevation: | 58 m |
| Operating Draft: | 20 -22 m |



Slika 2. Glavne geometrijske značajke FPSO SEVAN 1000 [2]

3. TEORIJA POTENCIJALNOG STRUJANJA I GIBANJE BRODA NA VALOVIMA

3.1. Teorija potencijalnog strujanja

Potencijalno strujanje je neviskozno, nestlačivo i homogeno. Zahvljajući pretpostavci da u fluidu nema kavitacijskih mjehurića plina, u takvom strujanju vrijede pojednostavljeni zakoni mehanike fluida.

Prilikom korištenja teorije potencijalnog strujanja u opisivanju značajki valova, treba se držati pretpostavke o maloj valnoj strmini (tada, zbog male vrijednosti njenog kvadrata u jednadžbama koje opisuju val, taj član može se zanemariti). U linearnoj teoriji harmonijski promjenjivi pomaci, brzine i ubrzanja čestica fluida, te harmonijski promjenjive vrijednosti tlaka u linearnom su odnosu prema elevaciji valne površine.

Osnovni uvjet potencijalnog strujanja izražen je jednadžbom:

$$\operatorname{rot} \mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{v}(x, y, z; t) = \operatorname{grad} \Phi(x, y, z; t) = \nabla \Phi(x, y, z; t) \quad (2)$$

Gdje je \mathbf{v} vektor brzine strujanja fluida određen prostornim koordinatama x, y i z u vremenu t .

Potencijal brzine strujanja $\Phi(x, y, z; t)$ skalarna je funkcija koja ima svojstvo da je komponenta brzine u točki fluida u bilo kojem trenutku zapravo njezina derivacija u tom smjeru za odabranu točku. Funkcija potencijala brzine strujanja apstraktna je matematička funkcija bez stvarnog fizikalnog značenja. Iako je njena vrijednost određena u svakoj točki idealne tekućine, vrijednost potencijala brzine nije moguće direktno mjeriti. [1]

Izraz za potencijal brzine strujanja u valu harmonijska je funkcija. Potencijal brzine strujanja harmonijskog vala Φ_w mora zadovoljavati četiri rubna uvjeta:

1. Uvjet kontinuiteta, odnosno Laplaceovu jednadžbu u području fluida – uvjet homogenosti i nestlačivosti fluida

$$\nabla v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

odnosno uvrštenjem komponenti:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

2. Rubni uvjet nepromočivosti na dnu - vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka je nuli.

$$w = v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad , \text{ za } z = -d \quad (5)$$

3. Dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini - tlak p na slobodnoj površini jednak atmosferskom ili drugačije narinutom. Tlak unutar nestacionarnog bezvrtložnog strujanja određuje se Bernoullijevom jednadžbom (6) koju, osim člana vanjskog tlaka (gdje je ρ gustoća fluida), u općem obliku čine hidrostatički član gz i preostali hidrodinamički član:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C^* \quad (6)$$

4. Kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini - vertikalna brzine čestice fluida na slobodnoj površini jednaka vertikalnoj brzini slobodne površine, a proizlazi iz (7) gdje ζ predstavlja elevaciju slobodne površine:

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

Parcijalnim deriviranjem kombinacije dinamičkog i kinematičkog rubnog uvjeta dobije se kinematičko-dinamički rubni uvjet ili Cauchy-Poissonov uvjet.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

Harmonijski ravninski valovi

Harmonijski ravninski valovi periodično je ponavljanje valnih obilježja u vremenu i prostoru. Ako je oblik valnog gibanja jednak u ravninama paralelnih presjeka, valovi se nazivaju ravninskima. [1]

S obzirom da ima oblik kosinusne funkcije, nazivamo ga harmonijskim, a njegov profil u potpunosti definiran je dvjema od triju navedenih karakterističnim fizikalnim veličinama:

- Duljinom vala – λ [m]
- Visinom vala – H [m]; $H = 2 \zeta_a$ (ζ_a – valna amplituda)
- Valnim periodom – T [s]

Treća veličina može se izračunati iz disperzivne jednadžbe **Error! Reference source not found.**

Još neki fizikalni izrazi izvedeni iz karakterističnih fizikalnih veličina opisuju zakonitosti harmonijskih ravninskih valova:

$$\text{Valni broj [rad/m]} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

$$\text{Kružna valna frekvencija [rad/s]} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$$\text{Fazna brzina [m/s]} \quad c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{2\pi}{k}}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega}{k} \quad (3)$$

$$\text{Valna strmina [m/m]} \quad \alpha = \frac{H}{\lambda} \quad (4)$$

Utjecaj viskoznosti na proces nastanka vala i valno gibanje općenito je malen. Stoga, najveći dio valne teorije razvija se uz pretpostavku neviskoznog fluida i potencijalnog gibanja. [1].

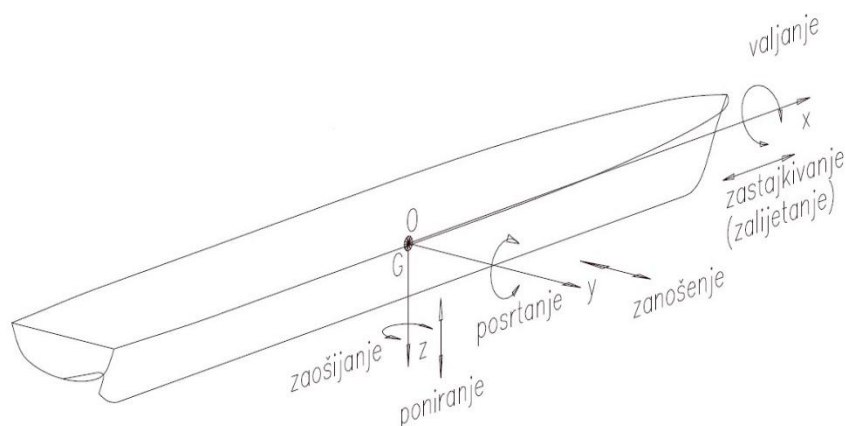
Gibanje broda na valovima

Značajna pretpostavka koju uzimamo u obzir prilikom razmatranja njihanja broda na valovima jest da se brod ponaša kao kruto tijelo, odnosno zanemarujemo utjecaj elastičnih pomaka trupa na njihanje broda. Primjenjujući navedenu pretpostavku, možemo tvrditi da su dinamika tijela i fluida koji ga okružuje direktna posljedica njihova međudjelovanja.

Rezultirajuće njihanje broda sastoji se od sljedećih šest gibanja podjeljenih u dvije grupe:

1. Translacijska gibanja:
 - a. zalijetanje (u smjeru osi x) – η_1
 - b. zanošenje (u smjeru osi y) – η_2
 - c. poniranje (u smjeru osi z) – η_3
2. Rotacijska gibanja:
 - d. valjanje (oko osi x) – η_4
 - e. posrtanje (oko osi y) – η_5
 - f. zaošijanje (oko osi z) – η_6

Slika . prikazuje 6 stupnjeva slobode gibanja broda .



Slika 3. Stupnjevi slobode gibanja broda na valovima [1]

Prilikom opisivanja pojave međudjelovanja broda i fluida te njihovog gibanja, a s ciljem sistematičnog i svima razumljivog pristupa rješavanju problema, uobičajeno je držati se nekih dogovora. Kao osnovu svega, potrebno je jasno definirati koordinatne sustave.

Nepomični koordinatni sustav (fiksni, inercijski) $S (x_0, y_0, z_0)$ vezan je za Zemlju. Ravnina x_0y_0 leži na mirnoj slobodnoj površini, pozitivan smjer osi x_0 je u smjeru napredovanja vala, a može biti i zakrenut u smjeru napredovanja broda. Os z_0 usmjerena je vertikalno prema gore.

Koordinatni sustav broda $G (x_b, y_b, z_b)$ vezan je za brod, a ishodište mu je u težištu broda G . Os x_b leži u smjeru uzdužne simetrale broda, a usmjerena je prema pramcu broda. Os y_b usmjerena je prema lijevom boku broda, a os z_b usmjerena je vertikalno prema gore. U stanju mirovanja broda ravnina x_by_b paralelna je s mirnom slobodnom površinom.

Translatirajući koordinatni sustav $O (x, y, z)$ kreće se brzinom broda U . Ako brod miruje smjerovi osi jednaki su onima koordinatnog sustava $G (x_b, y_b, z_b)$.

Zahvaljujući linearnoj prirodi modela, problem njihanja broda u linearnoj teoriji može se prikazati preko dva neovisna modela:

Model djelovanja vala na nepomično tijelo

Strujanje oko nepomičnog tijela koje nastaje uslijed nailazećeg vala opisano je dvjema funkcijama:

- Funkcijom potencijala brzine strujanja nailaznog vala - Φ_0
- Funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcije - Φ_7

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (5)$$

Osim pretpostavki i uvjeta usvojenih kod definiranja potencijala brzine strujanja harmonijskog vala, strujanje u difrakcijskoj komponenti mora zadovoljiti i rubni uvjet:

- Nepromočivosti oplakane površine S

$$v_n = \mathbf{n} \text{ grad } \Phi = \frac{\partial}{\partial n} (\Phi_0 + \Phi_7) = 0 \quad , \text{ na } S \quad (6)$$

U jednadžbi (6) v_n brzina je strujanja u smjeru normale na površinu S, a \mathbf{n} vektor normale.

Zadovoljenjem svih uvjeta, te integracijom tlakova po oplakanoj površini S uronjenog dijela volumena trupa nalazi se vektor rezultirajuće uzbudne sila (7) i vektor rezultirajućeg uzbudnog momenta (8) kojima nailazeći val djeluje na tijelo:

$$\mathbf{F}_U = \text{Re} \left\{ i\omega\rho\zeta_a \iint_{S_0} (\Phi_0(x, y, z) + \Phi_7(x, y, z)) \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_U = \text{Re} \left\{ i\omega\rho\zeta_a \iint_{S_0} (\Phi_0(x, y, z) + \Phi_7(x, y, z)) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (8)$$

Pri tome, tlak p može se izraziti pomoću funkcije potencijala brzine strujanja koristeći linearizirani dio Bernoullieve jednadžbe za hidrodinamički tlak u potencijalnom strujanju (9):

$$p = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \Phi(x, y, z; t) + \rho g z \quad (9)$$

Model njihanja tijela na mirnoj tekućini

Strujanje oko tijela opisano je potencijalom brzine strujanja Φ_j u nastalim valovima radijacije ζ_j ($j = 1 \dots 6$).

Uslijed nepromočivosti oplakane površine S uronjenog dijela tijela potrebno je uvesti dodatni rubni uvjet za brzinu strujanja u valu radijacije. Budući da ne postoji strujanje kroz oplakanu površinu, normalna komponenta brzine čestice tekućine uz stijenku mora biti jednaka normalnoj komponenti brzine dodirne točke $P(x_p, y_p, z_p)$ na oplakanoj površini S . Uvjet nepromočivosti za kompleksni potencijal radijacije dan je izrazom:

$$\mathbf{n} \text{ grad } \Phi_j = \frac{\partial \Phi_j}{\partial n} = v_{n_j}^p, \quad j = 1 \dots 6 \quad (10)$$

U slučaju prisilnog njihanja tijela na mironj tekućini, ukupni potencijal određen je sljedećom superpozicijom:

$$\Phi(x, y, z; t) = \sum_{j=1}^6 \Phi_j(x, y, z; t) \quad (11)$$

Hidrostatičke sile (12) i momenti (13) vraćaju tijelo u početno stanje pa se nazivaju povratnim silama odnosno momentima.

$$\mathbf{F}_C = -\rho g \operatorname{Re} \left\{ \iint_{S_0} [q_0(x, y)] \{\eta_j\} \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_C = -\rho g \operatorname{Re} \left\{ \iint_{S_0} [q_0(x, y)] \{\eta_j\} \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (13)$$

Tijekom njihanja na mirnoj tekućini tijelo emitira valove radijacije koji iz sustava odnose energiju i na taj način smanjuju amplitude njihanja. Sile (14) i momenti (15) koje tom prilikom nastaju manifestiraju se kao hidrodinamička reakcija:

$$\mathbf{F}_H = \operatorname{Re} \left\{ i\omega\rho \sum_{j=1}^6 \eta_j \iint_{S_0} \Phi_j(x, y, z) \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_H = \operatorname{Re} \left\{ i\omega\rho \sum_{j=1}^6 \eta_j \iint_{S_0} \Phi_j(x, y, z) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (15)$$

Jednadžbe dinamičke ravnoteže

Jednadžbe gibanja temelje se na drugom Newtonovu zakonu gibanja koji definira da su pri translaciji sile koje djeluju na tijelo jednake umnošku mase i ubrzanja, dok su za rotaciju momenti koji djeluju na tijelo jednaki su umnošku momenata tromosti i kutnog ubrzanja. Tijelo koje se njiše na valu u svakom je trenutku u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke i hidrostatičke sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase tijela. [1]

Dinamička ravnoteža njihanja izražena je sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidrodinamičkih i uzbudnih sila:

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\ddot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} + [C_{jk}]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_j(t)\} = \text{Re}\{\zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t}\} \quad (16)$$

Uz pretpostavku harmonijskog gibanja dinamička ravnoteža njihanja izražena je sljedećim sustavom algebarskih jednadžbi:

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\}e^{i\omega t} = \zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t} \quad (17)$$

Prethodna jednakost mora biti zadovoljena u svakom trenutku pa se uvjet dinamičke ravnoteže svodi na sustav kompleksnih algebarskih jednadžbi s nepoznicama $\delta_j, j=1\dots 6$

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\} = \zeta_a\{F_j\} \quad (18)$$

gdje je:

$[M_{jk}]$ - matrica mase tijela,

$[A_{jk}]$ -matrica pridruženih masa vode,

$[B_{jk}]$ matrica hidrodinamičkog prigušenja i

$[C_{jk}]$ matrica krutosti povratnih sila.

4. NUMERIČKO MODELIRANJE I PRORAČUN

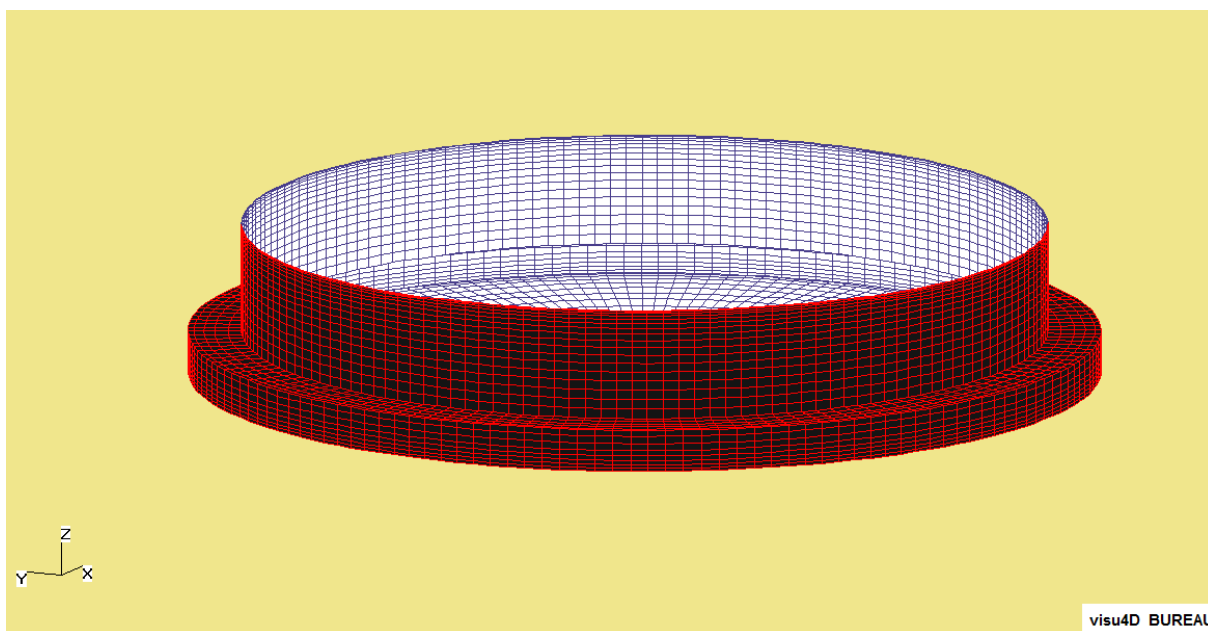
4.1. Opis modeliranja FPSO broda

Za numerički dio proračuna korišten je programski paket *HydroSTAR* (Bureau Veritas) [12]. Programski paket *HydroStar* temelji se na metodi rubnih elemenata i teoriji potencijalnog strujanja. Teorija potencijalnog strujanja omogućuje izračun sila prvog i drugog reda na temelju karakteristika modela i ulaznih parametara valova. Omogućuje izračun difrakcijske i radijacijske komponente dodatnog otpora broda. Programski paket u mogućnosti je, već spomenutom metodom rubnih elemenata i primjenom teorije potencijalnog strujanja, zakrivljenu brodsku površinu diskretizirati ravnim trokutastim i četverokutnim panelima koji čine mrežu panela (engl. *mesh*).

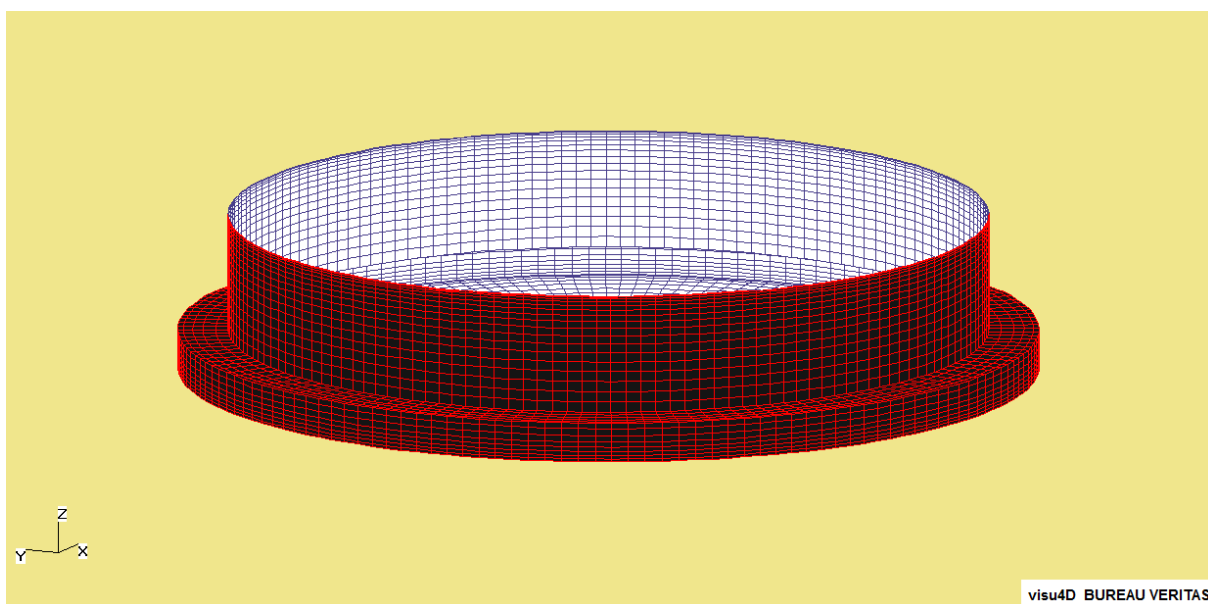
Metoda rubnih elemenata (*Boundary element method*) temelji se na teoriji potencijalnog strujanja. Linearna je i prilično robustna, ali relativno brza te se često primjenjuje u projektnoj brodograđevnoj praksi. Međutim, kao i svaka inženjerska metoda ona koristi neke pretpostavke i ograničenja:

- Tekućina je idealna (nestlačiva i neviskozna)
- Napetost slobodne površine je zanemarena
- Strujanje u tekućini je bezvrtložno (1) (potencijalno strujanje)
- Amplituda vala ζ_a mala je u odnosu na valnu duljinu i dubinu vode
- Harmonijski progresivni val je raninski

U programu *HydroSTAR* je forma generirana na način da se unesu koordinate rebara, gaz i trim modela. Osim toga definirani su i podaci o masi, položaju težišta modela te radijusima tromosti mase oko težišta. Nakon što je forma definirana program generira mrežu panela do vodne linije korištenjem modula *hsmsh* koji diskretizira brodsku formu na panele. Program također generira izlaznu datoteku koja sadržava sve podatke o panelima i položaju broda u odnosu na površinu vode (zadani gaz).



Slika 4. Prikaz forme FPSO broda za gaz T=20 m



Slika 5. Prikaz forme FPSO broda za gaz T=22 m

Nakon što smo definirali mrežu panela, definirani su ulazni podaci o valovima (valna duljina ili valna frekvencija) te pomoću modula *hsrdf* proveli smo proračun radijacijske i difrakcijske komponente strujanja. *HydroSTAR* će generirati matricu masa, matricu pridruženih masa, matricu hidrodinamičkog prigušenja te matricu krutosti povratnih sila. To podaci će koristiti u sljedećem modulu prilikom rješavanja dinamičkih jednadžbi gibanja.

Modul *hsmcn* koristeći podatke iz radijacijsko-difrakcijske analize rješava dinamičku jednadžbu gibanja za dozvoljene stupnjeve slobode. U ovom slučaju proračun se radio za poniranje i posrtanje.

Pomoću modula *hsrao* sve proračunate vrijednosti su prikazane u obliku tekstualne datoteke.

5. PRORAČUN SIDRENOG SUSTAVA

5.1. OPTEREĆENJE USIDRENOG OBJEKTA

Pomorski objekt koji se nalazi na pučini pod utjecajem je otpora valova, vjetra te morskih struja. U ovom radu za određivanje iznosa valnog opterećenja koristi se programski paket HydroSTAR [22]. Teorijska podloga ovog paketa je potencijalno strujanje kako je već opisano u 3. poglavlju.

Otpor valova

Dodatni otpor na morskim valovima moguće je odrediti uz poznavanje spektra valova za određeno stanje mora ili zadanu brzinu vjetra. Spektar odziva moguće je odrediti pomoću prijenosnih funkcija te pojednostavljeno izračunati srednju vrijednost dodatnog otpora:

$$\overline{R_{aw}} = 2 \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega_e) \frac{R_{aw}}{\zeta_a^2}(\omega_e) d\omega_e \quad (19)$$

$\frac{R_{aw}}{\zeta_a^2}(\omega_e)$ dobiven je u putem *HydroSTARa* preko prijenosnih funkcija. Spektar valova $S_{\zeta}(\omega_e)$ određen je preko Bretschneiderovog izraza koji preporuča ITTC:

$$S_{\zeta}^B(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{\frac{B}{\omega^4}}, \quad (28)$$

gdje su A i B konstante određene prema:

$$A = 0,0081g^2 \quad (29)$$

$$B = \frac{3,11}{H_{1/3}^2} \quad (30)$$

$H_{1/3}^2$ predstavlja značajnu valnu visinu za određeno stanje mora.

Otpor vjetra

Opterećenje vjetra ima značajan udio u ukupnom opterećenju na pomorski objekt. Vjetar djeluje na nadvodni dio trupa broda. Sile vjetra na trup pomorskog objekta proračunavaju se uz pomoć jednadžbi:

$$F_w = \frac{1}{2} C_w \rho_a V_w^2 A_T \quad (31)$$

gdje su:

F_w - sila vjetra

C_w - koeficijent sile vjetra [4]

A_T - poprečna projicirana površina objekta

ρ_a - gustoća zraka

V_w - brzina vjetra

Opterećenje morske struje

Pretpostavlja se da opterećenje uslijed morske struje ima samo konstantnu komponentu. Za određivanje iznosa opterećenja koristi se sljedeći izraz:

$$F_c = \frac{1}{2} C_c \rho_w V_c^2 D_0 T \quad (32)$$

gdje su:

F_c - sila morske struje

C_c - koeficijent sile morske struje [4]

D_0 - promjer trupa broda

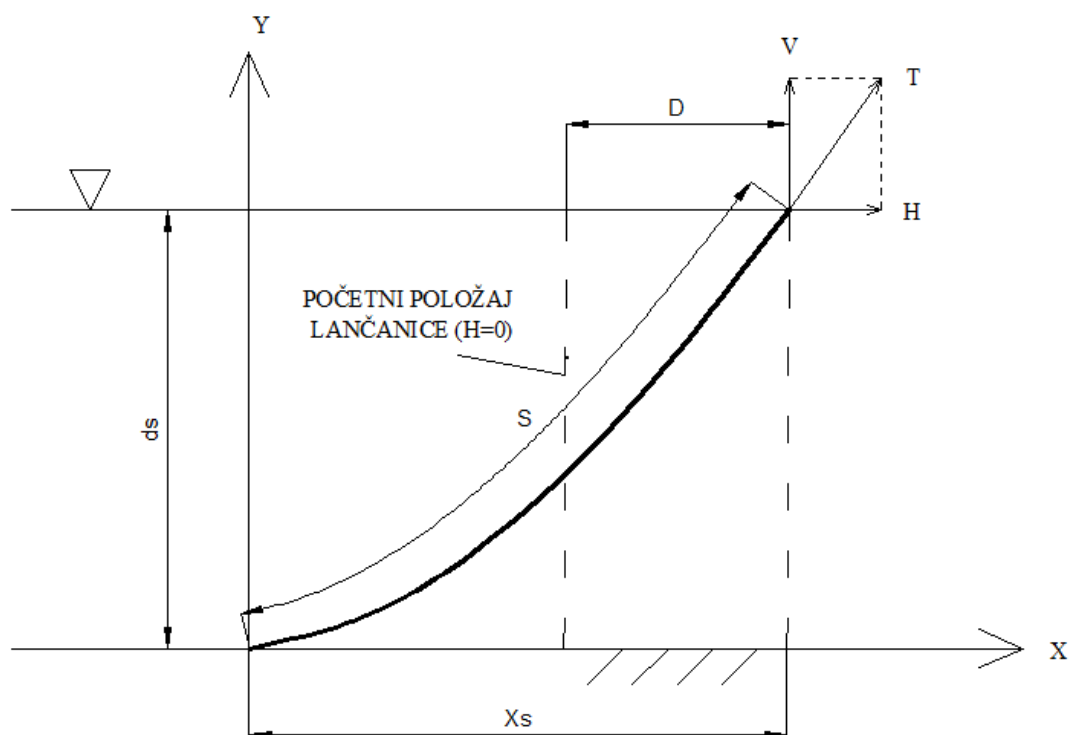
T - gaz broda

ρ_w - gustoća mora

V_c - brzina morske struje

5.2. MATEMATIČKI MODEL SIDRENE LINIJE

Pridneni lanac – obična lančanica [5]



Slika 6. Skica pridneni lanac-obična lančanica

gdje je:

d_s – dubina sidrenja

s – duljina lančanice

x_s – duljina horizontalne projekcije lančanice

D – horizontalni pomak hvatišta od početnog položaja

Progibna linija slijedi prema jednadžbi:

$$y = a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - a \quad (33)$$

gdje je:

a – karakteristična vrijednost lančanice

$$a = \frac{H}{q} \quad (34)$$

q – distribuirana težina lanca (ili sajle) u vodi

Horizontalna projekcija lančanice slijedi prema jednadžbi:

$$x_s = a \cdot \operatorname{arccos} h\left(1 + \frac{d_s}{a}\right) \quad (35)$$

Duljina lančanice slijedi prema jednadžbi:

$$s = a \cdot \sinh\left(\frac{x_s}{a}\right) \quad (36)$$

Vertikalna sila slijedi prema jednadžbi:

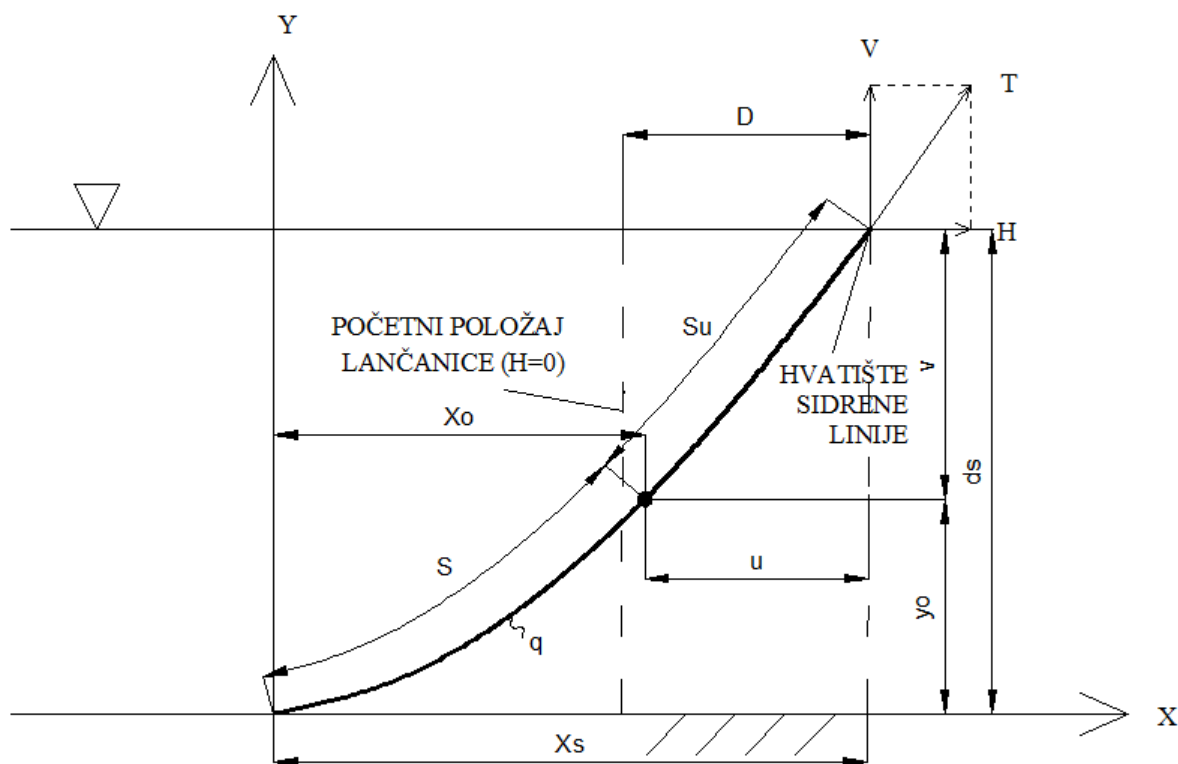
$$V = q \cdot s \quad (37)$$

Vlačna sila slijedi prema jednadžbi:

$$T = \sqrt{V^2 + H^2} \quad (38)$$

Horizontalni pomak hvatišta od početnog položaja slijedi prema:

$$D = x_s + d_s - s \quad (39)$$

Pridneni lanac + nerastezljivo uže bez težine

Slika 7. Skica pridneni lanac+nerastezljivo uže bez težine

gdje je:

q – distribuirana težina lančanice

s – duljina lančanice

s_u – duljina užeta

x_0, y_0 – koordinate spoja lančanice i užeta

u – duljina horizontalne projekcije užeta

v – duljina vertikalne projekcije užeta

d_s – (ukupna) dubina sidrenja

x_s – duljina horizontalne projekcije (kompletne) sidrene linije

D – horizontalni pomak hvatišta od početnog položaja

H – primjenjena horizontalna sila

V – verikalna sila u hvatištu

T – vlačna sila u hvatištu

Prvo približno rješenje za x_0/a slijedi prema:

$$\left(\frac{x_0}{a}\right)_1 = \frac{1}{a} \cdot \left[-s_u + \sqrt{s_u^2 + (2 \cdot d_s \cdot a)} \right] \quad (40)$$

gdje je:

a – karakteristična vrijednost lančanice i slijedi iz jednadžbe (40)

Drugo približno rješenje za x_0/a (po Newton – Raphson-ovoj metodi) slijedi prema:

$$f_i\left(\frac{x_0}{a}\right) = \cosh\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right] + \frac{s_u}{a} \cdot \tanh\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right] - \left(1 + \frac{d_s}{a}\right) \quad (41)$$

$$\left[\frac{df}{d\left(\frac{x_0}{a}\right)}\right]_i = \sinh\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right] + \frac{s_u}{a} \cdot \left\{1 - \tanh^2\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right]\right\} \quad (42)$$

$$\Delta\left(\frac{x_0}{a}\right) = -\frac{f_i\left(\frac{x_0}{a}\right)}{\left[\frac{df}{d\left(\frac{x_0}{a}\right)}\right]_i} \quad (43)$$

$$\left(\frac{x_0}{a}\right)_{i+1} = \left(\frac{x_0}{a}\right)_i + \Delta\left(\frac{x_0}{a}\right); \text{ uz } i = 1 \quad (44)$$

Koordinata x_0 slijedi prema jednadžbi:

$$x_0 = \left(\frac{x_0}{a}\right)_2 \cdot a \quad (45)$$

Koordinata y_0 slijedi prema jednadžbi:

$$y_0 = a \cdot \cosh\left(\frac{x_0}{a}\right) - a \quad (46)$$

Duljina lančanice s slijedi prema jednadžbi:

$$s = a \cdot \sinh\left(\frac{x_0}{a}\right) \quad (47)$$

Određivanje duljine horizontalne u i vertikalne v projekcije užeta slijedi prema:

$$v = s_u \cdot \tanh\left(\frac{x_0}{a}\right) \quad (48)$$

$$u = \frac{v}{\sinh\left(\frac{x_0}{a}\right)} \quad (49)$$

Horizontalna projekcija sidrene linije x_s slijedi prema jednadžbi:

$$x_s = x_0 + u \quad (50)$$

Kontrolni izraz za d_s slijedi prema jednadžbi:

$$d_s = y_0 + v \quad (51)$$

$$\Delta d_s = (y_0 + v) - d_s \quad (52)$$

gdje je:

Δd_s – razlika između zadane i izračunate dubine sidrenja

d_s – zadana dubina sidrenja

Određivanje sila u hvatištu slijedi prema jednadžbi:

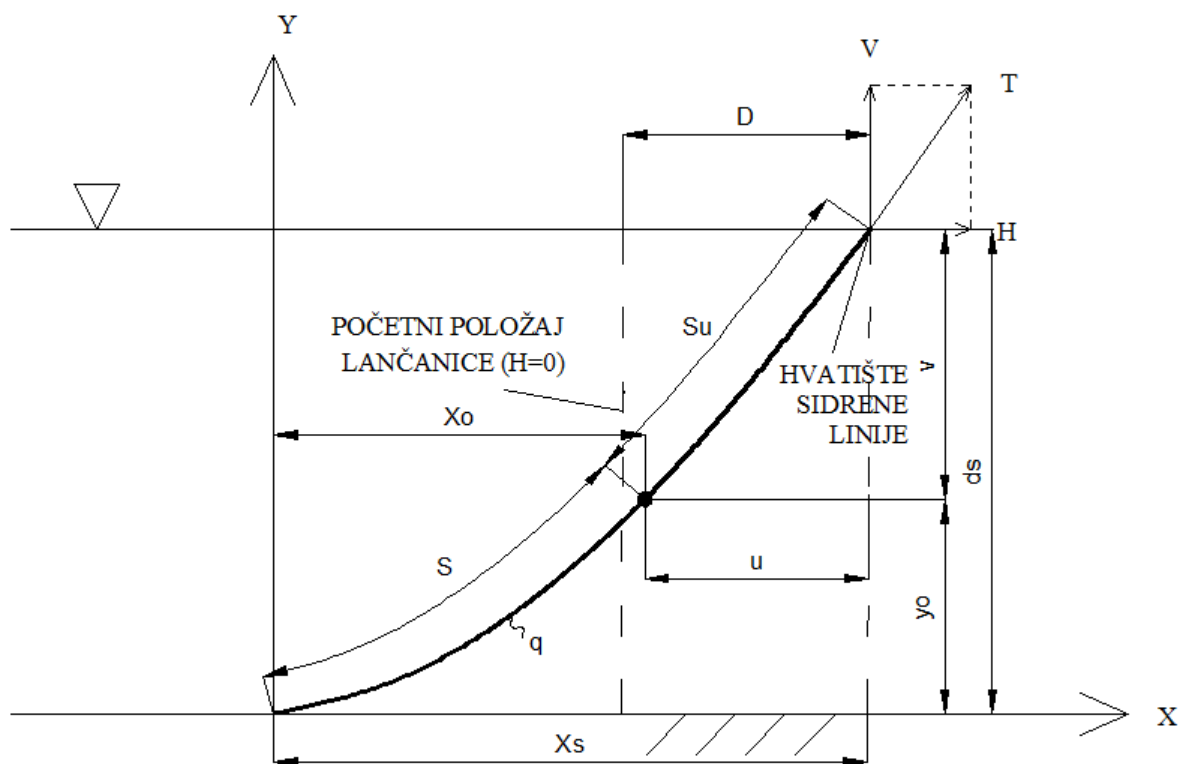
$$V = g \cdot s \quad (53)$$

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} \quad (54)$$

Horizontalni pomak hvatišta D slijedi prema jednadžbi:

$$D = x_s - (s + s_u) + d_s \quad (55)$$

Pridneni lanac + rastezljivo uže bez težine



Slika 8. Skica pridneni lanac+rastezljivo uže bez težine

Prvo približno rješenje za x_0/a slijedi prema jednadžbi:

$$\left(\frac{x_0}{a}\right)_1 = \frac{1}{a} \cdot \left[-\left(s_{u0} + \frac{H}{k}\right) + \sqrt{\left(s_{u0} + \frac{H}{k}\right)^2 + 2 \cdot d_s \cdot a} \right] \quad (56)$$

gdje je:

s_{u0} – početna duljina užeta

k – krutost užeta na istežanje

Drugo približno rješenje za x_0/a (prema Newton – Raphson-ovoj metodi) slijedi prema:

$$f_i\left(\frac{x_0}{a}\right) = \cosh\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right] + \frac{s_{u0}}{a} \cdot \tanh\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right] + \frac{g}{k} \cdot \sinh\left[\left(\frac{x_0}{a}\right)_i\right] - \left(1 + \frac{d_s}{a}\right) \quad (57)$$

$$\left[\frac{df}{d\left(\frac{x_0}{a}\right)} \right]_i = \sinh \left[\left(\frac{x_0}{a} \right)_i \right] + \frac{s_{u0}}{a} \cdot \left\{ 1 - \tanh^2 \left[\left(\frac{x_0}{a} \right)_i \right] \right\} + \frac{g}{k} \cdot \cosh \left[\left(\frac{x_0}{a} \right)_i \right] \quad (58)$$

$$\Delta \left(\frac{x_0}{a} \right) = - \frac{f_i \left(\frac{x_0}{a} \right)}{\left[\frac{df}{d\left(\frac{x_0}{a}\right)} \right]_i} \quad (59)$$

$$\left(\frac{x_0}{a} \right)_{i+1} = \left(\frac{x_0}{a} \right)_i + \Delta \left(\frac{x_0}{a} \right) \quad (60)$$

Koordinata x_0 slijedi prema jednadžbi:

$$x_0 = \left(\frac{x_0}{a} \right)_2 \cdot a \quad (61)$$

Koordinata y_0 slijedi prema jednadžbi:

$$y_0 = a \cdot \cosh \left(\frac{x_0}{a} \right) - a \quad (62)$$

Duljina lančanice slijedi prema jednadžbi:

$$s = a \cdot \sinh \left(\frac{x_0}{a} \right) \quad (63)$$

Duljina rastegnutog užeta slijedi prema jednadžbi:

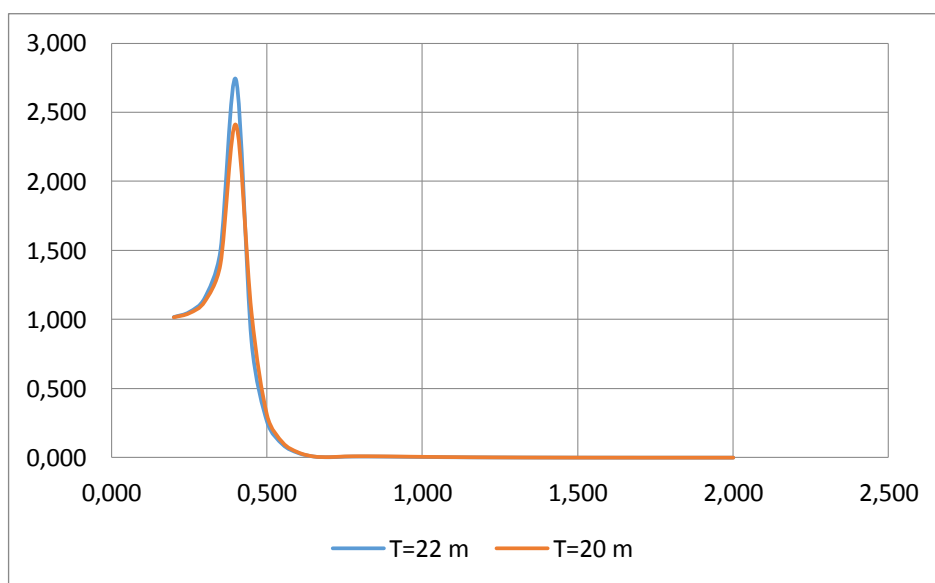
$$s_u = s_{u0} + \frac{H}{k} \cdot \cosh \left(\frac{x_0}{a} \right) \quad (64)$$

Dalje se nastavlja računati po formulama od (48) do (55).

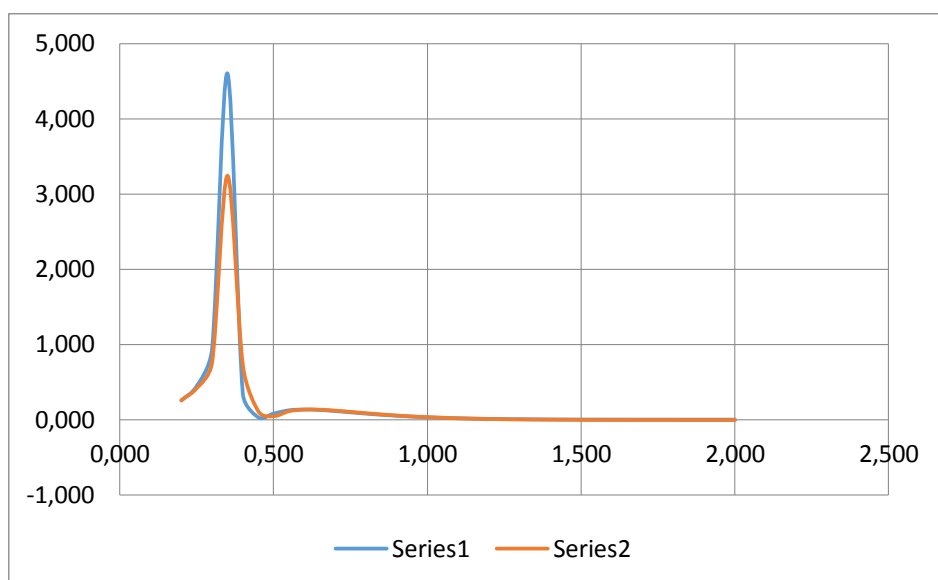
6. REZULTATI NUMERIČKOG PRORAČUNA

6.1. POMORSTVENOST PLATFORME

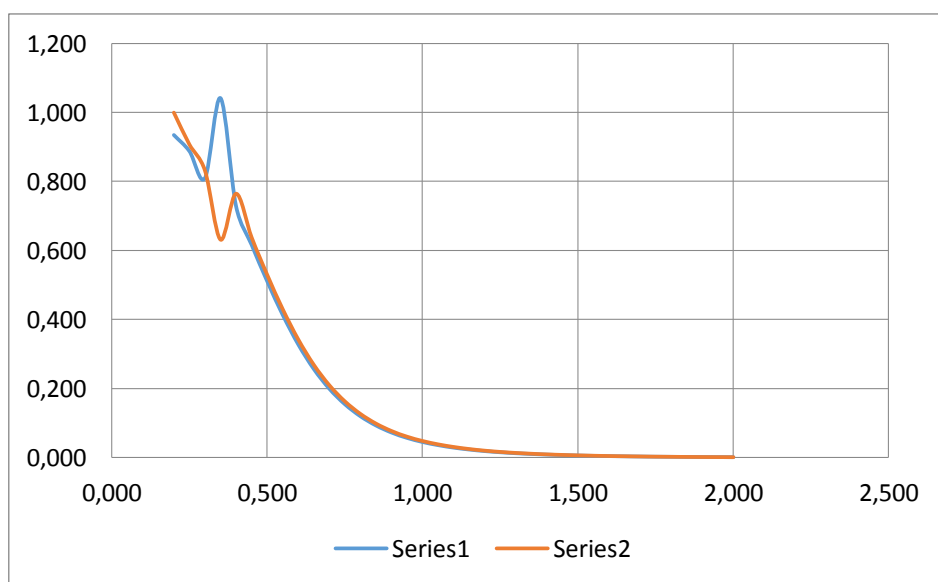
Nakon izvršenog proračuna odziva broda u programu HydroSTAR, dobiveni su grafovi prijenosnih funkcija odziva. Prikazani su dijagrami za poniranje, posrtanje i zalijetanje. Ostali stupnjevi slobode gibanja su za ovaj oblik forme FPSO broda su približno jednaki nuli te se smatraju zanemarivima.



Slika 9. Prijenosna funkcija odziva za poniranje



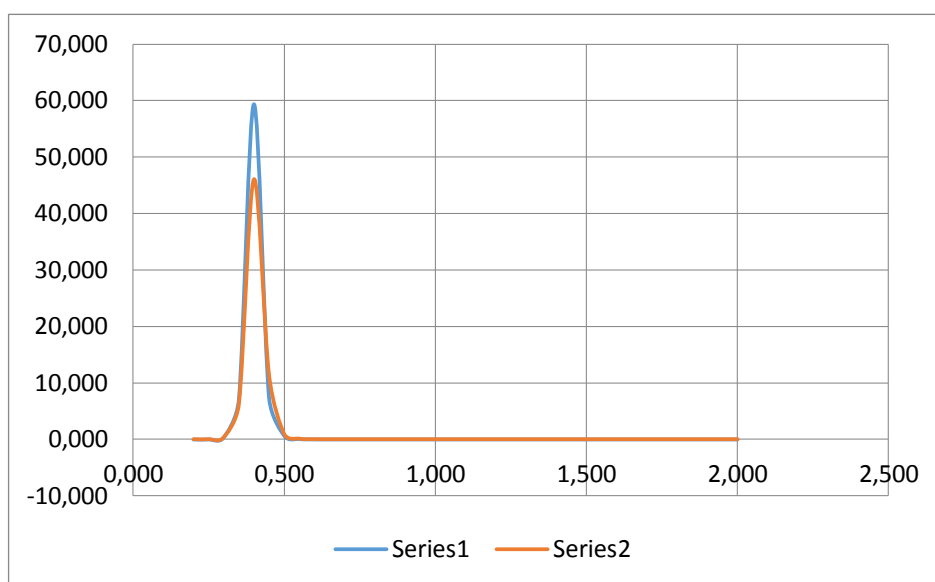
Slika 10. Prijenosna funkcija odziva za posrtanje



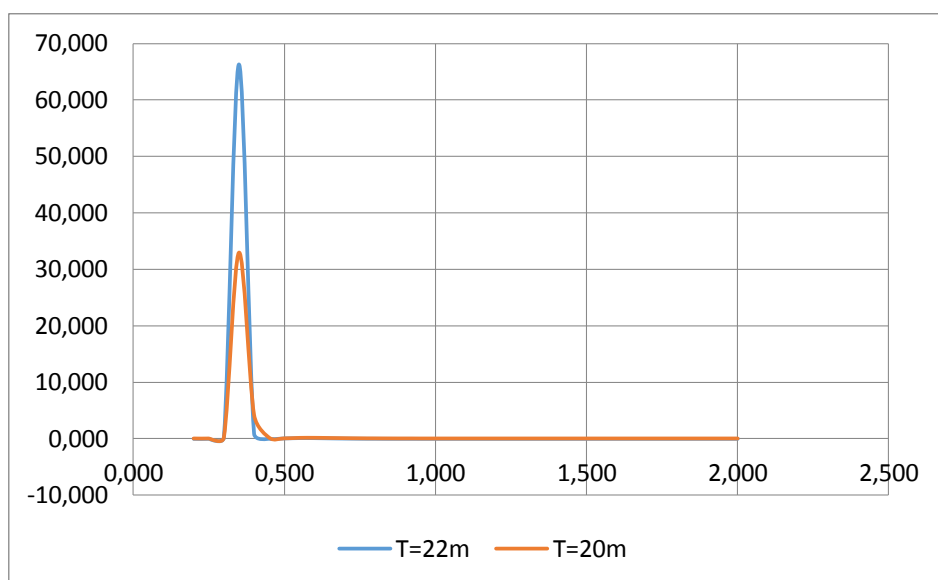
Slika 11. Prijenosna funkcija odziva za zalijetanje

Pomoću dobivenih amplituda odziva na temelju prijenosnih funkcija napravljen je proračun odziva broda na morskim valovima za definirana stanja mora. Da bi se dobio operator RAO bezdimenzionalna amplituda odziva je za svaku pojedinu frekvenciju kvadrirana te je pomnožena sa spektrom.

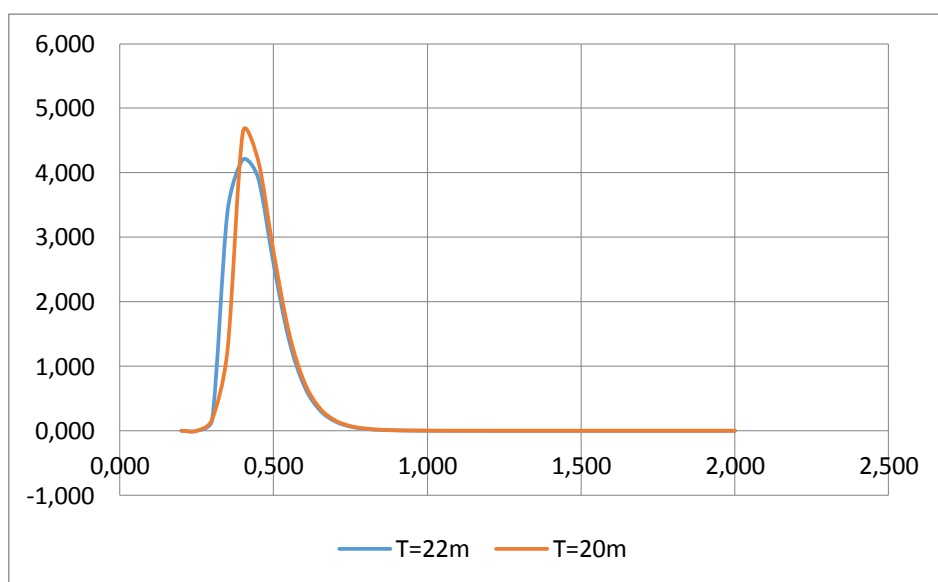
Prikazani su dijagrami za poniranje, posrtanje i zalijetanje. Ostali stupnjevi slobode gibanja su za ovaj oblik forme FPSO broda su približno jednaki nuli te se smatraju zanemarivima.



Slika 12. Spektar odziva za poniranje, $H_{1/3} = 7.33\text{m}$



Slika 13. Spektar odziva za posrtanje, $H_{1/3} = 7.33\text{m}$

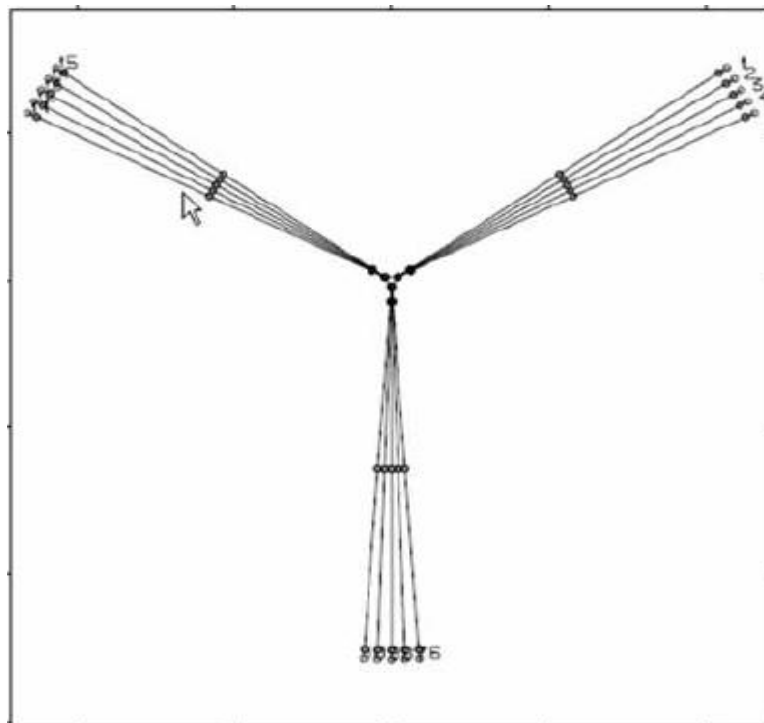


Slika 14. Spektar odziva zalijetanje, $H_{1/3} = 7.33\text{m}$

6.2. SIDRENI SUSTAV

Ulazni podaci

Sidreni sustav Odabranog FPSO broda je zvjezdastog tipa s tri grupe sidrenih linija jednako raspoređenih po presjeku broda te je prikazan na slijedećoj slici.



Slika 15. Skica sidrenog sustava [2]

Sidrene linije prikazane na prethodnoj slici sastoje se od pridnenog lanca i rastezljivog užeta. Karakteristike lanca i užeta prikazane su na sljedećim tablicama.

| PRIDNENI LANAC | OZNAKA | VRIJEDNOST | MJERNE JEDINICE |
|-----------------------------------|---------|------------|-----------------|
| DISTRIBUIRANA TEŽINA LANCA U VODI | $q =$ | 12,78 | kN/m |
| DUBINA SIDRENJA | $d_s =$ | 400 | m |
| MINIMALNA PREKIDNA SILA | MBL = | 63702 | kN |

Tablica 1. Karakteristike pridnenog lanca

| RASTEZLJIVO UŽE | OZNAKA | VRIJEDNOST | MJERNE JEDINICE |
|----------------------------|------------|------------|-----------------|
| POČETNA DULJINA UŽETA | $s_{u0} =$ | 750 | m |
| KRUTOST UŽETA NA ISTEZANJE | $k =$ | 3924 | kN/m |
| MINIMALNA PREKIDNA SILA | $MBL =$ | 58860 | kN |

Tablica 2. Karakteristike rastezljivog užeta

Ulazni podaci stanja okoliša koji su bili potrebni za izračun ukupne sile koja djeluje na FPSO brod su brzina vjetra, brzina morske struje te podaci o valovima za zadano područje. Podaci o valovima prikazani su u prilogu iz *Global Wave Statistic* koja prikazuje statistike valnih visina i perioda za odabrano područje *Area 11* (Marsdenovi kvadranti).

Podaci o vrijednostima brzine vjetra i morske struje prikazani su u sljedećoj tablici.

| | |
|----------------------------|-----|
| BRZINA VJETRA (čv) | 100 |
| BRZINA MORSKE STRUJE (m/s) | 0,5 |

Tablica 3. Podaci o brzini vjetra i morske struje [4]

U sljedećoj tablici su prikazane vrijednosti otpora valova, vjetra i morskih struja za zadanostanje okoliša za različite gazove.

| | T=20m | T=22m |
|------------------|----------|----------|
| Fw (kN) | 2498,62 | 2326,83 |
| Fc (kN) | 22,41 | 24,57 |
| Raw (kN) | 10016,96 | 10106,52 |
| Ukupna sila (kN) | 12537,99 | 12457,92 |

Tablica 4. Vrijednosti sila

Izlazni rezultati sidrenja

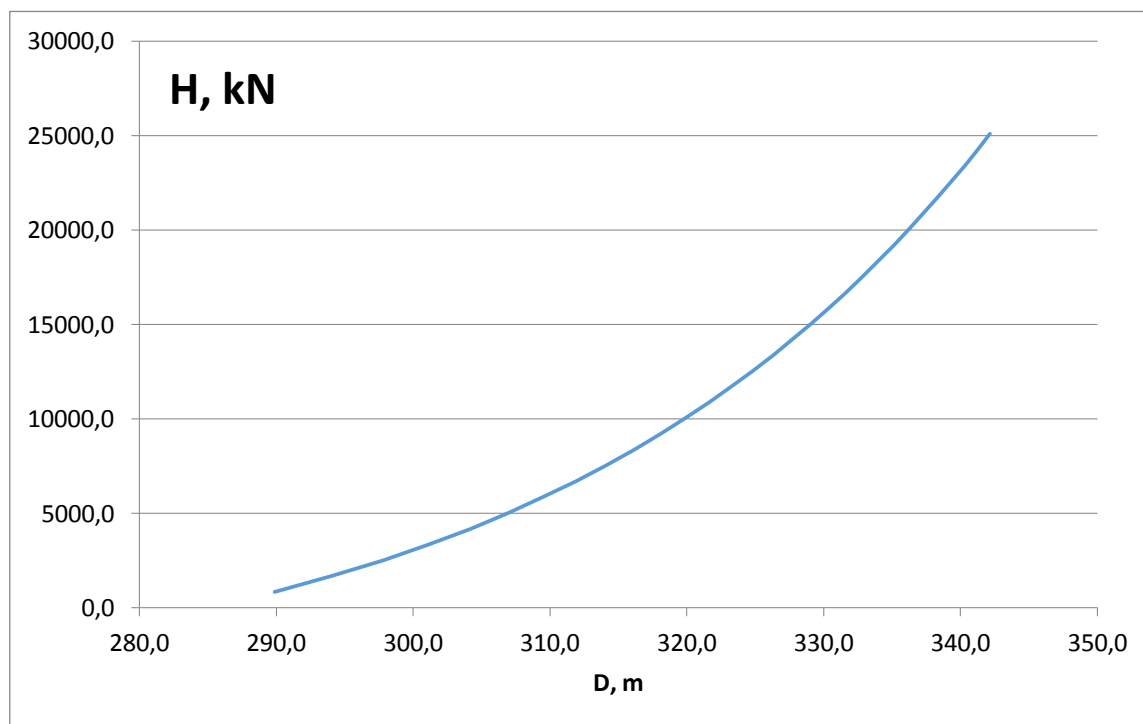
Nakon provedenog matematičkog proračuna sidrenog sustava dobiveni su sljedeći rezultati prikazani u tablici:

| | OZNAKA | T= 20 m | T= 22 m |
|----------------------------|--------------|---------|---------|
| POMAK PLATFORME | σ (m) | 18,23 | 18,17 |
| DULJINA HORIZONTALNE PROJ. | X_s (m) | 1136,4 | 1134 |
| SAFETY FACTOR ZA LANAC | S.F. | 4,36 | 4,39 |
| SAFETY FACTOR ZA UŽE | S.F. | 4,03 | 4,05 |

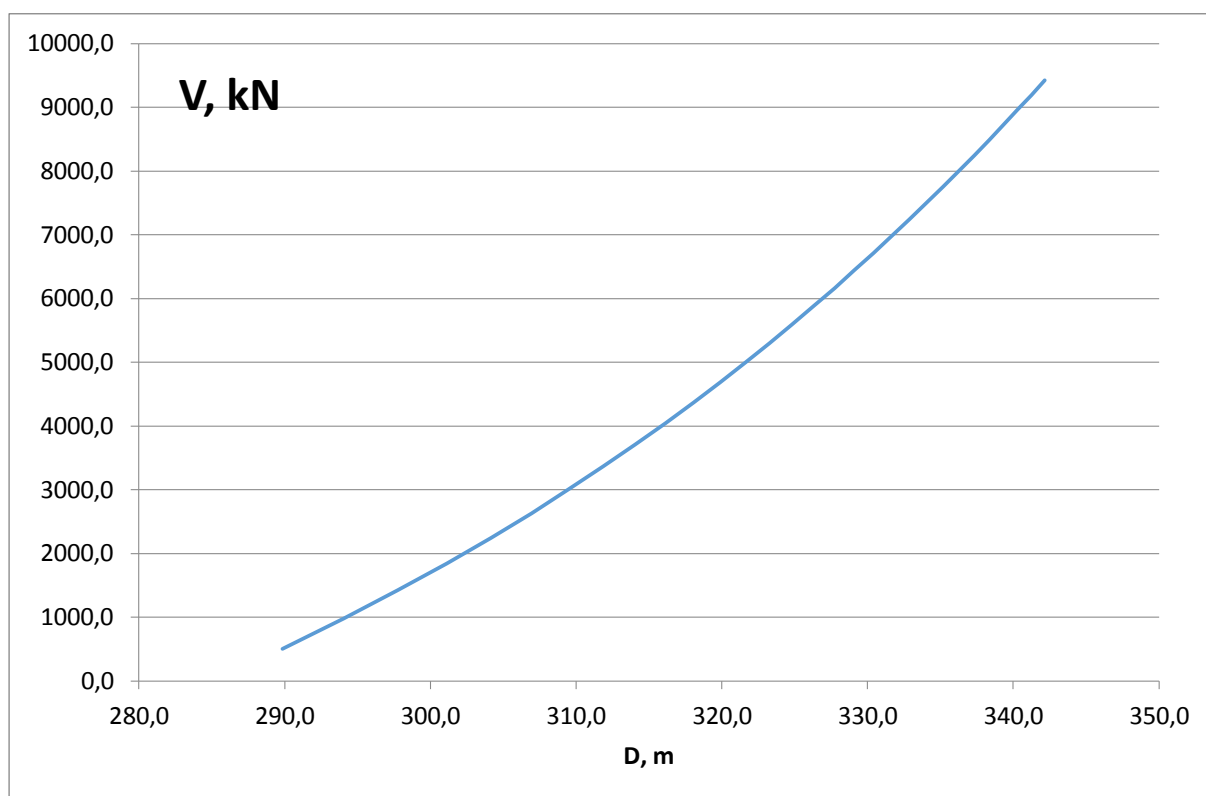
Tablica 5. Karakteristične vrijednosti sidrenog sustava

Dozvoljeni *Safety Factor* za lanac iznosi 2,2 dok za uže 3,45. [4]

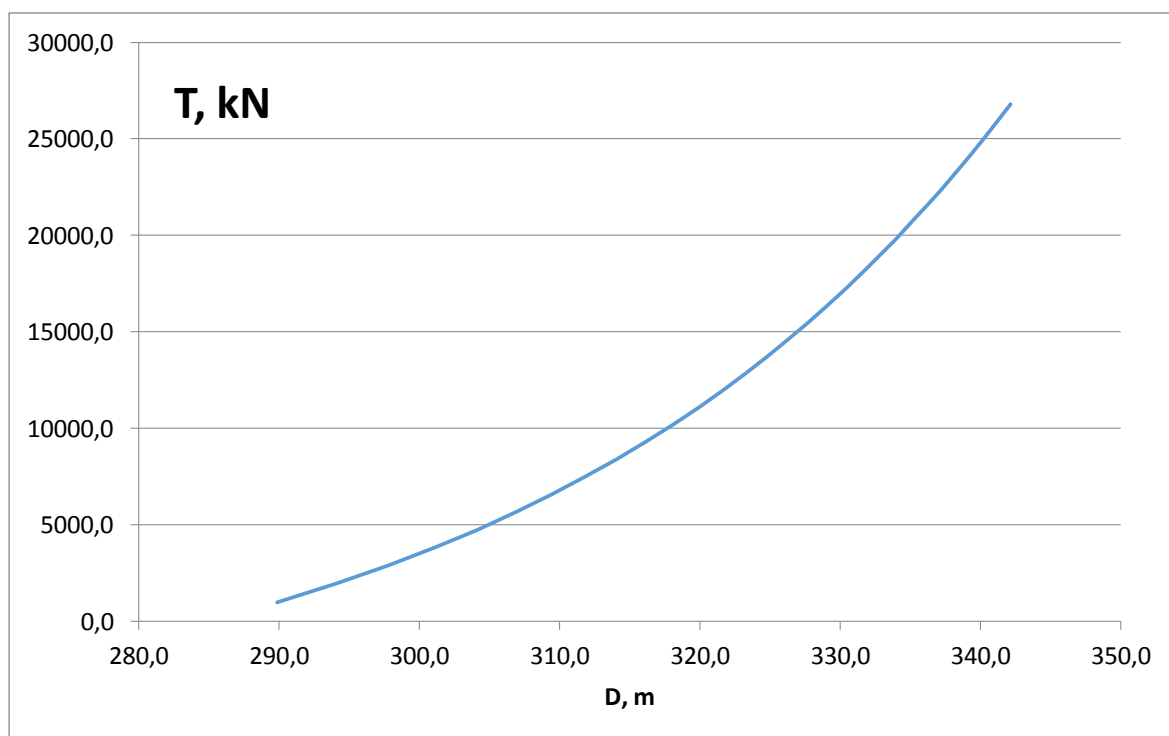
U prethodnoj tablici se vidi da je faktor sigurnosti za lanac i uže veći od dozvoljenog.



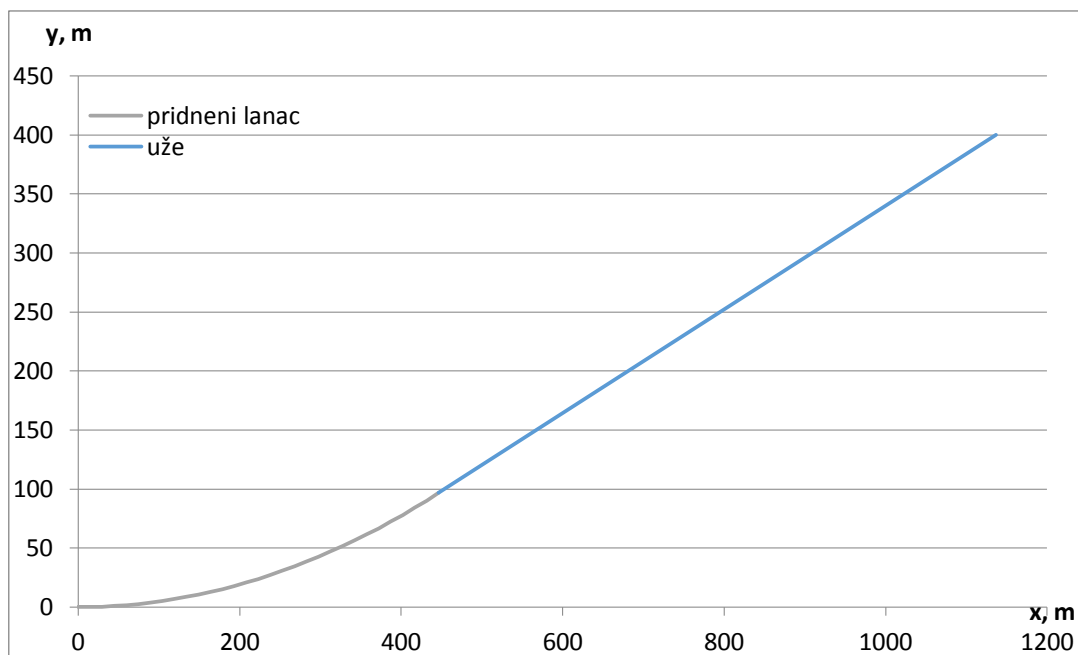
Slika 16. Ovisnost horizontalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za T=20m



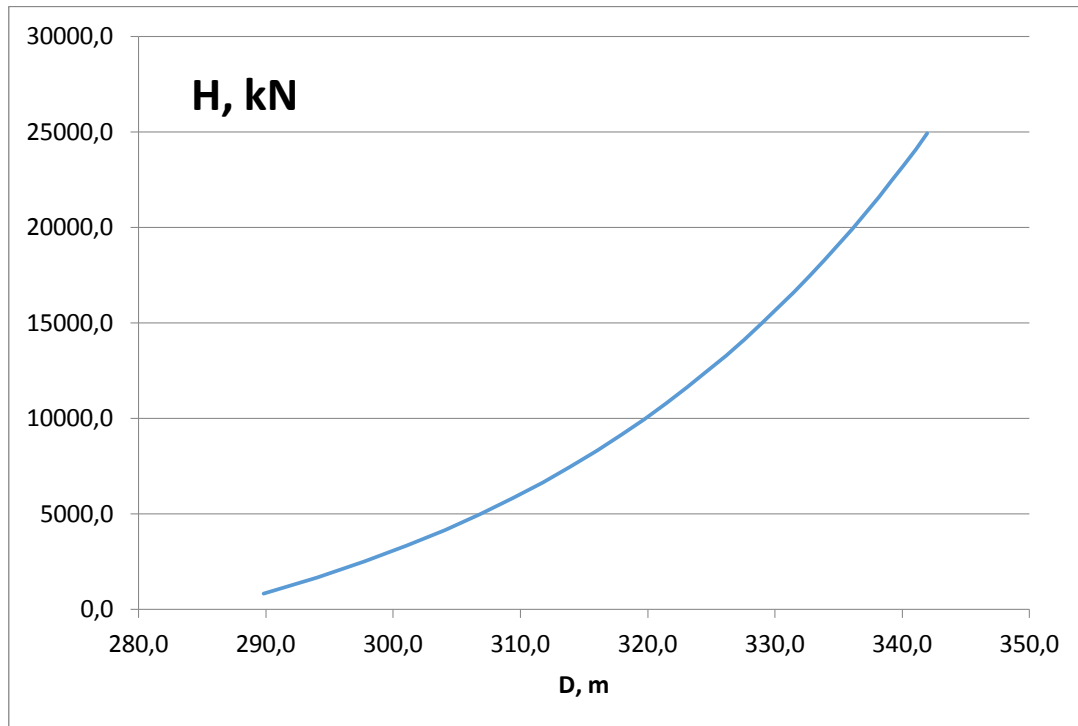
Slika 17. Ovisnost vertikalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=20\text{m}$



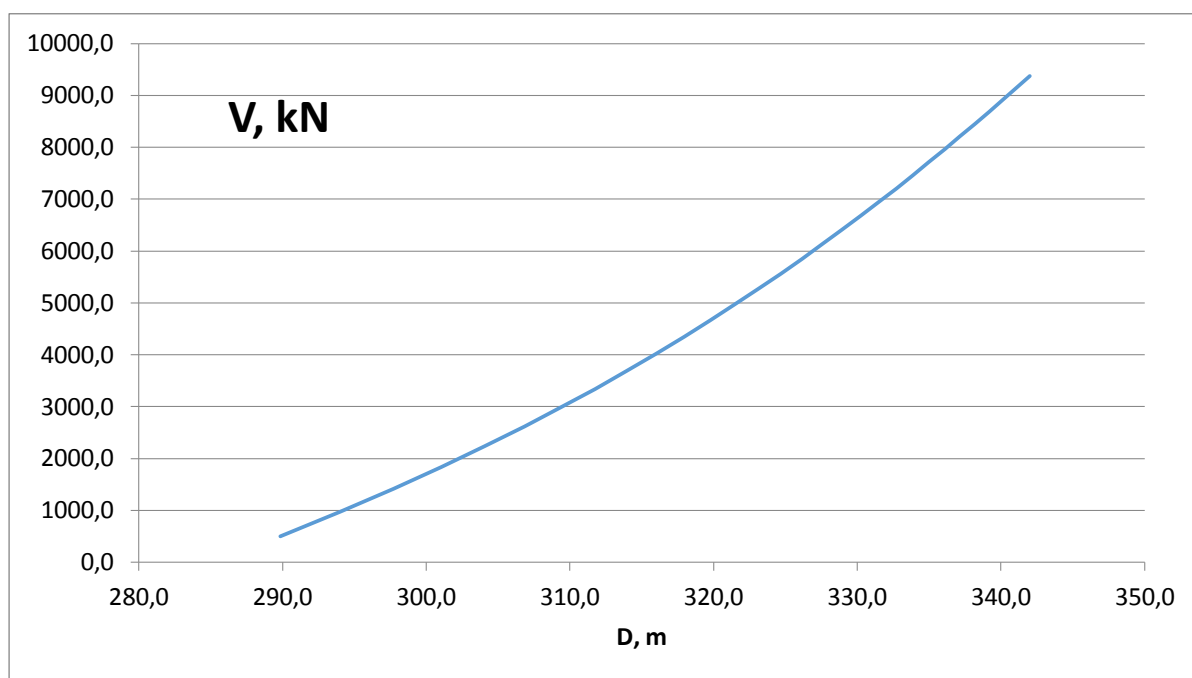
Slika 18. Ovisnost tlačne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=20\text{m}$



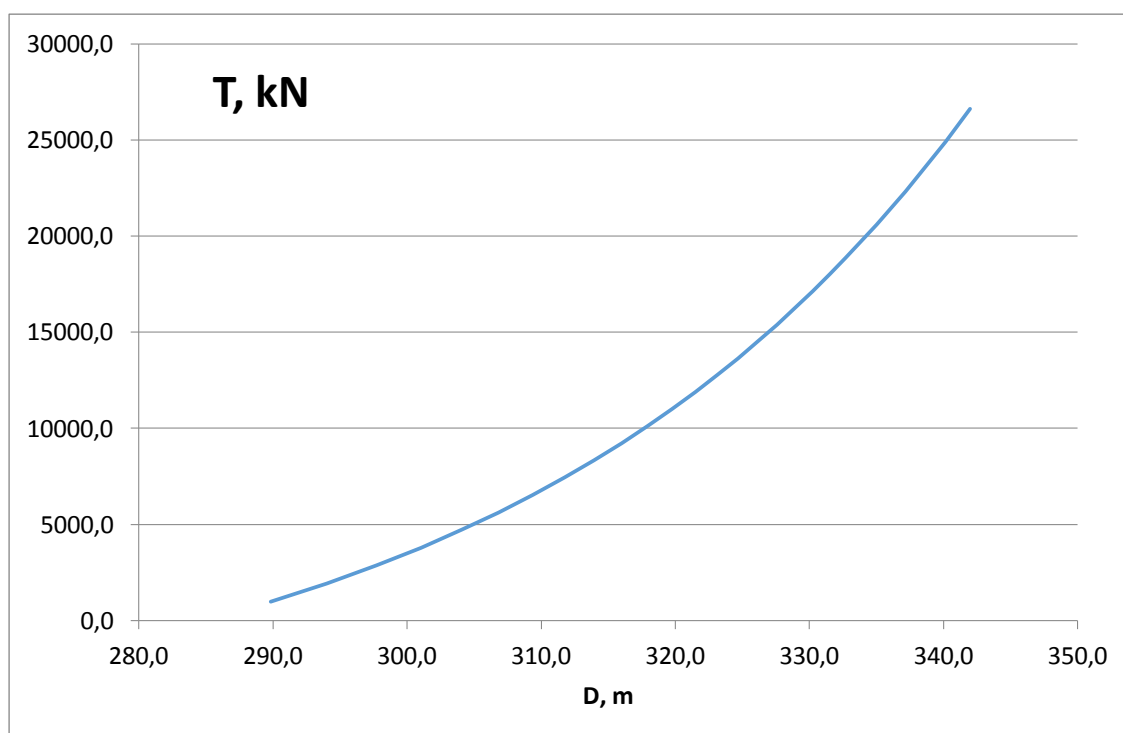
Slika 19. Profil sidrene linije za T=20m



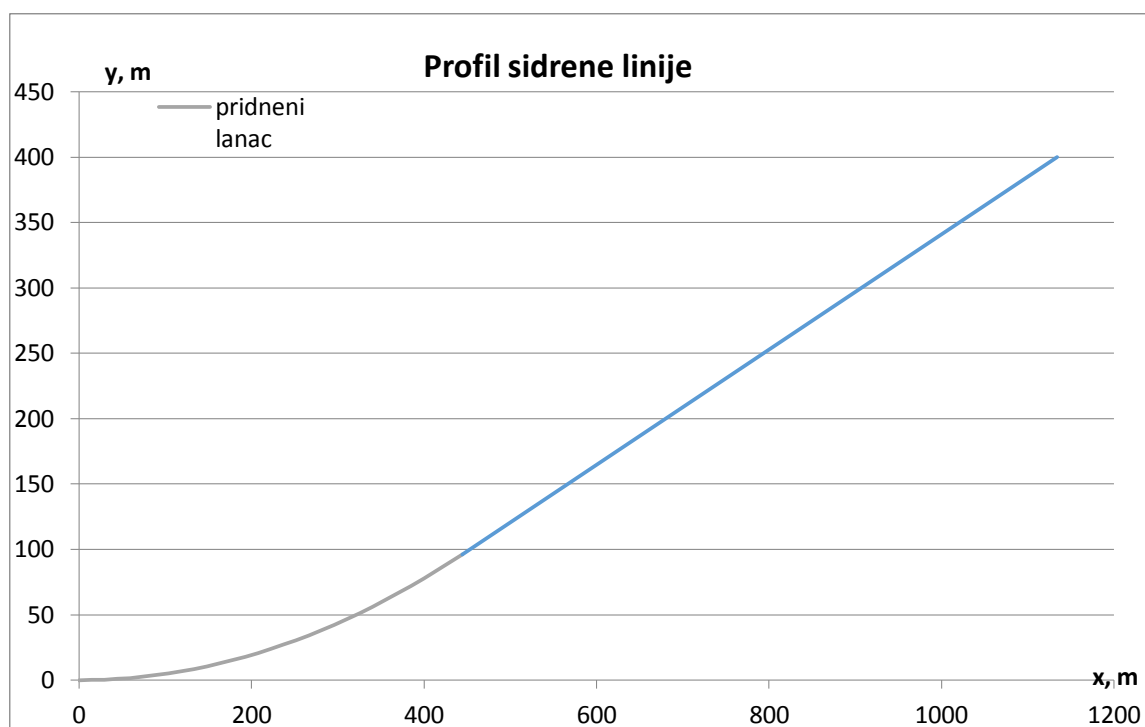
Slika 20. Ovisnost horizontalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za T=22m



Slika 21. Ovisnost vertikalne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=22\text{m}$



Slika 22. Ovisnost tlačne sile o horizontalnom pomaku hvatišta za $T=22\text{m}$



Slika 23. Profil sidrene linije za $T=22m$

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu proveden je matematički proračun sidrenog sustava za odabrani FPSO brod. Projektiranje ovih brodova se temelji na racionalnim modelima. Razlog tome je nagli razvoj te nedostatak relevantnih propisa od strane registra brodova. Cjelokupna fizika modela broda i njegovog sidrenog sustava dosta je složen problem .

Kako se sidrenje FPSO brodova još dosta istražuje i većinom se oslanjalo na eksperimentalna istraživanja i na greške koje su se do tada pojavljivale na postojećim brodovima u službi, interesantnim se pokazalo tom problemu pristupiti pomoću matematičkog modela. Takvi matematički modeli u koliko se pokažu točnima uvelike bi ubrzali proces određivanja načina sidrenja i smanjili troškove samog projektiranja i eksperimentalnog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Čorić, V.; Prpić-Oršić J.: *Pomorstvenost plovnih objekata*; Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] <http://www.sevanmarine.com>
- [3] Bureau Veritas: *HydroSTAR for Experts– User Manual*; 2013
- [4] *Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*, API, December 1996
- [5] Muftić O.: *Mehanika I (Statika)*, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1991.
- [6] *Global Wave Statistic*

PRILOG A

Prikaz statistike valnih visina i perioda za područje *Area II*. [6]

| | | T [s] | | | | | | | | | | | |
|-------|--|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-----|------|
| | | <4 | 4-5 | 5-6 | 6-7 | 7-8 | 8-9 | 9-10 | 10-11 | 11-12 | 12-13 | >13 | |
| H [m] | | | | | | | | | | | | | Σ |
| 0-1 | | 53 | 132 | 96 | 30 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 318 |
| 1-2 | | 12 | 85 | 124 | 66 | 19 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 311 |
| 2-3 | | 3 | 35 | 71 | 51 | 19 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 185 |
| 3-4 | | 1 | 13 | 34 | 30 | 13 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 96 |
| 4-5 | | 0 | 5 | 15 | 15 | 8 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46 |
| 5-6 | | 0 | 2 | 7 | 8 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 |
| 6-7 | | 0 | 1 | 3 | 4 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| 7-8 | | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 8-9 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 9-10 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 10-11 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11-12 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12-13 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13-14 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| >14 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Σ | | 69 | 273 | 353 | 208 | 75 | 20 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1002 |

PRILOG B

U prilogu je prikazan cjeloviti matematički proračun sidrenog sustava za svaki gaz posebno.

Proračun za gaz $T=20\text{ m}$

| No. | H, kN | a, m | H/k, m | $s_{u0}+H/k, m$ | $(x_0/a)_1$ |
|-----|---------|--------|--------|-----------------|-------------|
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 750,0 | 0 |
| 2 | 835,9 | 65,4 | 0,2 | 750,2 | 0,521 |
| 3 | 1671,7 | 130,8 | 0,4 | 750,4 | 0,510 |
| 4 | 2507,6 | 196,2 | 0,6 | 750,6 | 0,500 |
| 5 | 3343,5 | 261,6 | 0,9 | 750,9 | 0,491 |
| 6 | 4179,3 | 327,0 | 1,1 | 751,1 | 0,482 |
| 7 | 5015,2 | 392,4 | 1,3 | 751,3 | 0,474 |
| 8 | 5851,1 | 457,8 | 1,5 | 751,5 | 0,466 |
| 9 | 6686,9 | 523,2 | 1,7 | 751,7 | 0,459 |
| 10 | 7522,8 | 588,6 | 1,9 | 751,9 | 0,452 |
| 11 | 8358,7 | 654,0 | 2,1 | 752,1 | 0,446 |
| 12 | 9194,5 | 719,4 | 2,3 | 752,3 | 0,439 |
| 13 | 10030,4 | 784,9 | 2,6 | 752,6 | 0,434 |
| 14 | 10866,3 | 850,3 | 2,8 | 752,8 | 0,428 |
| 15 | 11702,1 | 915,7 | 3,0 | 753,0 | 0,423 |
| 16 | 12538,0 | 981,1 | 3,2 | 753,2 | 0,418 |
| 17 | 13373,9 | 1046,5 | 3,4 | 753,4 | 0,413 |
| 18 | 14209,7 | 1111,9 | 3,6 | 753,6 | 0,408 |
| 19 | 15045,6 | 1177,3 | 3,8 | 753,8 | 0,403 |
| 20 | 15881,5 | 1242,7 | 4,0 | 754,0 | 0,399 |
| 21 | 16717,3 | 1308,1 | 4,3 | 754,3 | 0,395 |
| 22 | 17553,2 | 1373,5 | 4,5 | 754,5 | 0,391 |
| 23 | 18389,1 | 1438,9 | 4,7 | 754,7 | 0,387 |
| 24 | 19224,9 | 1504,3 | 4,9 | 754,9 | 0,383 |
| 25 | 20060,8 | 1569,7 | 5,1 | 755,1 | 0,380 |
| 26 | 20896,7 | 1635,1 | 5,3 | 755,3 | 0,376 |
| 27 | 21732,5 | 1700,5 | 5,5 | 755,5 | 0,373 |
| 28 | 22568,4 | 1765,9 | 5,8 | 755,8 | 0,370 |
| 29 | 23404,3 | 1831,3 | 6,0 | 756,0 | 0,366 |
| 30 | 24240,1 | 1896,7 | 6,2 | 756,2 | 0,363 |
| 31 | 25076,0 | 1962,1 | 6,4 | 756,4 | 0,360 |

| $f_i(x_0/a)$ | $[df/d(x_0/a)]_i$ | $\Delta(x_0/a)$ | $(x_0/a)_2$ | x_0, m |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------|----------|
| 0,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 |
| -0,485 | 9,388 | 0,052 | 0,573 | 37,5 |
| -0,227 | 5,002 | 0,045 | 0,556 | 72,7 |
| -0,142 | 3,531 | 0,040 | 0,540 | 106,0 |
| -0,101 | 2,788 | 0,036 | 0,527 | 137,8 |
| -0,076 | 2,338 | 0,033 | 0,515 | 168,3 |
| -0,060 | 2,034 | 0,029 | 0,503 | 197,5 |
| -0,049 | 1,815 | 0,027 | 0,493 | 225,7 |
| -0,041 | 1,648 | 0,025 | 0,484 | 253,0 |
| -0,034 | 1,517 | 0,023 | 0,475 | 279,4 |
| -0,030 | 1,410 | 0,021 | 0,467 | 305,1 |
| -0,026 | 1,322 | 0,019 | 0,459 | 330,1 |
| -0,023 | 1,247 | 0,018 | 0,452 | 354,5 |
| -0,020 | 1,183 | 0,017 | 0,445 | 378,3 |
| -0,018 | 1,127 | 0,016 | 0,438 | 401,5 |
| -0,016 | 1,079 | 0,015 | 0,432 | 424,2 |
| -0,014 | 1,035 | 0,014 | 0,427 | 446,5 |
| -0,013 | 0,997 | 0,013 | 0,421 | 468,3 |
| -0,012 | 0,962 | 0,012 | 0,416 | 489,7 |
| -0,011 | 0,930 | 0,012 | 0,411 | 510,7 |
| -0,010 | 0,901 | 0,011 | 0,406 | 531,3 |
| -0,009 | 0,875 | 0,011 | 0,402 | 551,6 |
| -0,009 | 0,851 | 0,010 | 0,397 | 571,5 |
| -0,008 | 0,828 | 0,010 | 0,393 | 591,1 |
| -0,007 | 0,807 | 0,009 | 0,389 | 610,5 |
| -0,007 | 0,788 | 0,009 | 0,385 | 629,5 |
| -0,006 | 0,770 | 0,008 | 0,381 | 648,3 |
| -0,006 | 0,753 | 0,008 | 0,378 | 666,8 |
| -0,006 | 0,737 | 0,008 | 0,374 | 685,0 |
| -0,005 | 0,722 | 0,007 | 0,371 | 703,0 |
| -0,005 | 0,708 | 0,007 | 0,367 | 720,8 |

| y_0 , m | s , m | s_U , m | v , m | u , m | x_s , m |
|-----------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| 0,0 | 0,0 | 750,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 11,0 | 39,6 | 750,2 | 388,3 | 641,9 | 679,4 |
| 20,7 | 76,5 | 750,5 | 378,9 | 647,8 | 720,5 |
| 29,4 | 111,3 | 750,7 | 370,4 | 653,0 | 759,1 |
| 37,2 | 144,3 | 751,0 | 362,7 | 657,6 | 795,4 |
| 44,2 | 175,8 | 751,2 | 355,7 | 661,7 | 829,9 |
| 50,8 | 205,9 | 751,4 | 349,2 | 665,4 | 862,9 |
| 56,8 | 235,0 | 751,7 | 343,2 | 668,7 | 894,5 |
| 62,4 | 263,0 | 751,9 | 337,7 | 671,8 | 924,8 |
| 67,6 | 290,1 | 752,1 | 332,4 | 674,7 | 954,1 |
| 72,5 | 316,3 | 752,4 | 327,6 | 677,3 | 982,4 |
| 77,1 | 341,8 | 752,6 | 323,0 | 679,8 | 1009,9 |
| 81,4 | 366,7 | 752,8 | 318,6 | 682,1 | 1036,5 |
| 85,5 | 390,9 | 753,0 | 314,5 | 684,2 | 1062,5 |
| 89,4 | 414,5 | 753,3 | 310,6 | 686,2 | 1087,7 |
| 93,1 | 437,5 | 753,5 | 306,9 | 688,2 | 1112,4 |
| 96,7 | 460,1 | 753,7 | 303,4 | 690,0 | 1136,4 |
| 100,1 | 482,2 | 753,9 | 300,0 | 691,7 | 1160,0 |
| 103,3 | 503,9 | 754,2 | 296,8 | 693,3 | 1183,0 |
| 106,4 | 525,1 | 754,4 | 293,7 | 694,9 | 1205,5 |
| 109,4 | 546,0 | 754,6 | 290,7 | 696,4 | 1227,7 |
| 112,2 | 566,5 | 754,8 | 287,8 | 697,8 | 1249,4 |
| 115,0 | 586,6 | 755,1 | 285,1 | 699,2 | 1270,7 |
| 117,6 | 606,5 | 755,3 | 282,4 | 700,5 | 1291,6 |
| 120,2 | 626,0 | 755,5 | 279,8 | 701,8 | 1312,2 |
| 122,7 | 645,2 | 755,7 | 277,4 | 703,0 | 1332,5 |
| 125,1 | 664,1 | 755,9 | 275,0 | 704,2 | 1352,4 |
| 127,4 | 682,7 | 756,2 | 272,7 | 705,3 | 1372,0 |
| 129,6 | 701,1 | 756,4 | 270,4 | 706,4 | 1391,4 |
| 131,8 | 719,2 | 756,6 | 268,3 | 707,5 | 1410,5 |
| 133,9 | 737,1 | 756,8 | 266,2 | 708,5 | 1429,3 |

| No. | D, m | H, kN | V, kN | T, kN | Safety Factor | |
|-----|-------|---------|--------|---------|---------------|----------|
| | | | | | lanac | uže |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | |
| 2 | 289,9 | 835,9 | 505,6 | 976,9 | 65,21 | 60,25183 |
| 3 | 294,0 | 1671,7 | 977,6 | 1936,6 | 32,89 | 30,39 |
| 4 | 297,8 | 2507,6 | 1422,2 | 2882,9 | 22,10 | 20,42 |
| 5 | 301,1 | 3343,5 | 1844,0 | 3818,3 | 16,68 | 15,42 |
| 6 | 304,2 | 4179,3 | 2246,4 | 4744,8 | 13,43 | 12,41 |
| 7 | 306,9 | 5015,2 | 2632,0 | 5663,9 | 11,25 | 10,39 |
| 8 | 309,5 | 5851,1 | 3002,9 | 6576,7 | 9,69 | 8,95 |
| 9 | 311,9 | 6686,9 | 3360,7 | 7484,0 | 8,51 | 7,86 |
| 10 | 314,1 | 7522,8 | 3706,9 | 8386,5 | 7,60 | 7,02 |
| 11 | 316,1 | 8358,7 | 4042,5 | 9284,9 | 6,86 | 6,34 |
| 12 | 318,1 | 9194,5 | 4368,6 | 10179,6 | 6,26 | 5,78 |
| 13 | 319,9 | 10030,4 | 4685,9 | 11071,0 | 5,75 | 5,32 |
| 14 | 321,6 | 10866,3 | 4995,1 | 11959,4 | 5,33 | 4,92 |
| 15 | 323,3 | 11702,1 | 5296,9 | 12845,1 | 4,96 | 4,58 |
| 16 | 324,8 | 12538,0 | 5591,8 | 13728,4 | 4,64 | 4,29 |
| 17 | 326,3 | 13373,9 | 5880,3 | 14609,5 | 4,36 | 4,03 |
| 18 | 327,7 | 14209,7 | 6162,9 | 15488,6 | 4,11 | 3,80 |
| 19 | 329,1 | 15045,6 | 6439,7 | 16365,8 | 3,89 | 3,60 |
| 20 | 330,4 | 15881,5 | 6711,3 | 17241,3 | 3,69 | 3,41 |
| 21 | 331,7 | 16717,3 | 6977,9 | 18115,2 | 3,52 | 3,25 |
| 22 | 332,9 | 17553,2 | 7239,9 | 18987,6 | 3,35 | 3,10 |
| 23 | 334,0 | 18389,1 | 7497,3 | 19858,7 | 3,21 | 2,96 |
| 24 | 335,2 | 19224,9 | 7750,5 | 20728,4 | 3,07 | 2,84 |
| 25 | 336,3 | 20060,8 | 7999,7 | 21597,0 | 2,95 | 2,73 |
| 26 | 337,3 | 20896,7 | 8245,1 | 22464,5 | 2,84 | 2,62 |
| 27 | 338,3 | 21732,5 | 8486,8 | 23330,8 | 2,73 | 2,52 |
| 28 | 339,3 | 22568,4 | 8725,0 | 24196,2 | 2,63 | 2,43 |
| 29 | 340,3 | 23404,3 | 8959,9 | 25060,7 | 2,54 | 2,35 |
| 30 | 341,2 | 24240,1 | 9191,6 | 25924,3 | 2,46 | 2,27 |
| 31 | 342,2 | 25076,0 | 9420,2 | 26787,0 | 2,38 | 2,20 |

| | | | | | | sidrena linija | | |
|-----|-----------|------------|-----------|------------|--------------|----------------|-------|------|
| | | | | | | Safety Factor | | |
| No. | D_1 , m | H_1 , kN | D_2 , m | H_2 , kN | δ , m | No. | lanac | uže |
| 16 | 324,8 | 12537,99 | 0,0 | 0,0 | 162,41 | 16 | 4,64 | 4,29 |
| 17 | 326,3 | 13373,86 | 289,9 | 835,9 | 18,23 | 17 | 4,36 | 4,03 |
| 18 | 327,7 | 14209,73 | 294,0 | 1671,7 | 16,84 | 18 | 4,11 | 3,80 |
| 19 | 329,1 | 15045,59 | 297,8 | 2507,6 | 15,66 | 19 | 3,89 | 3,60 |
| 20 | 330,4 | 15881,46 | 301,1 | 3343,5 | 14,64 | 20 | 3,69 | 3,41 |
| 21 | 331,7 | 16717,33 | 304,2 | 4179,3 | 13,75 | 21 | 3,52 | 3,25 |
| 22 | 332,9 | 17553,19 | 306,9 | 5015,2 | 12,97 | 22 | 3,35 | 3,10 |
| 23 | 334,0 | 18389,06 | 309,5 | 5851,1 | 12,27 | 23 | 3,21 | 2,96 |
| 24 | 335,2 | 19224,93 | 311,9 | 6686,9 | 11,66 | 24 | 3,07 | 2,84 |
| 25 | 336,3 | 20060,79 | 314,1 | 7522,8 | 11,10 | 25 | 2,95 | 2,73 |
| 26 | 337,3 | 20896,66 | 316,1 | 8358,7 | 10,60 | 26 | 2,84 | 2,62 |
| 27 | 338,3 | 21732,52 | 318,1 | 9194,5 | 10,14 | 27 | 2,73 | 2,52 |
| 28 | 339,3 | 22568,39 | 319,9 | 10030,4 | 9,72 | 28 | 2,63 | 2,43 |
| 29 | 340,3 | 23404,26 | 321,6 | 10866,3 | 9,34 | 29 | 2,54 | 2,35 |
| 30 | 341,2 | 24240,12 | 323,3 | 11702,1 | 8,99 | 30 | 2,46 | 2,27 |
| 31 | 342,2 | 25075,99 | 324,8 | 12538,0 | 8,67 | 31 | 2,38 | 2,20 |

| $D_{0,i}$, m | i | i+1 | $D_{0,i}$, m | $D_{0,i+1}$, m | $H_{0,i}$, kN | $H_{0,i+1}$, kN | $V_{0,i}$, kN | $V_{0,i+1}$, kN |
|---------------|----|-----|---------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| 162,4 | 1 | 2 | 0,0 | 289,85 | 0,0 | 835,9 | 0,0 | 505,6 |
| 308,1 | 7 | 8 | 306,9 | 309,49 | 5015,2 | 5851,1 | 2632,0 | 3002,9 |
| 310,9 | 8 | 9 | 309,5 | 311,86 | 5851,1 | 6686,9 | 3002,9 | 3360,7 |
| 313,4 | 9 | 10 | 311,9 | 314,06 | 6686,9 | 7522,8 | 3360,7 | 3706,9 |
| 315,8 | 10 | 11 | 314,1 | 316,12 | 7522,8 | 8358,7 | 3706,9 | 4042,5 |
| 317,9 | 11 | 12 | 316,1 | 318,06 | 8358,7 | 9194,5 | 4042,5 | 4368,6 |
| 319,9 | 13 | 14 | 319,9 | 321,62 | 10030,4 | 10866,3 | 4685,9 | 4995,1 |
| 321,8 | 14 | 15 | 321,6 | 323,26 | 10866,3 | 11702,1 | 4995,1 | 5296,9 |
| 323,5 | 15 | 16 | 323,3 | 324,82 | 11702,1 | 12538,0 | 5296,9 | 5591,8 |
| 325,2 | 16 | 17 | 324,8 | 326,31 | 12538,0 | 13373,9 | 5591,8 | 5880,3 |
| 326,7 | 17 | 18 | 326,3 | 327,73 | 13373,9 | 14209,7 | 5880,3 | 6162,9 |
| 328,2 | 18 | 19 | 327,7 | 329,09 | 14209,7 | 15045,6 | 6162,9 | 6439,7 |
| 329,6 | 19 | 20 | 329,1 | 330,40 | 15045,6 | 15881,5 | 6439,7 | 6711,3 |
| 331,0 | 20 | 21 | 330,4 | 331,66 | 15881,5 | 16717,3 | 6711,3 | 6977,9 |
| 332,3 | 21 | 22 | 331,7 | 332,87 | 16717,3 | 17553,2 | 6977,9 | 7239,9 |
| 333,5 | 22 | 23 | 332,9 | 334,04 | 17553,2 | 18389,1 | 7239,9 | 7497,3 |

| H_0 , kN | V_0 , kN | T_0 , kN |
|------------|------------|------------|
| 468,3 | 283,3 | 547,4 |
| 5389,7 | 2798,2 | 6072,8 |
| 6345,1 | 3214,4 | 7112,9 |
| 7284,8 | 3608,3 | 8129,5 |
| 8211,8 | 3983,5 | 9127,0 |
| 9128,4 | 4342,8 | 10108,8 |
| 10036,9 | 4688,3 | 11077,9 |
| 10941,3 | 5022,2 | 12038,8 |
| 11838,8 | 5345,2 | 12989,6 |
| 12730,6 | 5658,3 | 13931,5 |
| 13617,4 | 5962,7 | 14865,7 |
| 14500,0 | 6259,0 | 15793,2 |
| 15378,7 | 6548,0 | 16714,7 |
| 16254,1 | 6830,2 | 17630,9 |
| 17126,6 | 7106,2 | 18542,4 |
| 17996,5 | 7376,4 | 19449,6 |

Profil sidrene linije za $T=20\text{m}$

| | | |
|---------------------|----------|----|
| $H =$ | 13373,9 | kN |
| $a =$ | 1046,5 | m |
| $H/k =$ | 3,408222 | m |
| $s_{U0+H/k} =$ | 753,4 | m |
| $(x_0/a)_1 =$ | 0,413 | |
| | | |
| $f_i(x_0/a) =$ | -0,014 | |
| $[df/d(x_0/a)]_i =$ | 1,035 | |
| $\Delta(x_0/a) =$ | 0,014 | |
| $(x_0/a)_2 =$ | 0,427 | |
| $x_0 =$ | 446,5 | m |
| | | |
| $y_0 =$ | 96,7 | m |
| $s =$ | 460,1 | m |
| $s_U =$ | 753,7 | m |
| $v =$ | 303,4 | m |
| $u =$ | 690,0 | m |
| $x_S =$ | 1136,4 | m |
| | | |
| $d_S =$ | 400,1 | m |
| $\Delta d_S =$ | 0,1 | m |
| | | |
| $D =$ | 326,3 | m |
| $V =$ | 5880,3 | kN |
| $T =$ | 14609,5 | kN |

Proračun za gaz $T=22m$

| No. | H, kN | a, m | H/k, m | $s_{U0}+H/k, m$ | $(x_0/a)_1$ |
|-----|---------|--------|--------|-----------------|-------------|
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 750,0 | 0 |
| 2 | 830,5 | 65,0 | 0,2 | 750,2 | 0,521 |
| 3 | 1661,1 | 130,0 | 0,4 | 750,4 | 0,510 |
| 4 | 2491,6 | 195,0 | 0,6 | 750,6 | 0,500 |
| 5 | 3322,1 | 259,9 | 0,8 | 750,8 | 0,491 |
| 6 | 4152,6 | 324,9 | 1,1 | 751,1 | 0,482 |
| 7 | 4983,2 | 389,9 | 1,3 | 751,3 | 0,474 |
| 8 | 5813,7 | 454,9 | 1,5 | 751,5 | 0,466 |
| 9 | 6644,2 | 519,9 | 1,7 | 751,7 | 0,459 |
| 10 | 7474,8 | 584,9 | 1,9 | 751,9 | 0,452 |
| 11 | 8305,3 | 649,9 | 2,1 | 752,1 | 0,446 |
| 12 | 9135,8 | 714,9 | 2,3 | 752,3 | 0,440 |
| 13 | 9966,3 | 779,8 | 2,5 | 752,5 | 0,434 |
| 14 | 10796,9 | 844,8 | 2,8 | 752,8 | 0,428 |
| 15 | 11627,4 | 909,8 | 3,0 | 753,0 | 0,423 |
| 16 | 12457,9 | 974,8 | 3,2 | 753,2 | 0,418 |
| 17 | 13288,4 | 1039,8 | 3,4 | 753,4 | 0,413 |
| 18 | 14119,0 | 1104,8 | 3,6 | 753,6 | 0,408 |
| 19 | 14949,5 | 1169,8 | 3,8 | 753,8 | 0,404 |
| 20 | 15780,0 | 1234,7 | 4,0 | 754,0 | 0,400 |
| 21 | 16610,6 | 1299,7 | 4,2 | 754,2 | 0,396 |
| 22 | 17441,1 | 1364,7 | 4,4 | 754,4 | 0,392 |
| 23 | 18271,6 | 1429,7 | 4,7 | 754,7 | 0,388 |
| 24 | 19102,1 | 1494,7 | 4,9 | 754,9 | 0,384 |
| 25 | 19932,7 | 1559,7 | 5,1 | 755,1 | 0,380 |
| 26 | 20763,2 | 1624,7 | 5,3 | 755,3 | 0,377 |
| 27 | 21593,7 | 1689,6 | 5,5 | 755,5 | 0,373 |
| 28 | 22424,3 | 1754,6 | 5,7 | 755,7 | 0,370 |
| 29 | 23254,8 | 1819,6 | 5,9 | 755,9 | 0,367 |
| 30 | 24085,3 | 1884,6 | 6,1 | 756,1 | 0,364 |
| 31 | 24915,8 | 1949,6 | 6,3 | 756,3 | 0,361 |

| $f_i(x_0/a)$ | $[df/d(x_0/a)]_i$ | $\Delta(x_0/a)$ | $(x_0/a)_2$ | x_0, m |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------|----------|
| 0,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 |
| -0,489 | 9,444 | 0,052 | 0,573 | 37,2 |
| -0,229 | 5,031 | 0,045 | 0,556 | 72,3 |
| -0,143 | 3,550 | 0,040 | 0,541 | 105,4 |
| -0,101 | 2,803 | 0,036 | 0,527 | 137,0 |
| -0,077 | 2,350 | 0,033 | 0,515 | 167,3 |
| -0,061 | 2,044 | 0,030 | 0,504 | 196,4 |
| -0,049 | 1,823 | 0,027 | 0,493 | 224,5 |
| -0,041 | 1,656 | 0,025 | 0,484 | 251,6 |
| -0,035 | 1,524 | 0,023 | 0,475 | 277,9 |
| -0,030 | 1,416 | 0,021 | 0,467 | 303,5 |
| -0,026 | 1,327 | 0,020 | 0,459 | 328,4 |
| -0,023 | 1,252 | 0,018 | 0,452 | 352,6 |
| -0,020 | 1,188 | 0,017 | 0,445 | 376,3 |
| -0,018 | 1,132 | 0,016 | 0,439 | 399,4 |
| -0,016 | 1,083 | 0,015 | 0,433 | 422,0 |
| -0,015 | 1,039 | 0,014 | 0,427 | 444,2 |
| -0,013 | 1,001 | 0,013 | 0,422 | 465,9 |
| -0,012 | 0,966 | 0,013 | 0,417 | 487,2 |
| -0,011 | 0,934 | 0,012 | 0,412 | 508,1 |
| -0,010 | 0,905 | 0,011 | 0,407 | 528,7 |
| -0,009 | 0,878 | 0,011 | 0,402 | 548,9 |
| -0,009 | 0,854 | 0,010 | 0,398 | 568,7 |
| -0,008 | 0,831 | 0,010 | 0,394 | 588,3 |
| -0,007 | 0,811 | 0,009 | 0,390 | 607,5 |
| -0,007 | 0,791 | 0,009 | 0,386 | 626,5 |
| -0,006 | 0,773 | 0,008 | 0,382 | 645,2 |
| -0,006 | 0,756 | 0,008 | 0,378 | 663,6 |
| -0,006 | 0,740 | 0,008 | 0,375 | 681,8 |
| -0,005 | 0,725 | 0,007 | 0,371 | 699,7 |
| -0,005 | 0,711 | 0,007 | 0,368 | 717,4 |

| y_0 , m | s , m | s_U , m | v , m | u , m | x_s , m |
|-----------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| 0,0 | 0,0 | 750,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 11,0 | 39,3 | 750,2 | 388,4 | 641,9 | 679,1 |
| 20,6 | 76,0 | 750,5 | 379,0 | 647,8 | 720,0 |
| 29,2 | 110,6 | 750,7 | 370,5 | 652,9 | 758,3 |
| 37,0 | 143,5 | 751,0 | 362,9 | 657,5 | 794,5 |
| 44,0 | 174,8 | 751,2 | 355,9 | 661,6 | 828,9 |
| 50,5 | 204,8 | 751,4 | 349,4 | 665,2 | 861,6 |
| 56,5 | 233,7 | 751,7 | 343,5 | 668,6 | 893,1 |
| 62,1 | 261,6 | 751,9 | 337,9 | 671,7 | 923,3 |
| 67,3 | 288,5 | 752,1 | 332,7 | 674,5 | 952,5 |
| 72,2 | 314,7 | 752,4 | 327,9 | 677,2 | 980,7 |
| 76,8 | 340,1 | 752,6 | 323,3 | 679,6 | 1008,0 |
| 81,1 | 364,8 | 752,8 | 319,0 | 681,9 | 1034,5 |
| 85,2 | 388,9 | 753,0 | 314,9 | 684,0 | 1060,3 |
| 89,1 | 412,4 | 753,3 | 311,0 | 686,1 | 1085,5 |
| 92,8 | 435,4 | 753,5 | 307,3 | 688,0 | 1110,0 |
| 96,3 | 457,8 | 753,7 | 303,7 | 689,8 | 1134,0 |
| 99,7 | 479,8 | 753,9 | 300,4 | 691,5 | 1157,4 |
| 102,9 | 501,4 | 754,1 | 297,1 | 693,1 | 1180,4 |
| 106,0 | 522,6 | 754,4 | 294,0 | 694,7 | 1202,8 |
| 109,0 | 543,4 | 754,6 | 291,1 | 696,2 | 1224,9 |
| 111,9 | 563,8 | 754,8 | 288,2 | 697,6 | 1246,5 |
| 114,6 | 583,8 | 755,0 | 285,4 | 699,0 | 1267,7 |
| 117,3 | 603,6 | 755,2 | 282,8 | 700,3 | 1288,6 |
| 119,8 | 623,0 | 755,5 | 280,2 | 701,6 | 1309,1 |
| 122,3 | 642,1 | 755,7 | 277,8 | 702,8 | 1329,3 |
| 124,7 | 660,9 | 755,9 | 275,4 | 704,0 | 1349,1 |
| 127,0 | 679,5 | 756,1 | 273,1 | 705,1 | 1368,7 |
| 129,2 | 697,8 | 756,3 | 270,8 | 706,2 | 1388,0 |
| 131,4 | 715,9 | 756,6 | 268,7 | 707,3 | 1407,0 |
| 133,5 | 733,7 | 756,8 | 266,6 | 708,3 | 1425,7 |

| No. | D, m | H, kN | V, kN | T, kN | Safety Factor | |
|-----|-------|---------|--------|---------|---------------|----------|
| | | | | | lanac | uže |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | |
| 2 | 289,8 | 830,5 | 502,5 | 970,7 | 65,62 | 60,63541 |
| 3 | 294,0 | 1661,1 | 971,8 | 1924,4 | 33,10 | 30,59 |
| 4 | 297,7 | 2491,6 | 1413,9 | 2864,8 | 22,24 | 20,55 |
| 5 | 301,0 | 3322,1 | 1833,5 | 3794,5 | 16,79 | 15,51 |
| 6 | 304,1 | 4152,6 | 2233,9 | 4715,4 | 13,51 | 12,48 |
| 7 | 306,8 | 4983,2 | 2617,5 | 5628,8 | 11,32 | 10,46 |
| 8 | 309,4 | 5813,7 | 2986,6 | 6536,0 | 9,75 | 9,01 |
| 9 | 311,7 | 6644,2 | 3342,8 | 7437,7 | 8,56 | 7,91 |
| 10 | 313,9 | 7474,8 | 3687,3 | 8334,7 | 7,64 | 7,06 |
| 11 | 316,0 | 8305,3 | 4021,4 | 9227,6 | 6,90 | 6,38 |
| 12 | 317,9 | 9135,8 | 4345,9 | 10116,8 | 6,30 | 5,82 |
| 13 | 319,8 | 9966,3 | 4661,8 | 11002,7 | 5,79 | 5,35 |
| 14 | 321,5 | 10796,9 | 4969,7 | 11885,7 | 5,36 | 4,95 |
| 15 | 323,1 | 11627,4 | 5270,2 | 12766,0 | 4,99 | 4,61 |
| 16 | 324,7 | 12457,9 | 5563,9 | 13643,9 | 4,67 | 4,31 |
| 17 | 326,2 | 13288,4 | 5851,1 | 14519,6 | 4,39 | 4,05 |
| 18 | 327,6 | 14119,0 | 6132,5 | 15393,3 | 4,14 | 3,82 |
| 19 | 328,9 | 14949,5 | 6408,2 | 16265,1 | 3,92 | 3,62 |
| 20 | 330,2 | 15780,0 | 6678,6 | 17135,2 | 3,72 | 3,44 |
| 21 | 331,5 | 16610,6 | 6944,2 | 18003,7 | 3,54 | 3,27 |
| 22 | 332,7 | 17441,1 | 7205,0 | 18870,7 | 3,38 | 3,12 |
| 23 | 333,9 | 18271,6 | 7461,4 | 19736,4 | 3,23 | 2,98 |
| 24 | 335,0 | 19102,1 | 7713,6 | 20600,8 | 3,09 | 2,86 |
| 25 | 336,1 | 19932,7 | 7961,8 | 21463,9 | 2,97 | 2,74 |
| 26 | 337,2 | 20763,2 | 8206,2 | 22326,0 | 2,85 | 2,64 |
| 27 | 338,2 | 21593,7 | 8446,9 | 23187,0 | 2,75 | 2,54 |
| 28 | 339,2 | 22424,3 | 8684,2 | 24047,1 | 2,65 | 2,45 |
| 29 | 340,1 | 23254,8 | 8918,2 | 24906,2 | 2,56 | 2,36 |
| 30 | 341,1 | 24085,3 | 9148,9 | 25764,4 | 2,47 | 2,28 |
| 31 | 342,0 | 24915,8 | 9376,7 | 26621,8 | 2,39 | 2,21 |

| No. | D ₁ , m | H ₁ , kN | D ₂ , m | H ₂ , kN | δ, m | No. | Safety Factor | |
|-----|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------|-----|---------------|------|
| | | | | | | | lanac | uže |
| 16 | 324,7 | 12457,92 | 0,0 | 0,0 | 162,34 | 16 | 4,67 | 4,31 |
| 17 | 326,2 | 13288,44 | 289,8 | 830,5 | 18,17 | 17 | 4,39 | 4,05 |
| 18 | 327,6 | 14118,97 | 294,0 | 1661,1 | 16,79 | 18 | 4,14 | 3,82 |
| 19 | 328,9 | 14949,50 | 297,7 | 2491,6 | 15,62 | 19 | 3,92 | 3,62 |
| 20 | 330,2 | 15780,03 | 301,0 | 3322,1 | 14,60 | 20 | 3,72 | 3,44 |
| 21 | 331,5 | 16610,56 | 304,1 | 4152,6 | 13,72 | 21 | 3,54 | 3,27 |
| 22 | 332,7 | 17441,08 | 306,8 | 4983,2 | 12,94 | 22 | 3,38 | 3,12 |
| 23 | 333,9 | 18271,61 | 309,4 | 5813,7 | 12,25 | 23 | 3,23 | 2,98 |
| 24 | 335,0 | 19102,14 | 311,7 | 6644,2 | 11,63 | 24 | 3,09 | 2,86 |
| 25 | 336,1 | 19932,67 | 313,9 | 7474,8 | 11,08 | 25 | 2,97 | 2,74 |
| 26 | 337,2 | 20763,20 | 316,0 | 8305,3 | 10,58 | 26 | 2,85 | 2,64 |
| 27 | 338,2 | 21593,72 | 317,9 | 9135,8 | 10,12 | 27 | 2,75 | 2,54 |
| 28 | 339,2 | 22424,25 | 319,8 | 9966,3 | 9,71 | 28 | 2,65 | 2,45 |
| 29 | 340,1 | 23254,78 | 321,5 | 10796,9 | 9,33 | 29 | 2,56 | 2,36 |
| 30 | 341,1 | 24085,31 | 323,1 | 11627,4 | 8,98 | 30 | 2,47 | 2,28 |
| 31 | 342,0 | 24915,83 | 324,7 | 12457,9 | 8,66 | 31 | 2,39 | 2,21 |

| D ₀ , m | i | i+1 | D _{0,i} , m | D _{0,i+1} , m | H _{0,i} , kN | H _{0,i+1} , kN | V _{0,i} , kN | V _{0,i+1} , kN |
|--------------------|----|-----|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 162,3 | 1 | 2 | 0,0 | 289,82 | 0,0 | 830,5 | 0,0 | 502,5 |
| 308,0 | 7 | 8 | 306,8 | 309,38 | 4983,2 | 5813,7 | 2617,5 | 2986,6 |
| 310,8 | 8 | 9 | 309,4 | 311,74 | 5813,7 | 6644,2 | 2986,6 | 3342,8 |
| 313,3 | 9 | 10 | 311,7 | 313,94 | 6644,2 | 7474,8 | 3342,8 | 3687,3 |
| 315,6 | 10 | 11 | 313,9 | 316,00 | 7474,8 | 8305,3 | 3687,3 | 4021,4 |
| 317,8 | 11 | 12 | 316,0 | 317,93 | 8305,3 | 9135,8 | 4021,4 | 4345,9 |
| 319,8 | 13 | 14 | 319,8 | 321,48 | 9966,3 | 10796,9 | 4661,8 | 4969,7 |
| 321,6 | 14 | 15 | 321,5 | 323,11 | 10796,9 | 11627,4 | 4969,7 | 5270,2 |
| 323,4 | 15 | 16 | 323,1 | 324,67 | 11627,4 | 12457,9 | 5270,2 | 5563,9 |
| 325,0 | 16 | 17 | 324,7 | 326,16 | 12457,9 | 13288,4 | 5563,9 | 5851,1 |
| 326,6 | 17 | 18 | 326,2 | 327,58 | 13288,4 | 14119,0 | 5851,1 | 6132,5 |
| 328,1 | 18 | 19 | 327,6 | 328,94 | 14119,0 | 14949,5 | 6132,5 | 6408,2 |
| 329,5 | 19 | 20 | 328,9 | 330,24 | 14949,5 | 15780,0 | 6408,2 | 6678,6 |
| 330,8 | 20 | 21 | 330,2 | 331,50 | 15780,0 | 16610,6 | 6678,6 | 6944,2 |
| 332,1 | 21 | 22 | 331,5 | 332,71 | 16610,6 | 17441,1 | 6944,2 | 7205,0 |
| 333,3 | 22 | 23 | 332,7 | 333,88 | 17441,1 | 18271,6 | 7205,0 | 7461,4 |

| H_o , kN | V_o , kN | T_o , kN |
|------------|------------|------------|
| 465,2 | 281,5 | 543,7 |
| 5360,8 | 2785,3 | 6041,2 |
| 6309,2 | 3199,1 | 7073,9 |
| 7242,2 | 3590,8 | 8083,5 |
| 8162,7 | 3964,0 | 9074,3 |
| 9073,0 | 4321,4 | 10049,6 |
| 9975,4 | 4665,2 | 11012,4 |
| 10873,6 | 4997,5 | 11967,1 |
| 11765,2 | 5318,9 | 12911,6 |
| 12651,0 | 5630,7 | 13847,5 |
| 13531,9 | 5933,6 | 14775,7 |
| 14408,6 | 6228,6 | 15697,2 |
| 15281,6 | 6516,3 | 16612,9 |
| 16151,2 | 6797,3 | 17523,3 |
| 17018,0 | 7072,1 | 18429,0 |
| 17882,3 | 7341,2 | 19330,5 |

Profil sidrene linije za T=22m

| | | |
|---------------------|----------|----|
| H = | 13288,4 | kN |
| a = | 1039,8 | m |
| H/k = | 3,386454 | m |
| sU0+H/k = | 753,4 | m |
| $(x_0/a)_1 =$ | 0,413 | |
| | | |
| $f_i(x_0/a) =$ | -0,015 | |
| $[df/d(x_0/a)]_i =$ | 1,039 | |
| $\Delta(x_0/a) =$ | 0,014 | |
| $(x_0/a)_2 =$ | 0,427 | |
| $x_0 =$ | 444,2 | m |
| | | |
| $y_0 =$ | 96,3 | m |
| s = | 457,8 | m |
| $s_U =$ | 753,7 | m |
| v = | 303,7 | m |
| u = | 689,8 | m |
| $x_S =$ | 1134,0 | m |
| | | |
| $d_S =$ | 400,1 | m |
| $\Delta d_S =$ | 0,1 | m |
| | | |
| D = | 326,2 | m |
| V = | 5851,1 | kN |
| T = | 14519,6 | kN |

