

# Primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva u uvjetima valnog polja

---

Pažanin, Tea

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:623817>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Tea Pažanin**

**Split, 2023. godina**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Tea Pažanin**

**Primjena modelskog pristupa u definiranju  
parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog  
zaljeva u uvjetima valnog polja**

**Diplomski rad**

**Split, 2023. godina**

**Zahvala**

*Veliku zahvalnost prije svega dugujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Veljku Srziću koji mi je omogućio potrebne izvore te pomogao sa savjetima i strpljenjem pri izradi diplomskog rada.*

*Također, zahvaljujem se kolegi mag. ing. aedif. Fanitu Pletikosiću na nesebičnoj pomoći i uputama pri izradi rada u programu Ansys AQWA.*

*Veliko hvala mojim roditeljima i bratu, mojoj drugoj obitelji Delić, predivnim kolegicama i prijateljicama te mom najvećem osloncu Mislavu.*

*Bili ste mi velika podrška i vjetar u leđa tijekom dugogodišnjeg školovanja i hvala još jednom što ste vjerovali u mene!*

## **Primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva u uvjetima valnog polja**

### ***Sažetak:***

Na temelju dostupnih podataka o vjetru te primjenom Gumbel i Pareto distribucija dobiveni su ulazni parametri, točnije značajna valna visina i period vala, za proračun i simulaciju u programu Ansys AQWA. Nastavno na prethodno navedeno, u konačnici je dobivena maksimalna potezna sila užeta na temelju koje će se razraditi tehničko rješenje sidrenog sustava za brod duljine od 50 metara u Tivatskom zaljevu.

### ***Ključne riječi:***

Gumbel i Pareto distribucija, Tivatski zaljev, maksimalna potezna sila užeta, Ansys AQWA, sidreni sustav, 50 metarni brod

## **The application of a modeling approach in defining parameters of an anchoring system in the waters of Tivat Bay under wave field conditions**

### ***Abstract:***

Based on available wind data and the application of Gumbel and Pareto distributions, input parameters, specifically significant wave height and wave period, were obtained for the calculation and simulations in the Ansys AQWA program. Following the above, the maximum towline force was ultimately determined, based on which a technical solution for the anchoring system for a 50-meter-long ship in Tivat Bay will be developed.

### ***Keywords:***

Gumbel and Pareto distribution, Tivat Bay, maximum towline force, Ansys AQWA, anchoring system, 50-meter-long ship

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Tea Pažanin

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083218252

KATEDRA: **Katedra za privrednu hidrotehniku**

PREDMET: Obalno inženjerstvo

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva u uvjetima valnog polja

Opis zadatka: Za lokaciju unutar Tivatskog zaljeva raspoložive podatke o vjetru potrebno je:

- Izraditi vjetrovalnu analizu i definirati projektni val;
- Uspostaviti model za analizu ponašanja plovila duljine 50 m usidrenog u jednoj točki,
- Izraditi modelsku analizu odgovora plovila i sidrenog lanca/užeta u uvjetima valnog polja;
- Analizirati stupnjeve slobode plovila i poteznu silu u sidrenom užetu;
- U skladu s dobivenim rezultatima definirati parametre konceptualnog rješenja sidrenog sustava.

U Splitu, 15.02.2023

Voditelj Diplomskog rada:

**Veljko  
Srzić**

Digitalno potpisao:  
Veljko Srzić  
Datum: 2023.09.15  
09:52:48 +02'00'

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

# Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. Uvod .....  | 1  |
| 2. Opis lokacije .....   | 2  |
| 3. Vjetrovalna analiza .....   | 5  |
| 3.1.) Ulazni podaci .....  | 5  |
| 3.2.) Tablica kontingencije i ruža vjetrova .....                              | 6  |
| 3.3.) Definiranje privjetrišta .....   | 9  |
| 3.4.) Definiranje maksimalnog puhanja vjetra .....                             | 14 |
| 3.5.) Definiranje parametara dubokovodnog vala .....                           | 16 |
| 3.5.1.) Godina metoda .....  | 16 |
| 4. Dugoročne valne prognoze .....  | 19 |
| 4.1.) Gumbel i Pareto distribucija .....                                       | 19 |
| 4.1.1.) Smjer NNE .....  | 22 |
| 4.1.2.) Smjer NE .....   | 30 |
| 4.1.3.) Smjer W .....  | 37 |
| 4.1.4.) Smjer WSW .....  | 44 |
| 4.2.) Zaključak dugoročnih valnih prognoza .....                               | 51 |
| 5. Ansys AQWA program .....  | 53 |
| 5.1.) Općenito o programu .....  | 53 |
| 5.2.) Izbor tipskog plovila .....  | 54 |
| 5.3.) Proračun u Ansys AQWA .....  | 56 |
| 5.3.1.) Definiranje ulaznih parametara za proračun u Ansys AQWA programu ..... | 56 |
| 5.3.2.) Definiranje mreže broda - mesh .....                                   | 59 |
| 5.3.3.) Definiranje time step-a i output step-a simulacije .....               | 62 |
| 5.3.4.) Definiranje trajanja simulacije – duration .....                       | 63 |
| 5.3.5.) Utjecaj perioda vala na veličinu maksimalne potezne sile užeta .....   | 64 |
| 5.3.6.) Rezultati proračuna i interpretacija istih .....                       | 66 |
| 6. Tehničko rješenje sidrenog sustava .....                                    | 84 |
| 7. Zaključak .....   | 91 |
| Literatura .....   | 92 |
| Popis slika i tablica .....  | 94 |
| Grafički prilozi .....   | 99 |

## 1. Uvod

Cilj ovog diplomskog rada je primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva kao središnjeg dijela Bokokotorskog zaljeva, u uvjetima valnog polja. Ono što karakterizira predmetno područje je prirodna zaštićenost, duboka uvučenost u kopno i zatvorenosti prema otvorenom moru. S obzirom na prethodno navedeno za očekivati je manju značajnu valnu visinu i period vala što u konačnici može pružiti siguran privez plovila.

Kako bi se definirali parametri dubokovodnog vala i kako bi se analizirale dugoročne valne prognoze uz pomoć distribucija Gumbel i Pareto, korišteni su ulazni podaci o srednjim satnim brzinama vjetra u metrima po sekundi (m/s) i prevladavajućim smjerovima puhanja vjetra u stupnjevima (°) u vremenskom periodu od 1. siječnja 2008. godine do 31. prosinca 2011. godine pruženih od strane Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju Crne Gore s mjerne postaje u Baru.

Glavni alat ovog diplomskog rada je program Ansys AQWA. Značajna valna visina i period vala bit će jedni od glavnih ulaznih parametara kako bi se napravio proračun i simulacija u prethodno navedenom programu te kako bi se u konačnici dobila maksimalna potezna sila užeta na temelju koje će se razraditi tehničko rješenje sidrenog sustava za brod duljine od 50 metara u predmetnom području.



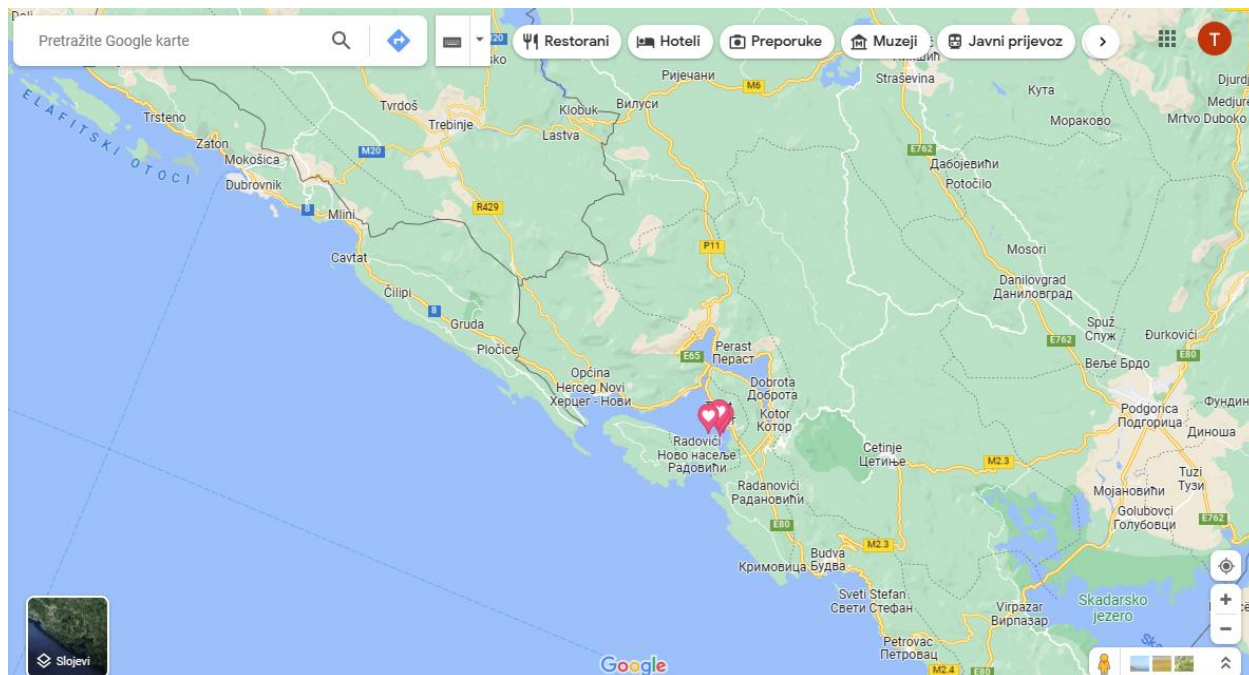
## 2. Opis lokacije

Crna Gora ima izvanredne prirodne resurse koji su idealni za razvoj nautičkog turizma. Unaprjeđenje nautičkog turizma u Crnoj Gori uključuje modernizaciju postojećih marina i izgradnju novih. S obzirom na stalni rast broja nautičkih plovila, dok su kapaciteti lučkih objekata za nautički turizam ograničeni, postoji sve veća potreba za sidrištima.

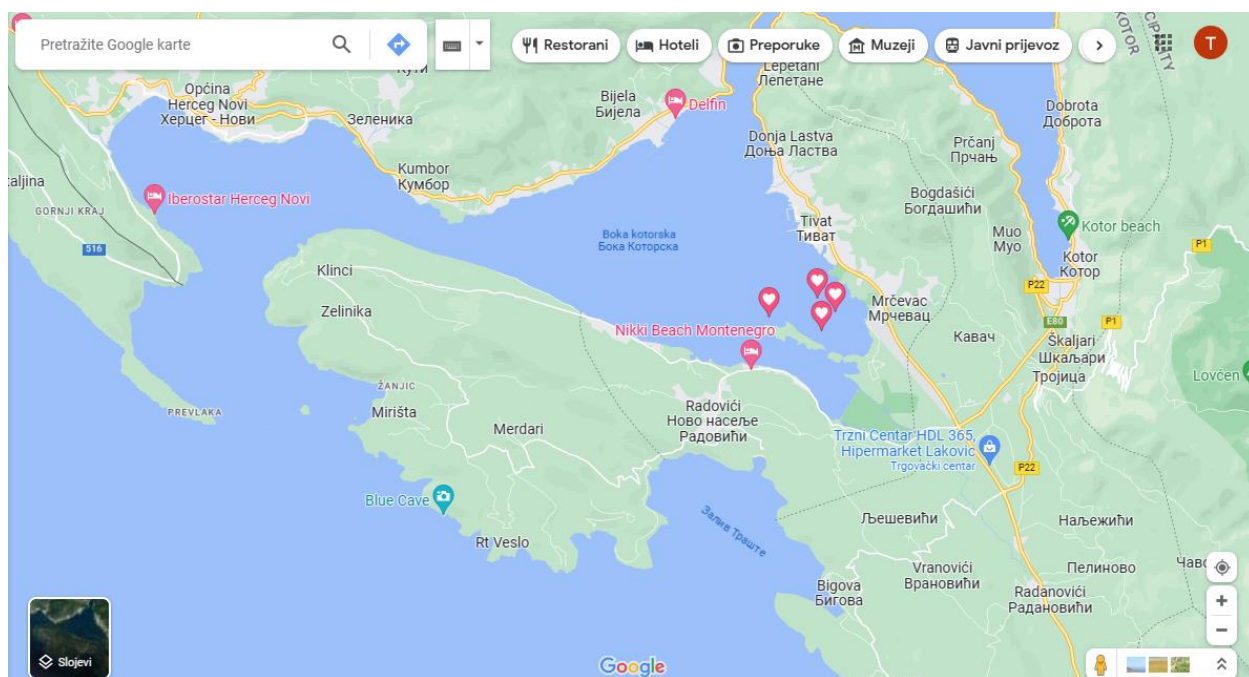
Bokokotorski zaljev pruža prirodnu zaštitu i sigurnost te je pogodno sidrište za sve vrste plovila zahvaljujući svojoj dubokoj uvučenosti u kopno i zatvorenosti prema otvorenom moru. Tivatski zaljev, kao središnji dio Bokokotorskog zaljeva, posebno je pogodan za sidrenje plovila s obzirom na veliki broj prirodnih prepreka poput otoka Sveti Marko, otoka Gospe od milosti i otoka Cvijeća te poluotoka Luštica na južnoj stani, na sjeveroistoku i istoku poluotok Vrmac te na zapadnoj strani Hercegovska obala. Predmetno područje karakteriziraju relativno male dubine te se kreću u prosjeku od 15 do 25 metara.

Važno je napomenuti kako na predmetnom području obuhvata nije zabilježeno prisustvo zaštićene morske trave *Posidonia oceanica* što uvelike olakšava izgradnju sidrenih sustava za privezište brodova.

U nastavku su priložene slike predmetnog područja (Tivatski zaljev) na kojima se jasno vidi lokacija obuhvata te su dobiveni ulazni podaci o srednjim satnim brzinama vjetra u m/s te prevladavajući smjerovi puhanja vjetra u stupnjevima (°) u razdoblju od 1. siječnja 2008. godine do 31. prosinca 2011. godine.



Slika 1 Tivatski zaljev (Izvor: Google Maps)



Slika 2 Tivatski zaljev - uvećana lokacija (Izvor: Google Maps)



*Slika 3 Tivatski zaljev (Izvor: Studija tehničko-tehnoloških uslova za dvije lokacije nautičkih sidrišta (vezivanje na bove na sidrištu) u Tivatskom zalivu sa pravilnikom upravljanja sidrištima)*

### **3. Vjetrovalna analiza**

#### **3.1.) Ulazni podaci**

U svrhu analitičke obrade i izrade projektno-tehničke dokumentacije korišteni su službeni podaci pruženi od strane Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju Crne Gore s mjerne stanice u Baru.

Kako bi se definirali parametri dubokovodnog vala i kako bi se analizirale dugoročne valne prognoze za lokaciju u Tivatskom zaljevu u Crnoj Gori, korišteni su ulazni podaci o srednjim satnim brzinama vjetra u metrima po sekundi (m/s) i prevladavajućim smjerovima puhanja vjetra u stupnjevima ( $^{\circ}$ ). Analizirani su podaci u vremenskom periodu od 1. siječnja 2008. godine do 31. prosinca 2011. godine, odnosno ukupno 35,064 podataka.

Vjetar predstavlja vodoravno strujanje zraka koje nastaje zbog nejednakosti tlaka u Zemljinoj atmosferi. Nadalje, vektorska je veličina s definiranom skalarnom vrijednosti (intenzitet, snaga ili brzina puhanja) i određenim smjerom puhanja. Njegova brzina mjeri se u različitim mjernim jedinicama poput m/s, km/h, čvor, mph (mile per hour) ili prema Beaufortovoj ljestvici. Također, smjer vjetra označava se engleskim kraticama koje označavaju strane svijeta (N, E, S, W itd.).

Instrument za mjerenje jačine vjetra i brzine strujanja zraka naziva se anemometar. Mjerenje brzine vjetra obavlja se na visini od 10 metara iznad tla kako bi se izbjegli svi negativni utjecaji miješanja vjetra uzrokovanih raznim čimbenicima. Duljina privjetrišta, brzina i trajanje vjetra utječu na veličinu valova. Što je duljina privjetrišta veća, valna visina (H) i valni period (T) će biti veći te obrnuto.

### 3.2.) Tablica kontingencije i ruža vjetrova

Na temelju raspoloživog niza srednjih satnih brzina vjetra i prevladavajućih smjerova puhanja vjetra, izrađene su tablice kontingencije apsolutne i relativne učestalosti koje su prikazane u nastavku na Slici 5. i Slici 6.

Tablice kontingencije sadrže informacije o apsolutnim i relativnim učestalostima različitih brzina i smjerova vjetra. Relativna učestalost prikazuje se u postotku (%), dok je apsolutna učestalost izražena realnim brojevima. Tablice kontingencije podijeljene su u 16 smjerova i 12 razreda Beaufortove skale. Osim toga, tablica kontingencije relativne učestalosti osnova je za izradu ruže vjetrova.

Ruža vjetrova podijeljena je na 16 smjerova, iako se češće koristi osnovnih 8 smjerova (sjever, sjeveroistok, istok, jugoistok, jug, jugozapad, zapad, sjeverozapad). Brzina vjetra iskazuje se u metrima po sekundi (m/s), ali se često upotrebljava i kilometar na sat, dok pomorci često koriste čvorove. Ruža vjetrova daje uvid u varijacije iznosa brzine i smjera vjetra. Brzina vjetra prikazuje se u zadanom omjeru na skali uz Ružu vjetrova. Smjer vjetra ukazuje na smjer iz kojeg puše vjetar i prikazan je u obliku relativne učestalosti pojedinog smjera u razdoblju mjerenja.

S obzirom na geografski položaj koja se analizira, dominantni smjerovi vjetra koji su odabrani za daljnje promatranje su NNE (sjever, sjeveroistok), NE (sjeveroistok), W (zapad) i WSW (zapad, jugozapad). U nastavku je prikazana ruža vjetrova s iznosima brzina i smjera vjetra.

**Tablica apsolutne učestalosti prema odabrani razredima**

| brz. (m/s) | 0-1.7m/s | 1.8-3.4m/s | 3.5-5.1m/s | 5.2-6.8m/s | 6.9-8.5m/s | 8.6-10.2m/s | 10.3-11.9m/s | 12-13.6m/s |       |
|------------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|-------|
| NNE        | 144      | 537        | 605        | 409        | 165        | 24          | 0            | 0          | 1884  |
| NE         | 652      | 6027       | 1753       | 1414       | 490        | 91          | 0            | 0          | 10427 |
| ENE        | 556      | 3495       | 376        | 185        | 42         | 3           | 0            | 0          | 4657  |
| E          | 303      | 1458       | 80         | 22         | 7          | 1           | 0            | 0          | 1871  |
| ESE        | 159      | 569        | 250        | 79         | 17         | 5           | 0            | 0          | 1079  |
| SE         | 115      | 625        | 548        | 150        | 11         | 0           | 0            | 0          | 1449  |
| SSE        | 88       | 396        | 324        | 129        | 55         | 10          | 0            | 0          | 1002  |
| S          | 97       | 322        | 204        | 59         | 24         | 2           | 1            | 0          | 709   |
| SSW        | 97       | 510        | 276        | 47         | 17         | 11          | 12           | 0          | 970   |
| SW         | 154      | 1159       | 184        | 25         | 20         | 13          | 11           | 5          | 1571  |
| WSW        | 158      | 1526       | 265        | 32         | 25         | 9           | 5            | 0          | 2020  |
| W          | 184      | 1868       | 1434       | 364        | 45         | 6           | 0            | 0          | 3901  |
| WNW        | 145      | 807        | 203        | 42         | 11         | 1           | 1            | 0          | 1210  |
| NW         | 80       | 258        | 74         | 12         | 0          | 0           | 0            | 0          | 424   |
| NNW        | 60       | 149        | 52         | 6          | 0          | 0           | 0            | 0          | 267   |
| N          | 1221     | 185        | 122        | 68         | 22         | 5           | 0            | 0          | 1623  |
| Zbroj      | 4213     | 19891      | 6750       | 3043       | 951        | 181         | 30           | 5          | 35064 |

Slika 4 Tablica kontingencije apsolutne učestalosti

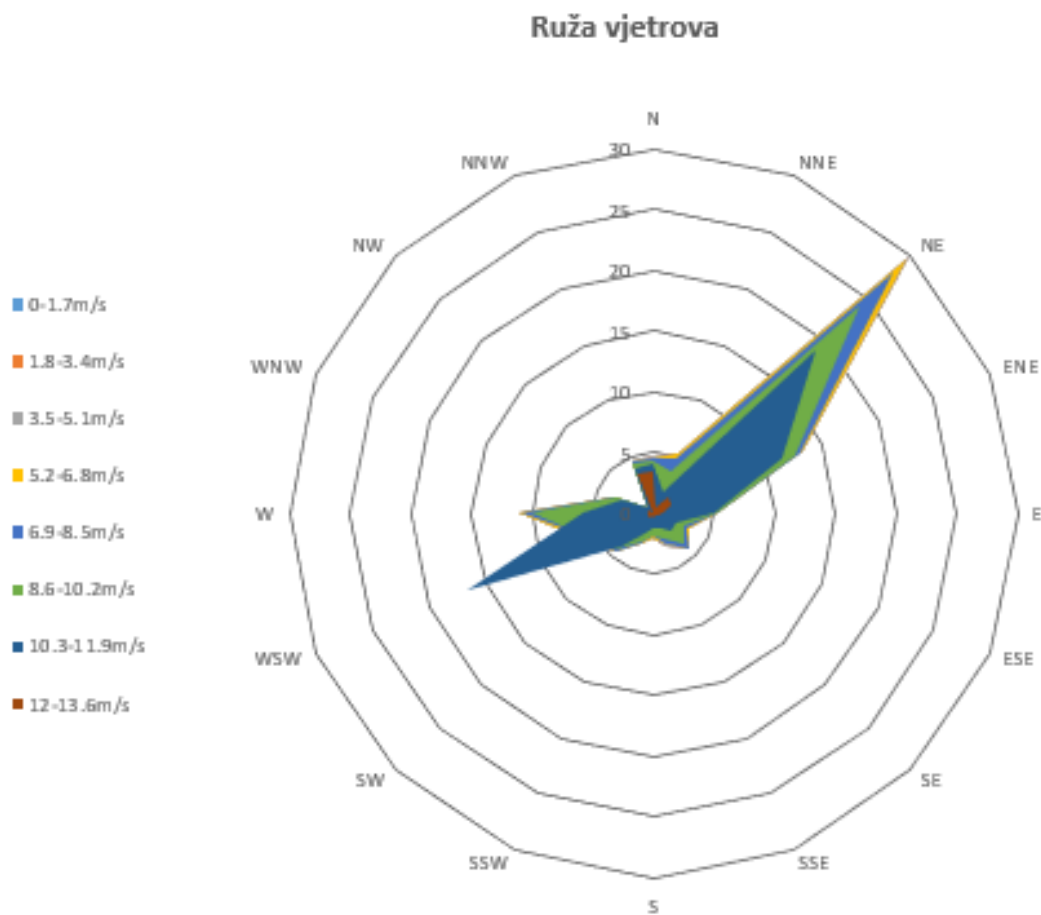
**Tablica relativne učestalosti prema odabranim razredima**

| brz. (m/s) | 0-1.7m/s | 1.8-3.4m/s | 3.5-5.1m/s | 5.2-6.8m/s | 6.9-8.5m/s | 8.6-10.2m/s | 10.3-11.9m/s | 12-13.6m/s |        |
|------------|----------|------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|--------|
| NNE        | 0,41     | 1,53       | 1,73       | 1,17       | 0,47       | 0,07        | 0,00         | 0,00       | 5,37   |
| NE         | 1,86     | 17,19      | 5,00       | 4,03       | 1,40       | 0,26        | 0,00         | 0,00       | 29,74  |
| ENE        | 1,59     | 9,97       | 1,07       | 0,53       | 0,12       | 0,01        | 0,00         | 0,00       | 13,28  |
| E          | 0,86     | 4,16       | 0,23       | 0,06       | 0,02       | 0,00        | 0,00         | 0,00       | 5,34   |
| ESE        | 0,45     | 1,62       | 0,71       | 0,23       | 0,05       | 0,01        | 0,00         | 0,00       | 3,08   |
| SE         | 0,33     | 1,78       | 1,56       | 0,43       | 0,03       | 0,00        | 0,00         | 0,00       | 4,13   |
| SSE        | 0,25     | 1,13       | 0,92       | 0,37       | 0,16       | 0,03        | 0,00         | 0,00       | 2,86   |
| S          | 0,28     | 0,92       | 0,58       | 0,17       | 0,07       | 0,01        | 0,00         | 0,00       | 2,02   |
| SSW        | 0,28     | 1,45       | 0,79       | 0,13       | 0,05       | 0,03        | 0,03         | 0,00       | 2,77   |
| SW         | 0,44     | 3,31       | 0,52       | 0,07       | 0,06       | 0,04        | 0,03         | 0,01       | 4,48   |
| WSW        | 0,45     | 4,35       | 0,76       | 0,09       | 0,07       | 0,03        | 0,01         | 0,00       | 5,76   |
| W          | 0,52     | 5,33       | 4,09       | 1,04       | 0,13       | 0,02        | 0,00         | 0,00       | 11,13  |
| WNW        | 0,41     | 2,30       | 0,58       | 0,12       | 0,03       | 0,00        | 0,00         | 0,00       | 3,45   |
| NW         | 0,23     | 0,74       | 0,21       | 0,03       | 0,00       | 0,00        | 0,00         | 0,00       | 1,21   |
| NNW        | 0,17     | 0,42       | 0,15       | 0,02       | 0,00       | 0,00        | 0,00         | 0,00       | 0,76   |
| N          | 3,48     | 0,53       | 0,35       | 0,19       | 0,06       | 0,01        | 0,00         | 0,00       | 4,63   |
| Zbroj      | 12,02    | 56,73      | 19,25      | 8,68       | 2,71       | 0,52        | 0,09         | 0,01       | 100,00 |

Slika 5 Tablica kontingencije relativne učestalosti

|            | granice stupnjeva        | oznaka |
|------------|--------------------------|--------|
| <b>NNE</b> | $11.25 \leq X < 33.75$   | 2      |
| <b>NE</b>  | $33.75 \leq X < 56.25$   | 4      |
| <b>ENE</b> | $56.25 \leq X < 78.75$   | 6      |
| <b>E</b>   | $78.75 \leq X < 101.25$  | 8      |
| <b>ESE</b> | $101.25 \leq X < 123.75$ | 10     |
| <b>SE</b>  | $123.75 \leq X < 146.25$ | 12     |
| <b>SSE</b> | $146.25 \leq X < 168.75$ | 14     |
| <b>S</b>   | $168.75 \leq X < 191.25$ | 16     |
| <b>SSW</b> | $191.25 \leq X < 213.75$ | 18     |
| <b>SW</b>  | $213.75 \leq X < 236.25$ | 20     |
| <b>WSW</b> | $236.25 \leq X < 258.75$ | 22     |
| <b>W</b>   | $258.75 \leq X < 281.25$ | 24     |
| <b>WNW</b> | $281.25 \leq X < 303.75$ | 26     |
| <b>NW</b>  | $303.75 \leq X < 326.25$ | 28     |
| <b>NNW</b> | $326.25 \leq X < 348.75$ | 30     |
| <b>N</b>   | $348.75 \leq X < 11.25$  | 32     |
| <b>C</b>   | 0                        |        |

Slika 6 Oznake smjerova vjetra



Slika 7 Ruža vjetrova s prikazanim iznosima brzina i smjera vjetra

### 3.3.) Definiranje privjetrišta

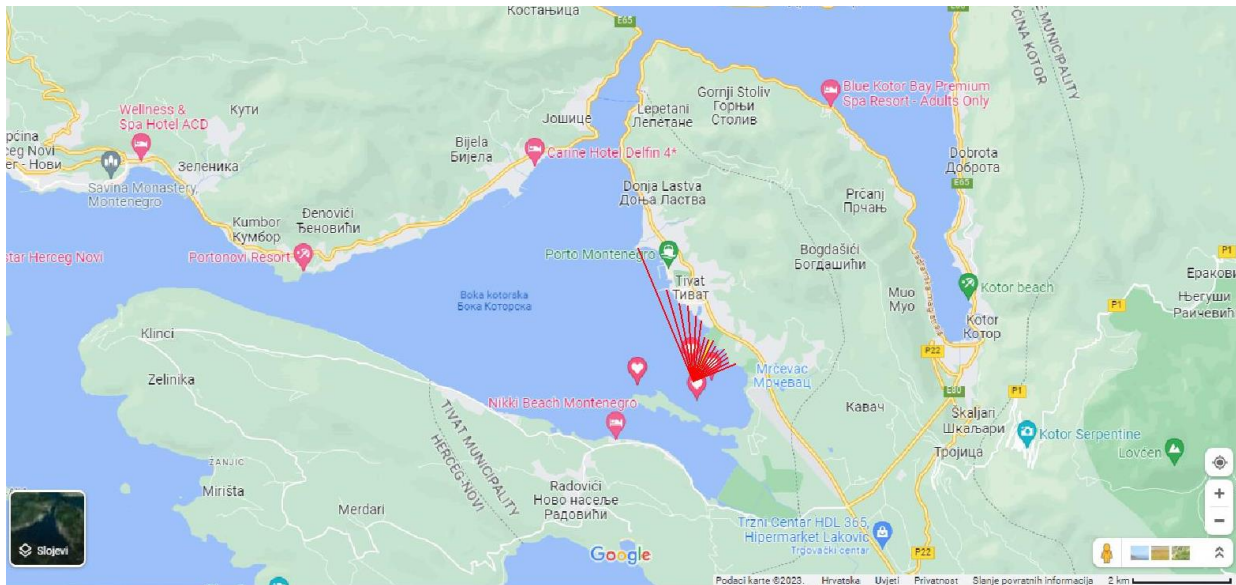
Postoji veliki broj metoda i proračunskih modela koji se koriste za definiranje duljine privjetrišta u kontekstu razvoja valova. Jedna od metoda koja se koristi za proračun efektivnih privjetrišta razvijena je od strane Saville-a (1954. g.). Pretpostavka ove metode je ta da vjetar prenosi energiju na površinu vode ne samo u smjeru dominantnog puhanja, već i u smjerovima s odklonom od glavnog smjera za +/- 45°.

Postupak definiranja duljine privjetrišta provodi se na sljedeći način: glavna zraka postavlja se u smjeru puhanja vjetra, a zatim se rotacijom od 6° u smjeru kazaljke na satu (u prvom koraku 3°, a potom svaki sljedeći po 6°) i suprotno od smjera kazaljke na satu postavljaju zrake koje prolaze kroz istu ishodišnu točku. Za svaku zraku se određuje duljina od ishodišta do prve prepreke, a zatim se izračunava suma projekcija tih duljina na centralnu zraku. Prethodno navedena suma dijeli se s ukupnom sumom kosinusa kutova između centralne zrake i svih rotiranih zraka, gdje se dobiva vrijednost efektivne duljine privjetrišta.

U nastavku su navedeni grafički prikazi i tablice s definiranim privjetrištima za smjerove NNE, NE, W i WSW za predmetnu lokaciju.

|   |   |
|---|---|
| $F_{EFF}$ – efektivno privjetrište (km)   | $F_{EFF} = \frac{\sum_i f_i * \cos^2 \theta_i}{\sum_i \cos \theta_i}$ |
| $\Theta_i$ – kut odklona zrake vala u odnosu na zraku smjera za koji se izračunava efektivno privjetrište (°) |   |
| $f_i$ – duljina privjetrišta zrake odklonjene za kut $\Theta_i$   |   |

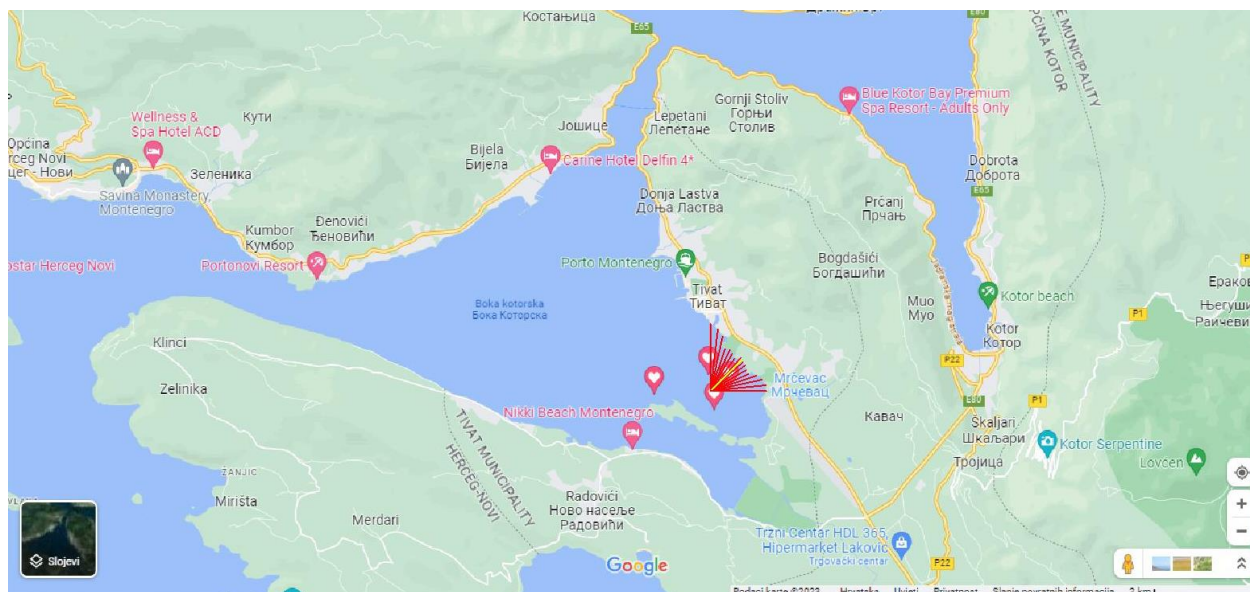




Slika 8 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra NNE

| NNE                              |                   |                |                            |
|----------------------------------|-------------------|----------------|----------------------------|
| $\alpha$ (°)                     | $f_l$ (km)        | $\cos(\alpha)$ | $f_l \cdot \cos^2(\alpha)$ |
| -45                              | 2.9039            | 0.707          | 1.4515                     |
| -39                              | 1.935             | 0.777          | 1.1682                     |
| -33                              | 1.6263            | 0.839          | 1.1448                     |
| -27                              | 1.5248            | 0.891          | 1.2105                     |
| -21                              | 1.3232            | 0.934          | 1.1543                     |
| -15                              | 1.2352            | 0.966          | 1.1526                     |
| -9                               | 0.915             | 0.988          | 0.8932                     |
| -3                               | 0.902             | 0.999          | 0.9002                     |
| 3                                | 0.9202            | 0.999          | 0.9184                     |
| 9                                | 0.8387            | 0.988          | 0.8187                     |
| 15                               | 0.8172            | 0.966          | 0.7626                     |
| 21                               | 0.8944            | 0.934          | 0.7802                     |
| 27                               | 0.861             | 0.891          | 0.6835                     |
| 33                               | 0.7843            | 0.839          | 0.5521                     |
| 39                               | 0.8124            | 0.777          | 0.4905                     |
| 45                               | 0.9219            | 0.707          | 0.4608                     |
| <b><math>F_{EFF}</math> (km)</b> | <b>1.02394647</b> | <b>14.2020</b> | <b>14.5421</b>             |

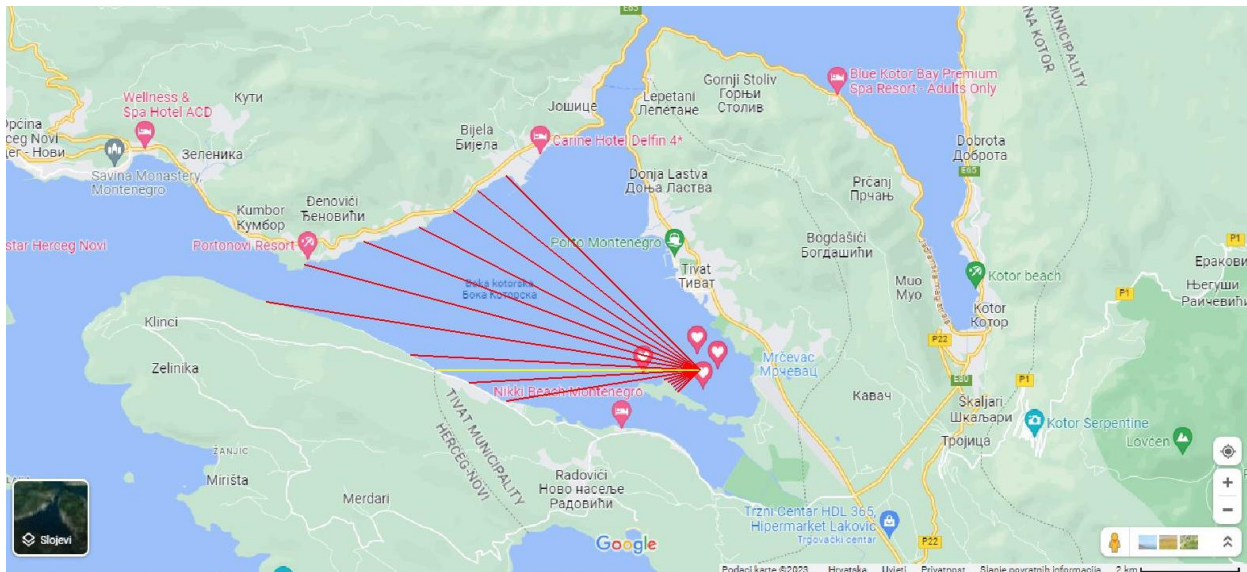
Slika 9 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra NNE



Slika 10 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra NE

| NE                               |                    |                |                            |
|----------------------------------|--------------------|----------------|----------------------------|
| $\alpha$ (°)                     | $f_i$ (km)         | $\cos(\alpha)$ | $f_i \cdot \cos^2(\alpha)$ |
| -45                              | 1.3429             | 0.707          | 0.6712                     |
| -39                              | 1.2512             | 0.777          | 0.7554                     |
| -33                              | 1.1311             | 0.839          | 0.7962                     |
| -27                              | 0.8941             | 0.891          | 0.7098                     |
| -21                              | 0.9094             | 0.934          | 0.7933                     |
| -15                              | 0.8907             | 0.966          | 0.8312                     |
| -9                               | 0.813              | 0.988          | 0.7936                     |
| -3                               | 0.9053             | 0.999          | 0.9035                     |
| 3                                | 0.8584             | 0.999          | 0.8567                     |
| 9                                | 0.8584             | 0.988          | 0.8379                     |
| 15                               | 0.8334             | 0.966          | 0.7777                     |
| 21                               | 0.9273             | 0.934          | 0.8089                     |
| 27                               | 0.9991             | 0.891          | 0.7932                     |
| 33                               | 1.0559             | 0.839          | 0.7433                     |
| 39                               | 1.1334             | 0.777          | 0.6843                     |
| 45                               | 1.1667             | 0.707          | 0.5832                     |
| <b><math>F_{EFF}</math> (km)</b> | <b>0.868844946</b> | <b>14.2020</b> | <b>12.3393</b>             |

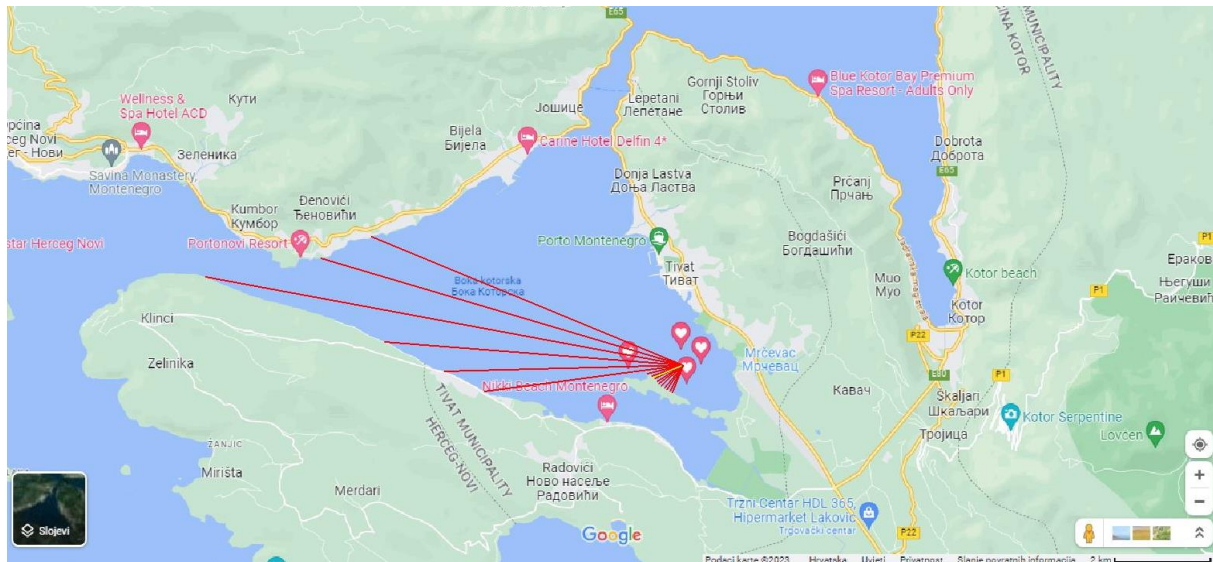
Slika 11 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra NE



Slika 12 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra W

| W                                |                   |                |                            |
|----------------------------------|-------------------|----------------|----------------------------|
| $\alpha$ (°)                     | $f_1$ (km)        | $\cos(\alpha)$ | $f_1 \cdot \cos^2(\alpha)$ |
| -45                              | 1.6646            | 0.707          | 0.8320                     |
| -39                              | 1.8388            | 0.777          | 1.1101                     |
| -33                              | 2.0161            | 0.839          | 1.4192                     |
| -27                              | 2.5154            | 0.891          | 1.9969                     |
| -21                              | 2.8435            | 0.934          | 2.4805                     |
| -15                              | 3.054             | 0.966          | 2.8499                     |
| -9                               | 4.0034            | 0.988          | 3.9079                     |
| -3                               | 4.63              | 0.999          | 4.6207                     |
| 3                                | 5.8128            | 0.999          | 5.8012                     |
| 9                                | 8.8073            | 0.988          | 8.5972                     |
| 15                               | 8.1897            | 0.966          | 7.6423                     |
| 21                               | 7.2075            | 0.934          | 6.2875                     |
| 27                               | 6.3137            | 0.891          | 5.0123                     |
| 33                               | 5.8716            | 0.839          | 4.1331                     |
| 39                               | 5.7067            | 0.777          | 3.4453                     |
| 45                               | 5.492             | 0.707          | 2.7452                     |
| <b><math>F_{EFF}</math> (km)</b> | <b>4.42764526</b> | <b>14.2020</b> | <b>62.8814</b>             |

Slika 13 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra W



Slika 14 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra WSW

| WSW                              |                    |                |                            |
|----------------------------------|--------------------|----------------|----------------------------|
| $\alpha$ (°)                     | $f_i$ (km)         | $\cos(\alpha)$ | $f_i \cdot \cos^2(\alpha)$ |
| -45                              | 1.4878             | 0.707          | 0.7437                     |
| -39                              | 1.4742             | 0.777          | 0.8900                     |
| -33                              | 1.5004             | 0.839          | 1.0562                     |
| -27                              | 1.5999             | 0.891          | 1.2701                     |
| -21                              | 1.7052             | 0.934          | 1.4875                     |
| -15                              | 1.9009             | 0.966          | 1.7738                     |
| -9                               | 2.2142             | 0.988          | 2.1614                     |
| -3                               | 2.5922             | 0.999          | 2.5870                     |
| 3                                | 2.8789             | 0.999          | 2.8731                     |
| 9                                | 3.2363             | 0.988          | 3.1591                     |
| 15                               | 4.0876             | 0.966          | 3.8144                     |
| 21                               | 4.8814             | 0.934          | 4.2583                     |
| 27                               | 6.1783             | 0.891          | 4.9048                     |
| 33                               | 9.9684             | 0.839          | 7.0170                     |
| 39                               | 7.7991             | 0.777          | 4.7085                     |
| 45                               | 6.9229             | 0.707          | 3.4604                     |
| <b><math>F_{EFF}</math> (km)</b> | <b>3.250629162</b> | <b>14.2020</b> | <b>46.1654</b>             |

Slika 15 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra WSW

Duljine privjetrišta kreću se u rasponu od 0.87 km do 4.43 km što je bilo i za očekivati s obzirom na to kako se radi o vrlo zavučenoj lokaciji te s obzirom na veliki broj prirodnih prepreka poput otoka Sveti Marko, otoka Gospe od milosti i otoka Cvijeća te poluotoka Luštica na južnoj stani (Luštica se s obzirom na promatranu lokaciju nalazi djelomično i na zapadnoj strani), na sjeveroistoku i istoku poluotok Vrmac te na zapadnoj strani Hercegovačka obala. Nastavno na prirodnu zaklonjenost, za očekivati je da će i valne visine biti izrazito male te da predmetna lokacija ima veliki potencijal za sidrenje brodova.

### 3.4.) Definiranje maksimalnog puhanja vjetra

Kako bi se definirali parametri dubokovodnog vala, jako je bitno definirati trajanje puhanja vjetra.

Trajanje puhanja vjetra je ključna informacija kod određivanja parametara dubokovodnog vala (valne visine  $H$ , perioda vala  $T$ , valna duljina  $L$ ) jer ako se gleda vjetar kroz energiju, a energija je umnožak snage i vremena, dolazi se do zaključka kako će ukupna energija koja se prenosi na morsku površinu ovisiti i o trajanju puhanja vjetra.

Postoje dvije vrste vala:

- “Fetch limited wave” odnosno val koji je ograničen duljinom privjetrišta
- “Duration limited wave” odnosno val koji je ograničen trajanjem puhanja vjetra

Sljedeća informacija koja je korisna je stanje potpuno razvijenog mora. To je stanje u kojem daljnjim povećanjem puhanja vjetra neće doći do promjene parametara vala odnosno energija vjetra se u 100% prenijela na morsku površinu. Postignuti su maksimalni parametri vala te daljnjim povećanjem trajanja puhanja vjetra, valni parametri neće se povećati odnosno dosegnuli su svoj maksimum.

Nastavno na navedeno, u nastavku je prikazana tablica u kojoj je određeno maksimalno trajanje puhanja vjetra za sve smjerove vjetra. Maksimalno trajanje puhanja vjetra napravljeno je tako da su svi ulazni podaci poredani u jedan stupac radi lakšeg proračuna u programu Excel. Nakon toga, raspisana je formula kojom se računa maksimalni neprekinuti (uzastopni) niz trajanja za pojedini smjera vjetra (=MAX(FREQUENCY(IF(uzorak=smjer vjetra, ROW(uzorak)),IF(uzorak<>smjer vjetra, ROW(uzorak))))).

| Smjer vjetra | Max vrijeme puhanja |
|--------------|---------------------|
| 0            | 1                   |
| 2            | 17                  |
| 4            | 39                  |
| 6            | 9                   |
| 8            | 6                   |
| 10           | 11                  |
| 12           | 14                  |
| 14           | 15                  |
| 16           | 6                   |
| 18           | 9                   |
| 20           | 6                   |
| 22           | 8                   |
| 24           | 12                  |
| 26           | 8                   |
| 28           | 5                   |
| 30           | 5                   |
| 32           | 24                  |

Slika 16 Tablica s prikazanim maksimalnim trajanjem puhanja vjetra

Maksimalno trajanje puhanja vjetra izraženo je u satima (h) te je bitno kako bi se mogla primijeniti Goda-ina metoda kojom se provjerava stanje postizanja potpuno razvijenog mora.

### 3.5.) Definiranje parametara dubokovodnog vala

#### 3.5.1.) Godina metoda

Goda-ina metoda jedna je od metoda koja se koristi za definiranje stanja potpuno razvijenog mora. Razvijena je od strane I.K. Goda, japanskog istraživača, s ciljem pružanja informacija o karakteristikama valova u stanju kada su valovi postigli maksimalnu stabilnost.

Prema Goda-inoj metodi, stanje potpuno razvijenog mora definira se na temelju parametra poznatog kao "valna duljina" (Ls). Metoda se oslanja na statističku analizu raspoloživih podataka o valovima kako bi se odredio odnos između valne visine (Hs) i valne duljine (Ls).

Goda-ina metoda koristi empirijske relacije i statističke modele za izračunavanje karakteristika valova u stanju potpuno razvijenog mora. Ovi modeli uzimaju u obzir parametre kao što su duljina privjetrišta ( $F_{EFF}$ ), stvarno trajanje vjetra (t) i brzina vjetra (v) kako bi se odredile vrijednosti valne duljine (Ls), period vala (Ts) i valne visine (Hs).

U nastavku su navedene formule pomoću kojih se definira minimalno trajanje puhanja vjetra u satima (h) te minimalnu duljinu privjetrišta u kilometrima (km).

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| $t_{min}$ - minimalno vrijeme puhanja vjetra (h) | $t_{min} = X^{0.73} * U^{-0.46}$ |
| X – duljina privjetrišta (km)                    | $X_{min} = t^{1.37} * U^{0.63}$  |
| U – brzina vjetra (m/s)                          |                                  |

Kada je stvarno vrijeme puhanja vjetra odnosno maksimalno (definirano na Slici 17.) manje od minimalnog vremena puhanja vjetra definiranog preko Goda-inog izraza, tada se ukupna energija vjetra ne može prenijeti na površinu mora u duljini efektivnog privjetrišta. To znači da neće doći do postizanja stanja potpuno razvijenog mora te se za mjerodavnu duljinu privjetrišta uzima minimalna potrebna duljina odnosno  $X_{min}$ . Ovakvo stanje naziva se „Duration limited wave“ odnosno val koji je ograničen trajanjem puhanja vjetra.

$$t < t_{min} \rightarrow X(F) = X_{min}(F_{min})$$

Ako je stvarno vrijeme puhanja vjetra odnosno maksimalno (definirano na Slici 17.) veće od minimalnog vremena puhanja vjetra definiranog preko Goda-inog izraza, tada se ukupna energija vjetra prenosi na površinu mora u duljini efektivnog privjetrišta. To znači da vjetar puše dovoljno dugo te da se energija vjetra prenijela na površinu mora u 100% te daljnjim

puhanjem vjetra neće doći do povećanja parametara vala jer su dosegli svoj maksimum. Za mjerodavnu duljinu privjetrišta uzima se efektivno privjetrište ( $F_{eff}$ ). Ovakvo stanje naziva se „Fetch limited wave“ odnosno val koji je ograničen duljinom privjetrišta.

$$t > t_{min} \rightarrow X(F) = X_{eff}(F_{eff})$$

Nakon što su definirani prethodno navedeni izrazi, valnu visinu ( $H_s$ ) i period vala ( $T_s$ ) može se definirati uz pomoću Groen-Dorrestein nomograma ili po Godi. Za potrebe ovog diplomskog rada korištene su formule po Godi (odnosno prema Wilsonovim izrazima) kako bih se odredio period vala ( $T_s$ ) i značajna valnu visinu ( $H_s$ ).

|   |   |
|---|---|
| $g$ – gravitacijsko ubrzanje $9.81 \text{ m/s}^2$           | $\frac{g * H_s}{U^2} = 0.3 * (1 - (1 + 0.004 * (\frac{g * X}{U^2})^{1/2})^{-2})$          |
| $H_s$ – značajna valna visina (m)                           |   |
| $U$ – brzina vjetra (m/s)                                   | $\frac{g * T_s}{2 * \pi * U} = 1.37 * (1 - (1 + 0.008 * (\frac{g * X}{U^2})^{1/3})^{-5})$ |
| $X$ – odabrano privjetrište ( $F_{min}$ ili $F_{eff}$ ) (m) |   |
| $T_s$ – period vala (s)                                     |   |

Valna duljina  $L_0$  izračunava se prema sljedećoj formuli:  $L_0 = \frac{g * T^2}{2 * \pi}$

$N$  je broj pojave vjetra određenog smjera definiran u tablici kontingencije apsolutne učestalosti (Slika 5.)

U nastavku su prikazane tablice u kojima su definirani parametri vala za smjerove vjetra NNE, NE, W i WSW.



| NNE       | 2 t:17h |          |          |          |          |          |      |
|-----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| v (m/s)   | 1.7     | 3.4      | 5.1      | 6.8      | 8.5      | 10.2     |      |
| Fmin (km) | 67.748  | 104.845  | 135.358  | 162.254  | 186.745  | 209.475  |      |
| tmin (h)  | 0.797   | 0.579    | 0.481    | 0.421    | 0.380    | 0.350    |      |
| FEFF (km) | 1.024   | 1.024    | 1.024    | 1.024    | 1.024    | 1.024    |      |
| Hs (m)    | 0.031   | 0.071    | 0.112    | 0.153    | 0.195    | 0.236    |      |
| Ts (s)    | 0.650   | 0.918    | 1.103    | 1.249    | 1.371    | 1.476    |      |
| Lo (m)    | 0.659   | 1.316    | 1.901    | 2.435    | 2.933    | 3.401    | N    |
| n         | 144     | 537      | 605      | 409      | 165      | 24       | 1884 |
| ni/N      | 0.07643 | 0.285032 | 0.321125 | 0.217091 | 0.08758  | 0.012739 | 1    |
| F(Hs)     | 0.07643 | 0.361465 | 0.68259  | 0.899682 | 0.987261 | 1        |      |

Slika 17 Parametri dubokovodnog vala NNE

| NE        | 4 t:39h  |          |          |          |          |          |       |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| v (m/s)   | 1.7      | 3.4      | 5.1      | 6.8      | 8.5      | 10.2     |       |
| Fmin (km) | 211.3204 | 327.0320 | 422.2092 | 506.1033 | 582.4953 | 653.3962 |       |
| tmin (h)  | 0.7070   | 0.5140   | 0.4265   | 0.3737   | 0.3372   | 0.3101   |       |
| FEFF (km) | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   |       |
| Hs (m)    | 0.0287   | 0.0659   | 0.1038   | 0.1419   | 0.1802   | 0.2184   |       |
| Ts (s)    | 0.6251   | 0.8787   | 1.0535   | 1.1908   | 1.3056   | 1.4051   |       |
| Lo (m)    | 0.6100   | 1.2056   | 1.7330   | 2.2141   | 2.6613   | 3.0824   | N     |
| n         | 652      | 6027     | 1753     | 1414     | 490      | 91       | 10427 |
| ni/N      | 0.06253  | 0.57802  | 0.16812  | 0.13561  | 0.04699  | 0.00873  | 1     |
| F(Hs)     | 0.06253  | 0.64055  | 0.80867  | 0.94428  | 0.99127  | 1        |       |

Slika 18 Parametri dubokovodnog vala NE

| W         | 24 t:12h |         |             |          |          |          |      |
|-----------|----------|---------|-------------|----------|----------|----------|------|
| v (m/s)   | 1.7      | 3.4     | 5.1         | 6.8      | 8.5      | 10.2     |      |
| Fmin (km) | 42.0398  | 65.0594 | 83.9939     | 100.6836 | 115.8810 | 129.9860 |      |
| tmin (h)  | 2.3211   | 1.6874  | 1.4003      | 1.2267   | 1.1071   | 1.0180   |      |
| FEFF (km) | 4.4276   | 4.4276  | 4.4276      | 4.4276   | 4.4276   | 4.4276   |      |
| Hs (m)    | 0.0486   | 0.1255  | 0.2078      | 0.2920   | 0.3771   | 0.4626   |      |
| Ts (s)    | 0.8857   | 1.3232  | 1.6313      | 1.8747   | 2.0786   | 2.2555   |      |
| Lo (m)    | 1.2249   | 2.7336  | 4.1546      | 5.4872   | 6.7458   | 7.9428   | N    |
| n         | 184      | 1868    | 1434        | 364      | 45       | 6        | 3901 |
| ni/N      | 0.04717  | 0.47885 | 0.367598052 | 0.09331  | 0.01154  | 0.00154  | 1    |
| F(Hs)     | 0.04717  | 0.52602 | 0.893617021 | 0.98693  | 0.99846  | 1        |      |

Slika 19 Parametri dubokovodnog vala W

| WSW       | 22 t:8h |         |             |         |         |         |         |      |
|-----------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|------|
| v (m/s)   | 1.7     | 3.4     | 5.1         | 6.8     | 8.5     | 10.2    | 11.9    |      |
| Fmin (km) | 24.1222 | 37.3306 | 48.1951     | 57.7715 | 66.4917 | 74.5850 | 82.1917 |      |
| tmin (h)  | 1.8524  | 1.3467  | 1.1175      | 0.9790  | 0.8835  | 0.8124  | 0.7568  |      |
| FEFF (km) | 3.2506  | 3.2506  | 3.2506      | 3.2506  | 3.2506  | 3.2506  | 3.2506  |      |
| Hs (m)    | 0.0446  | 0.1121  | 0.1834      | 0.2561  | 0.3293  | 0.4028  | 0.4766  |      |
| Ts (s)    | 0.8344  | 1.2303  | 1.5075      | 1.7260  | 1.9089  | 2.0675  | 2.2084  |      |
| Lo (m)    | 1.0870  | 2.3633  | 3.5481      | 4.6515  | 5.6895  | 6.6742  | 7.6147  | N    |
| n         | 158     | 1526    | 265         | 32      | 25      | 9       | 5       | 2020 |
| ni/N      | 0.07822 | 0.75545 | 0.131188119 | 0.01584 | 0.01238 | 0.00446 | 0.00248 | 1    |
| F(Hs)     | 0.07822 | 0.83366 | 0.964851485 | 0.98069 | 0.99307 | 0.99752 | 1       |      |

Slika 20 Parametri dubokovodnog vala WSW

## 4. Dugoročne valne prognoze

Dugoročna valna prognoza je postupak utvrđivanja karakterističnih vrijednosti valnih parametara za određeni smjer rasprostiranja. Određuje se na temelju većeg broja kratkoročnih prognoza te se provodi za razdoblja od 5, 20, 50 i 100 godina. Postupak utvrđivanja dugoročne valne prognoze odnosi se na obradu karakterističnih valnih parametara u povratno razdoblju koje je zadano u godinama.

$$Q(H_K^T) = p(H_K > H_K^T) = \int_{H_K^T}^{+\infty} f(H_K) dH_K = \frac{1}{T} * \frac{T_m}{n}$$

Rješavanjem navedenog izraza dobije se dugoročna valna prognoza. Izraz predstavlja funkciju prekoračenja gdje je T povratni period za koji se traži valna visina (5, 20, 50 I 100 godina), T<sub>m</sub> vremenski period mjerenja (u promatranom slučaju 4 godine), a n je ukupan broj mjerenja za pojedini raspon (ovisno koji se smjer puhanja vjetra obrađuje). U cijelom izrazu nepoznanica je donja granica integrala H<sub>K</sub><sup>T</sup>. Uzorak značajne valne visine (H<sub>s</sub>) te uzorak perioda vala (T<sub>s</sub>) mijenja se od smjera do smjera jer ovise o dužini privjetrišta i o broju ponavljanja valnog događaja.

### 4.1.) Gumbel i Pareto distribucija

Najčešće korištene teorijske distribucije za opis varijacija valnih parametara su Gumbel i Pareto distribucija.

**Gumbelova distribucija** koristi se za modeliranje ekstremnih vrijednosti (maksimalnih ili minimalnih) iz skupa podataka za različita područja poput hidrologije, meteorologije, inženjerstva, ekonomije i drugih. Ime je dobila po Emilu Gumbelu, francuskom statističaru koji ju je prvi opisao. Također je prepoznatljiva kao i log-Weibullova odnosno dvostruka eksponencijalna distribucija.

Gumbelova distribucija definirana je sljedećim izrazima:

|   |  |
|---|--|
| Parametar distribucije $\mu$ (jednak je aritmetičkoj sredini) | $E(H_S) = \mu + \beta * \gamma \rightarrow \mu = E(H_S) - \gamma * \sqrt{\frac{\sigma_{HS}^2 * 6}{\pi^2}}$ |
| Parametar distribucije  | $\beta = \sqrt{\frac{\sigma_{HS}^2 * 6}{\pi^2}}$   |
| Kumulativna distribucijska funkcija (CDF)                     | $P(H_S) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\beta}}}$   |
| Eulerova konstanta  | $\gamma = 0.5772$  |
| 2. moment ili varijanca                                       | $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$  |
| Aritmetička sredina   | $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$   |

- $\mu$  (mi) - parametar lokacije: Ovaj parametar predstavlja središnju vrijednost distribucije. Kontrolira pomak grafa distribucije duž x-osi. Što je veća vrijednost  $\mu$ , to će se graf distribucije pomicati u desno, a što je manja vrijednost  $\mu$ , pomicat će se u lijevo.
- $\beta$  (beta) - parametar sklonosti: Ovaj parametar kontrolira širinu distribucije. Veće vrijednosti  $\beta$  rezultiraju uže distribucije, dok manje vrijednosti  $\beta$  rezultiraju širim distribucijama.  $\beta$  također određuje nagib i oblik grafa distribucije.

Jedna od važnih primjena Gumbelove distribucije je u ekstremnoj vrijednosti analizi (EVA) koja se koristi za procjenu vjerojatnosti ekstremnih događaja. Ova analiza je posebno važna u inženjerskim disciplinama kada je potrebno dizajnirati strukture koje su otporne na ekstremne uvjete poput brana, lukobrana i slično.

Uz pomoć Gumbelove distribucije moguće je izračunati vjerojatnost da će se dogoditi ekstremni događaj prema određenom kriteriju. Također se mogu procijeniti povratne vrijednosti, tj. vrijednosti koje se očekuju da će se pojaviti u određenom vremenskom razdoblju (u predmetnom slučaju povratni period od 5, 20, 50 i 100 godina).

**Pareto distribucija** je jednoparametarska distribucija s eksponencijalnim repom koja se koristi za predviđanje ekstremnih događaja. Sastoji se od jedinog parametra oblika  $\alpha$  dok je vrijednost  $H_{sm}$  najmanja pozitivna vrijednost značajne valne visine. Ova distribucija nazvana je prema talijanskom ekonomistu Vilfredu Pareto koji ju je prvi put primijenio na ekonomskim podacima.

Pareto distribucija definirana je sljedećim izrazima:

|   |   |
|---|---|
| Pomoću ove formule definiramo parametar $\alpha$    | $E(H_s) = \frac{\alpha * H_{sm}}{\alpha - 1}$         |
| Najmanja pozitivna vrijednost značajne valne visine | $H_{sm}$  |
| Jednako aritmetičkoj sredini                        | $E(H_s)$  |
| Kumulativna distribucijska funkcija (CDF)           | $F(H_s) = 1 - \left(\frac{H_{sm}}{H_s}\right)^\alpha$ |

- $\alpha$  (alfa) – parametar oblika: Ovaj parametar kontrolira oblik distribucije i određuje nagib krivulje. Veće vrijednosti parametra alfa rezultiraju strmijom krivuljom, dok manje vrijednosti parametra alfa rezultiraju plićeom krivuljom. Alfa mjeri stupanj ekstremnosti distribucije te mora biti veći od nula ( $\alpha > 0$ ).
- $x_m$  - parametar skaliranja: Ovaj parametar predstavlja donju granicu distribucije ili minimalnu vrijednost koja se može pojaviti. Vrijednosti slučajnih varijabli moraju biti veće ili jednake parametru  $x_m$ . Parametar  $x_m$  također mora biti veći od nula ( $x_m > 0$ ). Parametar  $x_m$  ima važnu ulogu u određivanju položaja i skaliranja distribucije.

Postupak rješavanja kreće od prethodno definiranih tablica s parametrima dubokovodnog vala za svaki pojedini smjer odnosno za smjerove NNE, NE, W i WSW.

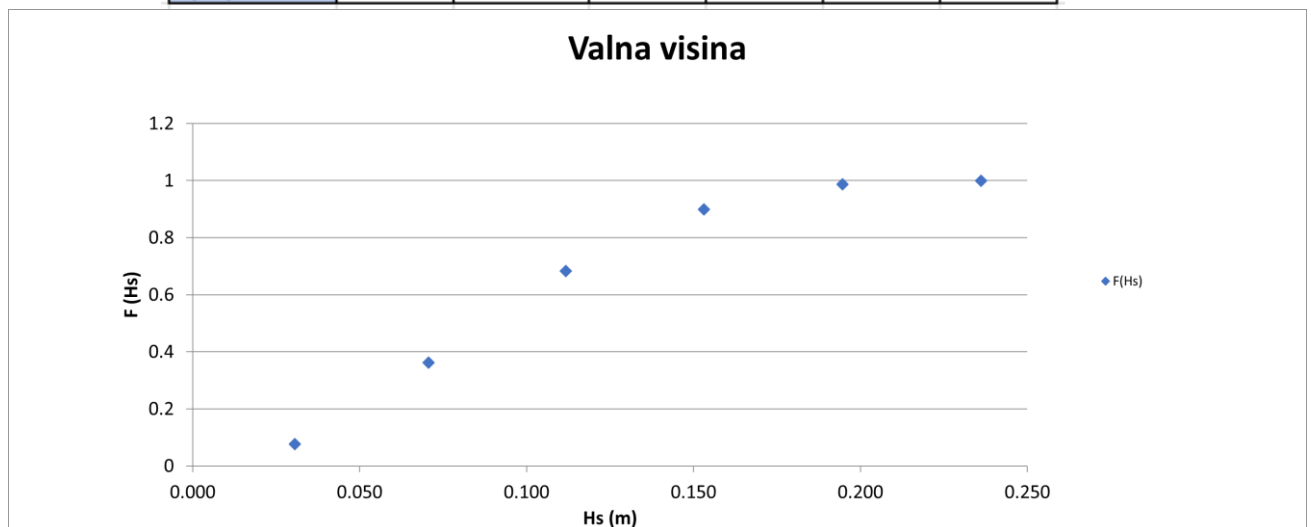
## 4.1.1.) Smjer NNE

| NNE                   | 2 t:17h |          |          |          |          |          |      |
|-----------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| v (m/s)               | 1.7     | 3.4      | 5.1      | 6.8      | 8.5      | 10.2     |      |
| F <sub>min</sub> (km) | 67.748  | 104.845  | 135.358  | 162.254  | 186.745  | 209.475  |      |
| t <sub>min</sub> (h)  | 0.797   | 0.579    | 0.481    | 0.421    | 0.380    | 0.350    |      |
| FEFF (km)             | 1.024   | 1.024    | 1.024    | 1.024    | 1.024    | 1.024    |      |
| H <sub>s</sub> (m)    | 0.031   | 0.071    | 0.112    | 0.153    | 0.195    | 0.236    |      |
| T <sub>s</sub> (s)    | 0.650   | 0.918    | 1.103    | 1.249    | 1.371    | 1.476    |      |
| Lo (m)                | 0.659   | 1.316    | 1.901    | 2.435    | 2.933    | 3.401    | N    |
| n                     | 144     | 537      | 605      | 409      | 165      | 24       | 1884 |
| n <sub>i</sub> /N     | 0.07643 | 0.285032 | 0.321125 | 0.217091 | 0.08758  | 0.012739 | 1    |
| F(H <sub>s</sub> )    | 0.07643 | 0.361465 | 0.68259  | 0.899682 | 0.987261 | 1        |      |

Slika 21 Parametri dubokovodnog vala NNE

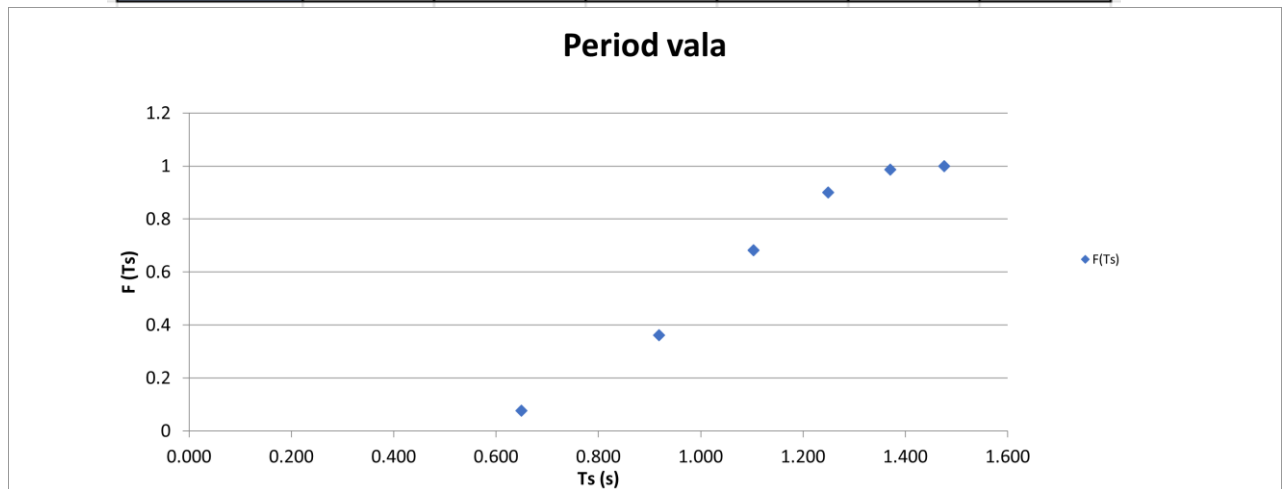
Zatim se određuju funkcije distribucije značajne valne visine (H<sub>s</sub>) i perioda vala (T<sub>s</sub>) odnosno definira se uzorak.

|                    |         |          |         |         |         |        |
|--------------------|---------|----------|---------|---------|---------|--------|
| H <sub>s</sub> (m) | 0.03051 | 0.0706   | 0.1117  | 0.1531  | 0.1945  | 0.2361 |
| F(H <sub>s</sub> ) | 0.07643 | 0.361465 | 0.68259 | 0.89968 | 0.98726 | 1      |



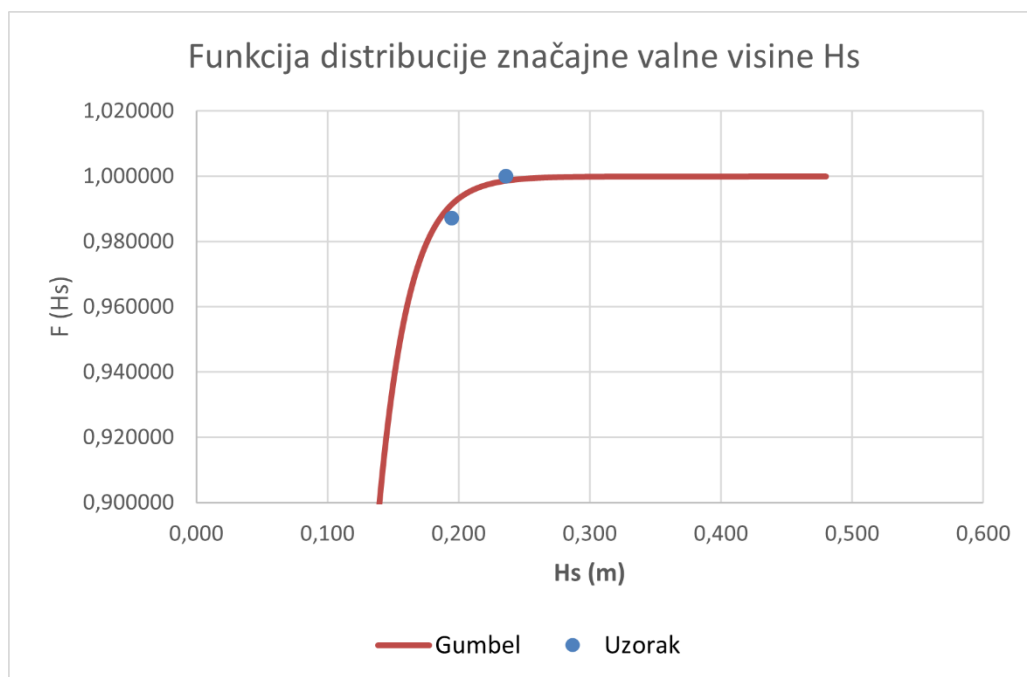
Slika 22 Funkcija distribucije valne visine NNE

|               |         |          |         |         |         |        |
|---------------|---------|----------|---------|---------|---------|--------|
| <b>Ts (s)</b> | 0.64972 | 0.9182   | 1.1034  | 1.2489  | 1.3705  | 1.4760 |
| <b>F(Ts)</b>  | 0.07643 | 0.361465 | 0.68259 | 0.89968 | 0.98726 | 1      |

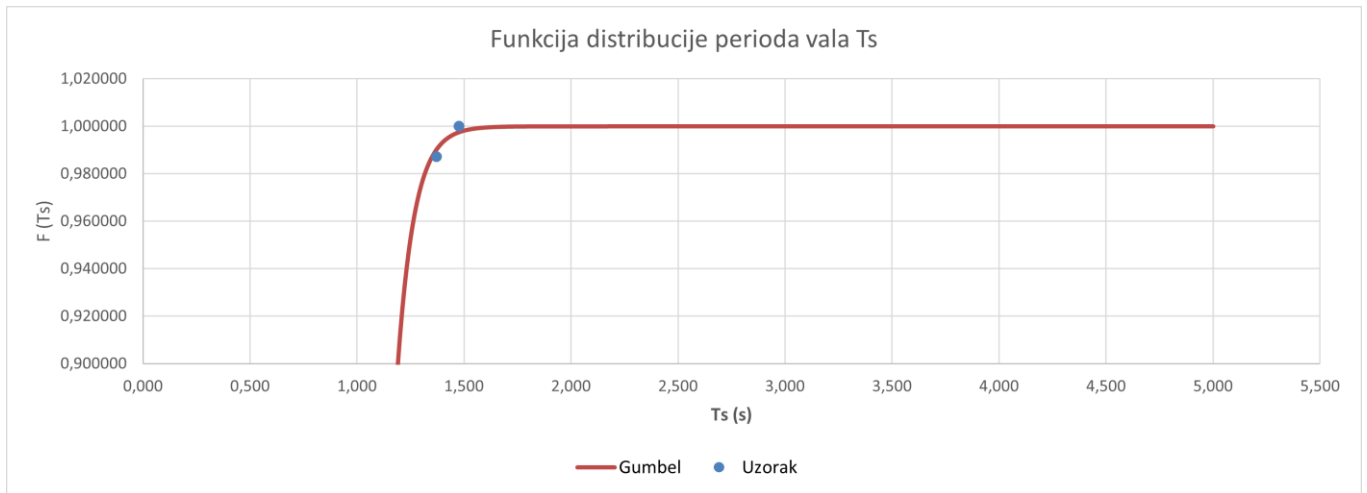


Slika 23 Funkcija distribucije perioda vala NNE

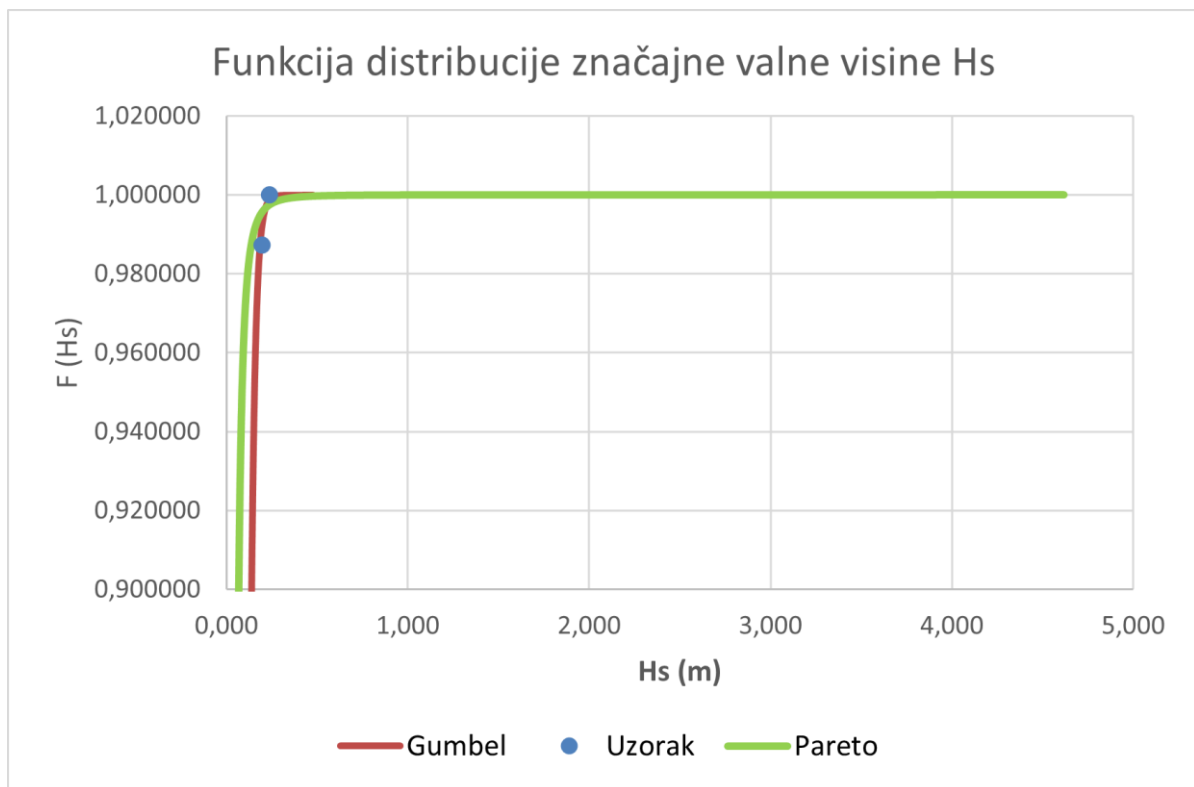
Parametri distribucija Gumbel i Pareto mijenjaju se dok se ne zadovolje vrijednosti u gornjem dijelu uzorka.



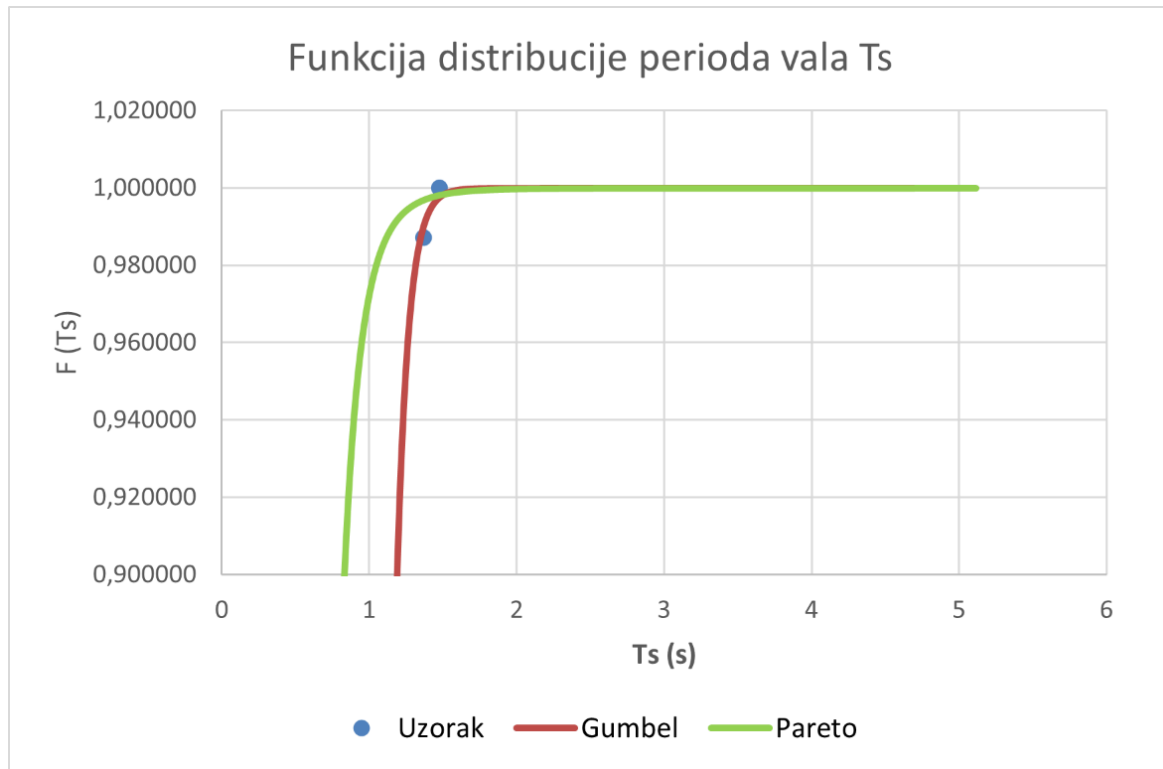
Slika 24 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Gumbelu za NNE



Slika 25 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Gumbelu za NNE



Slika 26 Funkcija distribucije značajne valne visine  $H_s$  po Paretu za NNE



Slika 27 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Pareto za NNE



Za cijeli postupak određivanja prethodno navedenih funkcija distribucija bilo je nužno napraviti sljedeće tablice za obje distribucije (Gumbel i Pareto distribuciju) te za oba valna parametra (valnu visinu  $H_s$  i period vala  $T_s$ ).

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |         |           |          |
|--------------------------------|---------|-----------|----------|
| $\mu$                          | $\beta$ | $H_s$ (m) | $F(H_s)$ |
| 0,09                           | 0,022   | 0,258     | 0,999518 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,259     | 0,999539 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,260     | 0,999559 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,261     | 0,999579 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,262     | 0,999598 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,263     | 0,999616 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,289     | 0,999882 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,290     | 0,999887 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,291     | 0,999892 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,292     | 0,999897 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,293     | 0,999902 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,294     | 0,999906 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,311     | 0,999957 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,312     | 0,999959 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,313     | 0,999960 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,314     | 0,999962 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,315     | 0,999964 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,316     | 0,999965 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,317     | 0,999967 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,318     | 0,999968 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,319     | 0,999970 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,320     | 0,999971 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,321     | 0,999972 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,322     | 0,999974 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,323     | 0,999975 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,324     | 0,999976 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,325     | 0,999977 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,326     | 0,999978 |
| 0,09                           | 0,022   | 0,327     | 0,999979 |

Slika 28 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $H_s$  za smjer NNE

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |         |        |          |
|--------------------------------|---------|--------|----------|
| $\mu$                          | $\beta$ | Ts (m) | F(Ts)    |
| 1,02                           | 0,076   | 1,610  | 0,999575 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,620  | 0,999627 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,630  | 0,999673 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,640  | 0,999714 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,650  | 0,999749 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,660  | 0,999780 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,670  | 0,999807 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,680  | 0,999831 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,690  | 0,999852 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,700  | 0,999870 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,710  | 0,999886 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,720  | 0,999900 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,730  | 0,999912 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,740  | 0,999923 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,750  | 0,999933 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,760  | 0,999941 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,770  | 0,999948 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,780  | 0,999955 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,790  | 0,999960 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,800  | 0,999965 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,810  | 0,999969 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,820  | 0,999973 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,830  | 0,999976 |
| 1,02                           | 0,076   | 1,840  | 0,999979 |

Slika 29 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala Ts za smjer NNE

| <b>Pareto distribucija:</b> |                |        |          |     |      |       |          |
|-----------------------------|----------------|--------|----------|-----|------|-------|----------|
|                             |                |        |          |     |      |       |          |
|                             |                |        |          |     |      |       |          |
|                             |                |        |          |     |      |       |          |
| alfa                        | X <sub>M</sub> | Hs (m) | F(Hs)    |     |      |       |          |
| 2,9                         | 0,03           | 0,703  | 0,999893 | 2,9 | 0,03 | 0,703 | 0,999893 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,704  | 0,999894 | 2,9 | 0,03 | 0,704 | 0,999894 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,705  | 0,999894 | 2,9 | 0,03 | 0,705 | 0,999894 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,706  | 0,999895 | 2,9 | 0,03 | 0,706 | 0,999895 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,707  | 0,999895 | 2,9 | 0,03 | 0,707 | 0,999895 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,971  | 0,999958 | 2,9 | 0,03 | 1,238 | 0,999979 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,972  | 0,999958 | 2,9 | 0,03 | 1,239 | 0,999979 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,973  | 0,999958 | 2,9 | 0,03 | 1,240 | 0,999979 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,974  | 0,999959 | 2,9 | 0,03 | 1,241 | 0,999980 |
| 2,9                         | 0,03           | 0,975  | 0,999959 | 2,9 | 0,03 | 1,242 | 0,999980 |

Slika 30 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Hs za smjer NNE

| Pareto distribucija: |                |        |          |   |     |       |          |
|----------------------|----------------|--------|----------|---|-----|-------|----------|
|                      |                |        |          |   |     |       |          |
|                      |                |        |          |   |     |       |          |
|                      |                |        |          |   |     |       |          |
|                      |                |        |          |   |     |       |          |
| alfa                 | X <sub>M</sub> | Ts (m) | F(Ts)    |   |     |       |          |
| 7                    | 0,6            | 1,817  | 0,999572 | 7 | 0,6 | 2,217 | 0,999894 |
| 7                    | 0,6            | 1,818  | 0,999574 | 7 | 0,6 | 2,218 | 0,999894 |
| 7                    | 0,6            | 1,819  | 0,999575 | 7 | 0,6 | 2,219 | 0,999894 |
| 7                    | 0,6            | 1,820  | 0,999577 | 7 | 0,6 | 2,220 | 0,999895 |
| 7                    | 0,6            | 1,821  | 0,999578 | 7 | 0,6 | 2,221 | 0,999895 |
| 7                    | 0,6            | 2,533  | 0,999958 | 7 | 0,6 | 2,802 | 0,999979 |
| 7                    | 0,6            | 2,534  | 0,999958 | 7 | 0,6 | 2,803 | 0,999979 |
| 7                    | 0,6            | 2,535  | 0,999958 | 7 | 0,6 | 2,804 | 0,999979 |
| 7                    | 0,6            | 2,536  | 0,999959 | 7 | 0,6 | 2,805 | 0,999980 |
| 7                    | 0,6            | 2,537  | 0,999959 | 7 | 0,6 | 2,806 | 0,999980 |

Slika 31 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Ts za smjer NNE

Nakon toga, u tablici za dugoročne valne prognoze određuju se vrijednosti Q pomoću sljedećeg izraza:

$$Q(H_K^T) = p(H_K > H_K^T) = \int_{H_K^T}^{+\infty} f(H_K) dH_K = \frac{1}{T} * \frac{T_m}{n}$$

te u skladu s dobivenom vrijednošću Q dobije se i 1-Q.

| T   | Q           | 1-Q      | $\mu$ | $\beta$ | $H_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | X <sub>M</sub> | $H_S^{Tpareto}$ |
|-----|-------------|----------|-------|---------|-----------------|----------|----------------|-----------------|
| 5   | 0,000424628 | 0,999575 | 0,09  | 0,022   | 0,261           | 2,9      | 0,03           | 0,436           |
| 20  | 0,000106157 | 0,999894 | 0,09  | 0,022   | 0,292           | 2,9      | 0,03           | 0,705           |
| 50  | 4,24628E-05 | 0,999958 | 0,09  | 0,022   | 0,312           | 2,9      | 0,03           | 0,97            |
| 100 | 2,12314E-05 | 0,999979 | 0,09  | 0,022   | 0,327           | 2,9      | 0,03           | 1,24            |

| T   | Q       | 1-Q      | $\mu$ | $\beta$ | $T_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | X <sub>M</sub> | $T_S^{Tpareto}$ |
|-----|---------|----------|-------|---------|-----------------|----------|----------------|-----------------|
| 5   | 0,00042 | 0,999575 | 1,02  | 0,076   | 1,610           | 7        | 0,6            | 1,819           |
| 20  | 0,00011 | 0,999894 | 1,02  | 0,076   | 1,720           | 7        | 0,6            | 2,219           |
| 50  | 4,2E-05 | 0,999958 | 1,02  | 0,076   | 1,790           | 7        | 0,6            | 2,535           |
| 100 | 2,1E-05 | 0,999979 | 1,02  | 0,076   | 1,840           | 7        | 0,6            | 2,804           |

Slika 32 Dugoročne valne prognoze za smjer NNE

Za dobivene vrijednosti 1-Q iz tablice sa Slike 33. očitavaju se približne vrijednosti s prethodno navedenih tablica (Slika 29., Slika 30., Slika 31. i Slika 32.). U tablicu za dugoročne valne prognoze upišu se očitane vrijednosti te se unesu podaci o  $H_S^{Tgumbel}$ ,  $H_S^{Tpareto}$ ,  $T_S^{Tgumbel}$  i  $T_S^{Tpareto}$ .

Na taj su se način dobile dugoročne valne prognoze za povratni period od 5, 20, 50 i 100 godina.

| T   | $H_s^{Tgumbel}$ | $H_{1/10}^{Tgumbel}$ | $H_{1/100}^{Tgumbel}$ | $H_{MAX}^{Tgumbel}$ | $H_s^{Tpareto}$ | $H_{1/10}^{Tpareto}$ | $H_{1/100}^{Tpareto}$ | $H_{MAX}^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 5   | 0,261           | 0,261                | 0,436                 | 0,470               | 0,436           | 0,554                | 0,728                 | 0,785               |
| 20  | 0,292           | 0,292                | 0,488                 | 0,526               | 0,705           | 0,895                | 1,177                 | 1,269               |
| 50  | 0,312           | 0,312                | 0,521                 | 0,562               | 0,973           | 1,236                | 1,625                 | 1,751               |
| 100 | 0,327           | 0,327                | 0,546                 | 0,589               | 1,240           | 1,575                | 2,071                 | 2,232               |

Slika 33 Karakteristične valne visine za smjer NNE

| T   | $T_s^{Tgumbel}$ | $T_p^{Tgumbel}$ | $T_s^{Tpareto}$ | $T_p^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 1,610           | 1,771           | 1,819           | 2,001           |
| 20  | 1,720           | 1,892           | 2,219           | 2,441           |
| 50  | 1,790           | 1,969           | 2,535           | 2,789           |
| 100 | 1,840           | 2,024           | 2,804           | 3,084           |

Slika 34 Karakteristični period vala za smjer NNE

Također su definirane karakteristične valne visine i periodi za povratne periode od 5, 20, 50 i 100 godina za incidentni smjera puhanja vjetra NNE.

Karakteristične valne visine i periodi mogu se izračunati prema sljedećim matematičkim formulama:

$$H_{1/10}=1.27*H_s ; H_{1/100}=1.67*H_s ; H_{max}=1.8*H_s ; T_p=1.1*T$$

Isti postupak ponavlja se za preostale smjerove.

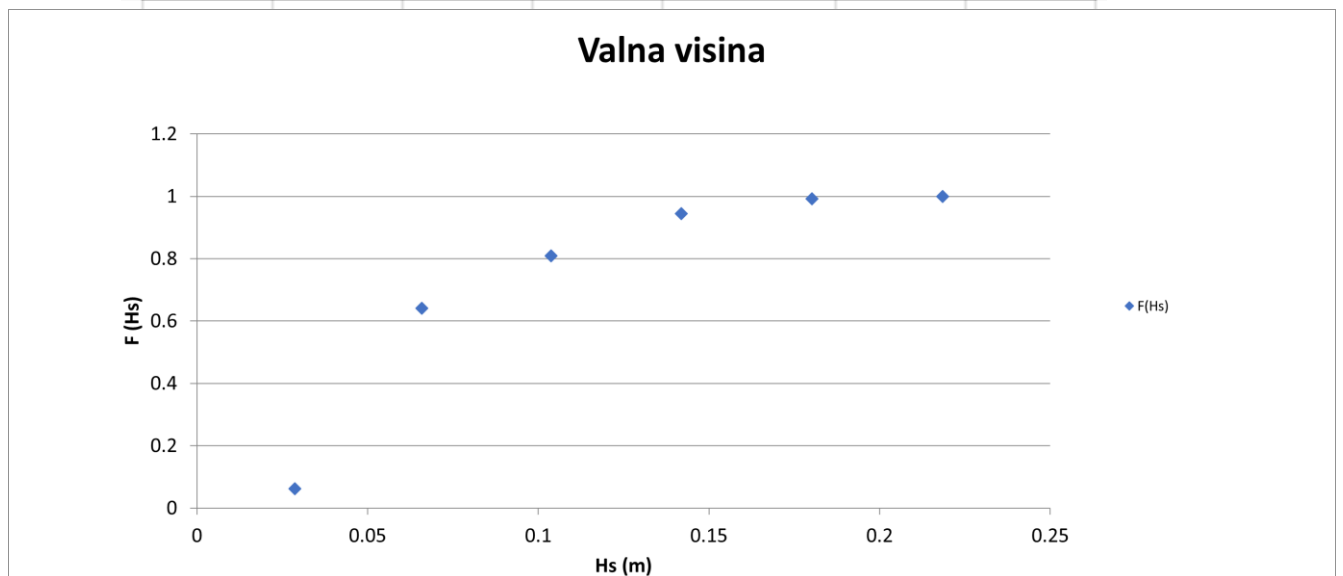
## 4.1.2.) Smjer NE

| NE        | 4 t:39h  |          |          |          |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| v (m/s)   | 1.7      | 3.4      | 5.1      | 6.8      | 8.5      | 10.2     |          |
| Fmin (km) | 211.3204 | 327.0320 | 422.2092 | 506.1033 | 582.4953 | 653.3962 |          |
| tmin (h)  | 0.7070   | 0.5140   | 0.4265   | 0.3737   | 0.3372   | 0.3101   |          |
| FEFF (km) | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   | 0.8688   |          |
| Hs (m)    | 0.0287   | 0.0659   | 0.1038   | 0.1419   | 0.1802   | 0.2184   |          |
| Ts (s)    | 0.6251   | 0.8787   | 1.0535   | 1.1908   | 1.3056   | 1.4051   |          |
| Lo (m)    | 0.6100   | 1.2056   | 1.7330   | 2.2141   | 2.6613   | 3.0824   | <b>N</b> |
| n         | 652      | 6027     | 1753     | 1414     | 490      | 91       | 10427    |
| ni/N      | 0.06253  | 0.57802  | 0.16812  | 0.13561  | 0.04699  | 0.00873  | 1        |
| F(Hs)     | 0.06253  | 0.64055  | 0.80867  | 0.94428  | 0.99127  | 1        |          |

Slika 35 Parametri dubokovodnog vala NE

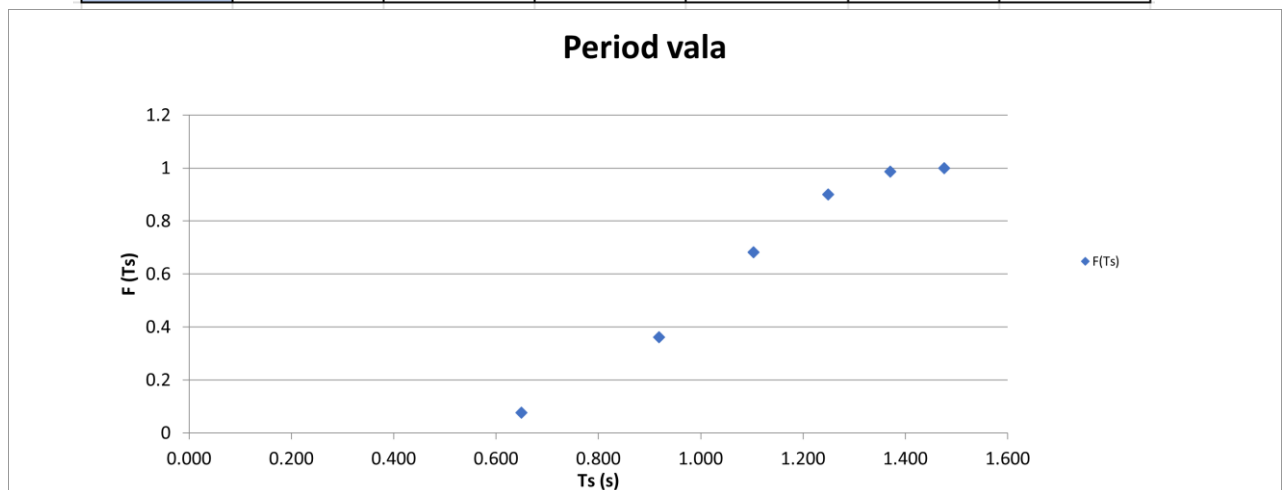
Zatim se određuju funkcije distribucije značajne valne visine ( $H_s$ ) i perioda vala ( $T_s$ ) odnosno definira se uzorak.

|               |         |         |         |            |         |        |
|---------------|---------|---------|---------|------------|---------|--------|
| <b>Hs (m)</b> | 0.02873 | 0.0659  | 0.1038  | 0.1419     | 0.1802  | 0.2184 |
| <b>F(Hs)</b>  | 0.06253 | 0.64055 | 0.80867 | 0.94427927 | 0.99127 | 1      |



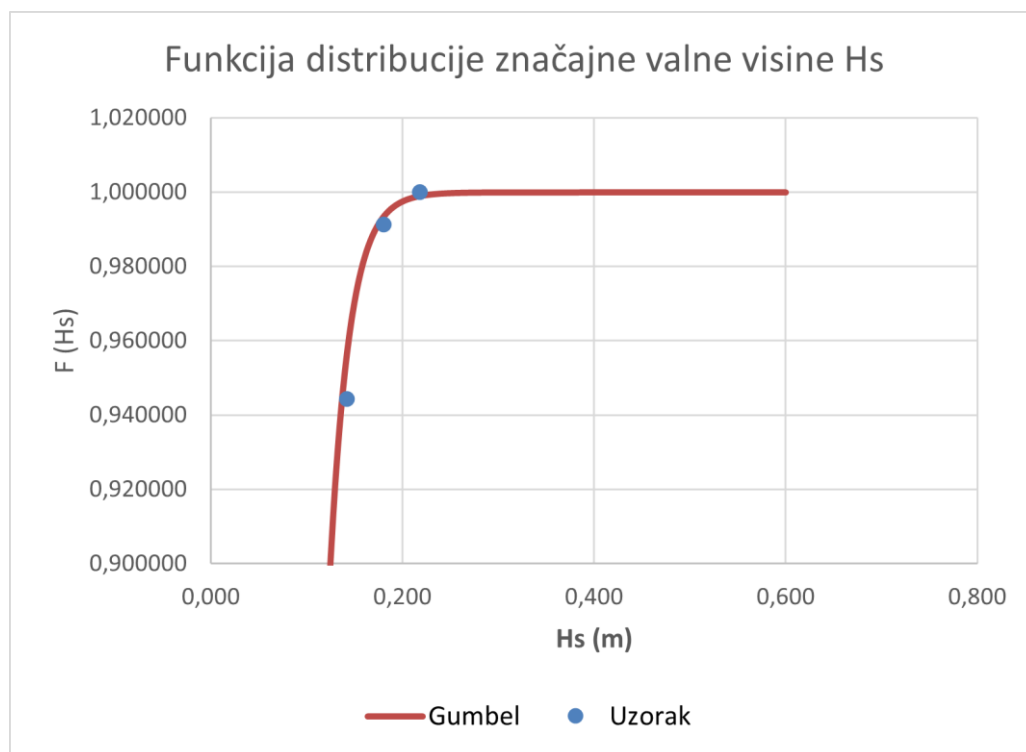
Slika 36 Funkcija distribucije valne visine NE

|               |         |          |         |          |          |        |
|---------------|---------|----------|---------|----------|----------|--------|
| <b>Ts (s)</b> | 0,6251  | 0,8787   | 1,0535  | 1,1908   | 1,3056   | 1,4051 |
| <b>F(Ts)</b>  | 0,06253 | 0,640549 | 0,80867 | 0,944279 | 0,991273 | 1      |

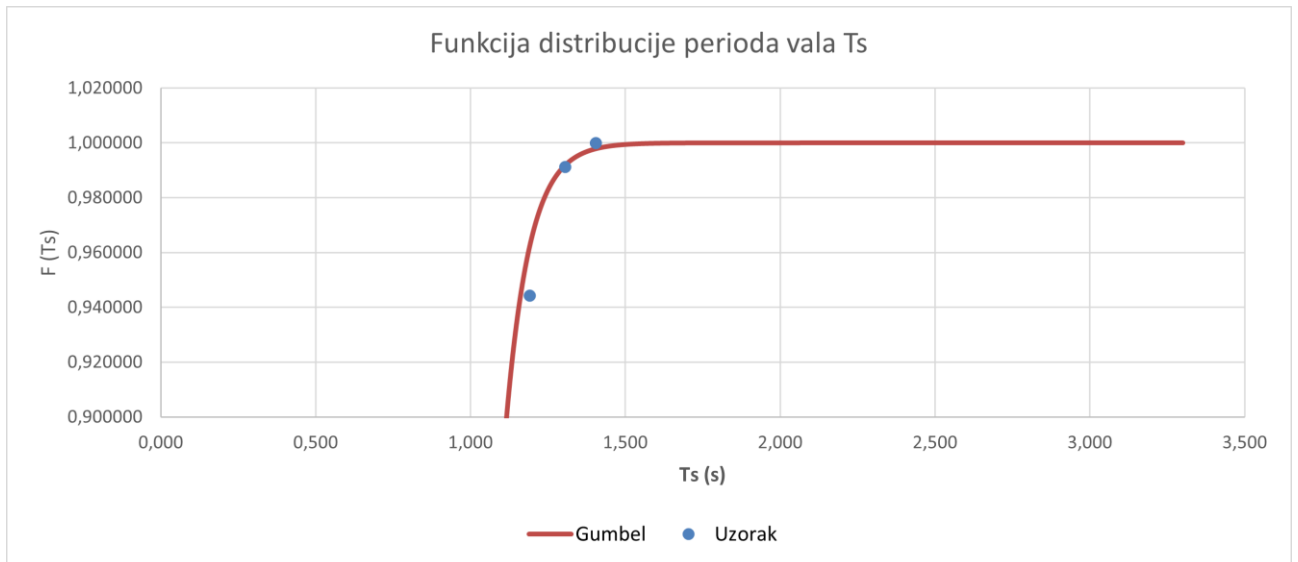


Slika 37 Funkcija distribucije perioda vala NE

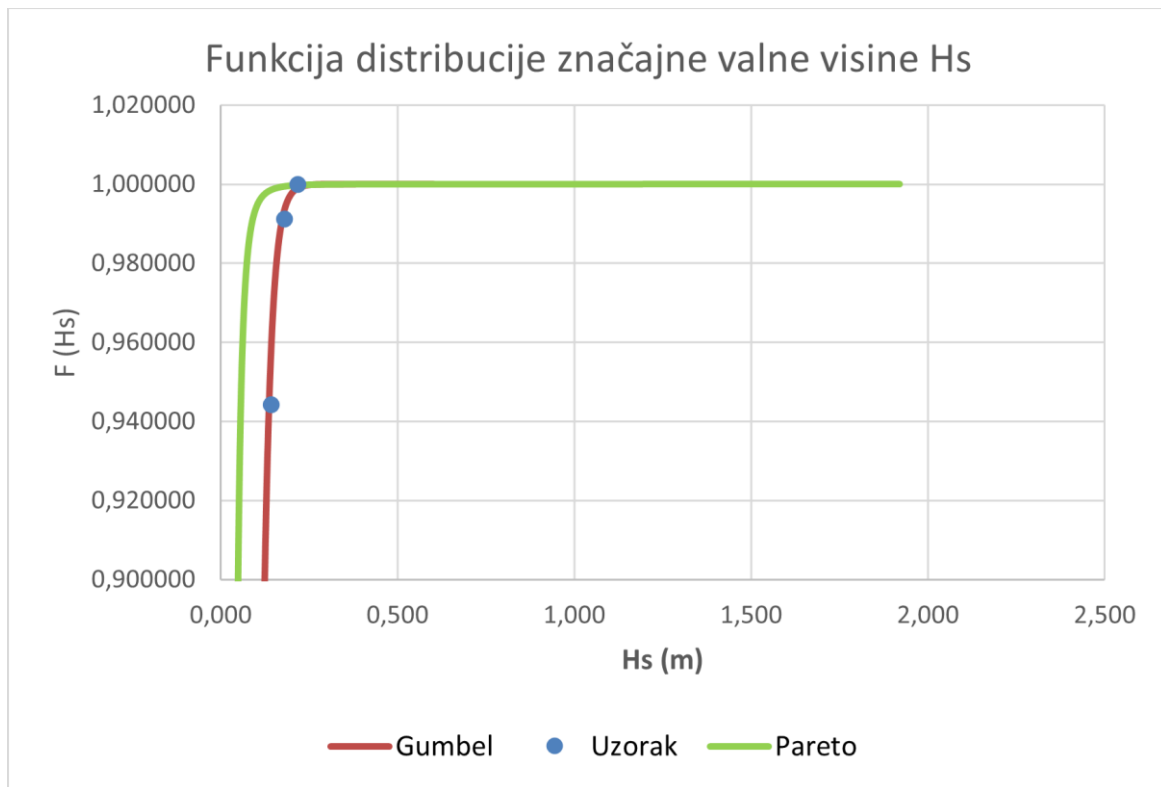
Parametri distribucija Gumbel i Pareto mijenjaju se dok se ne zadovolje vrijednosti u gornjem dijelu uzorka.



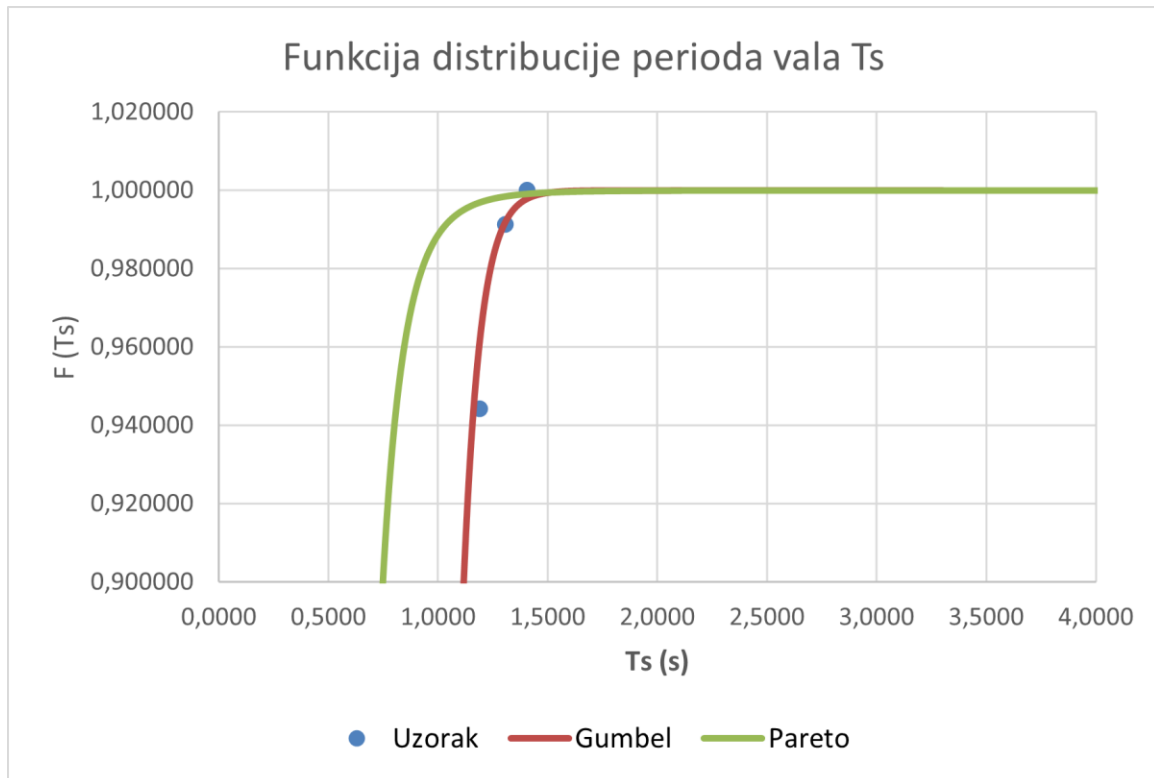
Slika 38 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Gumbelu za NE



Slika 39 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Gumbelu za NE



Slika 40 Funkcija distribucije značajne valne visine  $H_s$  po Paretu za NE



Slika 41 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Paretu za NE



Za cijeli postupak određivanja prethodno navedenih funkcija distribucija bilo je nužno napraviti sljedeće tablice za obje distribucije (Gumbel i Pareto distribuciju) te za oba valna parametra (valnu visinu  $H_s$  i period vala  $T_s$ ).

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |      |         |           |           |      |          |           |
|--------------------------------|------|---------|-----------|-----------|------|----------|-----------|
|                                |      |         |           |           |      |          |           |
|                                |      |         |           |           |      |          |           |
|                                |      |         |           |           |      |          |           |
|                                |      |         |           |           |      |          |           |
|                                |      |         |           |           |      |          |           |
| $\mu$                          |      | $\beta$ |           | $H_s$ (m) |      | $F(H_s)$ |           |
| 0,08                           | 0,02 | 0,268   | 0,9999173 | 0,08      | 0,02 | 0,295    | 0,9999786 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,269   | 0,9999213 | 0,08      | 0,02 | 0,296    | 0,9999796 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,27    | 0,9999252 | 0,08      | 0,02 | 0,297    | 0,9999806 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,271   | 0,9999288 | 0,08      | 0,02 | 0,298    | 0,9999815 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,272   | 0,9999323 | 0,08      | 0,02 | 0,299    | 0,9999824 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,314   | 0,9999917 | 0,08      | 0,02 | 0,328    | 0,9999959 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,315   | 0,9999921 | 0,08      | 0,02 | 0,329    | 0,9999961 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,316   | 0,9999925 | 0,08      | 0,02 | 0,33     | 0,9999963 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,317   | 0,9999929 | 0,08      | 0,02 | 0,331    | 0,9999965 |
| 0,08                           | 0,02 | 0,318   | 0,9999932 | 0,08      | 0,02 | 0,332    | 0,9999966 |

Slika 42 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $H_s$  za smjer NE

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |       |         |           |           |       |          |           |
|--------------------------------|-------|---------|-----------|-----------|-------|----------|-----------|
|                                |       |         |           |           |       |          |           |
|                                |       |         |           |           |       |          |           |
|                                |       |         |           |           |       |          |           |
|                                |       |         |           |           |       |          |           |
|                                |       |         |           |           |       |          |           |
| $\mu$                          |       | $\beta$ |           | $T_s$ (m) |       | $F(T_s)$ |           |
| 0,95                           | 0,074 | 1,649   | 0,9999210 | 0,95      | 0,074 | 1,752    | 0,9999804 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,650   | 0,9999221 | 0,95      | 0,074 | 1,753    | 0,9999806 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,651   | 0,9999231 | 0,95      | 0,074 | 1,754    | 0,9999809 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,652   | 0,9999241 | 0,95      | 0,074 | 1,755    | 0,9999811 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,653   | 0,9999252 | 0,95      | 0,074 | 1,756    | 0,9999814 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,819   | 0,9999921 | 0,95      | 0,074 | 1,872    | 0,9999961 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,820   | 0,9999922 | 0,95      | 0,074 | 1,873    | 0,9999962 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,821   | 0,9999923 | 0,95      | 0,074 | 1,874    | 0,9999962 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,822   | 0,9999924 | 0,95      | 0,074 | 1,875    | 0,9999963 |
| 0,95                           | 0,074 | 1,823   | 0,9999925 | 0,95      | 0,074 | 1,876    | 0,9999963 |

Slika 43 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $T_s$  za smjer NE

| Pareto distribucija: |       |        |           |   |       |       |           |
|----------------------|-------|--------|-----------|---|-------|-------|-----------|
|                      |       |        |           |   |       |       |           |
|                      |       |        |           |   |       |       |           |
|                      |       |        |           |   |       |       |           |
| alfa                 | $X_M$ | Hs (m) | F(Hs)     |   |       |       |           |
| 4                    | 0,028 | 0,297  | 0,9999210 | 4 | 0,028 | 0,421 | 0,9999804 |
| 4                    | 0,028 | 0,298  | 0,9999221 | 4 | 0,028 | 0,422 | 0,9999806 |
| 4                    | 0,028 | 0,299  | 0,9999231 | 4 | 0,028 | 0,423 | 0,9999808 |
| 4                    | 0,028 | 0,300  | 0,9999241 | 4 | 0,028 | 0,424 | 0,9999810 |
| 4                    | 0,028 | 0,301  | 0,9999251 | 4 | 0,028 | 0,425 | 0,9999812 |
| 4                    | 0,028 | 0,530  | 0,9999922 | 4 | 0,028 | 0,634 | 0,9999962 |
| 4                    | 0,028 | 0,531  | 0,9999923 | 4 | 0,028 | 0,635 | 0,9999962 |
| 4                    | 0,028 | 0,532  | 0,9999923 | 4 | 0,028 | 0,636 | 0,9999962 |
| 4                    | 0,028 | 0,533  | 0,9999924 | 4 | 0,028 | 0,637 | 0,9999963 |
| 4                    | 0,028 | 0,534  | 0,9999924 | 4 | 0,028 | 0,638 | 0,9999963 |

Slika 44 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Hs za smjer NE

| Pareto distribucija: |       |        |           |     |      |       |           |
|----------------------|-------|--------|-----------|-----|------|-------|-----------|
|                      |       |        |           |     |      |       |           |
|                      |       |        |           |     |      |       |           |
|                      |       |        |           |     |      |       |           |
| alfa                 | $X_M$ | Ts (m) | F(Ts)     |     |      |       |           |
| 7,5                  | 0,55  | 1,930  | 0,9999185 | 7,5 | 0,55 | 2,320 | 0,9999795 |
| 7,5                  | 0,55  | 1,940  | 0,9999216 | 7,5 | 0,55 | 2,330 | 0,9999802 |
| 7,5                  | 0,55  | 1,950  | 0,9999246 | 7,5 | 0,55 | 2,340 | 0,9999808 |
| 7,5                  | 0,55  | 1,960  | 0,9999274 | 7,5 | 0,55 | 2,350 | 0,9999814 |
| 7,5                  | 0,55  | 1,970  | 0,9999301 | 7,5 | 0,55 | 2,360 | 0,9999820 |
| 7,5                  | 0,55  | 2,880  | 0,9999960 | 7,5 | 0,55 | 2,880 | 0,9999960 |
| 7,5                  | 0,55  | 2,890  | 0,9999961 | 7,5 | 0,55 | 2,890 | 0,9999961 |
| 7,5                  | 0,55  | 2,900  | 0,9999962 | 7,5 | 0,55 | 2,900 | 0,9999962 |
| 7,5                  | 0,55  | 2,910  | 0,9999963 | 7,5 | 0,55 | 2,910 | 0,9999963 |
| 7,5                  | 0,55  | 2,920  | 0,9999963 | 7,5 | 0,55 | 2,920 | 0,9999963 |

Slika 45 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Ts za smjer NE

Nakon toga, u tablici za dugoročne valne prognoze određuju se vrijednosti Q pomoću sljedećeg izraza:

$$Q(H_K^T) = p(H_K > H_K^T) = \int_{H_K^T}^{+\infty} f(H_K) dH_K = \frac{1}{T} * \frac{T_m}{n}$$

te u skladu s dobivenom vrijednošću Q dobije se i 1-Q.

| T   | Q           | 1-Q       | $\mu$ | $\beta$ | $H_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | $\chi_M$ | $H_S^{Tpareto}$ |
|-----|-------------|-----------|-------|---------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | 7,67239E-05 | 0,9999233 | 0,08  | 0,02    | 0,27            | 4        | 0,028    | 0,299           |
| 20  | 1,9181E-05  | 0,9999808 | 0,08  | 0,02    | 0,297           | 4        | 0,028    | 0,423           |
| 50  | 7,67239E-06 | 0,9999923 | 0,08  | 0,02    | 0,316           | 4        | 0,028    | 0,532           |
| 100 | 3,83619E-06 | 0,9999962 | 0,08  | 0,02    | 0,33            | 4        | 0,028    | 0,636           |

| T   | Q           | 1-Q       | $\mu$ | $\beta$ | $T_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | $\chi_M$ | $T_S^{Tpareto}$ |
|-----|-------------|-----------|-------|---------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | 7,67239E-05 | 0,9999233 | 0,95  | 0,074   | 1,651           | 7,5      | 0,55     | 1,950           |
| 20  | 1,9181E-05  | 0,9999808 | 0,95  | 0,074   | 1,754           | 7,5      | 0,55     | 2,340           |
| 50  | 7,67239E-06 | 0,9999923 | 0,95  | 0,074   | 1,821           | 7,5      | 0,55     | 2,650           |
| 100 | 3,83619E-06 | 0,9999962 | 0,95  | 0,074   | 1,874           | 7,5      | 0,55     | 2,900           |

Slika 46 Dugoročne valne prognoze za smjer NE

Za dobivene vrijednosti 1-Q iz tablice sa Slike 47. očitavaju se približne vrijednosti s prethodno navedenih tablica (Slika 43., Slika 44., Slika 45. i Slika 46.). U tablicu za dugoročne valne prognoze upišu se očitane vrijednosti te se unesu podaci o  $H_S^{Tgumbel}$ ,  $H_S^{Tpareto}$ ,  $T_S^{Tgumbel}$  i  $T_S^{Tpareto}$ .

Na taj su se način dobile dugoročne valne prognoze za povratni period od 5, 20, 50 i 100 godina.

| T   | $H_S^{Tgumbel}$ | $H_{1/10}^{Tgumbel}$ | $H_{1/100}^{Tgumbel}$ | $H_{MAX}^{Tgumbel}$ | $H_S^{Tpareto}$ | $H_{1/10}^{Tpareto}$ | $H_{1/100}^{Tpareto}$ | $H_{MAX}^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 5   | 0,27            | 0,343                | 0,451                 | 0,486               | 0,299           | 0,380                | 0,499                 | 0,538               |
| 20  | 0,297           | 0,377                | 0,496                 | 0,535               | 0,423           | 0,537                | 0,706                 | 0,761               |
| 50  | 0,316           | 0,401                | 0,528                 | 0,569               | 0,532           | 0,676                | 0,888                 | 0,958               |
| 100 | 0,33            | 0,419                | 0,551                 | 0,594               | 0,636           | 0,808                | 1,062                 | 1,145               |

Slika 47 Karakteristične valne visine za smjer NE

| T   | $T_S^{Tgumbel}$ | $T_P^{Tgumbel}$ | $T_S^{Tpareto}$ | $T_P^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 1,651           | 1,816           | 1,950           | 2,145           |
| 20  | 1,754           | 1,929           | 2,340           | 2,574           |
| 50  | 1,821           | 2,003           | 2,650           | 2,915           |
| 100 | 1,874           | 2,061           | 2,900           | 3,190           |

Slika 48 Karakteristični period vala za smjer NE

Također su definirane karakteristične valne visine i periodi za povratne periode od 5, 20, 50 i 100 godina za incidentni smjera puhanja vjetra NE.

Karakteristične valne visine i periodi mogu se izračunati prema sljedećim matematičkim formulama:

$$H_{1/10} = 1.27 * H_S ; H_{1/100} = 1.67 * H_S ; H_{max} = 1.8 * H_S ; T_P = 1.1 * T$$

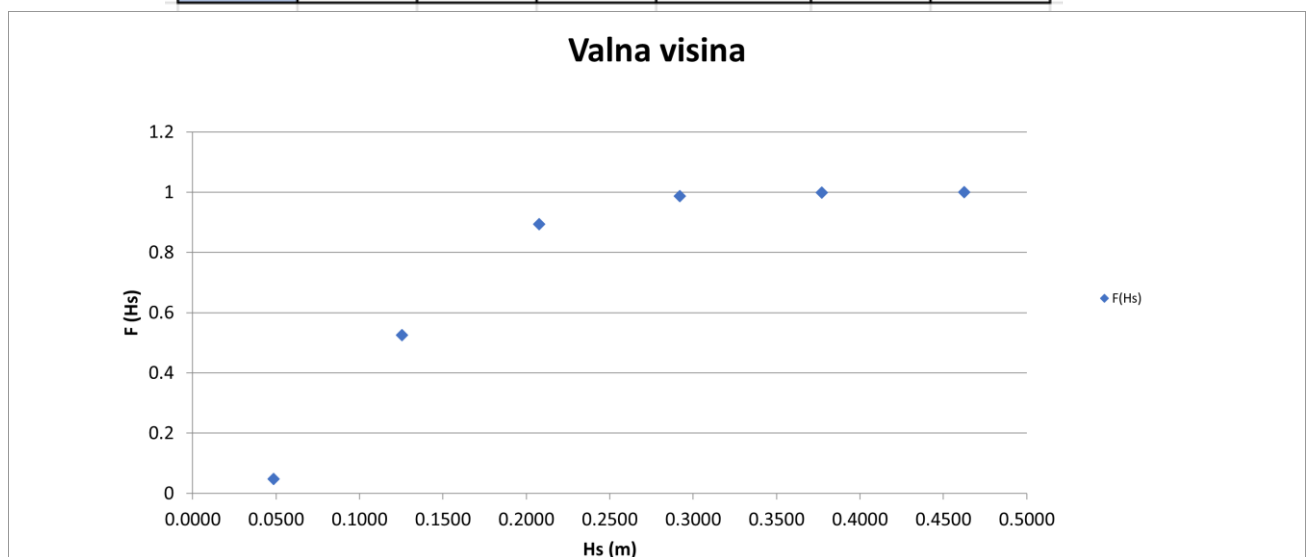
## 4.1.3.) Smjer W

| W         | 24 t:12h |         |             |          |          |          |      |
|-----------|----------|---------|-------------|----------|----------|----------|------|
| v (m/s)   | 1.7      | 3.4     | 5.1         | 6.8      | 8.5      | 10.2     |      |
| Fmin (km) | 42.0398  | 65.0594 | 83.9939     | 100.6836 | 115.8810 | 129.9860 |      |
| tmin (h)  | 2.3211   | 1.6874  | 1.4003      | 1.2267   | 1.1071   | 1.0180   |      |
| FEFF (km) | 4.4276   | 4.4276  | 4.4276      | 4.4276   | 4.4276   | 4.4276   |      |
| Hs (m)    | 0.0486   | 0.1255  | 0.2078      | 0.2920   | 0.3771   | 0.4626   |      |
| Ts (s)    | 0.8857   | 1.3232  | 1.6313      | 1.8747   | 2.0786   | 2.2555   |      |
| Lo (m)    | 1.2249   | 2.7336  | 4.1546      | 5.4872   | 6.7458   | 7.9428   | N    |
| n         | 184      | 1868    | 1434        | 364      | 45       | 6        | 3901 |
| ni/N      | 0.04717  | 0.47885 | 0.367598052 | 0.09331  | 0.01154  | 0.00154  | 1    |
| F(Hs)     | 0.04717  | 0.52602 | 0.893617021 | 0.98693  | 0.99846  | 1        |      |

Slika 49 Parametri dubokovodnog vala W

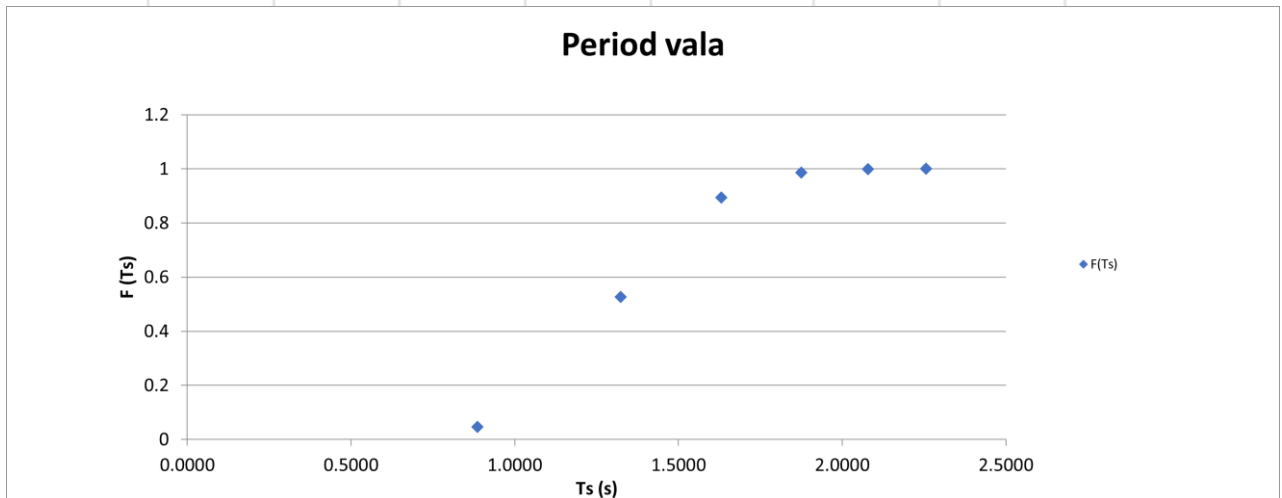
Zatim se određuju funkcije distribucije značajne valne visine ( $H_s$ ) i perioda vala ( $T_s$ ) odnosno definira se uzorak.

|        |         |         |         |            |         |        |
|--------|---------|---------|---------|------------|---------|--------|
| Hs (m) | 0.0486  | 0.1255  | 0.2078  | 0.2920     | 0.3771  | 0.4626 |
| F(Hs)  | 0.04717 | 0.52602 | 0.89362 | 0.98692643 | 0.99846 | 1      |



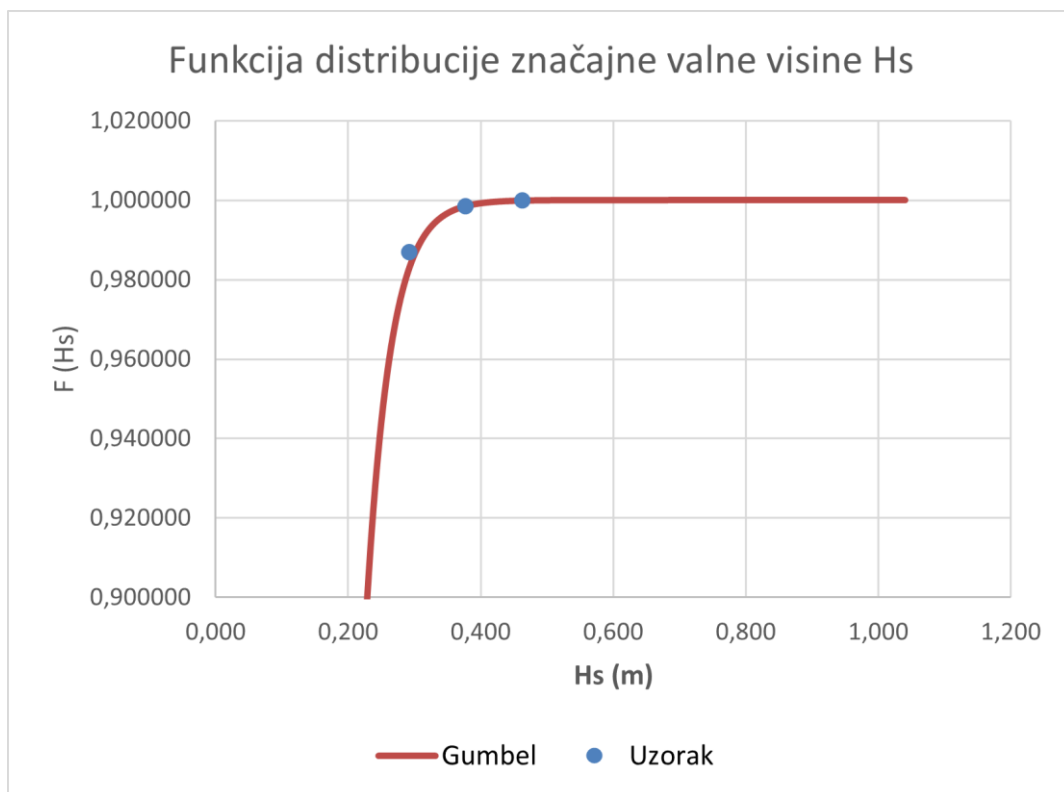
Slika 50 Funkcija distribucije valne visine W

|               |         |         |         |            |         |        |
|---------------|---------|---------|---------|------------|---------|--------|
| <b>Ts (s)</b> | 0.8857  | 1.3232  | 1.6313  | 1.8747     | 2.0786  | 2.2555 |
| <b>F(Ts)</b>  | 0.04717 | 0.52602 | 0.89362 | 0.98692643 | 0.99846 | 1      |

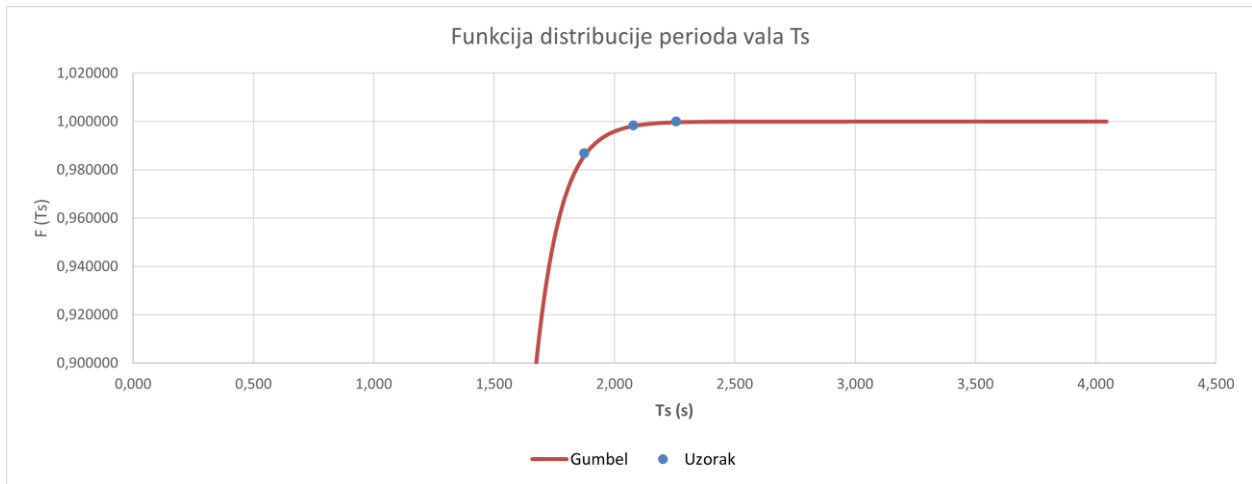


Slika 51 Funkcija distribucije perioda vala W

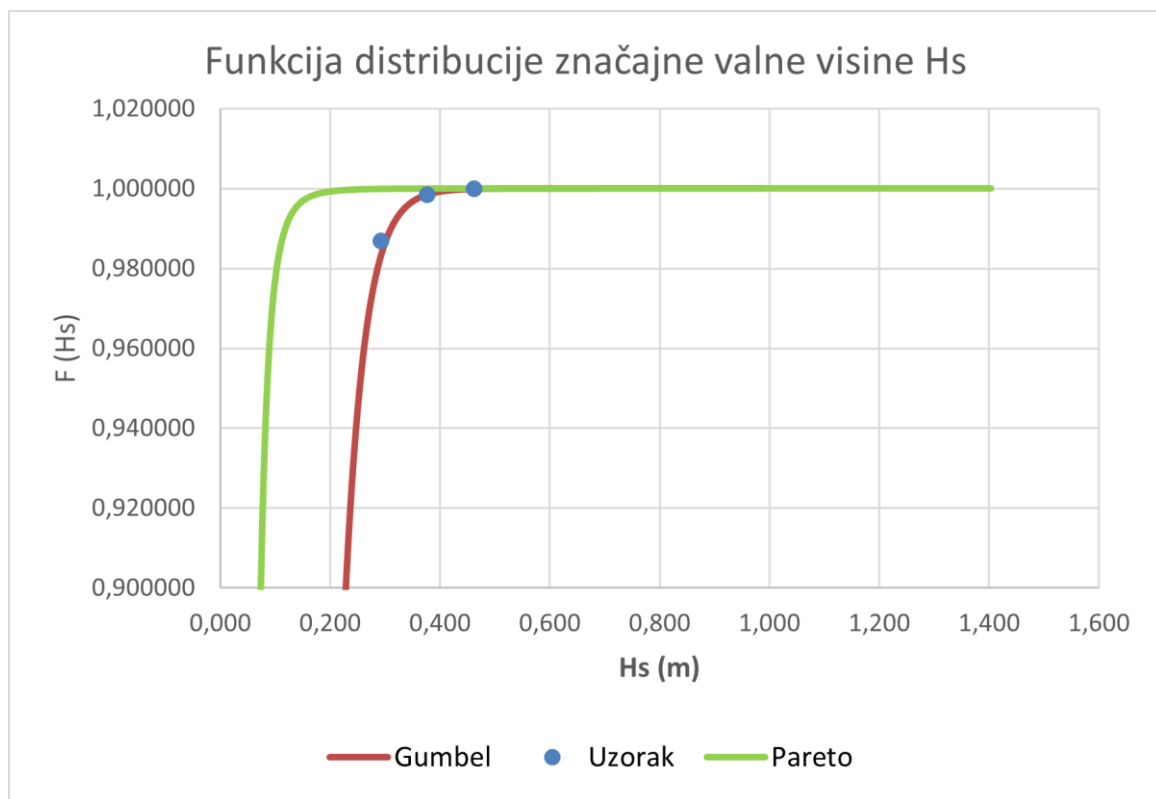
Parametri distribucija Gumbel i Pareto mijenjaju se dok se ne zadovolje vrijednosti u gornjem dijelu uzorka.



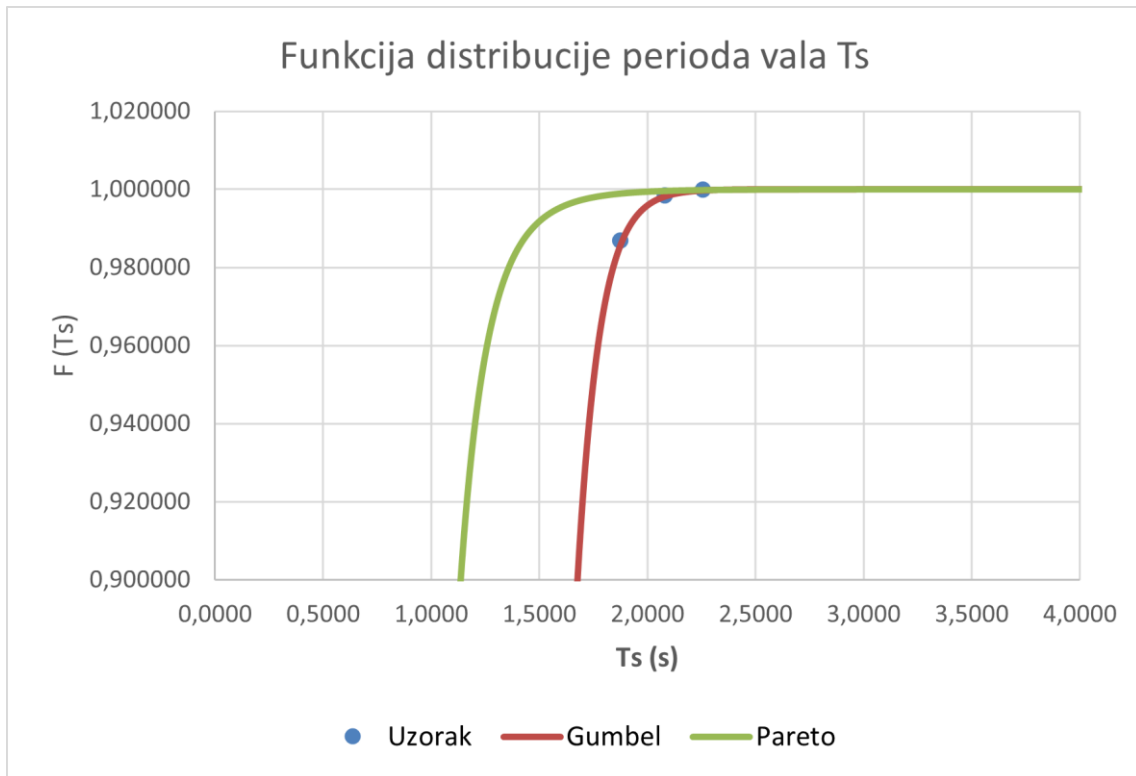
Slika 52 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Gumbelu za W



Slika 53 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Gumbelu za  $W$



Slika 54 Funkcija distribucije značajne valne visine  $H_s$  po Pareto za  $W$



Slika 55 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Paretu za  $W$

Za cijeli postupak određivanja prethodno navedenih funkcija distribucija bilo je nužno napraviti sljedeće tablice za obje distribucije (Gumbel i Pareto distribuciju) te za oba valna parametra (valnu visinu  $H_s$  i period vala  $T_s$ ).

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |         |           |           |      |       |       |           |
|--------------------------------|---------|-----------|-----------|------|-------|-------|-----------|
| $\mu$                          | $\beta$ | $H_s$ (m) | $F(H_s)$  |      |       |       |           |
| 0,15                           | 0,035   | 0,445     | 0,9997815 | 0,15 | 0,035 | 0,494 | 0,9999461 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,446     | 0,9997876 | 0,15 | 0,035 | 0,495 | 0,9999476 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,447     | 0,9997936 | 0,15 | 0,035 | 0,496 | 0,9999491 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,448     | 0,9997994 | 0,15 | 0,035 | 0,497 | 0,9999505 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,449     | 0,9998051 | 0,15 | 0,035 | 0,498 | 0,9999519 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,526     | 0,9999784 | 0,15 | 0,035 | 0,550 | 0,9999891 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,527     | 0,9999790 | 0,15 | 0,035 | 0,551 | 0,9999894 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,528     | 0,9999796 | 0,15 | 0,035 | 0,552 | 0,9999897 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,529     | 0,9999802 | 0,15 | 0,035 | 0,553 | 0,9999900 |
| 0,15                           | 0,035   | 0,530     | 0,9999807 | 0,15 | 0,035 | 0,554 | 0,9999903 |

Slika 56 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $H_s$  za smjer  $W$

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |         |           |           |      |     |       |           |
|--------------------------------|---------|-----------|-----------|------|-----|-------|-----------|
| $\mu$                          | $\beta$ | $T_s$ (m) | $F(T_s)$  |      |     |       |           |
| 1,45                           | 0,1     | 2,297     | 0,9997904 | 1,45 | 0,1 | 2,436 | 0,9999478 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,298     | 0,9997924 | 1,45 | 0,1 | 2,437 | 0,9999483 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,299     | 0,9997945 | 1,45 | 0,1 | 2,438 | 0,9999488 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,300     | 0,9997966 | 1,45 | 0,1 | 2,439 | 0,9999493 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,301     | 0,9997986 | 1,45 | 0,1 | 2,440 | 0,9999498 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,528     | 0,9999792 | 1,45 | 0,1 | 2,596 | 0,9999895 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,529     | 0,9999794 | 1,45 | 0,1 | 2,597 | 0,9999896 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,530     | 0,9999796 | 1,45 | 0,1 | 2,598 | 0,9999897 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,531     | 0,9999798 | 1,45 | 0,1 | 2,599 | 0,9999898 |
| 1,45                           | 0,1     | 2,532     | 0,9999800 | 1,45 | 0,1 | 2,600 | 0,9999899 |

Slika 57 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $T_s$  za smjer  $W$



| Pareto distribucija: |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|----------------------|----------------|--------------------|--------------------|------|----------------|--------------------|--------------------|
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
| alfa                 | X <sub>M</sub> | H <sub>s</sub> (m) | F(H <sub>s</sub> ) | alfa | X <sub>M</sub> | H <sub>s</sub> (m) | F(H <sub>s</sub> ) |
| 5                    | 0,048          | 0,260              | 0,9997855          | 5    | 0,048          | 0,344              | 0,9999471          |
| 5                    | 0,048          | 0,261              | 0,9997896          | 5    | 0,048          | 0,345              | 0,9999479          |
| 5                    | 0,048          | 0,262              | 0,9997936          | 5    | 0,048          | 0,346              | 0,9999486          |
| 5                    | 0,048          | 0,263              | 0,9997975          | 5    | 0,048          | 0,347              | 0,9999494          |
| 5                    | 0,048          | 0,264              | 0,9998013          | 5    | 0,048          | 0,348              | 0,9999501          |
| 5                    | 0,048          | 0,414              | 0,9999790          | 5    | 0,048          | 0,475              | 0,9999895          |
| 5                    | 0,048          | 0,415              | 0,9999793          | 5    | 0,048          | 0,476              | 0,9999896          |
| 5                    | 0,048          | 0,416              | 0,9999795          | 5    | 0,048          | 0,477              | 0,9999897          |
| 5                    | 0,048          | 0,417              | 0,9999798          | 5    | 0,048          | 0,478              | 0,9999898          |
| 5                    | 0,048          | 0,418              | 0,9999800          | 5    | 0,048          | 0,479              | 0,9999899          |

Slika 58 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala H<sub>s</sub> za smjer W

| Pareto distribucija: |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|----------------------|----------------|--------------------|--------------------|------|----------------|--------------------|--------------------|
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
|                      |                |                    |                    |      |                |                    |                    |
| alfa                 | X <sub>M</sub> | T <sub>s</sub> (m) | F(T <sub>s</sub> ) | alfa | X <sub>M</sub> | T <sub>s</sub> (m) | F(T <sub>s</sub> ) |
| 9                    | 0,88           | 2,259              | 0,9997934          | 9    | 0,88           | 2,635              | 0,9999483          |
| 9                    | 0,88           | 2,260              | 0,9997942          | 9    | 0,88           | 2,636              | 0,9999485          |
| 9                    | 0,88           | 2,261              | 0,9997951          | 9    | 0,88           | 2,637              | 0,9999487          |
| 9                    | 0,88           | 2,262              | 0,9997959          | 9    | 0,88           | 2,638              | 0,9999488          |
| 9                    | 0,88           | 2,263              | 0,9997967          | 9    | 0,88           | 2,639              | 0,9999490          |
| 9                    | 0,88           | 2,918              | 0,9999794          | 9    | 0,88           | 3,151              | 0,9999897          |
| 9                    | 0,88           | 2,919              | 0,9999794          | 9    | 0,88           | 3,152              | 0,9999897          |
| 9                    | 0,88           | 2,920              | 0,9999795          | 9    | 0,88           | 3,153              | 0,9999897          |
| 9                    | 0,88           | 2,921              | 0,9999796          | 9    | 0,88           | 3,154              | 0,9999898          |
| 9                    | 0,88           | 2,922              | 0,9999796          | 9    | 0,88           | 3,155              | 0,9999898          |

Slika 59 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala T<sub>s</sub> za smjer W

Nakon toga, u tablici za dugoročne valne prognoze određuju se vrijednosti Q pomoću sljedećeg izraza:

$$Q(H_K^T) = p(H_K > H_K^T) = \int_{H_K^T}^{+\infty} f(H_K) dH_K = \frac{1}{T} * \frac{T_m}{n}$$

te u skladu s dobivenom vrijednošću Q dobije se i 1-Q.

| T   | Q         | 1-Q       | $\mu$ | $\beta$ | $H_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | $\chi_M$ | $H_S^{Tpareto}$ |
|-----|-----------|-----------|-------|---------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | 0,0002051 | 0,9997949 | 0,15  | 0,035   | 0,447           | 5        | 0,048    | 0,262           |
| 20  | 5,127E-05 | 0,9999487 | 0,15  | 0,035   | 0,496           | 5        | 0,048    | 0,346           |
| 50  | 2,051E-05 | 0,9999795 | 0,15  | 0,035   | 0,528           | 5        | 0,048    | 0,416           |
| 100 | 1,025E-05 | 0,9999897 | 0,15  | 0,035   | 0,552           | 5        | 0,048    | 0,477           |

| T   | Q         | 1-Q       | $\mu$ | $\beta$ | $T_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | $\chi_M$ | $T_S^{Tpareto}$ |
|-----|-----------|-----------|-------|---------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | 0,0002051 | 0,9997949 | 1,45  | 0,1     | 2,299           | 9        | 0,88     | 2,261           |
| 20  | 5,127E-05 | 0,9999487 | 1,45  | 0,1     | 2,438           | 9        | 0,88     | 2,637           |
| 50  | 2,051E-05 | 0,9999795 | 1,45  | 0,1     | 2,530           | 9        | 0,88     | 2,920           |
| 100 | 1,025E-05 | 0,9999897 | 1,45  | 0,1     | 2,598           | 9        | 0,88     | 3,153           |

Slika 60 Dugoročne valne prognoze za smjer W

Za dobivene vrijednosti 1-Q iz tablice sa Slike 61. očitavaju se približne vrijednosti s prethodno navedenih tablica (Slika 57., Slika 58., Slika 59. i Slika 60.). U tablicu za dugoročne valne prognoze upišu se očitane vrijednosti te se unesu podaci o  $H_S^{Tgumbel}$ ,  $H_S^{Tpareto}$ ,  $T_S^{Tgumbel}$  i  $T_S^{Tpareto}$ .

Na taj su se način dobile dugoročne valne prognoze za povratni period od 5, 20, 50 i 100 godina.

| T   | $H_S^{Tgumbel}$ | $H_{1/10}^{Tgumbel}$ | $H_{1/100}^{Tgumbel}$ | $H_{MAX}^{Tgumbel}$ | $H_S^{Tpareto}$ | $H_{1/10}^{Tpareto}$ | $H_{1/100}^{Tpareto}$ | $H_{MAX}^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 5   | 0,447           | 0,568                | 0,746                 | 0,805               | 0,262           | 0,333                | 0,438                 | 0,472               |
| 20  | 0,496           | 0,630                | 0,828                 | 0,893               | 0,346           | 0,439                | 0,578                 | 0,623               |
| 50  | 0,528           | 0,671                | 0,882                 | 0,950               | 0,416           | 0,528                | 0,695                 | 0,749               |
| 100 | 0,552           | 0,701                | 0,922                 | 0,994               | 0,477           | 0,606                | 0,797                 | 0,859               |

Slika 61 Karakteristične valne visine za smjer W

| T   | $T_S^{Tgumbel}$ | $T_P^{Tgumbel}$ | $T_S^{Tpareto}$ | $T_P^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 2,299           | 2,529           | 2,261           | 2,487           |
| 20  | 2,438           | 2,682           | 2,637           | 2,901           |
| 50  | 2,530           | 2,783           | 2,920           | 3,212           |
| 100 | 2,598           | 2,858           | 3,153           | 3,468           |

Slika 62 Karakteristični period vala za smjer W

Također su definirane karakteristične valne visine i periodi za povratne periode od 5, 20, 50 i 100 godina za incidentni smjera puhanja vjetra W.

Karakteristične valne visine i periodi mogu se izračunati prema sljedećim matematičkim formulama:

$$H_{1/10} = 1.27 * H_S ; H_{1/100} = 1.67 * H_S ; H_{max} = 1.8 * H_S ; T_P = 1.1 * T$$

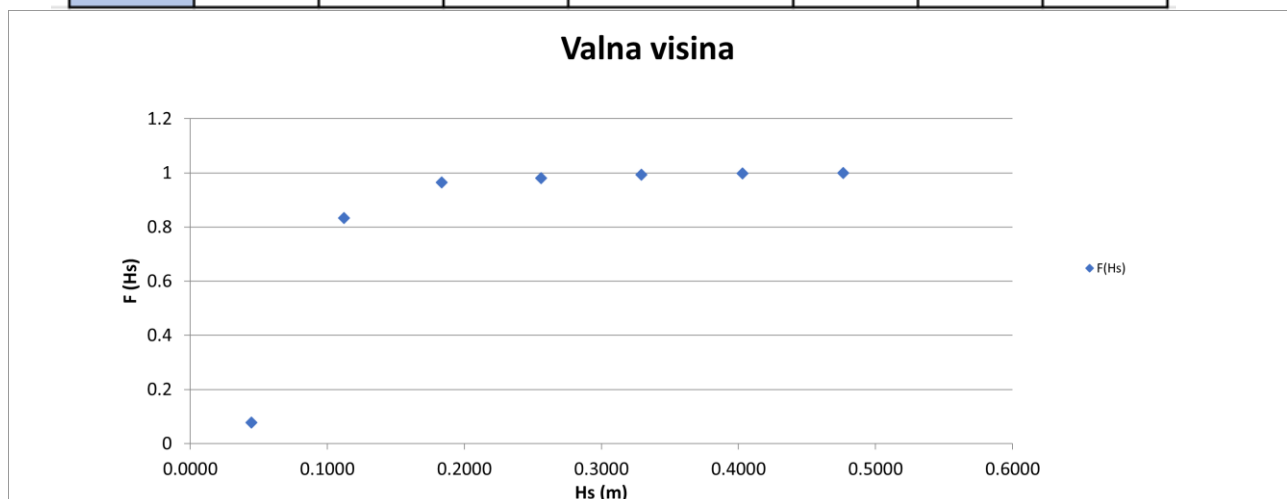
## 4.1.4.) Smjer WSW

| WSW       | 22 t:8h |         |             |         |         |         |         |      |  |
|-----------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|------|--|
| v (m/s)   | 1.7     | 3.4     | 5.1         | 6.8     | 8.5     | 10.2    | 11.9    |      |  |
| Fmin (km) | 24.1222 | 37.3306 | 48.1951     | 57.7715 | 66.4917 | 74.5850 | 82.1917 |      |  |
| tmin (h)  | 1.8524  | 1.3467  | 1.1175      | 0.9790  | 0.8835  | 0.8124  | 0.7568  |      |  |
| FEFF (km) | 3.2506  | 3.2506  | 3.2506      | 3.2506  | 3.2506  | 3.2506  | 3.2506  |      |  |
| Hs (m)    | 0.0446  | 0.1121  | 0.1834      | 0.2561  | 0.3293  | 0.4028  | 0.4766  |      |  |
| Ts (s)    | 0.8344  | 1.2303  | 1.5075      | 1.7260  | 1.9089  | 2.0675  | 2.2084  |      |  |
| Lo (m)    | 1.0870  | 2.3633  | 3.5481      | 4.6515  | 5.6895  | 6.6742  | 7.6147  | N    |  |
| n         | 158     | 1526    | 265         | 32      | 25      | 9       | 5       | 2020 |  |
| ni/N      | 0.07822 | 0.75545 | 0.131188119 | 0.01584 | 0.01238 | 0.00446 | 0.00248 | 1    |  |
| F(Hs)     | 0.07822 | 0.83366 | 0.964851485 | 0.98069 | 0.99307 | 0.99752 | 1       |      |  |

Slika 63 Parametri dubokovodnog vala WSW

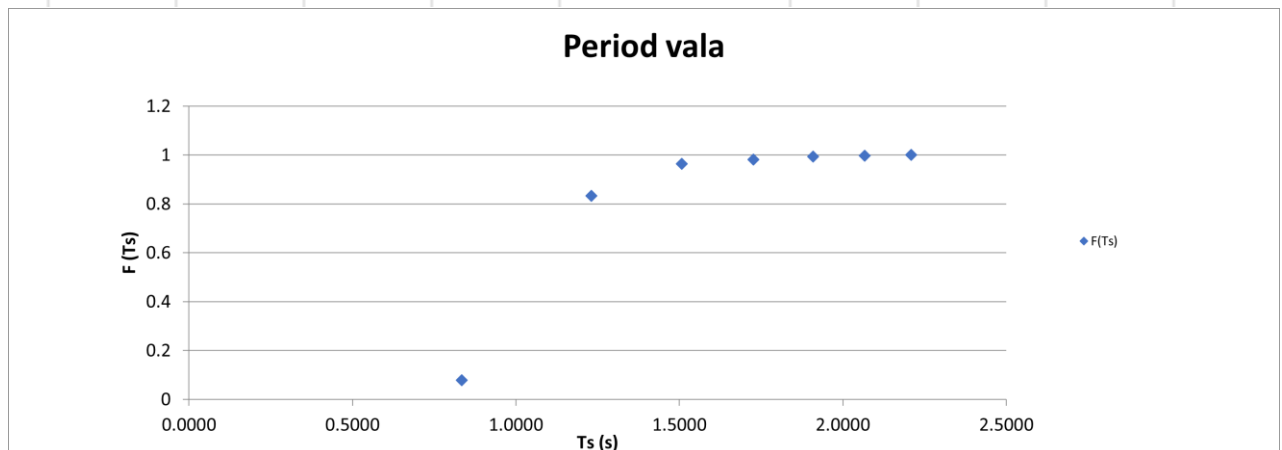
Zatim se određuju funkcije distribucije značajne valne visine (Hs) i perioda vala (Ts) odnosno definira se uzorak.

|        |         |         |         |             |         |         |        |
|--------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|--------|
| Hs (m) | 0.0446  | 0.1121  | 0.1834  | 0.2561      | 0.3293  | 0.4028  | 0.4766 |
| F(Hs)  | 0.07822 | 0.83366 | 0.96485 | 0.980693069 | 0.99307 | 0.99752 | 1      |



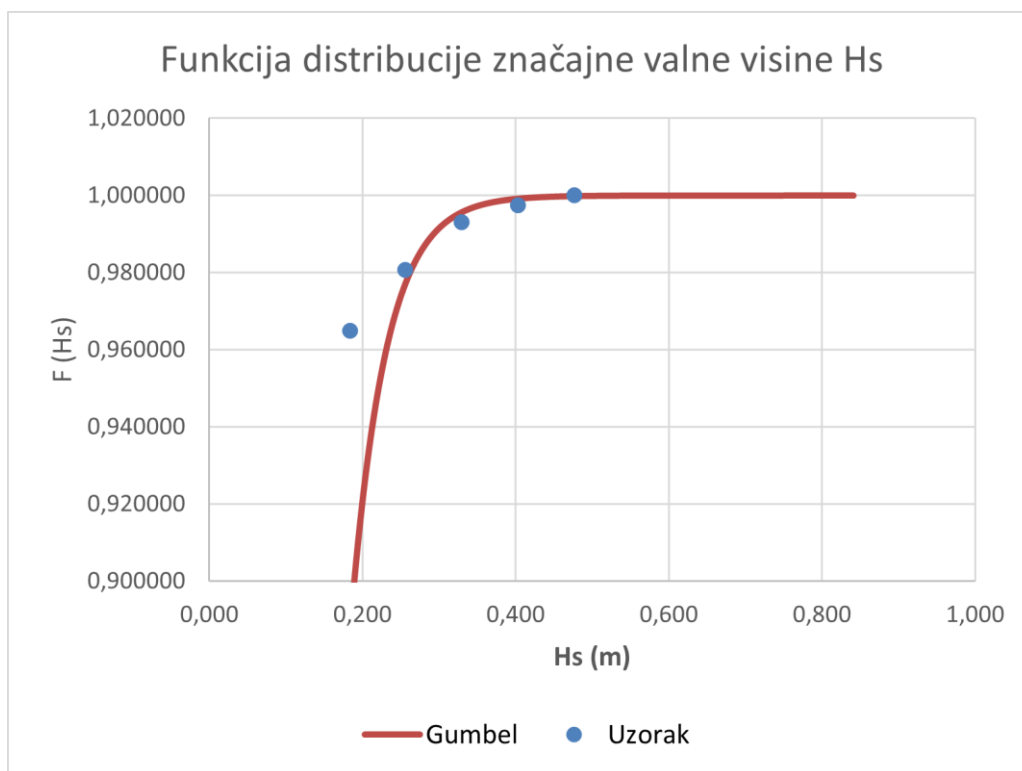
Slika 64 Funkcija distribucije valne visine WSW

|               |         |         |         |             |         |         |        |
|---------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|--------|
| <b>Ts (s)</b> | 0.8344  | 1.2303  | 1.5075  | 1.7260      | 1.9089  | 2.0675  | 2.2084 |
| <b>F(Ts)</b>  | 0.07822 | 0.83366 | 0.96485 | 0.980693069 | 0.99307 | 0.99752 | 1      |

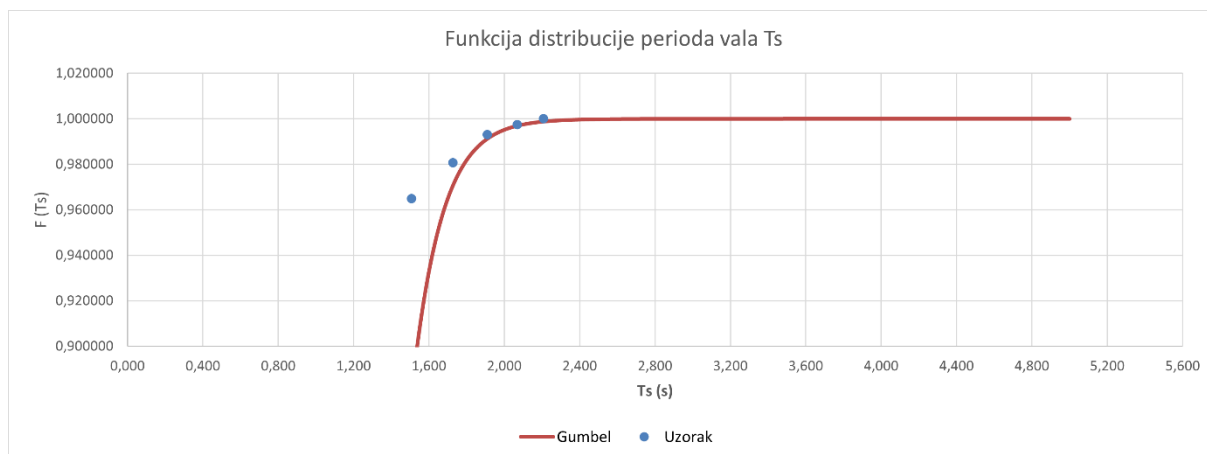


Slika 65 Funkcija distribucije perioda vala WSW

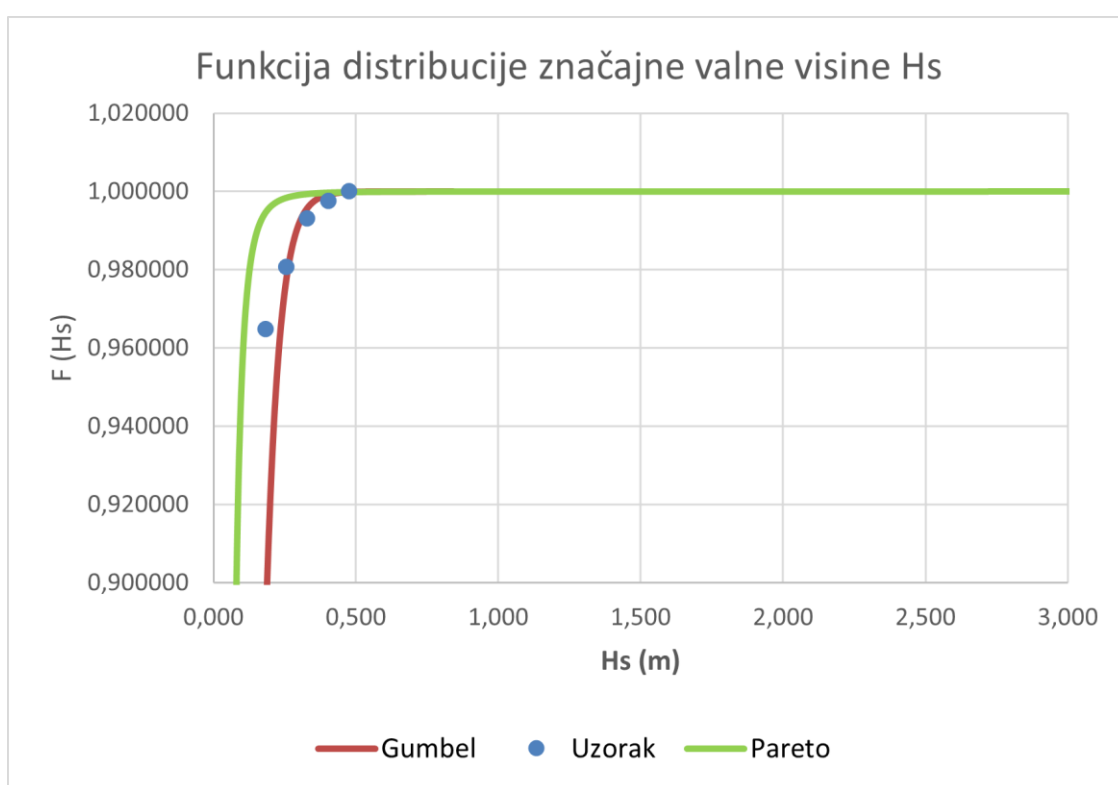
Parametri distribucija Gumbel i Pareto mijenjaju se dok se ne zadovolje vrijednosti u gornjem dijelu uzorka.



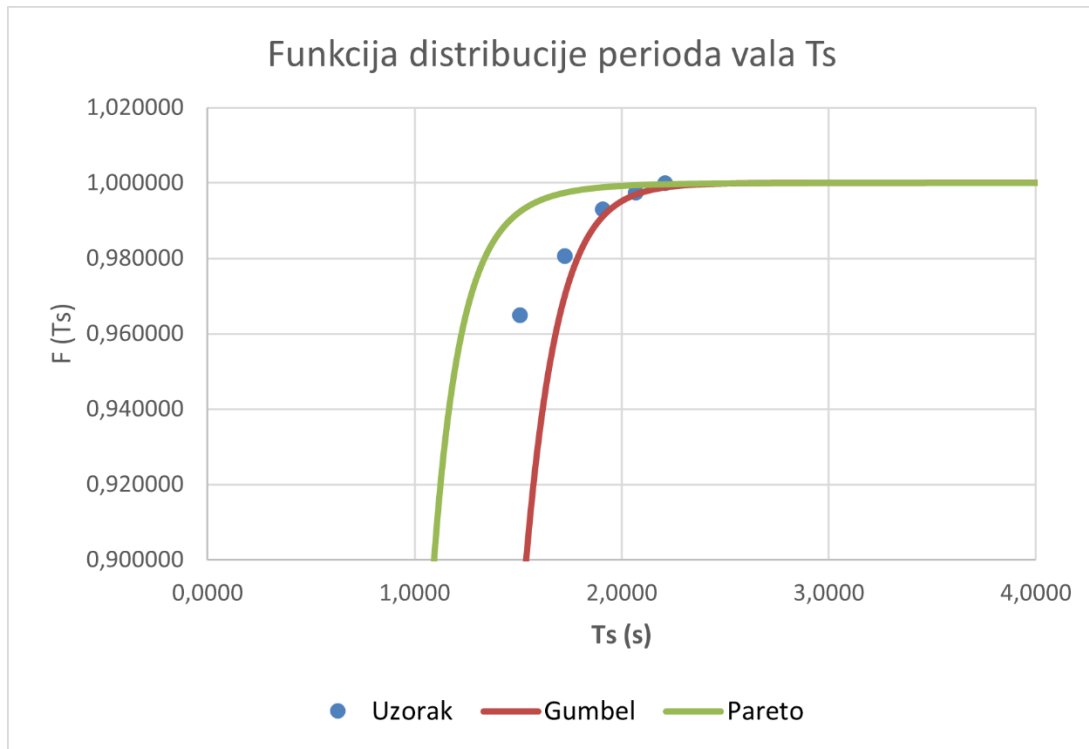
Slika 66 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Gumbelu za WSW



Slika 67 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Gumbelu za WSW



Slika 68 Funkcija distribucije značajne valne visine  $H_s$  po Paretu za WSW



Slika 69 Funkcija distribucije perioda vala  $T_s$  po Paretu za WSW

Za cijeli postupak određivanja prethodno navedenih funkcija distribucija bilo je nužno napraviti sljedeće tablice za obje distribucije (Gumbel i Pareto distribuciju) te za oba valna parametra (valnu visinu  $H_s$  i period vala  $T_s$ ).

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |       |       |           |         |           |       |          |           |
|--------------------------------|-------|-------|-----------|---------|-----------|-------|----------|-----------|
| $\mu$                          |       |       |           | $\beta$ | $H_s$ (m) |       | $F(H_s)$ |           |
| 0,09                           | 0,044 | 0,433 | 0,9995885 |         | 0,09      | 0,044 | 0,494    | 0,9998971 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,434 | 0,9995977 |         | 0,09      | 0,044 | 0,495    | 0,9998994 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,435 | 0,9996068 |         | 0,09      | 0,044 | 0,496    | 0,9999017 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,436 | 0,9996156 |         | 0,09      | 0,044 | 0,497    | 0,9999039 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,437 | 0,9996242 |         | 0,09      | 0,044 | 0,498    | 0,9999061 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,534 | 0,9999585 |         | 0,09      | 0,044 | 0,565    | 0,9999795 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,535 | 0,9999595 |         | 0,09      | 0,044 | 0,566    | 0,9999800 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,536 | 0,9999604 |         | 0,09      | 0,044 | 0,567    | 0,9999804 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,537 | 0,9999613 |         | 0,09      | 0,044 | 0,568    | 0,9999809 |
| 0,09                           | 0,044 | 0,538 | 0,9999621 |         | 0,09      | 0,044 | 0,569    | 0,9999813 |

Slika 70 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $H_s$  za smjer WSW

| <b>Gumbelova distribucija:</b> |      |       |           |         |           |      |          |           |
|--------------------------------|------|-------|-----------|---------|-----------|------|----------|-----------|
| $\mu$                          |      |       |           | $\beta$ | $T_s$ (m) |      | $F(T_s)$ |           |
| 1,2                            | 0,15 | 2,360 | 0,9995621 |         | 1,2       | 0,15 | 2,57     | 0,9998920 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,37  | 0,9995903 |         | 1,2       | 0,15 | 2,580    | 0,9998990 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,380 | 0,9996168 |         | 1,2       | 0,15 | 2,59     | 0,9999055 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,39  | 0,9996415 |         | 1,2       | 0,15 | 2,600    | 0,9999116 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,400 | 0,9996646 |         | 1,2       | 0,15 | 2,61     | 0,9999173 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,700 | 0,9999546 |         | 1,2       | 0,15 | 2,81     | 0,9999782 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,71  | 0,9999575 |         | 1,2       | 0,15 | 2,820    | 0,9999796 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,720 | 0,9999603 |         | 1,2       | 0,15 | 2,83     | 0,9999809 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,73  | 0,9999628 |         | 1,2       | 0,15 | 2,840    | 0,9999821 |
| 1,2                            | 0,15 | 2,740 | 0,9999652 |         | 1,2       | 0,15 | 2,85     | 0,9999833 |

Slika 71 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala  $T_s$  za smjer WSW

| Pareto distribucija: |                |       |           |       |       |       |           |
|----------------------|----------------|-------|-----------|-------|-------|-------|-----------|
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
|                      |                |       |           |       |       |       |           |
| alfa                 | X <sub>M</sub> |       | Hs (m)    | F(Hs) |       |       |           |
| 3,6                  | 0,043          | 0,377 | 0,9995967 | 3,6   | 0,043 | 0,555 | 0,9998998 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,378 | 0,9996005 | 3,6   | 0,043 | 0,556 | 0,9999004 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,379 | 0,9996043 | 3,6   | 0,043 | 0,557 | 0,9999011 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,380 | 0,9996080 | 3,6   | 0,043 | 0,558 | 0,9999017 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,381 | 0,9996117 | 3,6   | 0,043 | 0,559 | 0,9999023 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,717 | 0,9999601 | 3,6   | 0,043 | 0,869 | 0,9999800 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,718 | 0,9999603 | 3,6   | 0,043 | 0,870 | 0,9999801 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,719 | 0,9999605 | 3,6   | 0,043 | 0,871 | 0,9999802 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,720 | 0,9999607 | 3,6   | 0,043 | 0,872 | 0,9999803 |
| 3,6                  | 0,043          | 0,721 | 0,9999609 | 3,6   | 0,043 | 0,873 | 0,9999804 |

Slika 72 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Hs za smjer WSW

| Pareto distribucija: |                |       |           |       |      |       |           |
|----------------------|----------------|-------|-----------|-------|------|-------|-----------|
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
|                      |                |       |           |       |      |       |           |
| alfa                 | X <sub>M</sub> |       | Ts (m)    | F(Ts) |      |       |           |
| 8                    | 0,82           | 2,182 | 0,9996022 | 8     | 0,82 | 2,594 | 0,9999003 |
| 8                    | 0,82           | 2,183 | 0,9996036 | 8     | 0,82 | 2,595 | 0,9999006 |
| 8                    | 0,82           | 2,184 | 0,9996051 | 8     | 0,82 | 2,596 | 0,9999009 |
| 8                    | 0,82           | 2,185 | 0,9996065 | 8     | 0,82 | 2,597 | 0,9999012 |
| 8                    | 0,82           | 2,186 | 0,9996080 | 8     | 0,82 | 2,598 | 0,9999015 |
| 8                    | 0,82           | 2,909 | 0,9999601 | 8     | 0,82 | 3,173 | 0,9999801 |
| 8                    | 0,82           | 2,910 | 0,9999602 | 8     | 0,82 | 3,174 | 0,9999802 |
| 8                    | 0,82           | 2,911 | 0,9999604 | 8     | 0,82 | 3,175 | 0,9999802 |
| 8                    | 0,82           | 2,912 | 0,9999605 | 8     | 0,82 | 3,176 | 0,9999803 |
| 8                    | 0,82           | 2,913 | 0,9999606 | 8     | 0,82 | 3,177 | 0,9999803 |

Slika 73 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Ts za smjer WSW



Nakon toga, u tablici za dugoročne valne prognoze određuju se vrijednosti Q pomoću sljedećeg izraza:

$$Q(H_K^T) = p(H_K > H_K^T) = \int_{H_K^T}^{+\infty} f(H_K) dH_K = \frac{1}{T} * \frac{T_m}{n}$$

te u skladu s dobivenom vrijednošću Q dobije se i 1-Q.

| T   | Q          | 1-Q       | $\mu$ | $\beta$ | $H_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | $\chi_M$ | $H_S^{Tpareto}$ |
|-----|------------|-----------|-------|---------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | 0,00039604 | 0,9996040 | 0,1   | 0,035   | 0,435           | 3,6      | 0,043    | 0,379           |
| 20  | 9,901E-05  | 0,9999010 | 0,1   | 0,035   | 0,496           | 3,6      | 0,043    | 0,557           |
| 50  | 3,9604E-05 | 0,9999604 | 0,1   | 0,035   | 0,536           | 3,6      | 0,043    | 0,719           |
| 100 | 1,9802E-05 | 0,9999802 | 0,1   | 0,035   | 0,567           | 3,6      | 0,043    | 0,871           |

| T   | Q          | 1-Q       | $\mu$ | $\beta$ | $T_S^{Tgumbel}$ | $\alpha$ | $\chi_M$ | $T_S^{Tpareto}$ |
|-----|------------|-----------|-------|---------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 5   | 0,00039604 | 0,9996040 | 1,25  | 0,1     | 2,380           | 8        | 0,82     | 2,184           |
| 20  | 9,901E-05  | 0,9999010 | 1,25  | 0,1     | 2,590           | 8        | 0,82     | 2,596           |
| 50  | 3,9604E-05 | 0,9999604 | 1,25  | 0,1     | 2,720           | 8        | 0,82     | 2,911           |
| 100 | 1,9802E-05 | 0,9999802 | 1,25  | 0,1     | 2,830           | 8        | 0,82     | 3,175           |

Slika 74 Dugoročne valne prognoze za smjer WSW

Za dobivene vrijednosti 1-Q iz tablice sa Slike 75. očitavaju se približne vrijednosti s prethodno navedenih tablica (Slika 71., Slika 72., Slika 73. i Slika 74.). U tablicu za dugoročne valne prognoze upišu se očitane vrijednosti te se unesu podaci o  $H_S^{Tgumbel}$ ,  $H_S^{Tpareto}$ ,  $T_S^{Tgumbel}$  i  $T_S^{Tpareto}$ .

Na taj su se način dobile dugoročne valne prognoze za povratni period od 5, 20, 50 i 100 godina.

| T   | $H_S^{Tgumbel}$ | $H_{1/10}^{Tgumbel}$ | $H_{1/100}^{Tgumbel}$ | $H_{MAX}^{Tgumbel}$ | $H_S^{Tpareto}$ | $H_{1/10}^{Tpareto}$ | $H_{1/100}^{Tpareto}$ | $H_{MAX}^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 5   | 0,435           | 0,374                | 0,726                 | 0,783               | 0,379           | 0,481                | 0,633                 | 0,682               |
| 20  | 0,496           | 0,423                | 0,828                 | 0,893               | 0,557           | 0,707                | 0,930                 | 1,003               |
| 50  | 0,536           | 0,455                | 0,895                 | 0,965               | 0,719           | 0,913                | 1,201                 | 1,294               |
| 100 | 0,567           | 0,479                | 0,947                 | 1,021               | 0,871           | 1,106                | 1,455                 | 1,568               |

Slika 75 Karakteristične valne visine za smjer WSW

| T   | $T_S^{Tgumbel}$ | $T_P^{Tgumbel}$ | $T_S^{Tpareto}$ | $T_P^{Tpareto}$ |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5   | 2,380           | 2,618           | 2,261           | 2,184           |
| 20  | 2,590           | 2,849           | 2,637           | 2,596           |
| 50  | 2,720           | 2,992           | 2,920           | 2,911           |
| 100 | 2,830           | 3,113           | 3,153           | 3,175           |

Slika 76 Karakteristični period vala za smjer WSW

Također su definirane karakteristične valne visine i periodi za povratne periode od 5, 20, 50 i 100 godina za incidentni smjera puhanja vjetra WSW.

Karakteristične valne visine i periodi mogu se izračunati prema sljedećim matematičkim formulama:

$$H_{1/10} = 1.27 * H_S ; H_{1/100} = 1.67 * H_S ; H_{max} = 1.8 * H_S ; T_P = 1.1 * T$$

## 4.2.) Zaključak dugoročnih valnih prognoza

Nastavno na izrađene Gumbel i Pareto distribucije za incidentne smjerove puhanja vjetra NNE, NE, W i WSW donosi se sljedeći zaključak.

Cilj navedenih distribucija je taj da se pripadajuće krivulje što više prilagode ulaznom uzorku te uspoređujući prethodno priložene krivulje distribucija dolazi se do zaključka kako se Gumbelova distribucija bolje prilagodila danom uzorku podataka.

Nastavno na navedeno, u nastavku je priložen sažetak značajnih valnih visina i perioda valova za petogodišnji i stogodišnji povratni period incidentnih smjerova puhanja vjetra NNE (sjever, sjeveroistok), NE (sjeveroistok), W (zapad) i WSW (zapad, jugozapad).

Za incidentni smjer **NNE (sjever, sjeveroistok)** utvrđuje se val **petogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,261 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 1,610 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **NNE (sjever, sjeveroistok)** utvrđuje se val **stogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,327 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 1,840 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **NE (sjeveroistok)** utvrđuje se val **petogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,270 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 1,651 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **NE (sjeveroistok)** utvrđuje se val **stogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,330 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 1,874 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **W (zapad)** utvrđuje se val **petogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,447 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 2,299 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **W (zapad)** utvrđuje se val **stogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,552 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 2,598 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **WSW (zapad, jugozapad)** utvrđuje se val **petogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,435 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 2,380 \text{ s}$$

Za incidentni smjer **WSW (zapad, jugozapad)** utvrđuje se val **stogodišnjeg povratnog perioda** sljedećih parametara:

$$H_S^{Gumbel} = 0,567 \text{ m}$$

$$T_S^{Gumbel} = 2,830 \text{ s}$$

Nastavno na priloženi sažetak, vidljivo je kako su valne visine za predmetnu lokaciju dosta niske što je i bilo za očekivati s obzirom na to kako se radi o vrlo zavučenoj lokaciji te s obzirom na veliki broj prirodnih prepreka. Upravo zbog prethodno navedenog razloga za očekivati je kako se ne mogu razviti valovi velikih amplituda. Nastavno na vrlo niske valne visine, čak i za stogodišnji povratni period, predmetna lokacija optimalna je kao sidrište za plovila.

## 5. Ansys AQWA program

### 5.1.) Općenito o programu

**ANSYS AQWA** je program za proračun djelovanja valova, vjetra i morskih struja na plutajuće i fiksne morske konstrukcije uključujući: sustave za plutajuću proizvodnju, skladištenje i pretovar, platforme, privezišta za brodove, valobrane i mnoge druge.

ANSYS Hydrodynamic Diffraction i ANSYS Hydrodynamic Time Response dva su ključna modula unutar ANSYS AQWA softverskog paketa koji su dizajnirani za analizu hidrodinamičkih djelovanja na pomorskim strukturama te brodovima. U nastavku ću navesti više informacija o svakom od prethodno navedenih modula.

**ANSYS Hydrodynamic Diffraction** omogućava inženjerima analizu hidrodinamičkih učinaka odnosno proučavanje ponašanja valova pri djelovanju na strukturu ili brod te proučavanje kako ta djelovanja utječu na kretanje objekta. Računa hidrodinamičke sile, tlakove i opterećenja koja plutajuće i fiksne konstrukcije doživljavaju zbog interakcije s valovima.

**ANSYS Hydrodynamic Time Response** omogućava analizu dinamičkog ponašanja plutajućih objekata u vremenskoj domeni odnosno simulira dinamičko ponašanje konstrukcija tijekom vremena. To uključuje analizu ponašanja struktura u odgovoru na valove, vjetar, struje i druge dinamičke sile tijekom vremena. Može simulirati djelovanja na moru, ekstremne valne uvjete, učinke sporih pomaka i druge uvjete.

Ukratko, ANSYS Hydrodynamic Diffraction usmjeren je na analizu djelovanja valova, vjetra i morskih struja na pomorske konstrukcije, dok ANSYS Hydrodynamic Time Response služi za dinamičke simulacije u vremenskoj domeni kako bi se ocijenila izvedba i stabilnost plutajućih konstrukcija u različitim uvjetima. Ovaj program služi za izračun djelovanja na naše konstrukcije što nam u konačnici pruža sigurnost i pouzdanost konstrukcija pri izvedbi istih u izazovnim morskim djelovanjima.

## 5.2.) Izbor tipskog plovila

Za potrebe ovog diplomskog rada kao primjer tipskog plovila uzeto je sljedeće plovilo s priloženim tehničkim specifikacijama (duljina, širina, gaz plovila i ostalo).

Navedene tehničke specifikacije odnose se na plovilo duljine 50 m koje je reprezentativni model u daljnjem korištenju programa Ansys AQWA.



Slika 77 Prikaz tipskog plovila duljine 50 m

(Izvor: <https://qr.boats.com/qr/details/description/7673129?partyId=39146>, pristupljeno 27. 8. 2023. godine)



Slika 78 Prikaz tipskog plovila duljine 50 m

(Izvor: <https://qr.boats.com/qr/details/description/7673129?partyId=39146>, pristupljeno 27. 8. 2023. godine)

Length Overall: 49.92 m (163' 9")

Length Waterline (full load): 41.20 m (135' 2")

Max Beam Overall: 9.26 m (30' 5")

Draft at Full Load (inc. Keel): 2.65 m (8' 8")

Displacement (light ship): 347,790 kgs

Gross Tonnage: 498 GT

Class: ABS ⚡ A1 Commercial Yachting Service, ⚡ AMS, LY2 Compliant

Flag of Registry: Malta

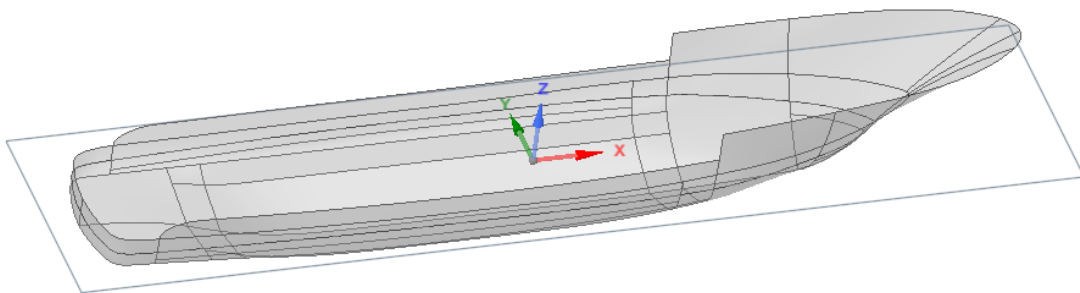
Lying: Tuscany, Italy

*Slika 79 Tehničke specifikacije tipskog plovila duljine 50 m*

### 5.3.) Proračun u Ansys AQWA

#### 5.3.1.) Definiranje ulaznih parametara za proračun u Ansys AQWA programu

Kako bi se uopće mogao započeti proračun u Ansys AQWA programu, bilo je potrebno zadati model broda koji je povećan na željenu vrijednost odnosno na 50 metara. Također, bilo je potrebno definirati i razinu mora koja je određena na način da se postavila XY ravnina koja dijeli brod na dva dijela – gornji i donji dio. U nastavku je prikazana fotografija prethodno navedenog modela broda. Nadalje, s obzirom na to kako je lokacija obuhvata u Tivatskom zaljevu gdje su dubine mora u rasponu od 15 do 25 metara dubine, za potrebe ovog programa odabrana je dubina od 20 metara.



*Slika 80 Model broda od 50 metara duljine*

Kao ulazni podatak, iz kataloga je odabrano uže PSR 2000 12 Strand napravljeno od kombinacije poliestera i olefin-kopolimera koje nudi visoki omjer čvrstoće i težine te je odlična zamjena za teža poliesterska uža. Karakterizira ga niska rastezljivost, visoka čvrstoća, nije sklono samostalnom uvijanju ili izvijanju pod utjecajem sile ili težine, ima izvrsnu otpornost na habanje te se jednostavno spaja. Isto tako, ima izvrsnu otpornost na UV zračenje te otpornost na suho i mokro habanje. U nastavku se nalazi fotografija odabranog užeta iz kataloga.

| Nominal Diameter |    | Size (circ in.) | Approximate Weight |         | Minimum Tensile Strength Spliced Rope |             | Minimum Tensile Strength ISO Unspliced Rope |             |
|------------------|----|-----------------|--------------------|---------|---------------------------------------|-------------|---|-------------|
| inch             | mm |                 | lbs/100ft          | kg/100m | lbs                                   | MT (tonnes) | lbs   | MT (tonnes) |
| 1                | 24 | 3               | 30                 | 44.6    | 25,000                                | 11.3        | 27,800                                      | 12.6        |
| 1-1/8            | 28 | 3-1/2           | 35                 | 52.1    | 32,000                                | 14.5        | 35,600                                      | 16.2        |
| 1-1/4            | 30 | 3-3/4           | 39                 | 58      | 38,000                                | 17.2        | 42,200                                      | 19.1        |
| 1-5/16           | 32 | 4               | 47                 | 69.9    | 43,000                                | 19.5        | 47,800                                      | 21.7        |
| 1-1/2            | 36 | 4-1/2           | 60                 | 89.3    | 54,000                                | 24.5        | 60,000                                      | 27.2        |
| 1-5/8            | 40 | 5               | 72                 | 107.2   | 65,000                                | 29.5        | 72,200                                      | 32.8        |
| 1-3/4            | 44 | 5-1/2           | 84                 | 125     | 75,000                                | 34.0        | 83,300                                      | 37.8        |
| 2                | 48 | 6               | 102                | 151.8   | 92,000                                | 41.7        | 102,200                                     | 46.4        |
| 2-1/8            | 52 | 6-1/2           | 120                | 178.6   | 108,000                               | 49.0        | 120,000                                     | 54.4        |
| 2-1/4            | 56 | 7               | 136                | 202.4   | 125,000                               | 56.7        | 138,900                                     | 63.0        |
| 2-1/2            | 60 | 7-1/2           | 160                | 238.1   | 147,000                               | 66.7        | 163,300                                     | 74.1        |
| 2-5/8            | 64 | 8               | 176                | 261.9   | 158,000                               | 71.7        | 175,600                                     | 79.7        |
| 2-3/4            | 68 | 8-1/2           | 199                | 296.2   | 184,000                               | 83.5        | 204,400                                     | 92.7        |
| 3                | 72 | 9               | 231                | 343.8   | 207,000                               | 93.9        | 230,000                                     | 104.4       |
| 3-1/4            | 80 | 10              | 286                | 425.6   | 252,000                               | 114.3       | 280,000                                     | 127.0       |
| 3-5/8            | 88 | 11              | 342                | 509     | 306,000                               | 138.8       | 340,000                                     | 154.3       |
| 4                | 96 | 12              | 413                | 614.6   | 369,000                               | 167.4       | 410,000                                     | 186.0       |

Tensile Strengths are determined in accordance with Cordage Institute 1500, Test Methods for Fiber Rope. Weights are calculated at linear density under standard preload (200d<sup>2</sup>) plus 5%. See reverse side for application and safety information.

Slika 81 Primjer odabranog užeta

(Izvor: [https://www.cortlandcompany.com/wp-content/uploads/2020/07/CT\\_TL\\_044\\_0522\\_US\\_Rope\\_Specifications\\_Ires.pdf](https://www.cortlandcompany.com/wp-content/uploads/2020/07/CT_TL_044_0522_US_Rope_Specifications_Ires.pdf), pristupljeno 3. 9. 2023. godine)

Nakon toga, određeni su sljedeći ulazni parametri užeta:

| sidreno uže      |             |                   |
|------------------|-------------|-------------------|
| d                | 0,06        | m                 |
| m                | 2,381       | kg/m              |
| density          | 1380        | kg/m <sup>3</sup> |
| density of water | 1025        | kg/m <sup>3</sup> |
| m submerged      | 0,61        | kg/m              |
| A eqv            | 0,001725    | m <sup>2</sup>    |
| d eqv            | 0,046870    | m                 |
| d eqv/d          | 0,781167135 | -                 |
| EA               | 3924        | kN                |

Slika 82 Parametri odabranog užeta

Za potrebe ovog zadatka odabrano je uže promjera 60 milimetara (mm). Njegova masa odabrana je prema prethodno priloženom katalogu te iznosi 2,381 kg/m i označava masu suhog užeta. Za gustoću poliesterskog užeta odabrana je vrijednost od 1380 kg/m<sup>3</sup>. Kako bi se odredila čvrstoću užeta, korištena je sljedeća formula:



$$\text{axial stiffness} = \begin{cases} 1.18 \times 10^5 d^2 \text{ kN} & \text{for nylon ropes} \\ 1.09 \times 10^6 d^2 \text{ kN} & \text{for polyester ropes} \\ 1.06 \times 10^6 d^2 \text{ kN} & \text{for polypropylene ropes} \end{cases}$$

Slika 83 Formula za izračun čvrstoće užeta

(Izvor: <https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Ropewire.Axialandbendingstiffness.htm>, pristupljeno 3. 9. 2023. godine)

Kako bi se odredila ekvivalentna površina, potrebno je koristiti masu potopljenog užeta. Prethodno navedena masa određuje se prema sljedećoj formuli:

$$m_{\text{submerged}} = m * \frac{(\rho_{\text{uže}} - \rho_{\text{more}})}{\rho_{\text{uže}}}$$

Nakon što je određena masu potopljenog užeta, prema sljedećoj formuli se određuje ekvivalentna površina užeta:

$$A_{\text{ekvivalentno}} = \frac{m_{\text{submerged}}}{(\rho_{\text{uže}} - \rho_{\text{more}})}$$

Ekvivalentni promjer užeta određuje se prema sljedećoj formuli:

$$d_{\text{ekvivalentno}} = \sqrt{\frac{A_{\text{ekvivalentno}} * 4}{\pi}}$$

Također, bitno je napomenuti kako su za potrebe ove simulacije usvojeni prethodno definirani period vala  $T_s = 2,830$  s te značajna valna visina  $H_s = 0,567$  m.

S obzirom na to kako su određeni svi potrebni ulazni podaci, u nastavku slijedi proračun u programu Ansys AQWA.

### 5.3.2.) Definiranje mreže broda - mesh

Kako bi se pripremio model za simulaciju, sljedeći korak koji je nužno napraviti je određivanje mreže (mesh) odnosno geometrije modela broda. Postupak meshinga uključuje podjelu geometrije modela broda na manje elemente, najčešće trokute i četverokute za 2D analizu ili tetraedre i heksaedre za 3D analizu, kako bi se olakšala numerička analiza. Ovi elementi čine mrežu koja se koristi za rješavanje matematičkih jednadžbi koje opisuju ponašanje modela.

U nastavku slijedi kratko objašnjenje određenih pojmova koji će se također spominjati u daljnjoj razradi ovog diplomskog rada:

**Time step (vremenski korak)** – određeni trenutak u vremenu odnosno interval simulacije tijekom kojeg se bilježe podaci o pomacima, silama i slično

**Output step (izlazni korak)** – ovaj podatak generira izlazne podatke u našoj simulaciji

**Duration (trajanje)** - vremenski period trajanja simulacije

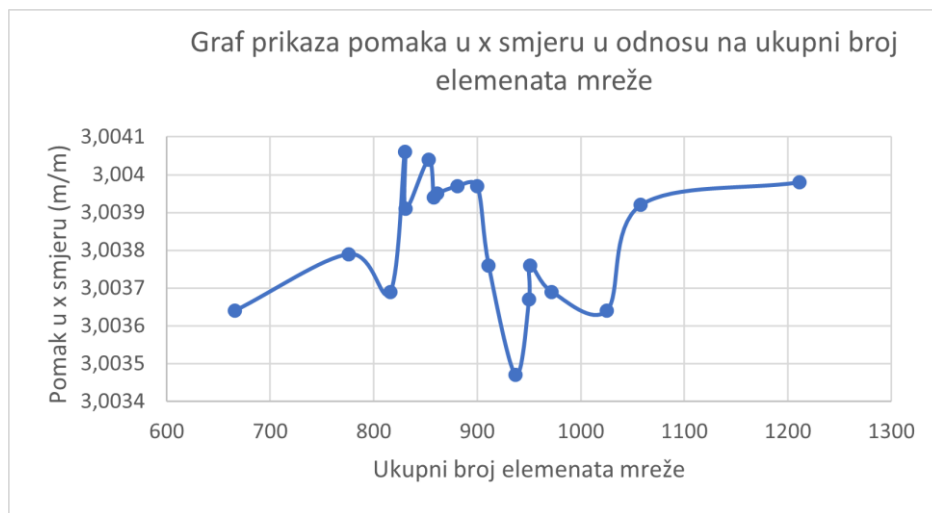
Za vrijeme proračuna mreže modela određeni parametri bili su konstantni, a konkretno se odnosi na trajanje simulacije te time step i output step parametra. Za trajanje simulacije određeno je 5 min odnosno 300 s, dok su time step i output step jednaki i iznose 0,01 s.

Mesh je ključan korak jer utječe na preciznost i brzinu same simulacije te uključuje odabir veličine elemenata i gustoće mreže. Što je mreža gušća rezultati će biti precizniji, ali će sama analiza podataka trajati duže. Nastavno na navedeno, potrebno je odrediti dovoljno malu mrežu da simulacija bude dovoljno precizna, a opet ne premalu kako sama analiza podataka ne bi trajala dugo. U ovom programu proces određivanja mreže započeo je od krupnije mreže prema sitnijoj te su promatrana 4 grafa: pomaci centra mase u x, y i z smjeru te potezna sila. Odabrana je ona mreža kada je nastupila konvergencija prethodno navedenih podataka odnosno odlučeno je parametar prije same divergencije. Odabrana mreža koja ide u daljnji proračun je 881 ukupnih elemenata.

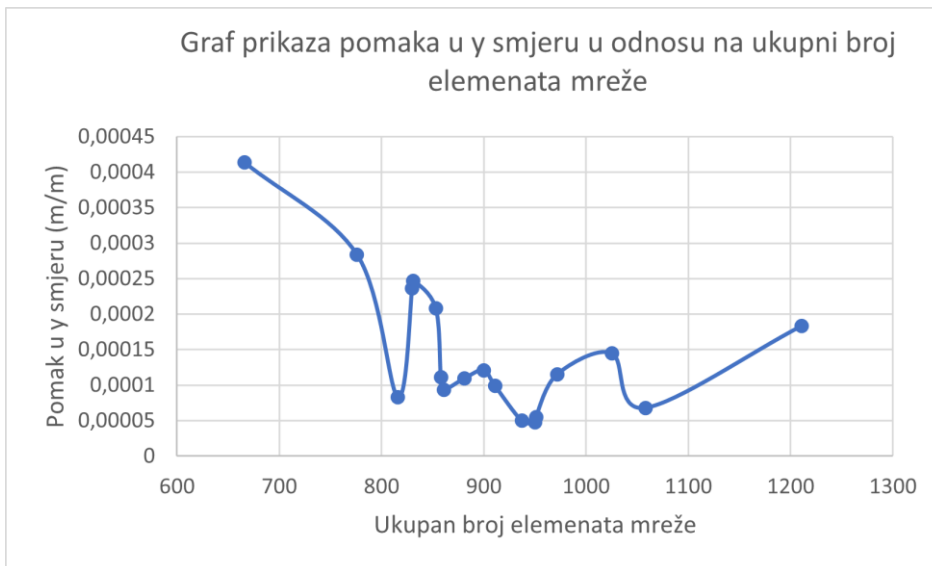
|                                  |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Element size (m)                 | 1,2         | 1,15        | 1,1         | 1,05        | 1           | 0,95        | 0,94        | 0,93        | 0,92        | 0,91        | 0,9         | 0,89        |
| Defeature size (m)               | 2,2         | 2,15        | 2,1         | 2,05        | 2           | 1,95        | 1,94        | 1,93        | 1,92        | 1,91        | 1,9         | 1,89        |
| Total elements                   | 515         | 541         | 586         | 632         | 666         | 776         | 816         | 830         | 831         | 853         | 858         | 861         |
| Shortest period (s)              | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         |
| H (m)                            | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           |
| Duration (s)                     | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         |
| Highest frequency (Hz)           | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     |
| Displacement - x direction (m/m) | 3,00384     | 3,00342     | 3,00359     | 3,00404     | 3,00364     | 3,00379     | 3,00369     | 3,00406     | 3,00391     | 3,00404     | 3,00394     | 3,00395     |
| Displacement - y direction (m/m) | 0,000420533 | 0,000143042 | 0,000537822 | 8,32337E-05 | 0,000413373 | 0,000283622 | 8,28809E-05 | 0,000236568 | 0,000247064 | 0,000208417 | 0,000110841 | 9,37313E-05 |
| Displacement - z direction (m/m) | 0,98356     | 0,98355     | 0,98355     | 0,98355     | 0,98356     | 0,98353     | 0,98354     | 0,98355     | 0,98355     | 0,98355     | 0,98355     | 0,98356     |
| Force (kN)                       | 0,49834     | 0,49833     | 0,4985      | 0,49845     | 0,49819     | 0,49858     | 0,49864     | 0,4985      | 0,49849     | 0,49851     | 0,49853     | 0,49852     |

|             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,88        | 0,87        | 0,86        | 0,85        | 0,84        | 0,83        | 0,82        | 0,81        | 0,8         | 0,75        |
| 1,88        | 1,87        | 1,86        | 1,85        | 1,84        | 1,83        | 1,82        | 1,81        | 1,8         | 1,75        |
| 881         | 900         | 911         | 937         | 950         | 951         | 972         | 1025        | 1058        | 1211        |
| 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         | 2,7         |
| 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           | 1           |
| 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         | 300         |
| 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     | 0,37037     |
| 3,00397     | 3,00397     | 3,00376     | 3,00347     | 3,00367     | 3,00376     | 3,00369     | 3,00364     | 3,00392     | 3,00398     |
| 0,000109364 | 0,000120983 | 9,88517E-05 | 4,97932E-05 | 4,73671E-05 | 5,52565E-05 | 0,000115352 | 0,000144942 | 6,79268E-05 | 0,000183334 |
| 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     | 0,98356     |
| 0,49849     | 0,49849     | 0,49852     | 0,49838     | 0,49849     | 0,49831     | 0,49844     | 0,49854     | 0,49856     | 0,49861     |

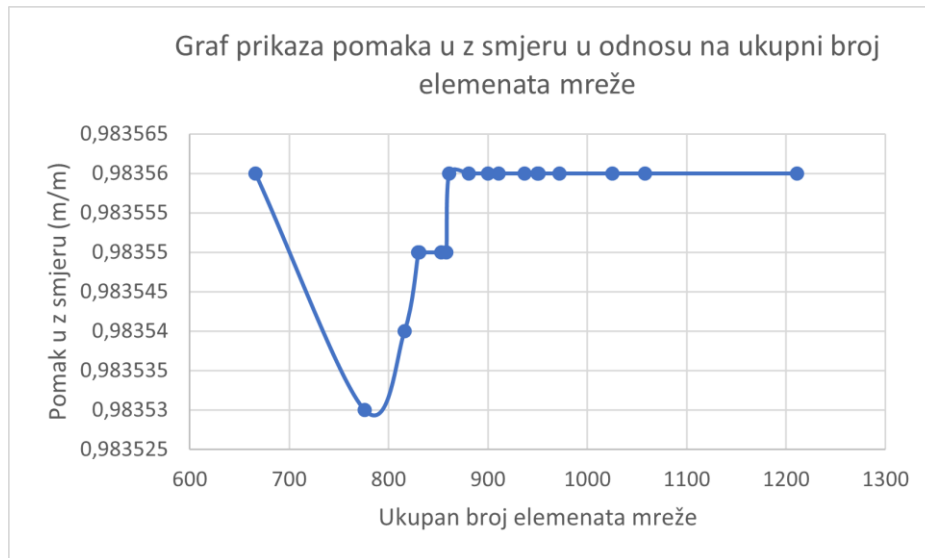
Slika 84 Tablični prikaz proračuna mreže modela broda



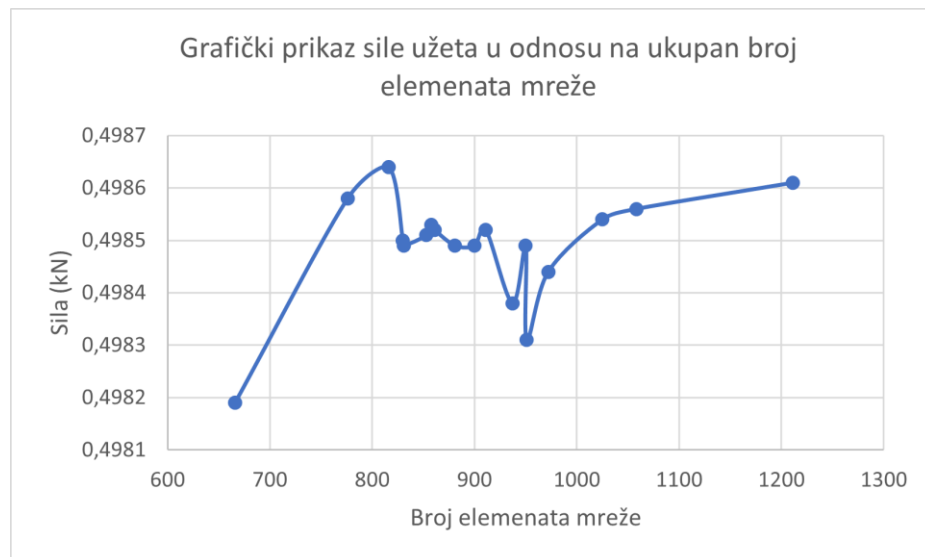
Slika 85 Graf prikaza pomaka centra mase u x smjeru u odnosu na ukupan broj elemenata mreže



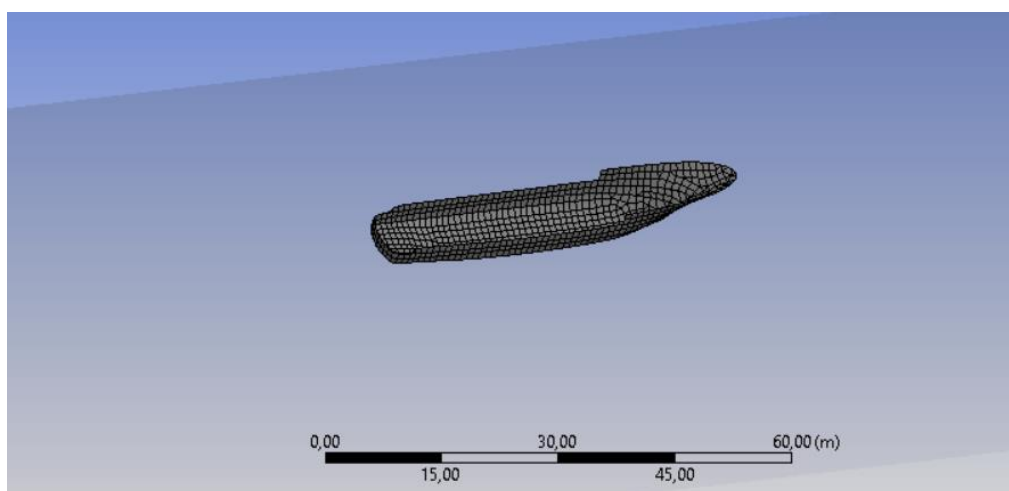
Slika 86 Graf prikaza pomaka centra mase u y smjeru u odnosu na ukupan broj elemenata mreže



Slika 87 Graf prikaza pomaka centra mase u z smjeru u odnosu na ukupan broj elemenata mreže



Slika 88 Grafički prikaz sile užeta u odnosu na ukupan broj elemenata



Slika 89 Prikaz odabrane mreže modela broda

### 5.3.3.) Definiranje time step-a i output step-a simulacije

Kako bi se u sljedećem koraku odredio time step i output step odnosno vremenski korak simulacije i izlazni korak simulacije, odabirat ćemo istu vrijednost za oba parametra.

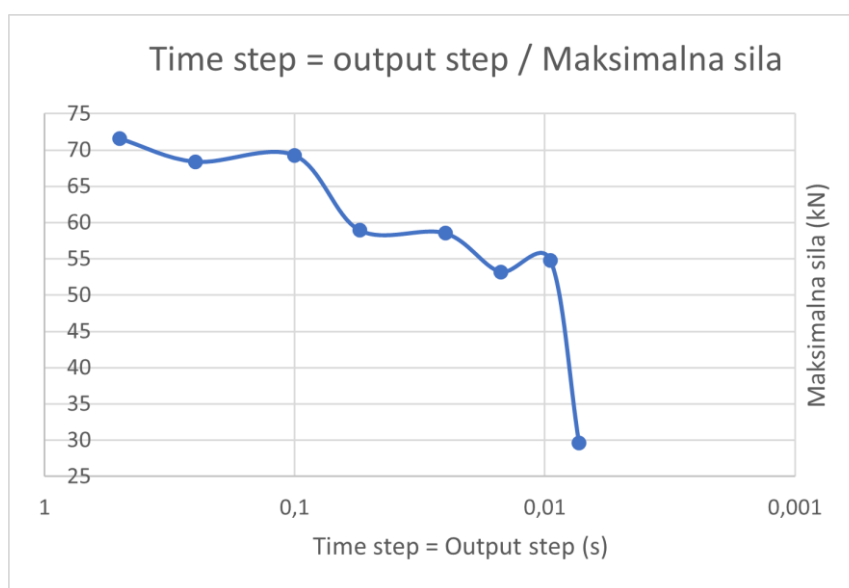
Sada je u ovom koraku određena mreža modela broda (881 ukupan element) te je za trajanje simulacije određena vrijednost od 7200 s odnosno 2 sata. Razlog zašto je odabrano veće trajanje simulacije je broj podataka – što je broj podataka veći, obrada istih je puno preciznija. Također, prethodno navedeni parametri (mesh i trajanje simulacije) biti će konstantni za cijelo vrijeme obrade podataka.

Odabir ovih parametara ovisi o brzini promjene dinamičkih varijabli u modelu. Ako su promjene brze, treba se odabrati manji time step kako bi se uhvatile te promjene. Proračun kreće od većeg iznosa prema manjem. Što se iznos time step-a i output step-a sve više smanjuje, analiza podataka je preciznija, ali programu treba puno više vremena za proračun. Isto kao i za prethodni korak odabira idealne mreže modele broda, odabire se onaj time step i output step kada nastupi konvergencija promatranog podatka (u ovom slučaju maksimalne potezne sile užeta), a prije divergencije istog.

Odabrani time step i output step koji ide u daljnji proračun je 0,025 s.

| Time step = Output step (s) | 0,5      | 0,25     | 0,1      | 0,055    | <b>0,025</b>    | 0,015    | 0,0095   | 0,0073   |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Maximum force (kN)          | 71,56026 | 68,37611 | 69,25873 | 58,94638 | <b>58,53359</b> | 53,20253 | 54,79801 | 29,65613 |

Slika 90 Tablični prikaz proračuna time step i output step



Slika 91 Grafički prikaz odnosa maksimalne sile s time step-om i output step-om

Na prethodno priloženom grafu, X os je prikazana u logaritamskom mjerilu.

### 5.3.4.) Definiranje trajanja simulacije – duration

Kako bi se odredilo idealno trajanje simulacije, sada se za konstantne parametre uzimaju prethodno određena mreža modela broda te time step i output step.

Trajanje simulacije je izuzetno bitno radi sigurnosti odnosno kako bi se uhvatili svi relevantni događaji, a konkretno se odnosi na maksimalnu silu užeta. Sada se u ovom slučaju ne prati konvergencija promatranog parametra već se odabire ono trajanje kada se promatrani parametar stabilizira i kada nema više značajnih promjena. To znači da simulacija traje dovoljno dugo te daljnjim povećanjem simulacije neće doći do promjene veličine promatranog parametra odnosno promjena vremena više ne utječe na njegovu veličinu (u ovom slučaju maksimalne potezne sile užeta).

Proračun kreće od manje satne vrijednosti prema većoj te se može primijetiti kako se maksimalna potezna sila užeta krenula stabilizirati od 2 sata i 30 min te je upravo to vrijeme odabrano kao idealno trajanje simulacije.

Sila u užetu koja je dobivena na temelju proračuna je u iznosu od 65,08372 kN što je bilo i za očekivati za zadanu veličinu broda od 50 metara duljine te na valne visine koje se pojavljuju u predmetnom području.

| Trajanje (h)         | 0,5      | 0,75     | 1        | 1,25     | 1,5      | 1,75     | 2        | 2,25     | <b>2,5</b>      | 2,75     | 3        | 3,15     |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Maksimalna sila (kN) | 28,63055 | 42,54838 | 51,03943 | 51,03943 | 51,03943 | 58,53359 | 58,53359 | 58,53359 | <b>65,08372</b> | 65,08372 | 65,08372 | 65,08372 |

Slika 92 Tablični prikaz proračuna trajanja simulacije



Slika 93 Grafički prikaz odnosa trajanja simulacije i maksimalne sile

### 5.3.5.) Utjecaj perioda vala na veličinu maksimalne potezne sile užeta

Kada je definirana mreža modela broda, time step, output step te trajanje simulacije, sljedeći korak je provjera utjecaja perioda vala na veličinu potezne maksimalne sile užeta.

S obzirom na to kako je ulazni parametar simulacije bio period od  $T_s = 2,830$  s te je u skladu s navedenim valna duljina jednaka  $L_s = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} = 12,5$  m dolazi se do zaključka kako se ispod odabranog modela broda od 50 metara duljine može smjestiti 4 vala prethodno navedene valne duljine. To znači da brod oscilira gore/dolje te zapravo s takvom valnom duljinom ne daje maksimalnu poteznu silu užeta.

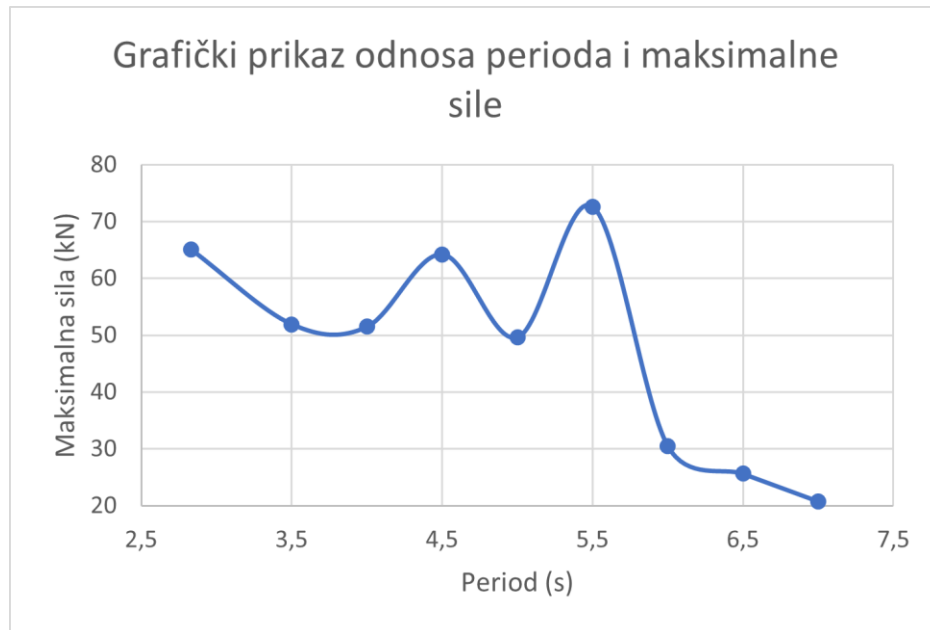
Kako bi se zaključilo kolika je maksimalna potezna sila užeta te ima li utjecaj povećanje perioda na povećanje maksimalne potezne sile užeta, povećava se period vala odnosno valna duljina te se uspoređuje s odabranom duljinom broda od 50 metara.

Očekivano je kako će se maksimalna potezna sila pojaviti na 80% do 100% duljine broda.

Na donjim tablicama prikazan je omjer valne duljine i duljine broda (postotak) u odnosu na maksimalnu silu odnosno promjenu maksimalne sile u odnosu na period. S obzirom na prethodno navedeno, maksimalna potezna sila užeta pojavila se na 94,46% broda odnosno pri valnoj duljini od 47,23 m. To znači da se brod nalazi na jednom valu te da mu prova oscilira gore dolje što u konačnici rezultira maksimalnom poteznom silom užeta u iznosu od 72,63007 kN. Upravo će ta sila biti ona na temelju koje će se odrediti karakteristike sidrenog sustava.

|                             |          |          |          |         |          |                 |          |          |         |
|-----------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|-----------------|----------|----------|---------|
| <b>Period (s)</b>           | 2,83     | 3,5      | 4        | 4,5     | 5        | <b>5,5</b>      | 6        | 6,5      | 7       |
| <b>Maksimalna sila (kN)</b> | 65,08372 | 51,92499 | 51,48934 | 64,2221 | 49,61697 | <b>72,63007</b> | 30,50306 | 25,62402 | 20,7597 |

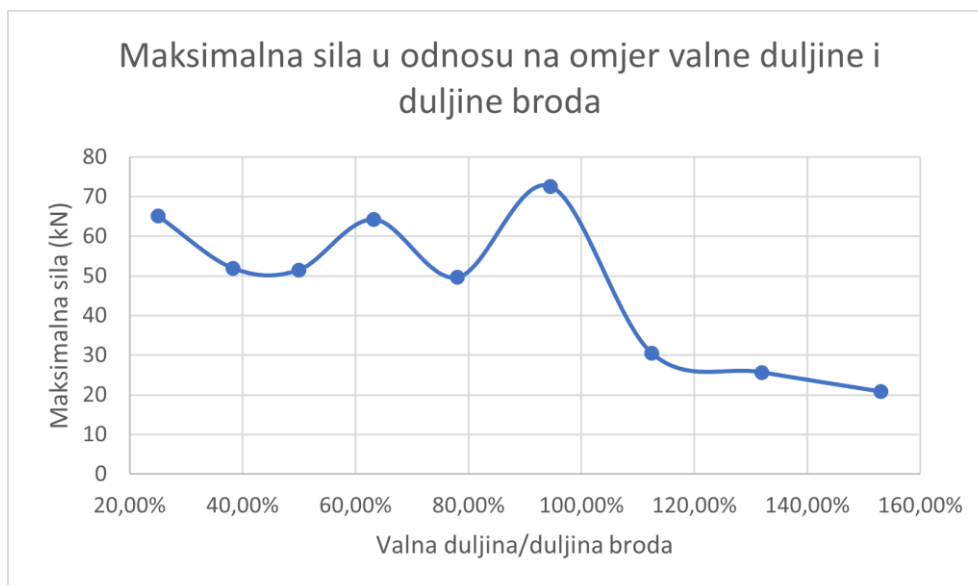
Slika 94 Tablični prikaz odnosa perioda i maksimalne potezne sile užeta



Slika 95 Grafički prikaz odnosa perioda vala i maksimalne potezne sile užeta

|                                    |          |          |          |         |          |                 |          |          |         |
|------------------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|-----------------|----------|----------|---------|
| <b>Valna duljina/duljina broda</b> | 25,01%   | 38,25%   | 49,96%   | 63,23%  | 78,07%   | <b>94,46%</b>   | 112,41%  | 131,93%  | 153,01% |
| <b>Maksimalna sila (kN)</b>        | 65,08372 | 51,92499 | 51,48934 | 64,2221 | 49,61697 | <b>72,63007</b> | 30,50306 | 25,62402 | 20,7597 |

Slika 96 Tablični prikaz odnosa valne duljine/duljine broda i maksimalne potezne sile užeta



Slika 97 Grafički prikaz maksimalne potezne sile užeta u odnosu na omjer valne duljine i duljine broda

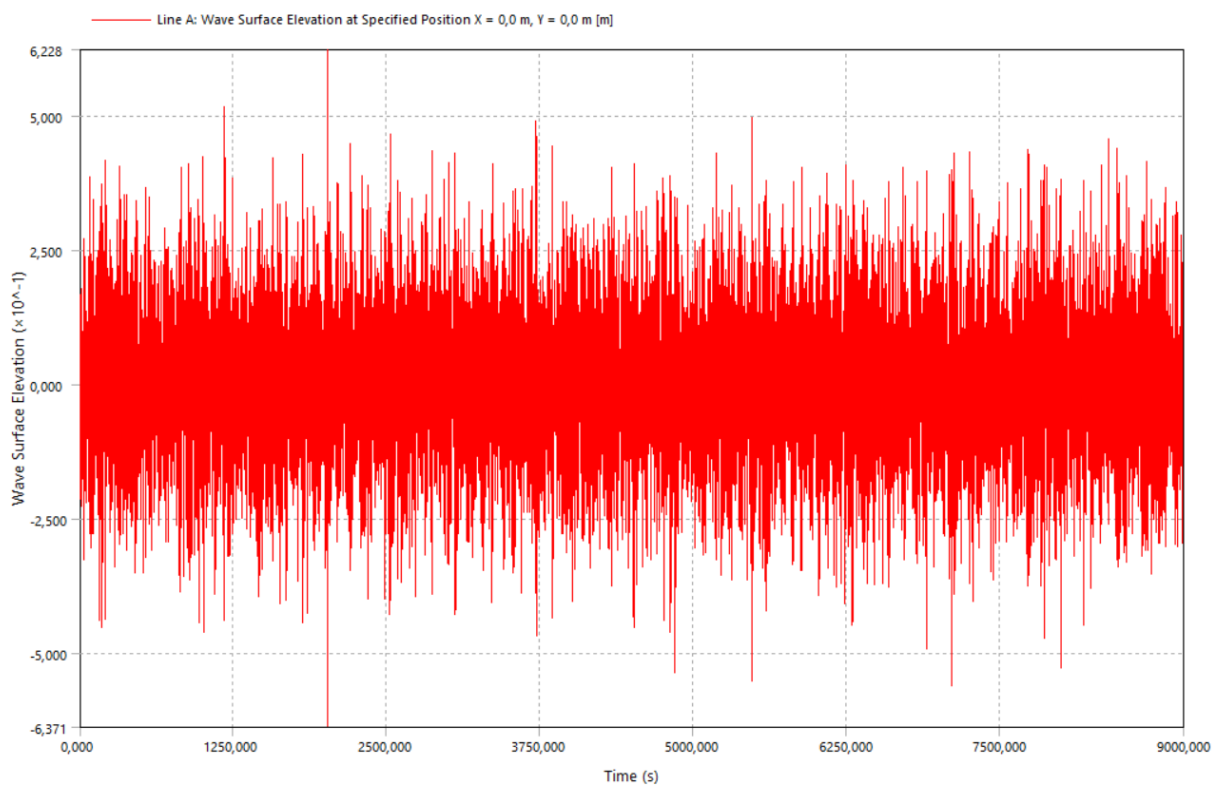


### 5.3.6.) Rezultati proračuna i interpretacija istih

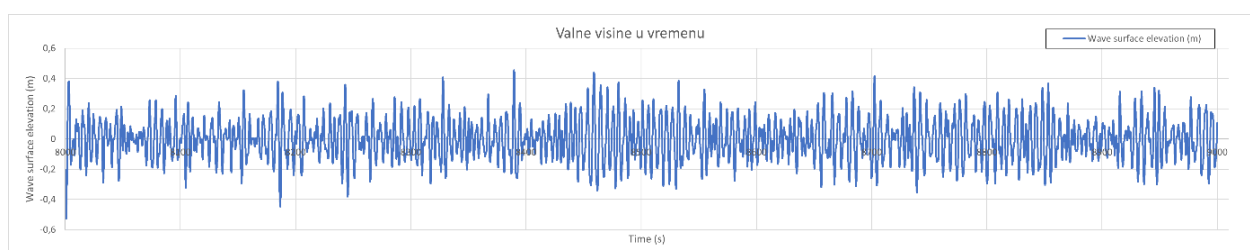
U nastavku ovog poglavlja prikazani su krajnji rezultati proračuna u Ansys AQWA programu te interpretacija istih.

#### Prikaz valnog polja u vremenskoj domeni

Na sljedećim fotografijama (Slika 99. i Slika 100.) može se vidjeti prikaz valnog polja u vremenskoj domeni. Slika 99. ima vremensku skalu od 0 do 9000 s te je isto prikazano na x osi, dok se na y osi može vidjeti vrijednosti valnih visina izražene u metrima. Vršne vrijednosti predstavljaju brjegove i dolove valova. Na Slici 100., čija je vremenska skala uvećana odnosno prikazuje vremensku skalu od 8000 do 9000 s, mogu se jasno vidjeti prethodno navedeni brjegovi i dolovi. Također, primjećuje se kako se između dva brjega nalazi zadani period vala od  $T_s = 5,5$  s. U nastavku je usporedno gledano više grafova kako bi se u konačnici došlo do zaključka uzrokovanja poteznih sila užeta broda.



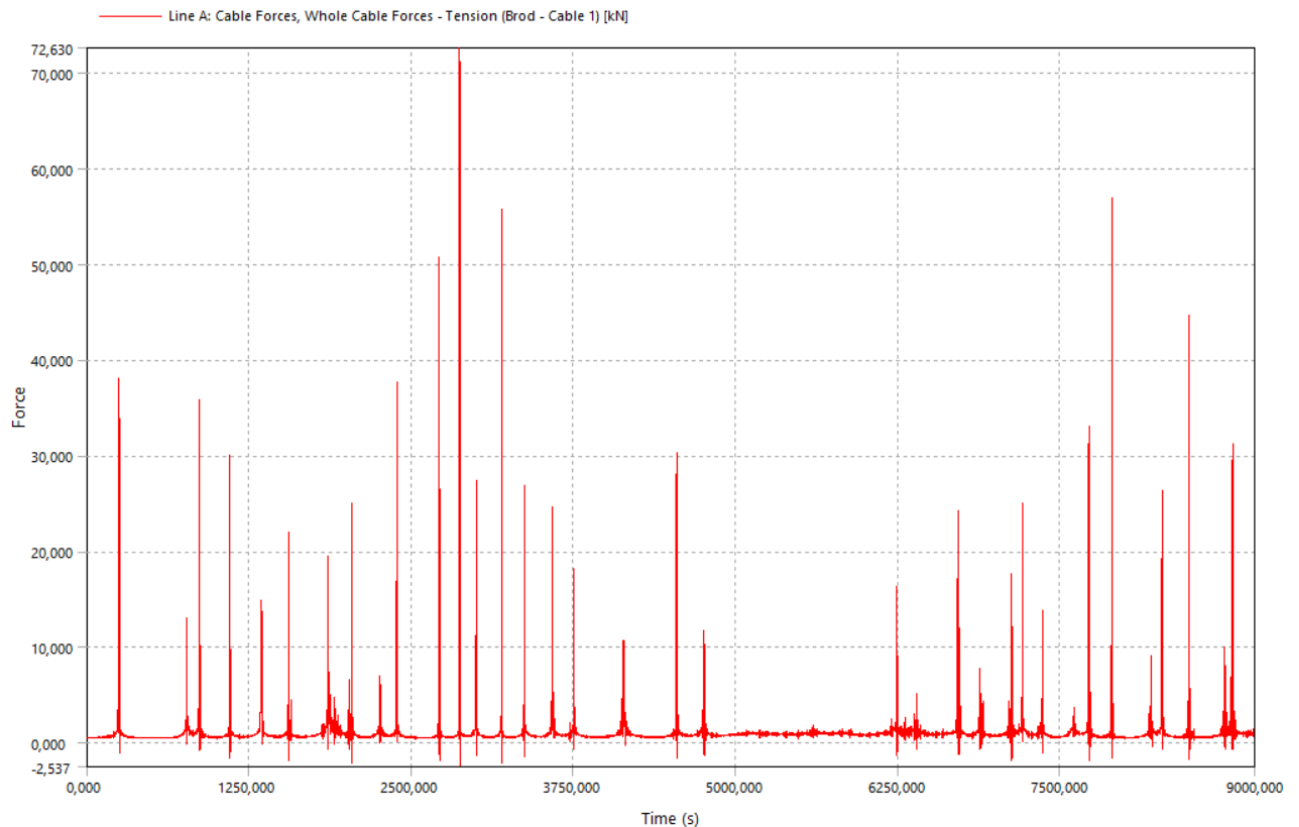
Slika 98 Prikaz valne visine u vremenskoj domeni



Slika 99 Prikaz valne visine na uvećanoj vremenskoj skali

### Prikaz poteznih sila užeta u vremenskoj domeni

Na sljedećoj fotografiji (Slika 101.) može se vidjeti prikaz poteznih sila užeta na vremenskoj skali od 0 do 9000 s. Kako bi se u potpunosti mogla razumjeti pozadina vršnih vrijednosti sila te kako bi se mogao dati konkretan odgovor što točno uzrokuje potezne sile užeta, treba se uvesti još nekoliko mehanizama te ih promatrati od jednom.



Slika 100 Prikaz poteznih sila užeta u vremenskoj domeni

Postoje tri mehanizma koji generiraju poteznu silu užeta:

- pomak u smjeru x osi odnosno surge (odmicanje),
- pomak u z smjeru odnosno heave (izdizanje) te
- pomak u ry smjeru odnosno pitch (rotacija).

Mjerna jedinica za surge i heave je metar (m), dok je za pitch mjerna jedinica stupanj (°). Bitno je naglasiti kako je surge najčešće efekt pojave više uzastopnih valova dok pitch i heave mogu biti uzrokovani samo jednim valom.

Svaki od prethodno navedenih mehanizama sastoji se od sljedećih utjecaja:

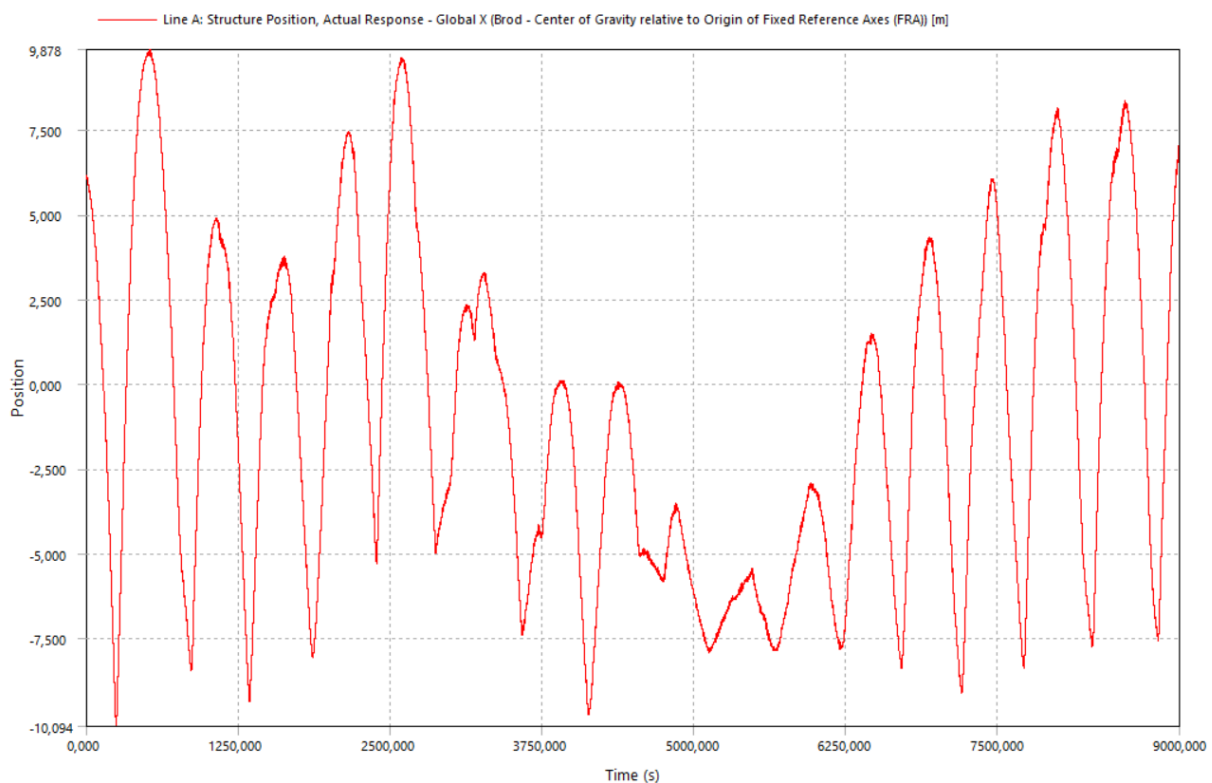
- Actual response – superpozicija svih efekata koji djeluju na brod
- Wave frequency response – utjecaj valova
- Low frequency response – valovi niskih frekvencija koji imaju dulje periode, a time i veće valne duljine

te se na osnovu prethodno navedenog može definirati sljedeća formula:

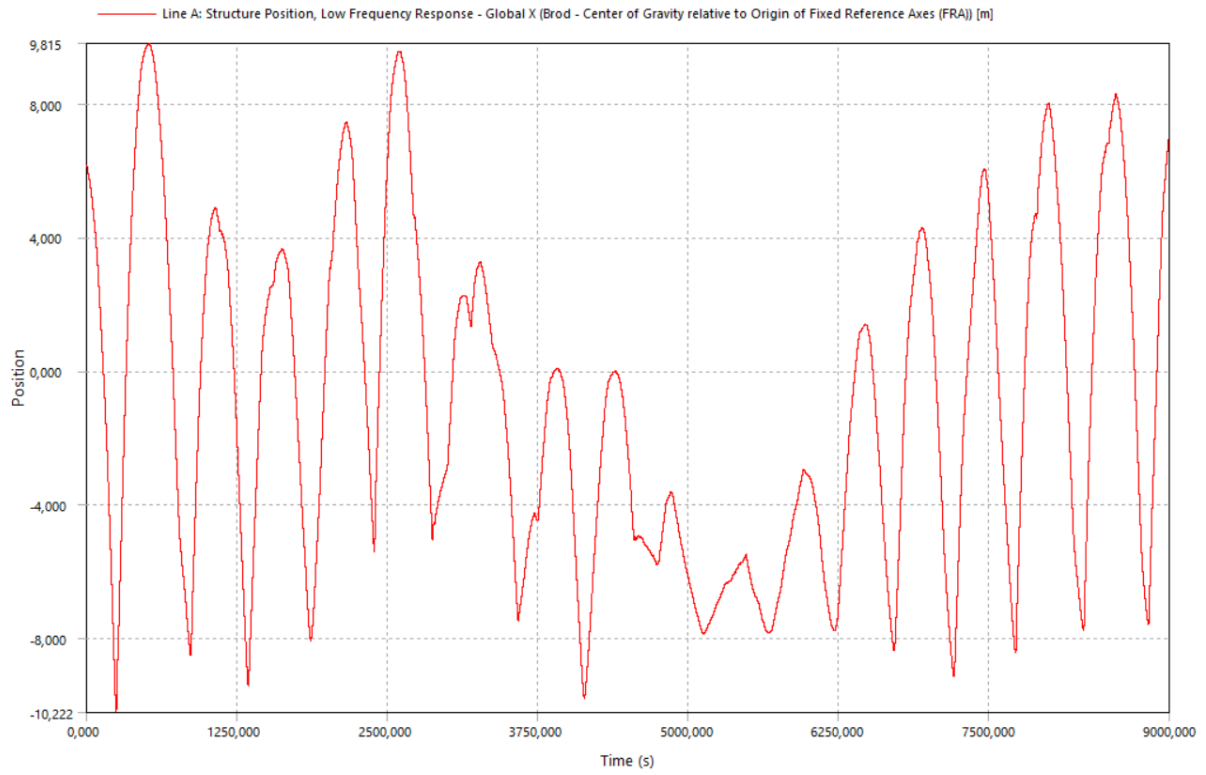
$$\text{Actual response} = \text{Wave frequency response} + \text{Low frequency response}$$

U nastavku je prikazana cijela vremenska domena za prethodno navedene mehanizme te njihovi popratni utjecaji, ali se detaljnija interpretacija primjenjuje od Slike 111. do Slike 117. uključujući i njih. Kako bi se razumjelo odakle su uvećane prethodno navedene slike, u nastavku su prikazani grafovi za actual response, wave frequency response i low frequency response za surge, heave i pitch u vremenskoj domeni od 0 do 9000 s.

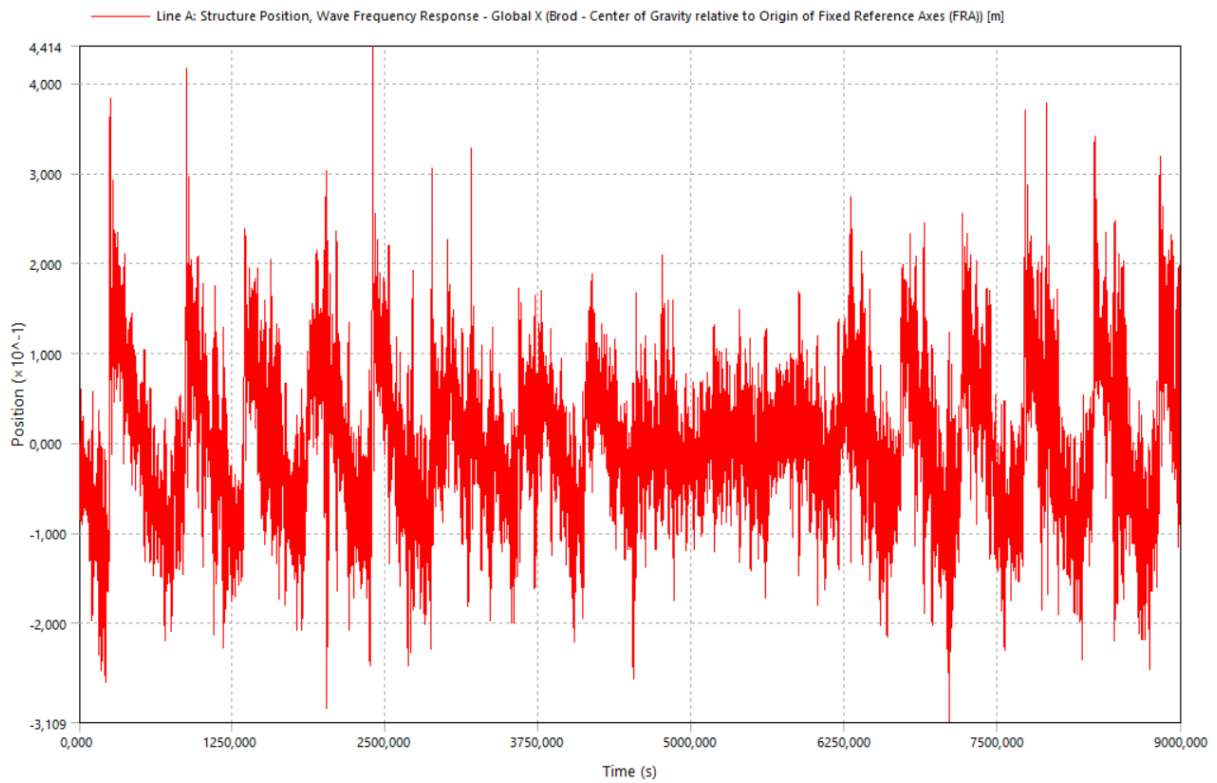
### Pomak u smjeru x – surge



Slika 101 Pomak u x smjeru - actual response

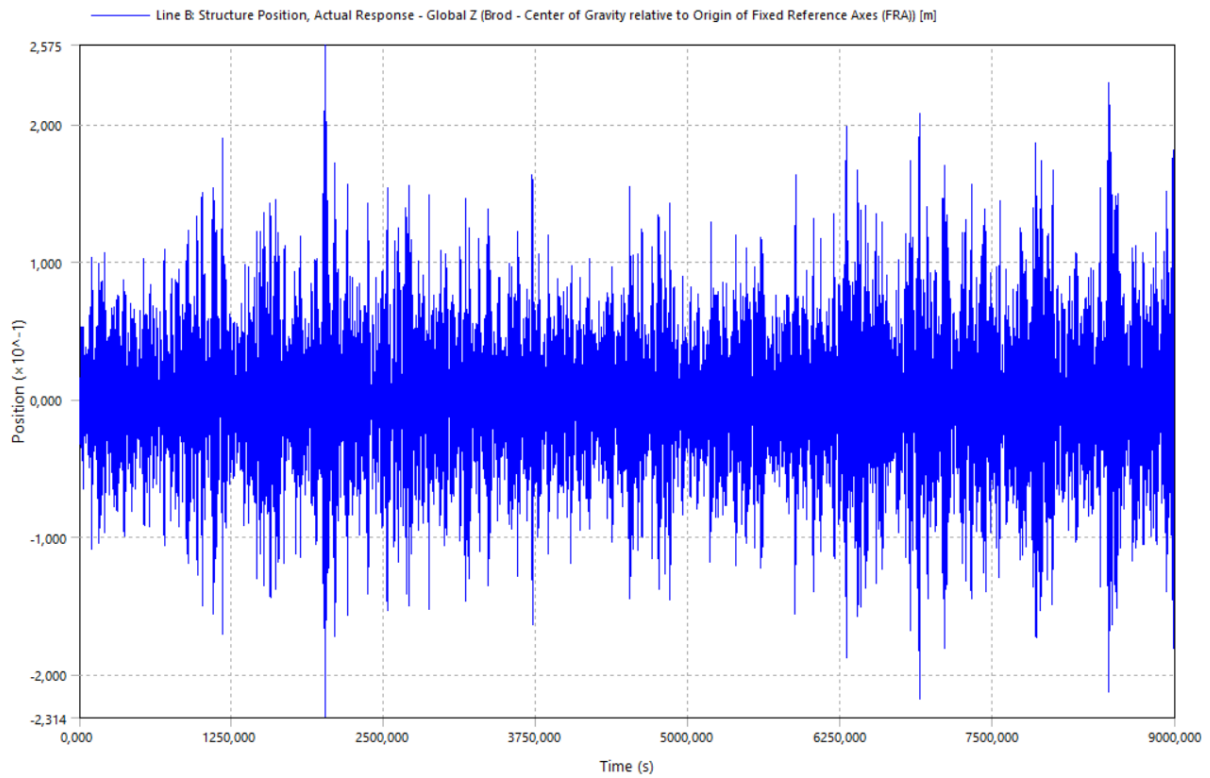


Slika 102 Pomak u x smjeru - low frequency response

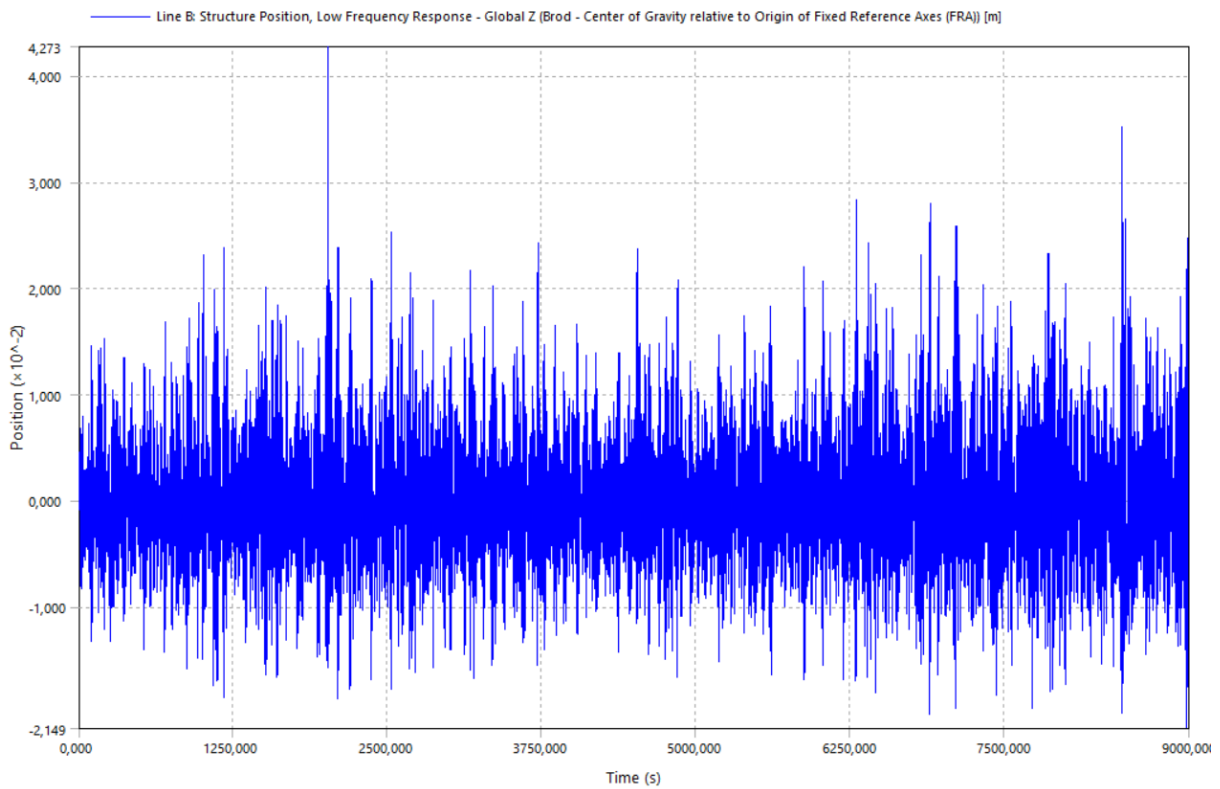


Slika 103 Pomak u x smjeru - wave frequency response

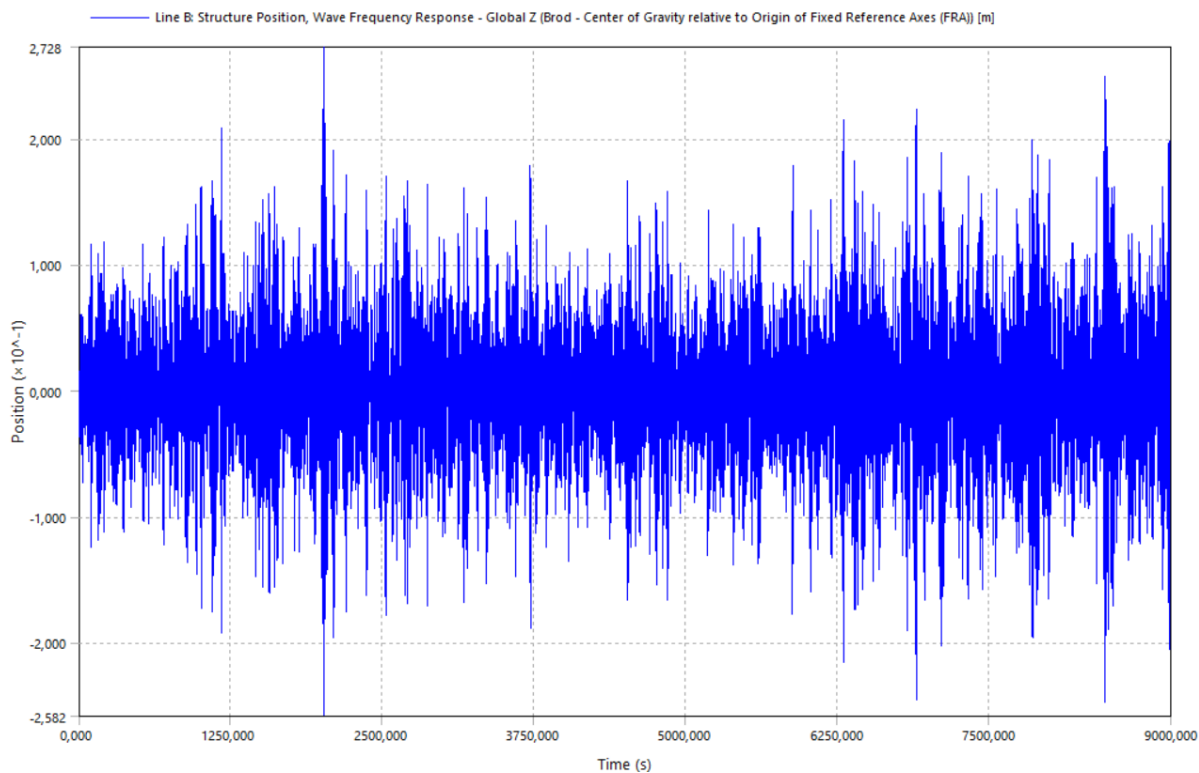
**Pomak u smjeru z – heave**



*Slika 104 Pomak u z smjeru - actual response*

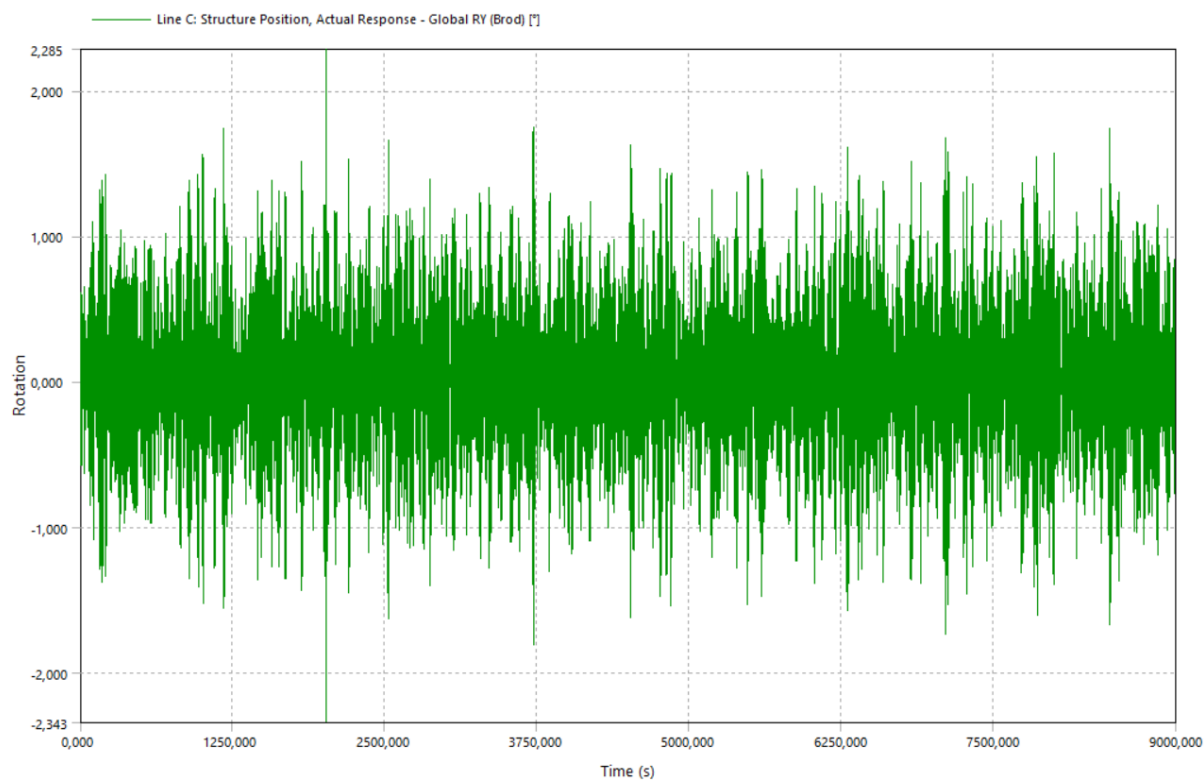


*Slika 105 Pomak u z smjeru - low frequency response*

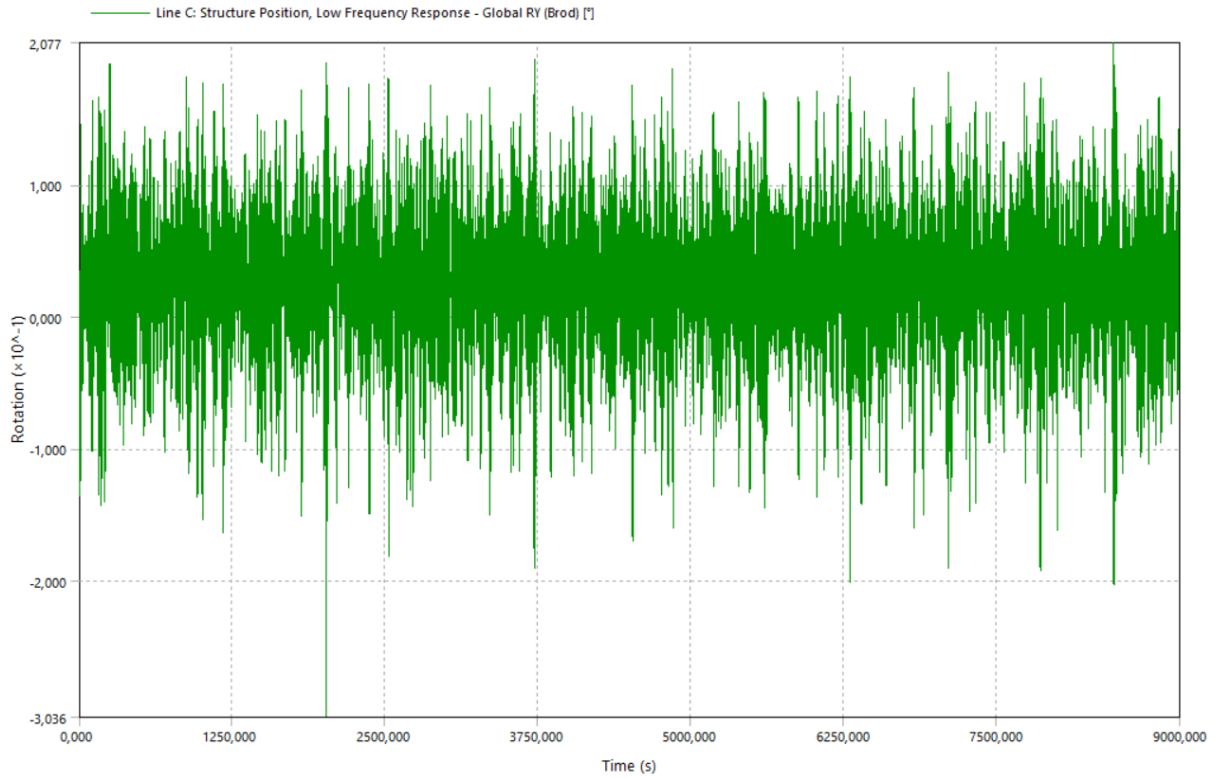


Slika 106 Pomak u z smjeru - wave frequency response

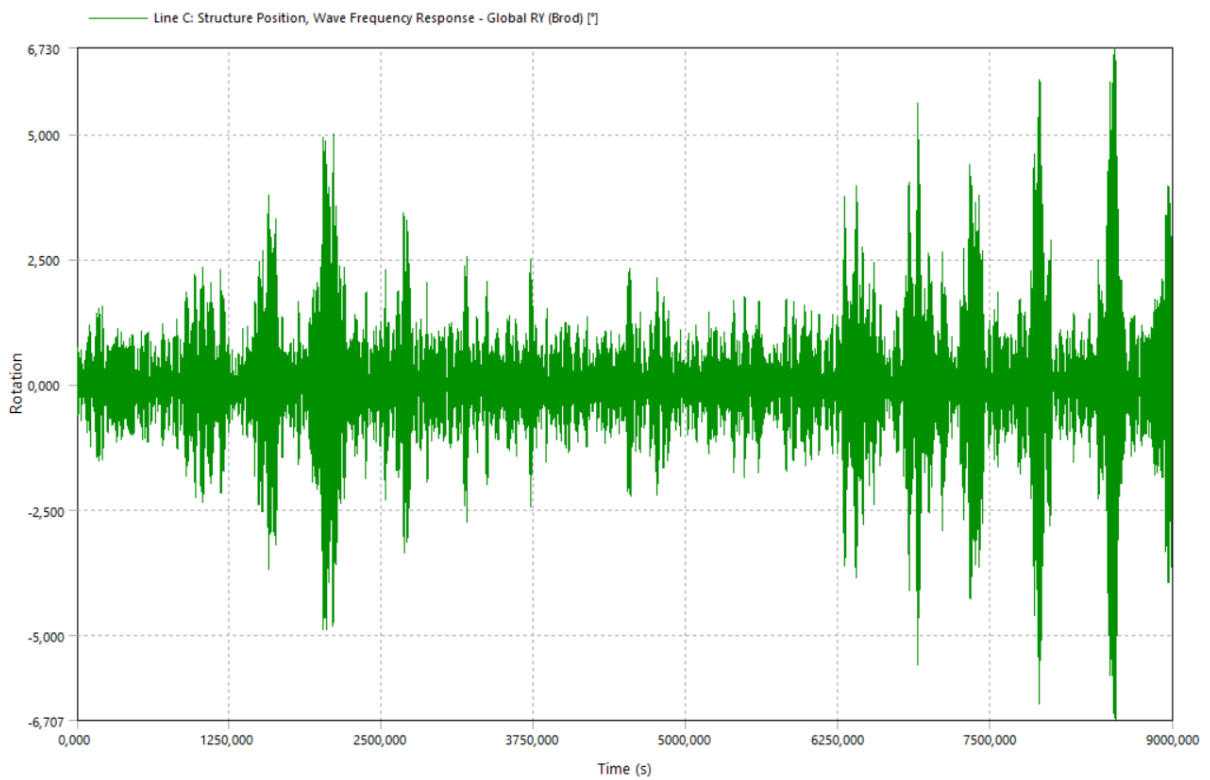
**Pomak u smjeru ry – pitch**



Slika 107 Pomak u ry smjeru - actual response



Slika 108 Pomak u ry smjeru - low frequency response



Slika 109 Pomak u ry smjeru - wave frequency response

U nastavku slijedi interpretacija grafova te zaključak što uzrokuje koje potezne sile.

Kako bi se razumjela interpretacija sljedećih grafova, trebaju se svi zajedno paralelno promatrati. Na Slici 111. mogu se prepoznati tri vrste poteznih sila jer su vrlo slične iznosom i periodičnošću. Ako se gleda s lijeva na desno definiraju se sljedeće grupe poteznih sila: 1. i 4. predstavljaju jednu vrstu poteznih sila, 2. i 5. bi drugu vrstu poteznih sila te 3. treću vrstu poteznih sila. Kako bi se lakše razumjela interpretacija sila, uvode se sljedeće oznake prethodno navedenih sila: prva grupa – Sila 1, druga grupa – Sila 2 te treća grupa – Sila 3.

Sila 1: na grafovima je teško raspoznat o kojem se utjecaju točno radi, ali ako se detaljnije pregledaju prikazi simulacije Sile 1, može se primijetiti kako je dominantan utjecaj pomaka u ry smjeru odnosno pitch – konop nije skroz zategnut tako da sila nije pod utjecajem pomaka u x smjeru te pomak u smjeru z nije značajan.

Sila 2: dominantan je utjecaj pomaka u x smjeru odnosno surge, što se može jasno vidjeti na Slici 112. i Slici 115., odnosno postoji poklapanje vršnih vrijednosti sa surgeom. Također, kod ovih poteznih sila u trenutku zatezanja može se primijetiti pojava dvije vršne vrijednosti poteznih sila. Razlog tome je zatezanje užeta dva puta – valovi koji nailaze na brod su dovoljno brzi tako da kad se brod nategne i ima tendenciju krenuti put naprijed, nailazi drugi val koji ponovno odguruje brod te zateže užu. Također, na prikazu simulacije za Silu 2 jasno se može vidjeti kako se konop zateže te kako je dominantan utjecaj pomaka u x smjeru.

Sila 3: može se primijetiti dominacija pitcha – jasnije se vidi na Slici 117. gdje su prikazani low i wave frequency response gdje je znatna dominacija wave frequency responsea.



Također, na Slici 112. može se primijetiti kako uzlazna i silazna krivulja za surge nije glatka – razlog za to su pomaci od utjecaja valova. Kako se uže nategne, a valovi i dalje nailaze, oni ga gurkaju nazad i uzrokuju tu hrapavost krivulje. Isto se može primijetiti na fotografijama iz simulacije za Silu 3.

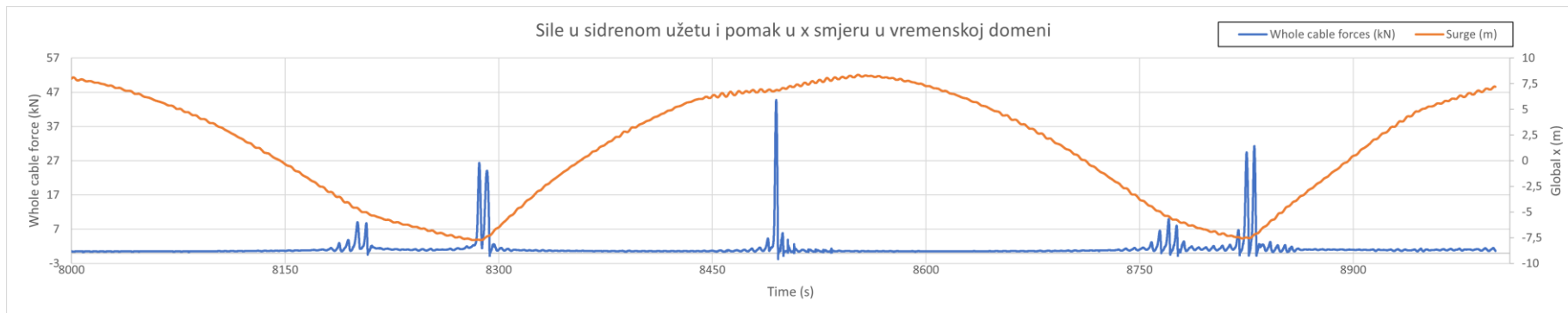
Na sljedećim slikama (Slika 115. do Slika 117. uključujući i njih) prikazane su preklopljene krivulje za wave frequency response i low frequency response.

Na Slici 115. jasno se može vidjeti dominantan utjecaj low frequency responsea (vidi se po skali na y osima). Također, u ovom se grafu može primijetiti i refleksiju valova od brod u trenutku od 8300 s. Kada se brod zaustavi odnosno kada se konop zategne, valovi i dalje nailaze na brod te se odbijaju od isti (zato je u trenutku 8300 s val nešto veći). Također, u trenutku od 8000 s do 8300 s može se primijetiti kako su to valovi koji tjeraju brod put nazad odnosno uzrokuju zatezanje konopa.

Što se tiče Slike 116., postoji dominantan utjecaj wave frequency responsea dok kod Slike 117. dominantan utjecaj ima wave frequency response te je veći od actual responsea iz razloga što je u kontrafazi s low frequency responseom i njihovim zbrajanjem dobije se umanjeni actual response.



Slika 110 Prikaz valnog polja u vremenskoj domeni



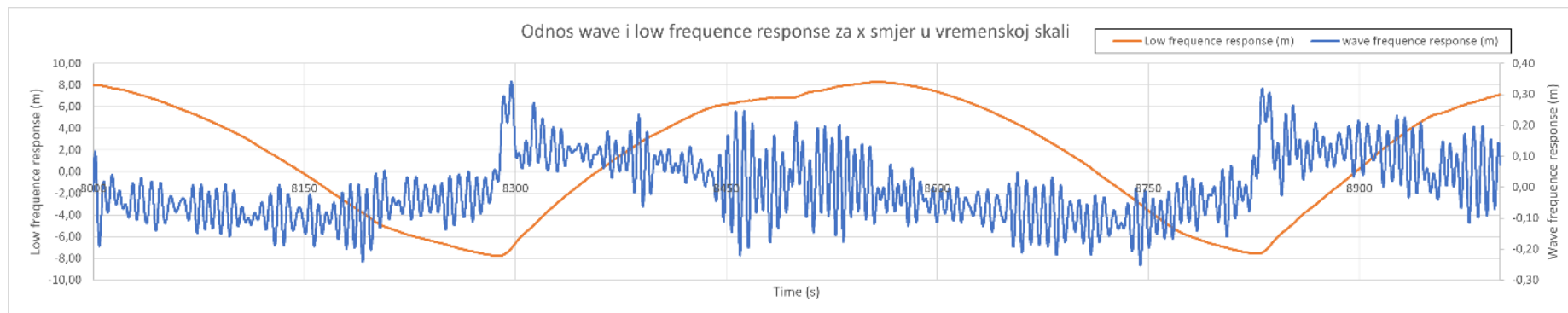
Slika 111 Sile u sidrenom užetu i pomak u x smjeru u vremenskoj domeni



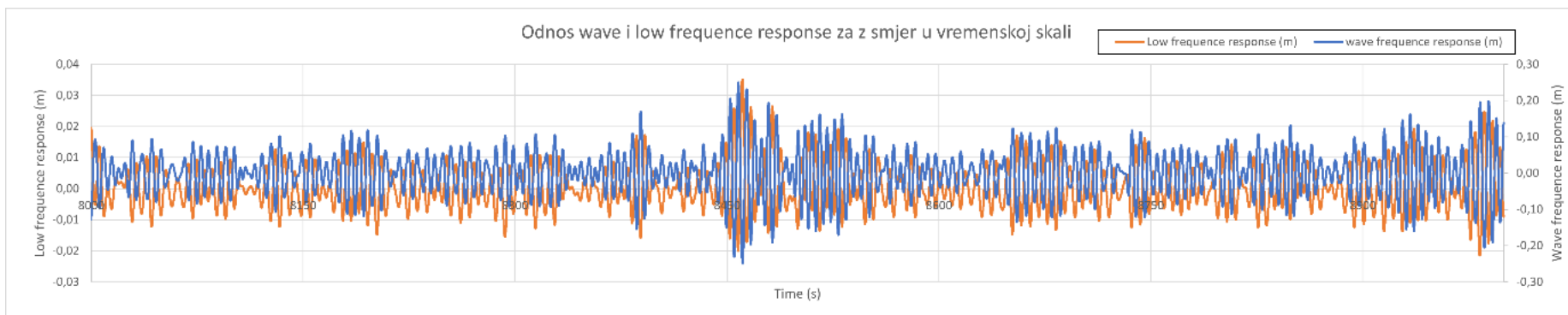
Slika 112 Sile u sidrenom užetu i pomak u z smjeru u vremenskoj domeni



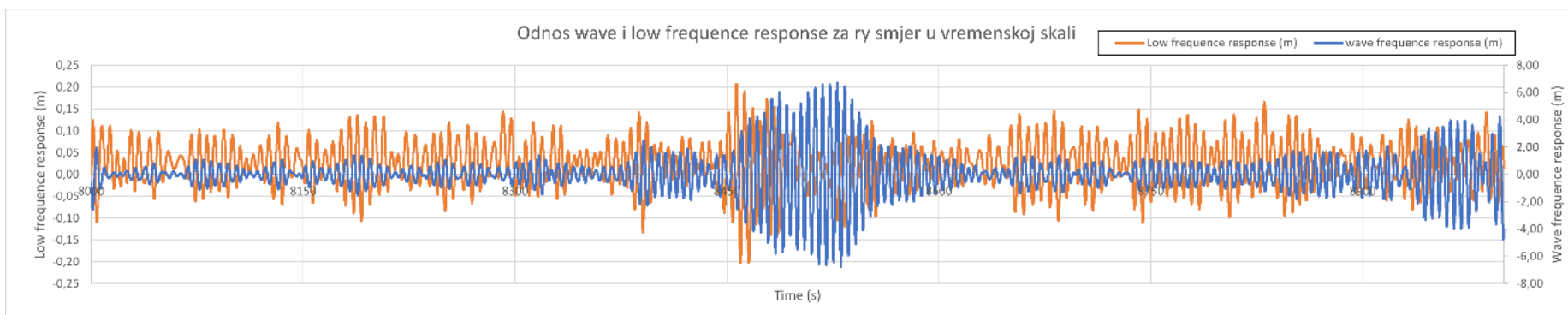
Slika 113 Sile u sidrenom užetu i pomak u ry smjeru u vremenskoj domeni



Slika 114 Odnos wave i low frequency response za x smjer u vremenskoj skali



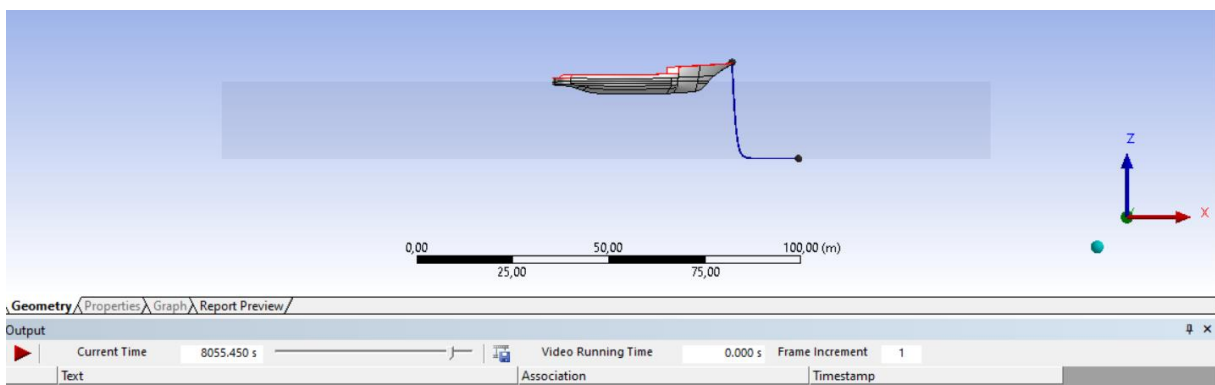
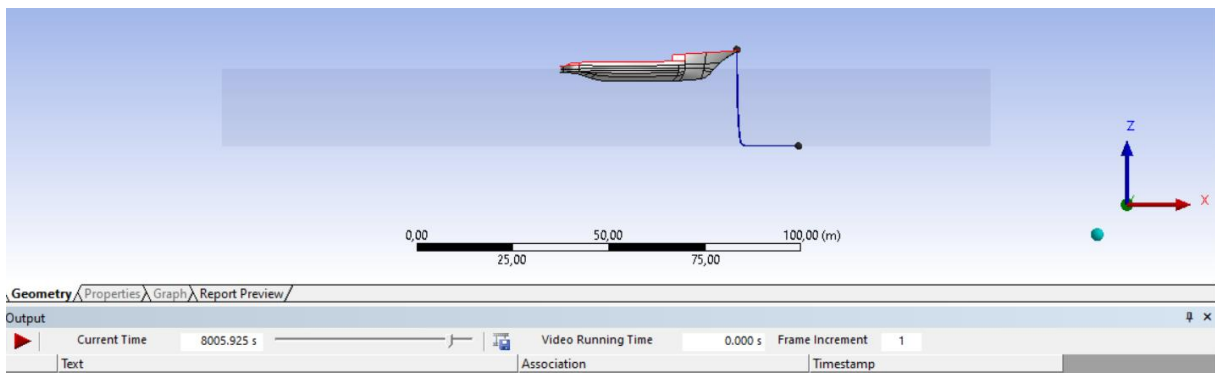
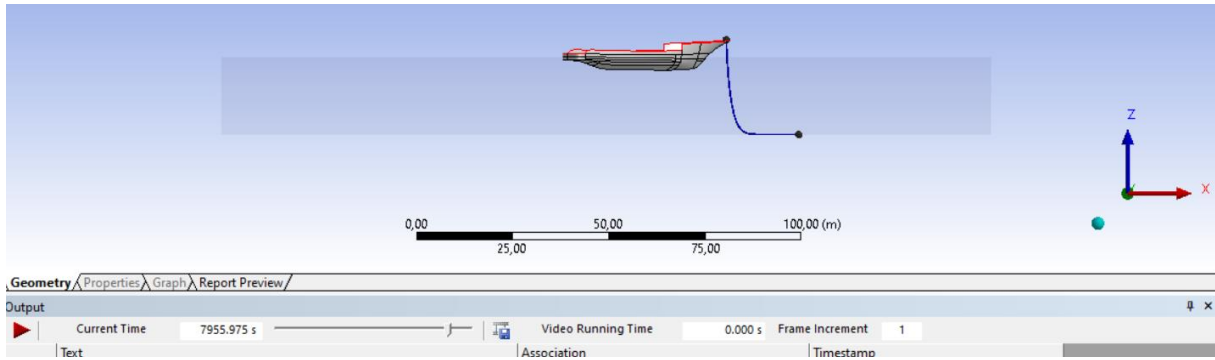
Slika 115 Odnos wave i low frequency response za z smjer u vremenskoj skali

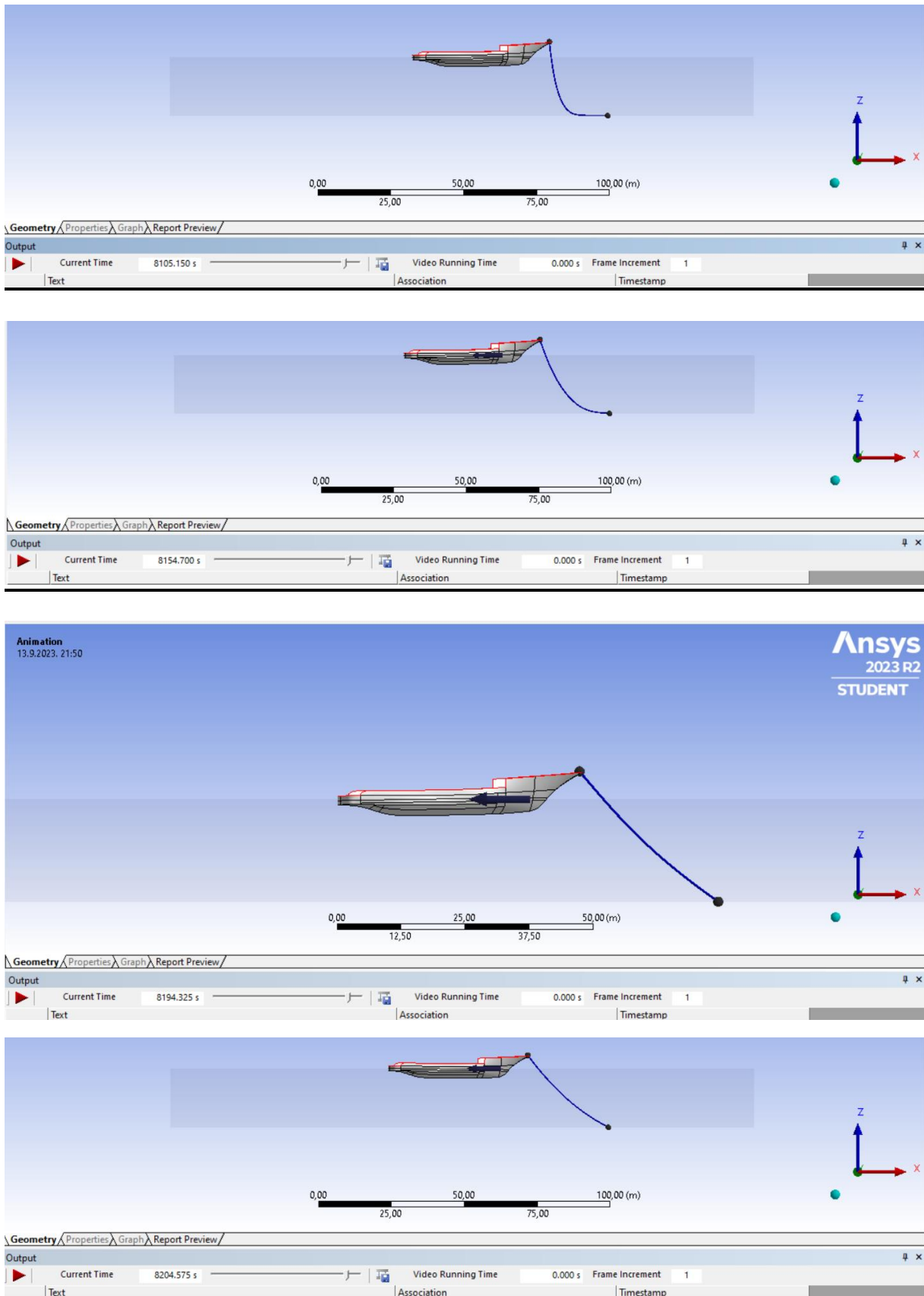


Slika 116 Odnos wave i low frequency response za ry smjer u vremenskoj skali

Za lakše razumijevanje prethodno objašnjenih uzroka maksimalnih poteznih sila (Slika 112.) u nastavku su prikazane slike iz simulacije za Silu 1, 2 i 3.

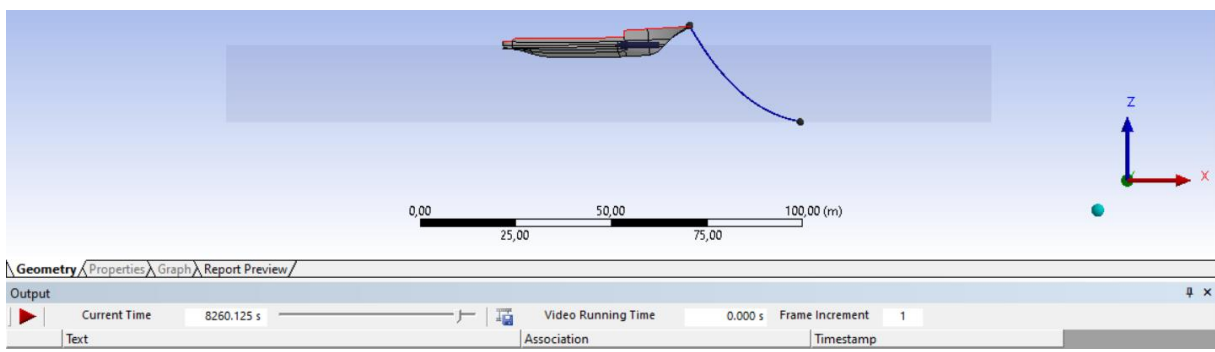
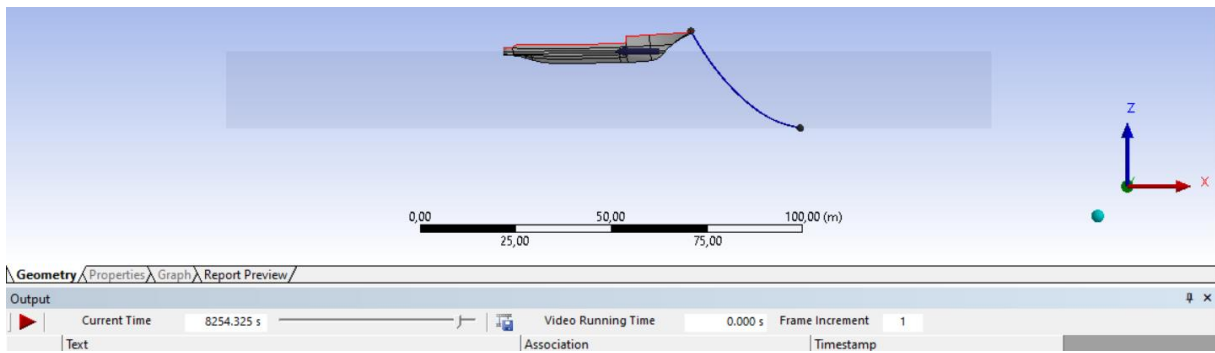
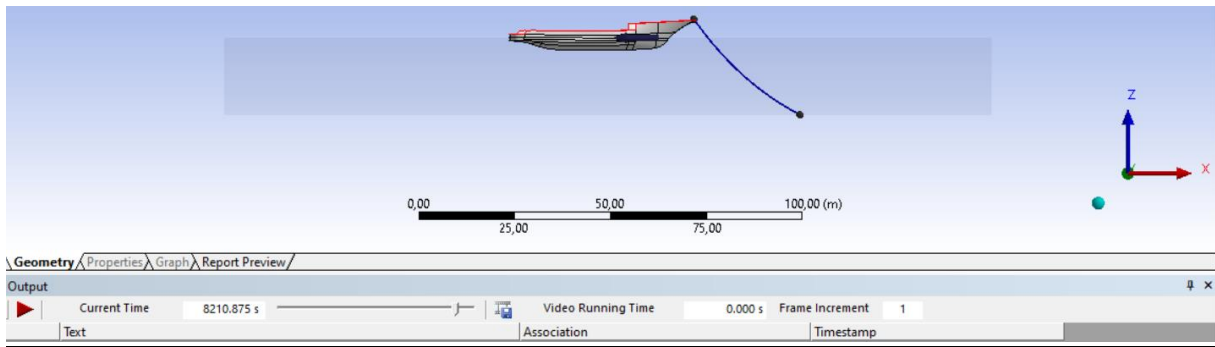
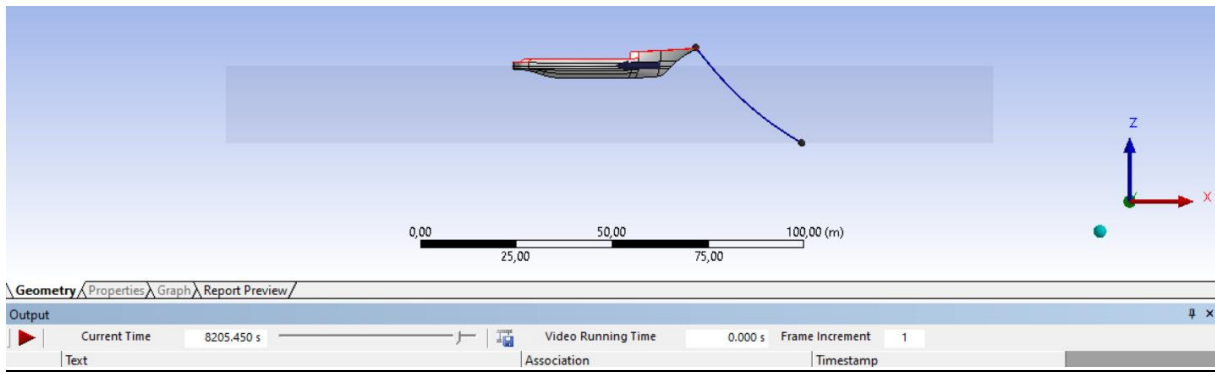
### **Fotografije iz simulacije za Silu 1:**

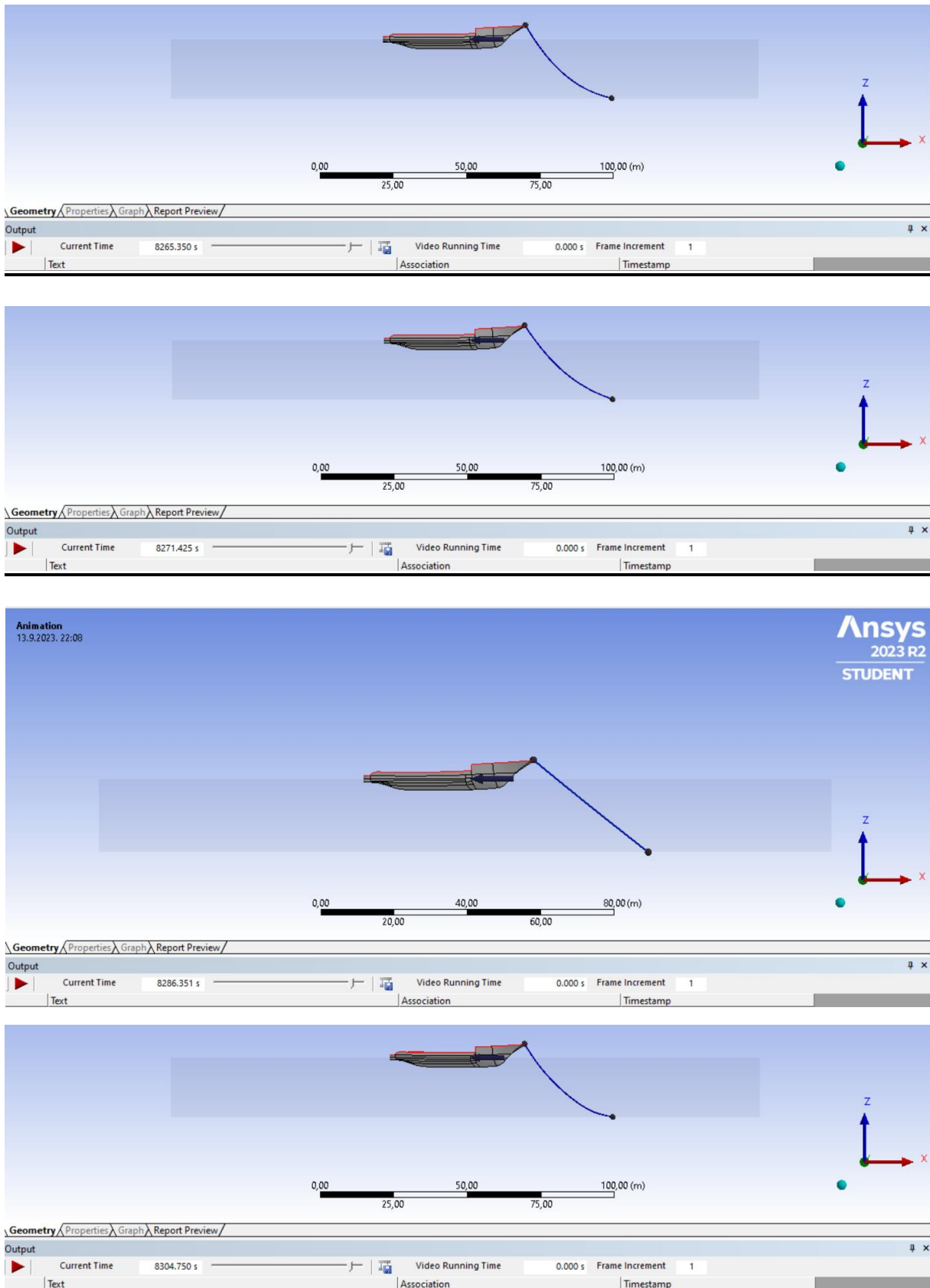




Slika 117 Prikaz simulacije za Silu 1

**Fotografije iz simulacije za Silu 2:**

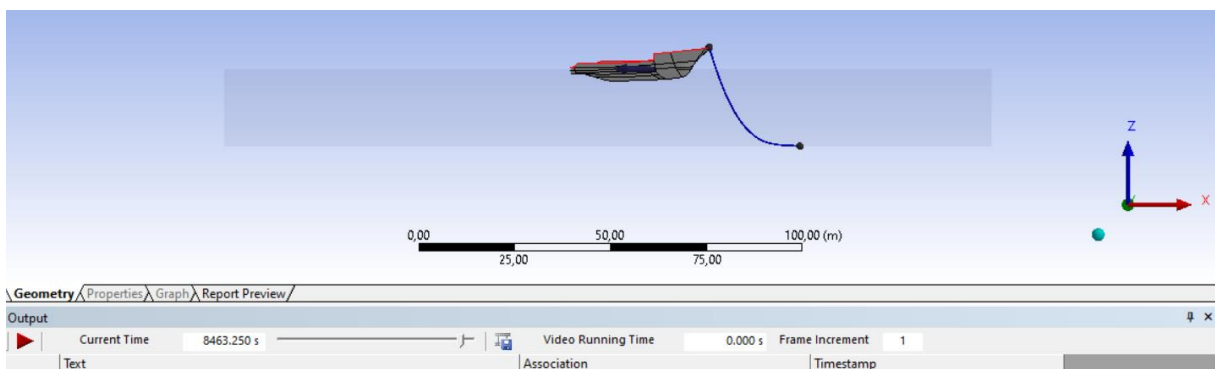
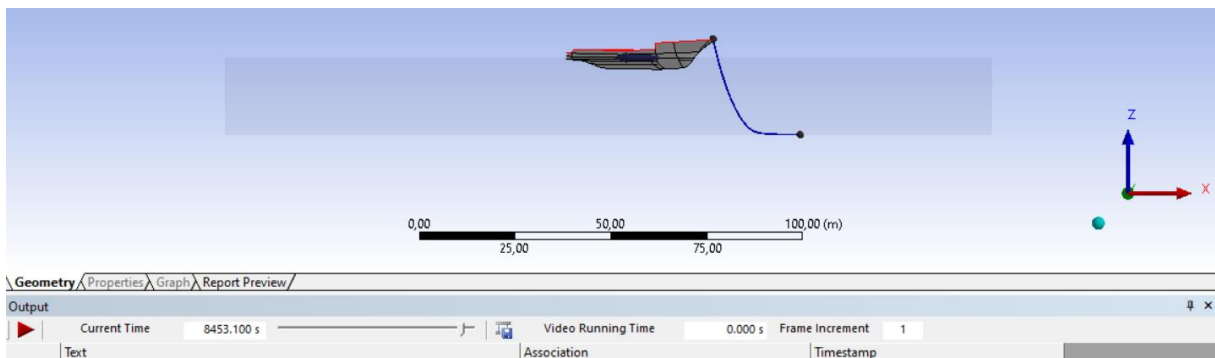
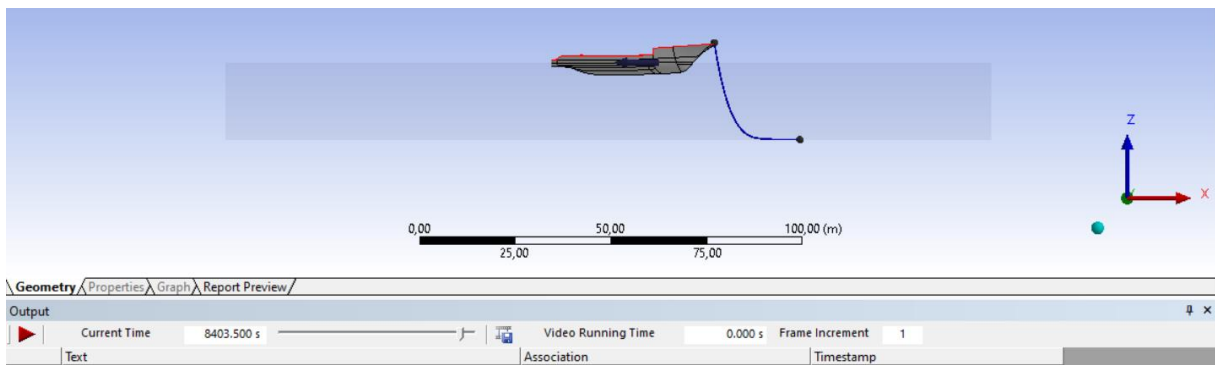
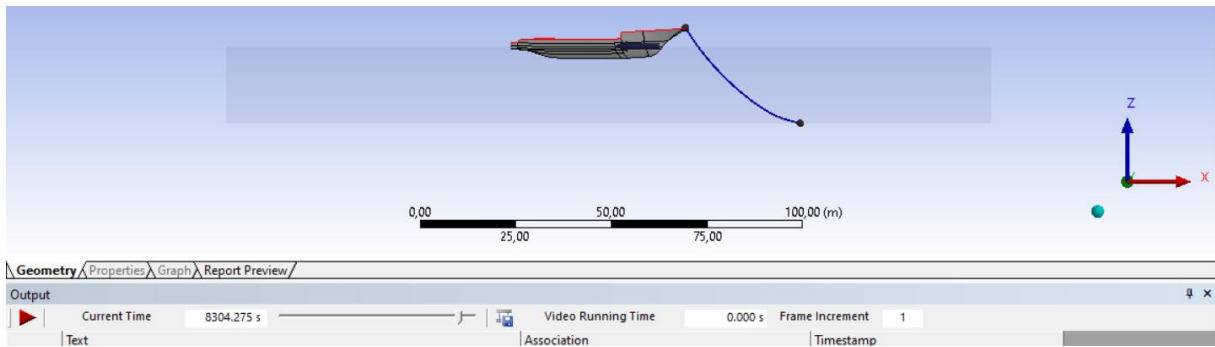


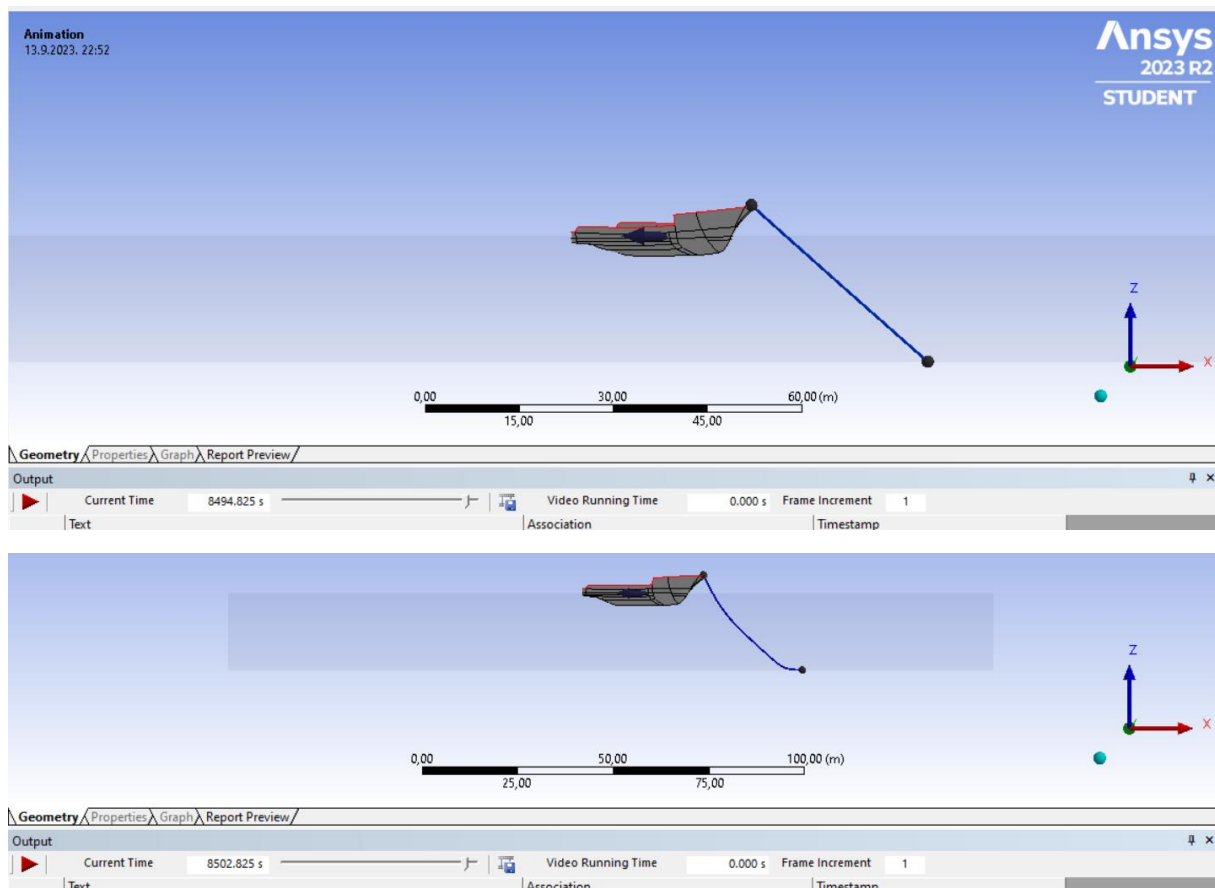


Slika 118 Prikaz simulacije za Silu 2



**Fotografije iz simulacije za Silu 3:**





Slika 119 Prikaz simulacije za Silu 3

## 6. Tehničko rješenje sidrenog sustava

Za potrebe ovog diplomskog rada odabrano je sidrenje u jednoj točki također poznato kao i „single-point mooring“ (SPM). Ova metoda sidrenja daje određenu slobodu kretanja plovilu upravo iz razloga što je privezište samo u jednoj točki.

Kako bi se osigurao siguran privez plovilima potrebno je u nastavku detaljno razraditi svaki segment sidrenog sustava.

### Lanac

Za potrebe tehničkog rješenja sidrenog sustava odabire se lanac DIN 5683 svijetli ili toplo cinčani. Ovi lanci se često koriste za sidrenje plovila jer pružaju visoku čvrstoću i otpornost na koroziju potrebnu za sigurno sidrenje plovila. To su lanci koji su obično izrađeni od čelika te su premazani slojem cinka kako bi se povećala njihova otpornost na koroziju i oksidaciju.

Odabran je lanac DIN 5683 nazivnog promjera  $\Phi 26$  mm, težine 11,4 kg/m te prekidne nosivosti od 192 kN. Razlog zbog kojeg je odabran prethodno navedeni lanac je taj što je potrebno odabrati onaj koji ima barem dva puta veću nosivost od maksimalne potezne sile užeta  $F=72,63007$  kN određene u prethodnom poglavlju. U nastavku je priložena fotografija odabranog lanca iz kataloga lanaca.

### 3. Lanac za sidrenje pomorskih oznaka DIN 5683, svijetli ili toplo cinčani

Chain DIN5683- I - 1964.



| nazivni promjer<br>mm | korak karike<br>mm | širina karike<br>$b_1$<br>mm | opterećenje   |                | težina lanca<br>kg/m |
|-----------------------|--------------------|------------------------------|---------------|----------------|----------------------|
|                       |                    |                              | ispitno<br>kN | prekidno<br>kN |                      |
| 16                    | 144                | 88                           | 15            | 75             | 4,3                  |
| 18                    | 162                | 99                           | 18,3          | 91,5           | 5,5                  |
| 20                    | 180                | 110                          | 22,8          | 114            | 6,6                  |
| 22                    | 207                | 127                          | 30            | 150            | 8,9                  |
| 26                    | 234                | 143                          | 38,4          | 192            | 11,4                 |
| 30                    | 270                | 165                          | 51            | 255            | 15,2                 |
| 33                    | 297                | 181                          | 61,8          | 309            | 18,3                 |
| 36                    | 324                | 198                          | 75            | 375            | 21,9                 |

Slika 120 Odabrani lanac iz kataloga lanaca

(Izvor: <http://www.lanac.hr/nautika/>, pristupljeno 13. 9. 2023. godine)

Products / Standard chains / DIN Chains / Round steel chains / Round link chains for buoy mooring (buoy chains) DIN 5683

| Diameter d | Pitch t | Width b | Weight kg/m | Proof load kN GK 2 | Proof load kN GK 3 | Breaking load kN GK 2 | Breaking load kN GK 3 |
|------------|---------|---------|-------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 16         | 144     | 88      | 4,3         | 15,0               | 32,2               | 75,0                  | 161,0                 |
| 18         | 162     | 99      | 5,5         | 18,3               | 40,7               | 91,5                  | 203,5                 |
| 20         | 180     | 110     | 6,8         | 22,8               | 50,3               | 114,0                 | 251,5                 |
| 23         | 207     | 127     | 8,9         | 30,0               | 66,5               | 150,0                 | 332,5                 |
| 26         | 234     | 143     | 11,4        | 38,4               | 85,0               | 192,0                 | 425,0                 |
| 30         | 270     | 165     | 15,2        | 51,0               | 113,0              | 255,0                 | 565,0                 |
| 33         | 297     | 181     | 18,3        | 61,8               | 136,8              | 309,0                 | 684,0                 |
| 36         | 324     | 198     | 21,9        | 75,0               | 163,0              | 375,0                 | 815,0                 |
| 39         | 351     | 214     | 25,7        | 90,0               | 191,0              | 450,0                 | 955,0                 |

Slika 121 Lanac DIN5683 s prikazom nosivosti

(Izvor: <https://www.kettenfabrik-unna.de/en/rundstahlketten-fuer-seezeichen-verankerung-tonnenketten-din-5683.html>, pristupljeno: 13. 9. 2023. godine)

Za potrebe ovog tehničkog rješenja te s obzirom na predmetne dubine od 20 metara, odabran je lanac duljine 20 metara (zbog dubine od 20 metara) + 5 metara (rezerva).

Nastavno na navedeno te na prethodno priloženi katalog lanaca, težina lanca na suhome od 25 metara duljine iznosi:

$$m_{ukupno} = 25 \text{ m} * 11,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 285 \text{ kg}$$

U sljedećem koraku potrebno je odrediti plutaču određene nosivosti koja može podnijeti težinu prethodno odabranog lanca bez da tone.

### Plutača

Kako bi se odabrala plutača dovoljne nosivosti prethodno odabranog lanca od 25 metara odnosno  $m_{ukupno} = 285 \text{ kg}$ , potrebno je prvo odrediti težinu uronjenog lanca. To se određuje na sljedeći način:

$$m_{uronjeno} = m_{ukupno} * \frac{(\rho_{lanac} - \rho_{more})}{\rho_{lanac}}$$

$$m_{uronjeno} = 285 * \frac{(7800 - 1025)}{7800} = 247,548 \text{ kg}$$

$$\rho_{lanac} = 7800 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{more} = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{ukupno} = 285 \text{ kg}$$

Prema prethodno navedenom izračunu, u nastavku se odabire plutaču SB-75 koja ima nosivost 750 kg.

## OCEAN GUARD SUPPORT BUOYS

| BUOY MODEL | BUOYANCY NET |       | BUOY WEIGHT |       | DIAMETER OVERALL |     | HEIGHT OVERALL |     | WORKING LOAD |      |
|------------|--------------|-------|-------------|-------|------------------|-----|----------------|-----|--------------|------|
|            | LBS          | KG    | LBS         | KG    | FT               | M   | FT             | M   | LBS          | TONS |
| SB-25      | 551          | 250   | 158         | 72    | 2.6              | 0.8 | 2.6            | 0.8 | 22,000       | 10   |
| SB-50      | 1,102        | 500   | 285         | 129   | 3.2              | 1.0 | 3.2            | 1.0 | 22,000       | 10   |
| SB-75      | 1,653        | 750   | 390         | 177   | 3.5              | 1.1 | 3.5            | 1.1 | 22,000       | 10   |
| SB-100     | 2,205        | 1,000 | 475         | 215   | 3.8              | 1.2 | 3.8            | 1.2 | 40,000       | 18   |
| SB-125     | 2,756        | 1,250 | 537         | 244   | 4.1              | 1.2 | 4.1            | 1.2 | 40,000       | 18   |
| SB-150     | 3,307        | 1,500 | 584         | 265   | 4.3              | 1.3 | 4.3            | 1.3 | 40,000       | 18   |
| SB-175     | 3,858        | 1,750 | 687         | 312   | 4.6              | 1.4 | 4.6            | 1.4 | 40,000       | 18   |
| SB-200     | 4,409        | 2,000 | 819         | 371   | 4.8              | 1.5 | 4.8            | 1.5 | 40,000       | 18   |
| SB-250     | 5,511        | 2,500 | 931         | 422   | 5.2              | 1.6 | 5.2            | 1.6 | 40,000       | 18   |
| SB-300     | 6,614        | 3,000 | 1,200       | 544   | 5.5              | 1.7 | 5.5            | 1.7 | 45,000       | 20   |
| SB-350     | 7,716        | 3,500 | 1,300       | 590   | 5.8              | 1.8 | 5.8            | 1.8 | 45,000       | 20   |
| SB-400     | 8,818        | 4,000 | 1,612       | 731   | 6.0              | 1.8 | 6.0            | 1.8 | 45,000       | 20   |
| SB-450     | 9,921        | 4,500 | 1,712       | 777   | 6.2              | 1.9 | 6.2            | 1.9 | 45,000       | 20   |
| SB-500     | 11,023       | 5,000 | 1,945       | 882   | 6.4              | 2.0 | 6.4            | 2.0 | 45,000       | 20   |
| SB-600     | 13,228       | 6,000 | 2,302       | 1,044 | 6.8              | 2.1 | 6.8            | 2.1 | 45,000       | 20   |
| SB-700     | 15,432       | 7,000 | 2,500       | 1,134 | 7.2              | 2.2 | 7.2            | 2.2 | 45,000       | 20   |

\* Actual values for above sizes may vary +/- 15% due to variations in materials and tolerances.



Slika 122 Katalog plutača

(Izvor: [https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section\\_15\\_Buoys.pdf](https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section_15_Buoys.pdf), pristupljeno 13. 9. 2023. godine)

### Blok za sidrenje

Pri odabiru lanca, blokova i slično, potrebno je uskladiti koeficijente sigurnosti.

Nastavno na odabrani lanac nosivosti 192 kN te s obzirom na prethodno određenu maksimalnu poteznu silu užeta od  $F=72,63007$  kN, može se uočiti kako koeficijent sigurnosti iznosi 2,64.

Uzimajući u obzir navedeno, za tehničko rješenje sidrenog sustava odabrana su 3 sidrena betonska bloka. Kako bi se odredila kolika je potrebna masa bloka, u nastavku je priložen sljedeći proračun:

$$F=72,63007 \text{ kN} = 7,263007 \text{ t}$$

$$m_{uronjeno} = 7,263007 * 3 = 21,789 \text{ t}$$

$$m_{uronjeno} = m_{suh0} * \frac{(\rho_{beton} - \rho_{more})}{\rho_{beton}}$$

$$m_{suh0} = \frac{m_{uronjeno} * \rho_{beton}}{(\rho_{beton} - \rho_{more})} = \frac{21,789 * 2500}{(2500 - 1025)} = 36,96 \text{ t}$$

$$\rho_{beton} = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{more} = 1025 \text{ kg/m}^3$$

S obzirom na to kako je dobivena ukupna masu betonskog bloka na suhom, potrebno je odrediti težinu pojedinačnog bloka. Odabire se blok sljedećih dimenzija: 2,5 m x 2 x 1 m (a x b x h) odnosno jedan blok ima 5 m<sup>3</sup>.

Kako bi se provjerilo zadovoljava li odabrani blok prethodno izračunatu potrebnu masu na suhom, radi se izračun prema sljedećoj formuli:

$$m = 5\text{m}^3 \times 2500 \text{ kg/m}^3 \times 3 \text{ bloka} = 37500 \text{ kg} = 37.5 \text{ t}$$

Odabrane dimenzije betonskog bloka zadovoljavaju opterećenje sile od  $F = 72,63007 \text{ kN}$  s koeficijentom sigurnosti 3.

U nastavku je priložen primjer betonskog sidrenog bloka.



*Slika 123 Primjer sidrenog betonskog bloka*

*(Izvor: [https://www.burzanautike.com/hr/mali\\_oglas/prodajem-betonski\\_blok\\_za\\_sidrenje\\_plovila/27394](https://www.burzanautike.com/hr/mali_oglas/prodajem-betonski_blok_za_sidrenje_plovila/27394), pristupljeno: 13. 9. 2023. godine)*

### **„Omega“**

„Omega“ je spoj koji je ugrađen u betonski blok te se na nju pričvršćuje lanac. Za potrebe ovog diplomskog rada odabrane su dvije „omege“ po betonskom sidrenom bloku odnosno jedna s gornje strane koja služi za transport te jedna s bočne strane koja služi za sidrenje. Napravljena je od rebrastog čelika B500B promjera  $\Phi 50 \text{ mm}$  težine  $15.41 \text{ kg/m}$ .

Na prethodno navedenoj slici može se jasno vidjeti kako izgleda „omega“ koja je ugrađena u betonski sidreni blok. Sveukupan broj omega u ovom tehničkom rješenju iznosi 6 komada (po dva komada na svakom betonskom sidrenom bloku).

| 直径(mm) | 截面积(mm <sup>2</sup> ) | 理论重量(kg/m) |
|--------|-----------------------|------------|
| 6      | 28.27                 | 0.222      |
| 7      | 38.5                  | 0.302      |
| 8      | 50.27                 | 0.395      |
| 9      | 63.6                  | 0.499      |
| 10     | 78.54                 | 0.617      |
| 12     | 113.1                 | 0.888      |
| 14     | 153.9                 | 1.21       |
| 16     | 201.1                 | 1.58       |
| 18     | 254.5                 | 2.0        |
| 20     | 314.2                 | 2.47       |
| 22     | 380.1                 | 2.98       |
| 25     | 490.9                 | 3.856      |
| 28     | 615.8                 | 4.84       |
| 32     | 804.2                 | 6.31       |
| 36     | 1018                  | 7.99       |
| 40     | 1257                  | 9.87       |
| 45     | 1590                  | 12.48      |
| 50     | 1964                  | 15.41      |
| 55     | 2376                  | 18.65      |
| 60     | 2827                  | 22.19      |
| 70     | 3818                  | 30.21      |
| 80     | 5027                  | 39.46      |
| 90     | 6362                  | 49.94      |

Slika 124 Katalog promjera rebrastog čelika B500B

(Izvor: <http://bs.royalsteelgroup.com/carbon-steel-black-reinforcing-iron-rod-deformed-steel-rebar-for-construction-and-concrete-product/>, pristupljeno: 15. 9. 2023. godine)

### **Lanci (vezani za betonske sidrene blokove)**

Za potrebe ovog rada odabrana su 3 lanca duljine 8 metara koji se spajaju na betonske sidrene blokove. Ovi lanci smanjuju poteznu silu užeta odnosno amortiziraju je. Cilj je što veću silu koja se suprotstavlja prebaciti na lanac, a što manje na blok odnosno nastojimo minimizirati pomake sidrenih blokova. Odabran je lanac promjera  $\Phi 50$  mm, težine 56,22 kg/m te prekidne nosivosti od 1370 kN. Ukupna težina na suhom prethodno navedena 3 lanca iznosi 1377,35 kg. U nastavku su priložene fotografije odabranog lanca iz kataloga.

| Diameter | CHAIN LINK SIZE |         | AM2                |          | AM3                |          | APPROX.<br>WEIGHT<br>27.5M |
|----------|-----------------|---------|--------------------|----------|--------------------|----------|----------------------------|
|          |                 |         | U2 STUD LINK CHAIN |          | U3 STUD LINK CHAIN |          |                            |
|          | OUTSIDE         | OUTSIDE | PROOF              | BREAKING | PROOF              | BREAKING |                            |
|          | LENGTH          | WIDTH   | LOAD               | LOAD     | LOAD               | LOAD     |                            |
| MM       | MM              | MM      | KN                 | KN       | KN                 | KN       | KG                         |
| 50       | 300             | 180     | 981                | 1370     | 1370               | 1960     | 1546                       |
| 52       | 312             | 187.2   | 1060               | 1480     | 1480               | 2110     | 1661                       |
| 54       | 324             | 194.4   | 1140               | 1590     | 1590               | 2270     | 1791                       |
| 56       | 336             | 201.6   | 1220               | 1710     | 1710               | 2430     | 1926                       |
| 58       | 348             | 208.8   | 1290               | 1810     | 1810               | 2600     | 2086                       |
| 60       | 360             | 216     | 1380               | 1940     | 1940               | 2770     | 2249                       |
| 62       | 372             | 223.2   | 1470               | 2060     | 2060               | 2940     | 2361                       |
| 64       | 384             | 230.4   | 1560               | 2190     | 2190               | 3130     | 2516                       |
| 66       | 396             | 237.6   | 1660               | 2310     | 2310               | 3300     | 2676                       |
| 68       | 408             | 244.8   | 1750               | 2450     | 2450               | 3500     | 2885                       |
| 70       | 420             | 252     | 1840               | 2580     | 2580               | 3690     | 3010                       |

Slika 125 Katalog odabranog lanca

(Izvor: <https://www.dawson-group.com/amp/50mm-Grade-U3-Stud-Link-Anchor-Chain-for-Ship-Building-pd033512.html>, pristupljeno: 15. 9. 2023. godine)

### **Križni spojni prsten**

Križni spojni prsten je prsten s dvije ukrute koje ga dijele na 4 jednaka dijela te se radi po mjeri. Ukrute su nužne kako ne bi došlo do vitoperenja samoga prstena prilikom opterećenja te ga je potrebno napraviti sa što više mjesta s obzirom da se u jednu točku spajaju 4 lanca – 3 lanca od 8 metara te lanac s plutače od 25 metara.

Kada postoji djelovanje u x smjeru odnosno surge, prvo se aktivira 5 dodatnih metara lanca, nakon toga 20 metara lanca te se na kraju podiže križni spojni prsten zajedno s 3 lanca od 8 metara.

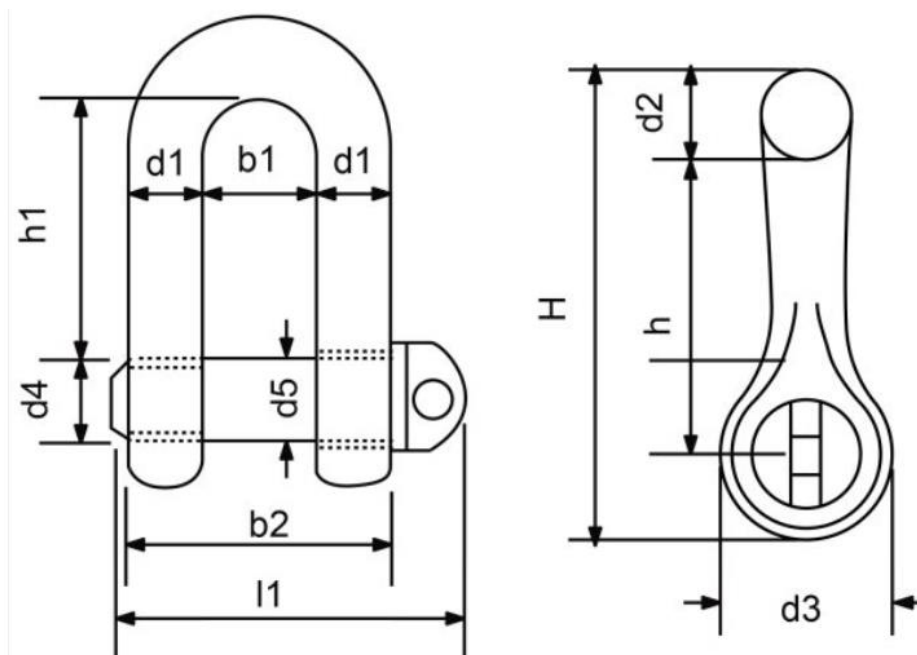
### **Gambet**

Gambet je spoj između lanca i omega na sidrenom bloku te lanca i križnog spojnog prstena. Odabire se na način da mu nosivost mora imati barem duplu nosivost od lanca. S obzirom na to kako lanac na betonskim sidrenim blokovima služi kao dodatno opterećenje, odabire se gambet nosivosti 20 t koji ima unutarnji svijetli prostor  $b_1=90$  mm kako bi stao lanac debljine  $\Phi 50$  mm te „omega“ debljine  $\Phi 50$  mm. Isto tako, s obzirom na to kako lanac privezan na plutaču ima nosivost 192 kN odabiru se 2 gambeta nosivosti 20,0 t (ukupna nosivost je 40,0 t) koji ima unutarnji svijetli prostor  $b_1=90$  mm kako bi stao lanac debljine  $\Phi 26$  mm odnosno lanac navedenog promjera ima unutarnji svijetli prostor  $b_1=91$  mm. Sveukupan broj gambeta u ovom tehničkom rješenju iznosi 11 komada (svaki blok ima po dva gambeta jer se lanac provlači kroz



dvije „omege“ te 5 gambeta na križnom spojnom prstenu – 3 gabela za lanac  $\Phi 50$  mm te 2 gabela za lanac  $\Phi 26$  mm).

U nastavku su priložene fotografije gambeta te kataloga iz kojeg su odabrane prethodno navedene vrijednosti.



Slika 126 Shematski prikaz gambeta

| Nosivost (t) | B1 (mm) | B2 (mm) | D1 (mm) | D2 (mm) | D3 (mm) | H1 (mm) | Težina (kg/kom) |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
| WLL          |         |         |         |         |         |         | Weight          |
| 0,1          | 7       | 15      | 4       | 10      | M 5     | 15,5    | 0,013           |
| 0,16         | 8       | 18      | 5       | 12      | M 6     | 18,0    | 0,024           |
| 0,25         | 11      | 25      | 7       | 16      | M 8     | 24,0    | 0,045           |
| 0,4          | 14      | 30      | 8       | 20      | M 10    | 30,0    | 0,082           |
| 0,63         | 17      | 37      | 10      | 24      | M 12    | 36,0    | 0,173           |
| 1,0          | 21      | 47      | 13      | 32      | M 16    | 49,0    | 0,36            |
| 1,6          | 27      | 61      | 17      | 40      | M 20    | 61,0    | 0,75            |
| 2,0          | 30      | 68      | 19      | 44      | M 22    | 67,0    | 1,03            |
| 2,5          | 33      | 75      | 21      | 48      | M 24    | 73,0    | 1,43            |
| 3,15         | 38      | 86      | 24      | 54      | M 27    | 83,5    | 2,11            |
| 4,0          | 42      | 96      | 27      | 60      | M 30    | 91,0    | 2,89            |
| 5,0          | 47      | 107     | 30      | 72      | M 36    | 111,0   | 3,90            |
| 6,3          | 53      | 121     | 34      | 78      | M 39    | 119,5   | 5,02            |
| 8,0          | 60      | 136     | 38      | 90      | M 45    | 139,5   | 6,75            |
| 10,0         | 66      | 150     | 42      | 96      | M 48    | 147,0   | 9,76            |
| 12,0         | 73      | 167     | 47      | 104     | M 52    | 158,0   | 13,1            |
| 16,0         | 81      | 185     | 52      | 120     | M 60    | 185,0   | 17,70           |
| 20,0         | 90      | 206     | 58      | 136     | M 68    | 211,0   | 23,80           |
| 25,0         | 100     | 226     | 63      | 144     | M 72    | 221,0   | 32,70           |
| 32,0         | 110     | 250     | 70      | 160     | M 80    | 246,0   | 49,50           |
| 40,0         | 125     | 283     | 79      | 180     | M 90    | 276,0   | 69,00           |
| 56,0         | 140     | 316     | 88      | 200     | M 100   | 307,0   | 94,60           |
| 63,0         | 155     | 347     | 96      | 220     | M 110   | 339,0   | 125,00          |

Slika 127 Katalog gambeta (Izvor: <https://remex.hr/proizvod/skopac-din-82101-rx-lift/>, pristupljeno: 13. 9. 2023. godine)

## 7. Zaključak

Na predmetnoj lokaciji obuhvata – Tivatski zaljev na temelju dostupnih podataka o vjetru te primjenom Gumbel i Pareto distribucija definirane su dugoročne valne prognoze, točnije značajna valna visina  $H_s = 0,567$  m i period vala  $T_s = 2,830$  s, koji su ulazni parametri za proračun i simulaciju u programu Ansys AQWA.

U prethodno navedenom programu, nakon obrade podataka, odabrana je mreža modela plovila u iznosu od 881 ukupnih elemenata, određen je time step i output step u iznosu od 0,025 s te trajanje simulacije u vremenskom periodu od 2,5 sata.

Nadalje, s obzirom na to kako period vala u iznosu od  $T_s = 2,830$  s te valna duljina u iznosu od  $L_s = 12,50$  m ne daju maksimalnu poteznu silu užeta, bilo je potrebno odrediti istu koja se pojavila na 94,46% duljine broda u iznosu od  $F = 72,63007$  kN za period vala od  $T_s = 5,5$  s.

Također, utvrđeno je kako postoje tri mehanizma koji generiraju poteznu silu užeta: pomak u smjeru x osi odnosno surge (odmicanje), pomak u z smjeru odnosno heave (izdizanje) te pomak u ry smjeru odnosno pitch (rotacija).

Analizom grafova dobivenih iz simulacije utvrđuje se kako se maksimalna potezna sila užeta javlja u trenutku 2871,875 s te je upravo za tu silu predlaže tehničko rješenje sidrenog sustava na predmetnoj lokaciji za brod duljine od 50 metara.

Tehničko rješenje se sastoji od: plutače, lanca duljine 25 metara, 3 lanca u duljini od 8 metara, 3 betonska sidrena bloka, 11 gambeta, 6 „omega“ te jednog križnog spojnog prstena.

Lanac koji visi s plutače promjera je  $\Phi 26$  mm, ukupne duljine 25 metara te ukupne težine od 247,548 kg. Na temelju odabranog lanca, odabire se plutača SB-75 koja ima nosivost 750 kg. Nadalje, odabrana su 3 bloka dimenzija 2,5 x 2 x 1 metar odnosno pojedinačnog volumena od 5 m<sup>3</sup>. Lanci koji su vezani za betonske sidrene blokove promjera su  $\Phi 50$  mm, ukupne duljine 24 metra te ukupne težine od 1377,35 kg. Odabire se 6 „omega“ od rebrastog čelika B500B promjera  $\Phi 50$  mm težine 15.41 kg/m, 11 gambeta nosivosti 20,0 t i unutarnjeg svijetlog prostora  $b_1 = 90$  mm.

## Literatura

- [1] Srzić, V. (2022.), Predavanja i vježbe iz kolegija Obalno inženjerstvo, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
- [2] Srzić, V. (2020.), Predavanja i vježbe iz kolegija Pomorske građevine, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
- [3] (2019.), Studija tehničko-tehnoloških uslova za dvije lokacije nautičkih sidrišta (vezivanje na bove na sidrištu) u Tivatskom zalivu sa pravilnikom upravljanja sidrištima, BUDVA DIVING d.o.o. Budva, Zavod za hidrometeorologiju i seizmologiju Crne Gore
- [4] (2019.), Workshop 02.1: Aqwa Basics – Hydrodynamic Diffraction, Introduction to Hydrodynamic Analysis with ANSYS Aqwa, ANSYS
- [5] (2019.), Workshop 03.1: Aqwa Basics – Hydrodynamic Response, Introduction to Hydrodynamic Analysis with ANSYS Aqwa, ANSYS
- [6] (2012.), AQWA User Manual, ANSYS
- [7] Rope specifications, dostupno na: [https://www.cortlandcompany.com/wp-content/uploads/2020/07/CT\\_TL\\_044\\_0522\\_US\\_Rope\\_Specifications\\_Ires.pdf](https://www.cortlandcompany.com/wp-content/uploads/2020/07/CT_TL_044_0522_US_Rope_Specifications_Ires.pdf), pristupljeno 29. 8. 2023. godine
- [8] Rope/wire: Axial and bending stiffness, dostupno na: [Rope/wire: Axial and bending stiffness \(orcina.com\)](https://www.orcina.com/rope/wire/axial-and-bending-stiffness), pristupljeno 29. 8. 2023. godine
- [9] Lanac – Nautika, dostupno na: <http://www.lanac.hr/nautika/>, pristupljeno 13. 9. 2023. godine
- [10] Lanac DIN5683 s prikazom nosivosti, dostupno na: <https://www.kettenfabrik-unna.de/en/rundstahlketten-fuer-seezeichen-verankerung-tonnenketten-din-5683.html>, pristupljeno 13. 9. 2023. godine
- [11] Katalog lanaca s prikazom nosivosti, dostupno na: <https://www.dawson-group.com/amp/50mm-Grade-U3-Stud-Link-Anchor-Chain-for-Ship-Building-pd033512.html>, pristupljeno: 15. 9. 2023. godine
- [12] Katalog plutača, dostupno na: [https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section\\_15\\_Buoys.pdf](https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section_15_Buoys.pdf), pristupljeno 13. 9. 2023. godine

[13] Katalog rebraste armature B500B, dostupno na: <http://bs.royalsteelgroup.com/carbon-steel-black-reinforcing-iron-rod-deformed-steel-rebar-for-construction-and-concrete-product/>, pristupljeno: 15. 9. 2023. godine

[14] Katalog gambeta, dostupno na: <https://remex.hr/proizvod/skopac-din-82101-rx-lift/>, pristupljeno 13. 9. 2023. godine

## Popis slika i tablica

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 Tivatski zaljev (Izvor: Google Maps) .....  | 3  |
| Slika 2 Tivatski zaljev - uvećana lokacija (Izvor: Google Maps) .....   | 3  |
| Slika 3 Tivatski zaljev (Izvor: Studija tehničko-tehnoloških uslova za dvije lokacije nautičkih sidrišta (vezivanje na bove na sidrištu) u Tivatskom zalivu sa pravilnikom upravljanja sidrištima)..... | 4  |
| Slika 4 Tablica kontingencije apsolutne učestalosti.....  | 7  |
| Slika 5 Tablica kontingencije relativne učestalosti .....   | 7  |
| Slika 6 Oznake smjerova vjetra.....   | 8  |
| Slika 7 Ruža vjetrova s prikazanim iznosima brzina i smjera vjetra.....   | 8  |
| Slika 8 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra NNE .....  | 10 |
| Slika 9 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra NNE .....  | 10 |
| Slika 10 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra NE.....   | 11 |
| Slika 11 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra NE .....  | 11 |
| Slika 12 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra W .....   | 12 |
| Slika 13 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra W.....  | 12 |
| Slika 14 Definicija efektivnog privjetrišta za smjer puhanja vjetra WSW .....   | 13 |
| Slika 15 Efektivno privjetrište za smjer puhanja vjetra WSW.....  | 13 |
| Slika 16 Tablica s prikazanim maksimalnim trajanjem puhanja vjetra.....   | 15 |
| Slika 17 Parametri dubokovodnog vala NNE .....  | 18 |
| Slika 18 Parametri dubokovodnog vala NE .....   | 18 |
| Slika 19 Parametri dubokovodnog vala W.....   | 18 |
| Slika 20 Parametri dubokovodnog vala WSW.....   | 18 |
| Slika 21 Parametri dubokovodnog vala NNE .....  | 22 |
| Slika 22 Funkcija distribucije valne visine NNE .....   | 22 |
| Slika 23 Funkcija distribucije perioda vala NNE.....  | 23 |
| Slika 24 Funkcija distribucije značajne valne visine $H_s$ po Gumbelu za NNE .....  | 23 |
| Slika 25 Funkcija distribucije perioda vala $T_s$ po Gumbelu za NNE .....   | 24 |
| Slika 26 Funkcija distribucije značajne valne visine $H_s$ po Paretu za NNE .....   | 24 |
| Slika 27 Funkcija distribucije perioda vala $T_s$ po Paretu za NNE .....  | 25 |
| Slika 28 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala $H_s$ za smjer NNE.....   | 26 |
| Slika 29 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala $T_s$ za smjer NNE .....  | 27 |
| Slika 30 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala $H_s$ za smjer NNE .....   | 27 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 31 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Ts za smjer NNE.....   | 28 |
| Slika 32 Dugoročne valne prognoze za smjer NNE.....                             | 28 |
| Slika 33 Karakteristične valne visine za smjer NNE .....                        | 29 |
| Slika 34 Karakteristični period vala za smjer NNE .....                         | 29 |
| Slika 35 Parametri dubokovodnog vala NE .....                                   | 30 |
| Slika 36 Funkcija distribucije valne visine NE .....                            | 30 |
| Slika 37 Funkcija distribucije perioda vala NE.....                             | 31 |
| Slika 38 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Gumbelu za NE .....  | 31 |
| Slika 39 Funkcija distribucije perioda vala Ts po Gumbelu za NE .....           | 32 |
| Slika 40 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Paretu za NE.....    | 32 |
| Slika 41 Funkcija distribucije perioda vala Ts po Paretu za NE.....             | 33 |
| Slika 42 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala Hs za smjer NE..... | 34 |
| Slika 43 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala Ts za smjer NE..... | 34 |
| Slika 44 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Hs za smjer NE.....    | 35 |
| Slika 45 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Ts za smjer NE.....    | 35 |
| Slika 46 Dugoročne valne prognoze za smjer NE.....                              | 36 |
| Slika 47 Karakteristične valne visine za smjer NE .....                         | 36 |
| Slika 48 Karakteristični period vala za smjer NE .....                          | 36 |
| Slika 49 Parametri dubokovodnog vala W.....                                     | 37 |
| Slika 50 Funkcija distribucije valne visine W.....                              | 37 |
| Slika 51 Funkcija distribucije perioda vala W .....                             | 38 |
| Slika 52 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Gumbelu za W .....   | 38 |
| Slika 53 Funkcija distribucije perioda vala Ts po Gumbelu za W.....             | 39 |
| Slika 54 Funkcija distribucije značajne valne visine Hs po Paretu za W.....     | 39 |
| Slika 55 Funkcija distribucije perioda vala Ts po Paretu za W .....             | 40 |
| Slika 56 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala Hs za smjer W ..... | 41 |
| Slika 57 Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala Ts za smjer W.....  | 41 |
| Slika 58 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Hs za smjer W.....     | 42 |
| Slika 59 Dio tablice Pareto distribucije parametara vala Ts za smjer W.....     | 42 |
| Slika 60 Dugoročne valne prognoze za smjer W .....                              | 43 |
| Slika 61 Karakteristične valne visine za smjer W .....                          | 43 |
| Slika 62 Karakteristični period vala za smjer W.....                            | 43 |
| Slika 63 Parametri dubokovodnog vala WSW.....                                   | 44 |
| Slika 64 Funkcija distribucije valne visine WSW.....                            | 44 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Slika 65 | Funkcija distribucije perioda vala WSW .....  | 45 |
| Slika 66 | Funkcija distribucije značajne valne visine $H_s$ po Gumbelu za WSW .....   | 45 |
| Slika 67 | Funkcija distribucije perioda vala $T_s$ po Gumbelu za WSW .....  | 46 |
| Slika 68 | Funkcija distribucije značajne valne visine $H_s$ po Paretu za WSW.....   | 46 |
| Slika 69 | Funkcija distribucije perioda vala $T_s$ po Paretu za WSW .....   | 47 |
| Slika 70 | Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala $H_s$ za smjer WSW .....   | 48 |
| Slika 71 | Dio tablice Gumbelove distribucije parametara vala $T_s$ za smjer WSW.....  | 48 |
| Slika 72 | Dio tablice Pareto distribucije parametara vala $H_s$ za smjer WSW.....   | 49 |
| Slika 73 | Dio tablice Pareto distribucije parametara vala $T_s$ za smjer WSW .....  | 49 |
| Slika 74 | Dugoročne valne prognoze za smjer WSW .....   | 50 |
| Slika 75 | Karakteristične valne visine za smjer WSW .....   | 50 |
| Slika 76 | Karakteristični period vala za smjer WSW .....  | 50 |
| Slika 77 | Prikaz tipskog plovila duljine 50 m (Izvor: <a href="https://qr.boats.com/qr/details/description/7673129?partyId=39146">https://qr.boats.com/qr/details/description/7673129?partyId=39146</a> , pristupljeno 27. 8. 2023. godine).....  | 54 |
| Slika 78 | Prikaz tipskog plovila duljine 50 m (Izvor: <a href="https://qr.boats.com/qr/details/description/7673129?partyId=39146">https://qr.boats.com/qr/details/description/7673129?partyId=39146</a> , pristupljeno 27. 8. 2023. godine).....  | 54 |
| Slika 79 | Tehničke specifikacije tipskog plovila duljine 50 m .....   | 55 |
| Slika 80 | Model broda od 50 metara duljine .....  | 56 |
| Slika 81 | Primjer odabranog užeta (Izvor: <a href="https://www.cortlandcompany.com/wp-content/uploads/2020/07/CT_TL_044_0522_US_Rope_Specifications_Ires.pdf">https://www.cortlandcompany.com/wp-content/uploads/2020/07/CT_TL_044_0522_US_Rope_Specifications_Ires.pdf</a> , pristupljeno 3. 9. 2023. godine)..... | 57 |
| Slika 82 | Parametri odabranog užeta .....   | 57 |
| Slika 83 | Formula za izračun čvrstoće užeta (Izvor: <a href="https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Ropewire,Axialandbendingstiffness.htm">https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Ropewire,Axialandbendingstiffness.htm</a> , pristupljeno 3. 9. 2023. godine) .....                    | 58 |
| Slika 84 | Tablični prikaz proračuna mreže modela broda.....   | 60 |
| Slika 85 | Graf prikaza pomaka centra mase u x smjeru u odnosu na ukupan broj elemenata mreže .....  | 60 |
| Slika 86 | Graf prikaza pomaka centra mase u y smjeru u odnosu na ukupan broj elemenata mreže .....  | 60 |
| Slika 87 | Graf prikaza pomaka centra mase u z smjeru u odnosu na ukupan broj elemenata mreže .....  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 88 Grafički prikaz sile užeta u odnosu na ukupan broj elemenata.....                                  | 61 |
| Slika 89 Prikaz odabrane mreže modela broda .....   | 61 |
| Slika 90 Tablični prikaz proračuna time step i output step .....  | 62 |
| Slika 91 Grafički prikaz odnosa maksimalne sile s time step-om i output step-om .....                       | 62 |
| Slika 92 Tablični prikaz proračuna trajanja simulacije .....  | 63 |
| Slika 93 Grafički prikaz odnosa trajanja simulacije i maksimalne sile.....                                  | 63 |
| Slika 94 Tablični prikaz odnosa perioda i maksimalne potezne sile užeta .....                               | 64 |
| Slika 95 Grafički prikaz odnosa perioda vala i maksimalne potezne sile užeta .....                          | 65 |
| Slika 96 Tablični prikaz odnosa valne duljine/duljine broda i maksimalne potezne sile užeta.....            | 65 |
| Slika 97 Grafički prikaz maksimalne potezne sile užeta u odnosu na omjer valne duljine i duljine broda..... | 65 |
| Slika 98 Prikaz valne visine u vremenskoj domeni.....   | 66 |
| Slika 99 Prikaz valne visine na uvećanoj vremenskoj skali.....  | 66 |
| Slika 100 Prikaz poteznih sila užeta u vremenskoj domeni .....  | 67 |
| Slika 101 Pomak u x smjeru - actual response .....  | 68 |
| Slika 102 Pomak u x smjeru - low frequency response.....  | 69 |
| Slika 103 Pomak u x smjeru - wave frequency response .....  | 69 |
| Slika 104 Pomak u z smjeru - actual response .....  | 70 |
| Slika 105 Pomak u z smjeru - low frequency response .....   | 70 |
| Slika 106 Pomak u z smjeru - wave frequency response .....  | 71 |
| Slika 107 Pomak u ry smjeru - actual response.....  | 71 |
| Slika 108 Pomak u ry smjeru - low frequency response .....  | 72 |
| Slika 109 Pomak u ry smjeru - wave frequency response .....   | 72 |
| Slika 110 Prikaz valnog polja u vremenskoj domeni .....   | 74 |
| Slika 111 Sile u sidrenom užetu i pomak u x smjeru u vremenskoj domeni .....                                | 75 |
| Slika 112 Sile u sidrenom užetu i pomak u z smjeru u vremenskoj domeni.....                                 | 75 |
| Slika 113 Sile u sidrenom užetu i pomak u ry smjeru u vremenskoj domeni .....                               | 76 |
| Slika 114 Odnos wave i low frequency response za x smjer u vremenskoj skali .....                           | 76 |
| Slika 115 Odnos wave i low frequency response za z smjer u vremenskoj skali.....                            | 77 |
| Slika 116 Odnos wave i low frequency response za ry smjer u vremenskoj skali.....                           | 77 |
| Slika 117 Prikaz simulacije za Silu 1 .....   | 79 |
| Slika 118 Prikaz simulacije za Silu 2 .....   | 81 |
| Slika 119 Prikaz simulacije za Silu 3 .....   | 83 |

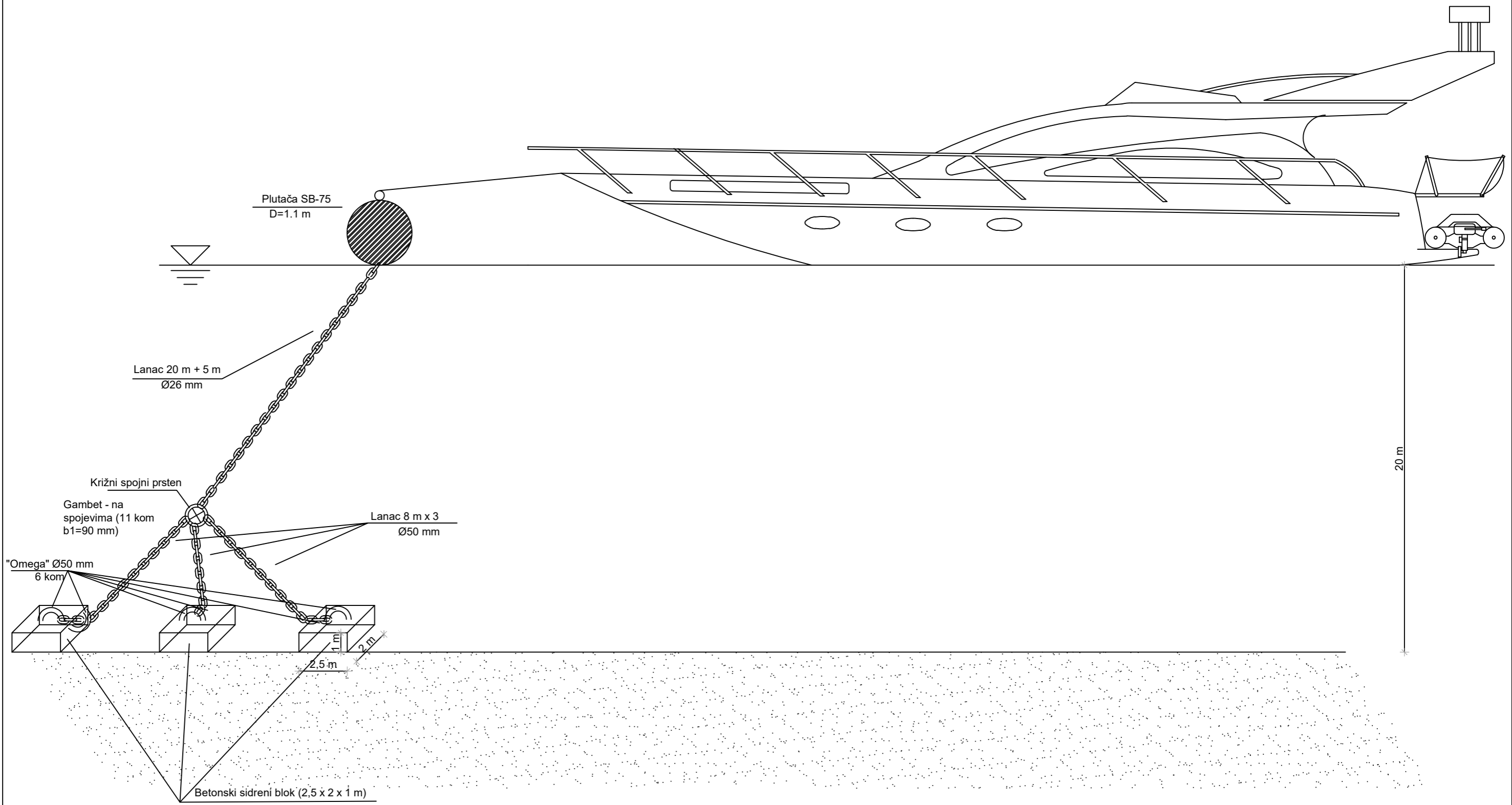



|  |    |
|--|----|
| Slika 120 Odabrani lanac iz kataloga lanaca (Izvor: <a href="http://www.lanac.hr/nautika/">http://www.lanac.hr/nautika/</a> , pristupljeno 13. 9. 2023. godine).....   | 84 |
| Slika 121 Lanac DIN5683 s prikazom nosivosti (Izvor: <a href="https://www.kettenfabrik-unna.de/en/rundstahlketten-fuer-seezeichen-verankerung-tonnenketten-din-5683.html">https://www.kettenfabrik-unna.de/en/rundstahlketten-fuer-seezeichen-verankerung-tonnenketten-din-5683.html</a> , pristupljeno: 13. 9. 2023. godine) .....  | 85 |
| Slika 122 Katalog plutača (Izvor: <a href="https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section_15_Buoys.pdf">https://anchormarinehouston.com/wp-content/uploads/2019/03/Section_15_Buoys.pdf</a> , pristupljeno 13. 9. 2023. godine) .....  | 86 |
| Slika 123 Primjer sidrenog betonskog bloka (Izvor: <a href="https://www.burzanautike.com/hr/mali_oglas/prodajem-betonski_blok_za_sidrenje_plovila/27394">https://www.burzanautike.com/hr/mali_oglas/prodajem-betonski_blok_za_sidrenje_plovila/27394</a> , pristupljeno: 13. 9. 2023. godine) .....  | 87 |
| Slika 124 Katalog promjera rebrastog čelika B500B (Izvor: <a href="http://bs.royalsteelgroup.com/carbon-steel-black-reinforcing-iron-rod-deformed-steel-rebar-for-construction-and-concrete-product/">http://bs.royalsteelgroup.com/carbon-steel-black-reinforcing-iron-rod-deformed-steel-rebar-for-construction-and-concrete-product/</a> , pristupljeno: 15. 9. 2023. godine) ..... | 88 |
| Slika 125 Katalog odabranog lanca (Izvor: <a href="https://www.dawson-group.com/amp/50mm-Grade-U3-Stud-Link-Anchor-Chain-for-Ship-Building-pd033512.html">https://www.dawson-group.com/amp/50mm-Grade-U3-Stud-Link-Anchor-Chain-for-Ship-Building-pd033512.html</a> , pristupljeno: 15. 9. 2023. godine).....  | 89 |
| Slika 126 Shematski prikaz gambeta .....   | 90 |
| Slika 127 Katalog gambeta (Izvor: <a href="https://remex.hr/proizvod/skopac-din-82101-rx-lift/">https://remex.hr/proizvod/skopac-din-82101-rx-lift/</a> , pristupljeno: 13. 9. 2023. godine) .....   | 90 |

## **Grafički prilozi**

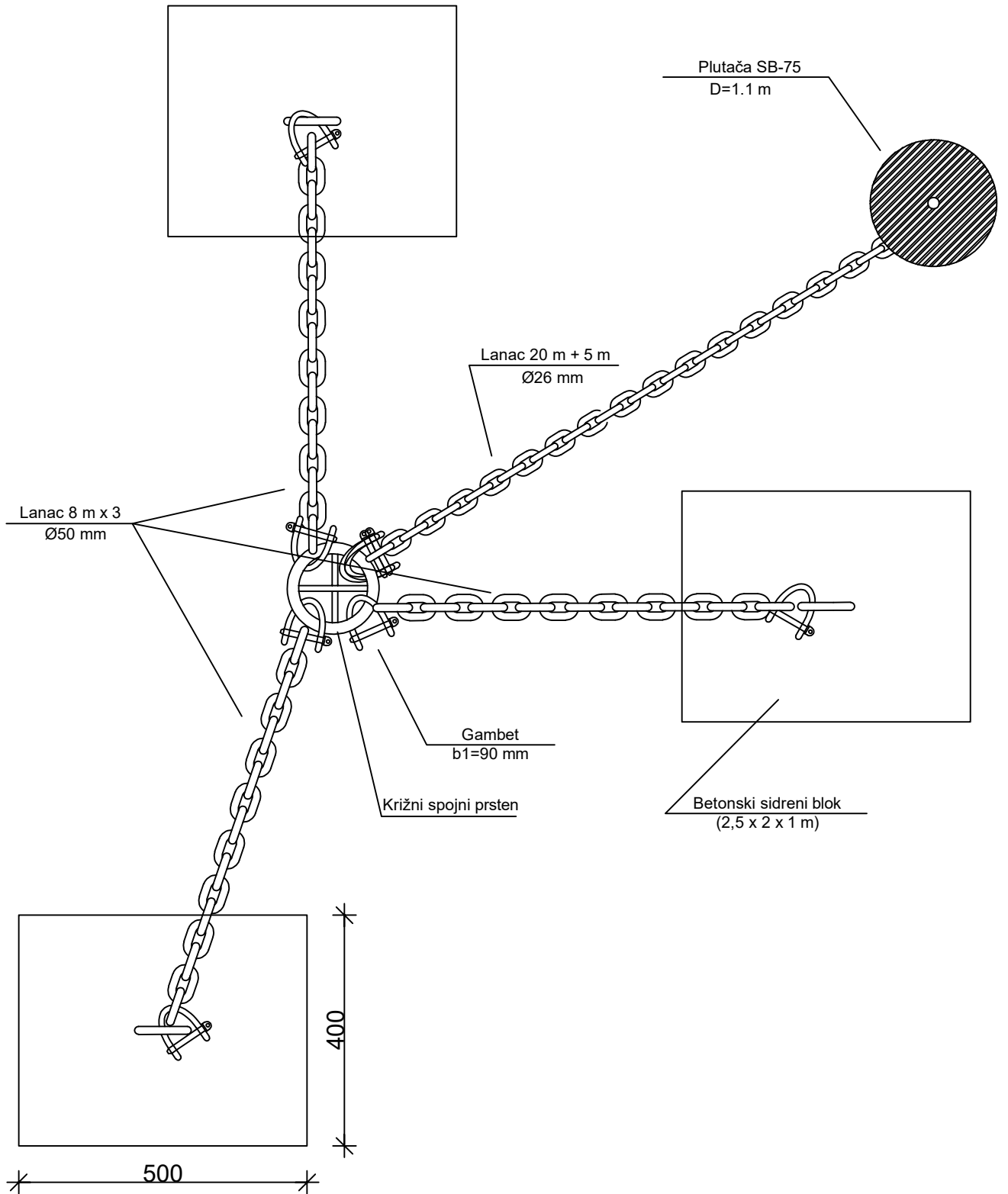
- [1] Grafički prikaz tehničkog rješenja sidrenog sustava u Tivatskom zaljevu (M 1:200)
- [2] Tlocrtni prikaz tehničkog rješenja sidrenog sustava u Tivatskom zaljevu (M 1:50)
- [3] Detalj betonskog sidrenog bloka (M 1:25)

# Tehničko rješenje sidrenog sustava u Tivatskom zaljevu M 1:200



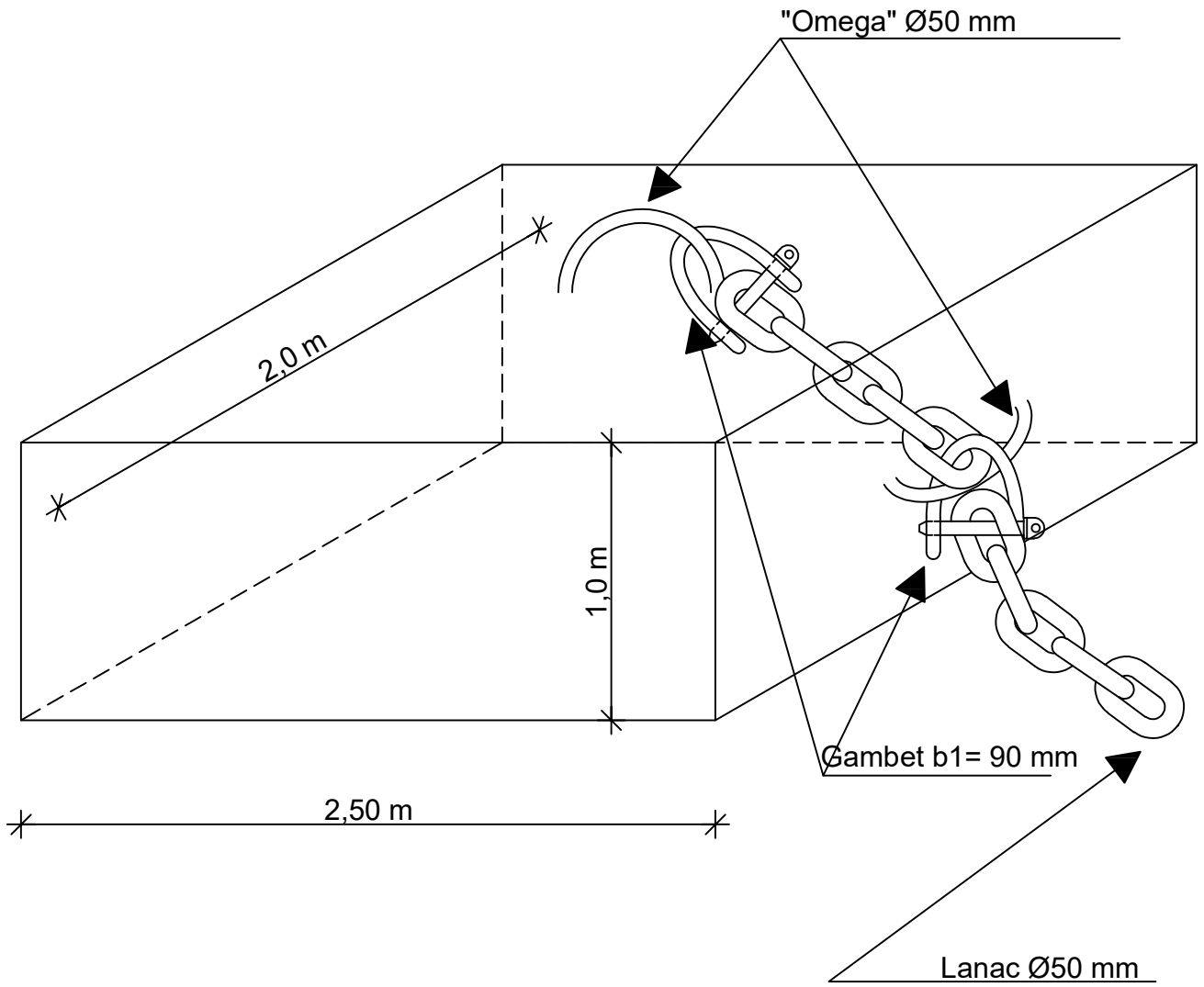
|  |                      |  |              |       |
|--|----------------------|--|--------------|-------|
| <br>SVEUČILIŠTE U SPLITU,<br>FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,<br>ARHITEKTURE I GEODEZIJE<br>21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15 | <b>DIPLOMSKI RAD</b> |  |              |       |
|  | TEMA                 | Primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva u uvjetima valnog polja |              |       |
|  | STUDENT              | Tea Pažanin  |              |       |
|  | SADRŽAJ              | TEHNIČKO RJEŠENJE SIDRIŠTA U TIVATSKOM ZALJEVU   | MJERILO      | 1:200 |
|  | DATUM                | 2023.  | BROJ PRILOGA | 1     |

# TLOCRTNI PRIKAZ TEHNIČKOG RJEŠENJA SIDRENOG SUSTAVA M 1:50



|   |                      |  |              |      |
|---|----------------------|--|--------------|------|
|  <p>SVEUČILIŠTE U SPLITU,<br/>FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,<br/>ARHITEKTURE I GEODEZIJE<br/>21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15</p> | <b>DIPLOMSKI RAD</b> |  |              |      |
|   | TEMA                 | Primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva u uvjetima valnog polja |              |      |
|   | STUDENT              | Tea Pažanin  |              |      |
|   | SADRŽAJ              | TLOCRTNI PRIKAZ TEHNIČKOG RJEŠENJA SIDRENOG SUSTAVA  | MJERILO      | 1:50 |
|   | DATUM                | 2023.  | BROJ PRILOGA | 2    |

# DETALJ BETONSKOG SIDRENOG BLOKA M 1:25



SVEUČILIŠTE U SPLITU,  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE  
21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15

## DIPLOMSKI RAD

|         |  |                |
|---------|--|----------------|
| TEMA    | Primjena modelskog pristupa u definiranju parametara sidrenog sustava u akvatoriju Tivatskog zaljeva u uvjetima valnog polja |                |
| STUDENT | Tea Pažanin  |                |
| SADRŽAJ | DETALJ BETONSKOG SIDRENOG BLOKA  | MJERILO 1:25   |
| DATUM   | 2023.  | BROJ PRILOGA 3 |