

# Čvrstoća trupa FPSO broda

---

**Bilić, Sandra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2008**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:050249>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**Zavod za brodogradnju i pomorsku tehniku**



## **DIPLOMSKI RAD**

**Mentor:**

**Doc.dr.sc. Joško Parunov**

**Student: Sandra BILIĆ**

**U Zagrebu, 2008.**

---

## SADRŽAJ

<b>2</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>TANKER .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>PUČINSKE KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>KRATKA POVIJEST PLOVNIH OBJEKATA .....</b>	<b>6</b>
<b>4.2</b>	<b>TIPOVI PLUTAJUĆIH PUČINSKIH KONSTRUKCIJA .....</b>	<b>7</b>
4.2.1	POLUURONJIVE PLATFORME .....	7
<b>4.3</b>	<b>SPAR INSTALACIJE .....</b>	<b>8</b>
<b>4.4</b>	<b>TLG PLATFORMA .....</b>	<b>9</b>
<b>4.5</b>	<b>FPSO .....</b>	<b>10</b>
4.5.1	EKONOMIJA FPSO KONSTRUKCIJE .....	13
4.5.2	STRUKTURA FPSO KONSTRUKCIJE .....	14
4.5.3	TANKER U ODNOSU NA FPSO .....	14
4.5.4	KONVERZIJA TANKERA U ODNOSU NA NOVO SAGRAĐENI FPSO .....	15
<b>5</b>	<b>ČVRSTOĆA TRUPA.....</b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b>IZDRŽLJIVOST BRODSKOG TRUPA.....</b>	<b>16</b>
<b>5.2</b>	<b>GRANIČNA ČVRSTOĆA.....</b>	<b>16</b>
<b>5.3</b>	<b>MATERIJALI U BRODOGRADNJI .....</b>	<b>17</b>
5.3.1	BRODOGRAĐEVNI ČELIK .....	20

---

5.3.2	OSTALI BRODOGRAĐEVNI MATERIJALI.....	21
5.4	<b>IZDRŽLJIVOST BRODSKOG TRUPA NA SAVIJANJE .....</b>	<b>22</b>
5.5	<b>ZAMOR MATERIJALA.....</b>	<b>23</b>
5.6	<b>OPTEREĆENJA BRODSKE KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>24</b>
6	<b>MODEL BRODA .....</b>	<b>25</b>
7	<b>MARS .....</b>	<b>26</b>
8	<b>HIDRODINAMIČKA ANALIZA .....</b>	<b>29</b>
8.1	<b>ODZIV BRODA .....</b>	<b>29</b>
8.2	<b>ODZIV BRODA NA NEPRAVILNOM VALOVLU .....</b>	<b>30</b>
8.3	<b>PRORAČUN PRIJENOSNIH FUNKCIJA GIBANJA I OPTEREĆENJA .....</b>	<b>30</b>
8.3.1	PRORAČUN PRIJENOSNE FUNKCIJE KOD PONIRANJA.....	31
8.4	<b>PRORAČUN PRIJENOSNE FUNKCIJE KOD RELATIVNOG GIBANJA.....</b>	<b>35</b>
8.5	<b>PRORAČUN PRIJENOSNE FUNKCIJE KOD MOMENTA SAVIJANJA.....</b>	<b>38</b>
8.6	<b>PRORAČUN SPEKTRA ODZIVA.....</b>	<b>41</b>
8.6.1	STATISTIKA KRATKOROČNOG ODZIVA.....	45
9	<b>PRORAČUN ČVRSTOĆE BRODA U PROGRAMU MARS.....</b>	<b>57</b>
9.1	<b>ANALIZA GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA .....</b>	<b>58</b>
9.2	<b>PROVJERA ZAMORA MATERIJALA .....</b>	<b>62</b>
Slika 10.	Prikaz zamornog vijeka pojedinih uzdužnjaka kod tankera .....	62
10	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>66</b>

---

## 1 UVOD

FPSO brodovi su pučinske konstrukcije čija je osnovna namjena crpljenje i skladištenje nafte.

U ovom diplomskom radu dani su pregled i značajke FPSO brodova, kao i razlike u odnosu na druge vrste platformi te u odnosu na preoceanski tanker za prijevoz nafte. Posebna pažnja usmjerena je ka čvrstoći trupa, kako tankera tako i FPSO broda.

U proračunskom djelu rezultati proračuna uzdužne čvrstoće i dinamičke izdržljivosti dobiveni su upotrebom programa MARS, koji je razvilo klasifikacijsko društvo Bureau Veritas. Tu je ujedno bilo nužno izvršiti hidrodinamičku analizu poniranja koja direktno ulazi u softverski paket te je prikazana u radu.

## 2 TANKER

Tankere definiramo kao brodove sa jednostrukom ili dvostrukom oplatom (iako valja naglasiti kako konstrukcija novih nalaže dvostruku oplatu kao mjeru sprečavanja zagađivanja u slučaju sudara ili nasukavanja; moramo biti svjesni kako se na svjetskim morima još uvijek nalaze jednostruki trupovi) i strukturnim tankovima za prijevoz tekućeg tereta.

Prvi tankeri su se pojavili krajem 19. stoljeća i prevozili su naftu iz Meksičkog zaljeva za Englesku. Otada pa do danas, tankeri su prisutni na svim morima i neprestano traje njihov razvoj.

Tankeri, u pravilu imaju manje nadvođe od ostalih teretnih brodova, ali pregrade i stabilitet u slučaju prodora vode moraju udovoljavati naročitim zahtjevima, propisanim u Međunarodnoj konvenciji o teretnim linijama, 1966, i u Međunarodnoj konvenciji za zaštitu ljudskog života na moru, 1974.

Paralelno s razvojem tankera nastoji se usavršiti i konstrukcija trupa, u prvom redu da se osigura potrebna čvrstoća. Zbog relativno male visine trupa i kritičnih opterećenja, koja mogu nastati uslijed nepovoljno raspoređenih tereta, odnosno balasta, nastaju u pojedinim strukturnim elementima znatna naprezanja, pa pod određenim okolnostima brodski trup može napuknuti ili se čak prelomiti. Radi bolje uzdužne čvrstoće, već se 1906. usvaja uzdužni sistem gradnje tankera.

Gotovo istodobno pojavljuju se i drugi sistemi gradnje s poprečnim rebrima. Konstrukcija trupa i dalje se mijenja. Pronalaze se nove forme spajanja pojedinih elemenata, osobito poslije primjene zavarivanja.

U novije vrijeme prevladava uzdužni sistem gradnje (s uzdužnim rebrima). Naročita se pažnja posvećuje izboru materijala podesnog za zavarivanje, uklanjanje oštih prekida te položaju i sistemu gradnje uzdužnih pregrada. Cijeli prostor ispod palube tankera, od pramčanog do strojarskog prostora, predviđen je za smještaj tereta i podijeljen je jednom ili s dvije uzdužne i nekoliko poprečnih pregrada u više tankova, tako da u poprečnom smjeru postoje lijevi i desni bočni tank, kao i po jedan središnji.

Prema vrsti tekućeg tereta možemo ih podijeliti na:

- ✦ tankere za prijevoz sirove nafte, te naftnih derivata
- ✦ tankere za prijevoz ukapljenog prirodnog plina
- ✦ tankere za prijevoz raznih kemikalija
- ✦ tankere za prijevoz ulja



Slika 1. Model tankera za prijevoz nafte

## **3 PUČINSKE KONSTRUKCIJE**

### **3.1 KRATKA POVIJEST PLOVNIH OBJEKATA**

Primarna potreba kod razvoja ljudske civilizacije postala je energija. U samom začetku glavni izvor energije je bio ugljen, da bi ga kasnije zamijenili nafta i plin, koji u današnje vrijeme postaju osnovna potrošna roba u svjetskoj trgovini.

Potruga za naftom u moru započela je, najvjerojatnije u Kaliforniji, na prijelazu iz 19-tog u 20-to stoljeće. U početku, iskorištavanje mora se odvijalo uz obalu, pa sve do 150 m od obale, gradeći lukobrane.

Do ranih 30-tih god. 20-tog st. sistem crpljenja odvijao se uz pomoć samarica koje su bile smještene na udaljenost i do čak 2 km od obale. Opskrba se vršila uz pomoć tegljenica koje su brodovi vukli do obale; ali kada govorimo o dubini vode koja se nalazi u tom području, ona je limitirana na 5 m. Postaje jasno kako se javlja sve veća potreba za pronalaženje rješenja koja bi bila operativna i na većim dubinama.

II svjetski rat postao je prekretnica u razvoju plovni objekata. Tehnologija koja se pritom razvija, vrlo lako se primjenjuju u gradnji istih; kako u područjima duboke vode, tako i u oštrijem okruženju, pritom bivajući puno sigurniji i efikasniji. 1946. gradi se prva čelična platforma od cjevastih dijelova namijenjena za rad 8 km od obale u meksičkom zaljevu, na dubini od 4.5 m. Duljina platforme je 53 m, dok joj je širina 23 m, nakon čega daljnji razvoj pomiče granice.

Pomorstvenost kao disciplina, do ranih 70-tih god. 20-tog st. nije imala stvarnu primjenu. Međutim, uslijed naftne krize, saznanja iz tog područja rapidno se počinju primjenjivati na platforme kako bi se osvojila sve zahtjevnija područja (kasnih 70-tih govorimo o dubini od 300 m, a kasnih 80-tih od 550 m).



Konačno, 90-tih god. prošlog stoljeća stvoren je novi koncept plutajućih objekata, što je poboljšanje u odnosu na dotadašnje tradicionalne fiksne konstrukcije i tada počinjemo govoriti o FPSO konstrukcijama; iako valja naglasiti kako ne možemo sa sigurnošću odrediti kada su po prvi puta takve jedinice nalik brodovima zauzele svoje mjesto u pomorskoj naftnoj industriji.

## **3.2 TIPOVI PLUTAJUĆIH PUČINSKIH KONSTRUKCIJA**

### **3.2.1 POLUURONJIVE PLATFORME**

Poluuronjive platforme se pretežno upotrebljavaju za bušotine ali od 80-tih god. dodaje im se još jedna zadaća-proizvodnja; iako uglavnom ne posjeduju prostor za skladištenje zaliha. U najraširenijem broju slučajeva, konstrukcijski su riješene na način da posjeduju dvije uronjene horizontalne cijevi nazvane pontonima; koji osiguravaju većinu uzgona kao što imaju i ulogu katamaranske forme prilikom transporta kod niskog gaza.

Sidrenje poluuronjive platforme vrši se uz pomoć lanaca. Alternativno, na mjestima gdje to nije praktično, uz pomoć računala koja reagiraju na pomak sa položaja na koji su postavljene.

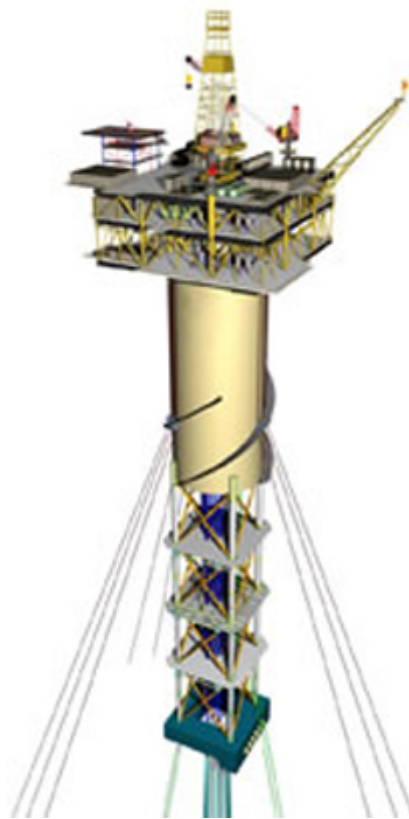


**Slika 2. Pluuronjiva platforma pentagonalnog tipa**

### **3.3 SPAR INSTALACIJE**

Spar instalacije su nastale za skladištenje, a naknadno i za proizvodnju.

Obično se sastoje od vertikalnog cilindra velikog radijusa, što pridonosi značajnoj redukciji odziva od poniranja. Vez takvog objekta omogućava svih 6 stupnjeva slobode gibanja, iako to nije i apsolutno pravilo.

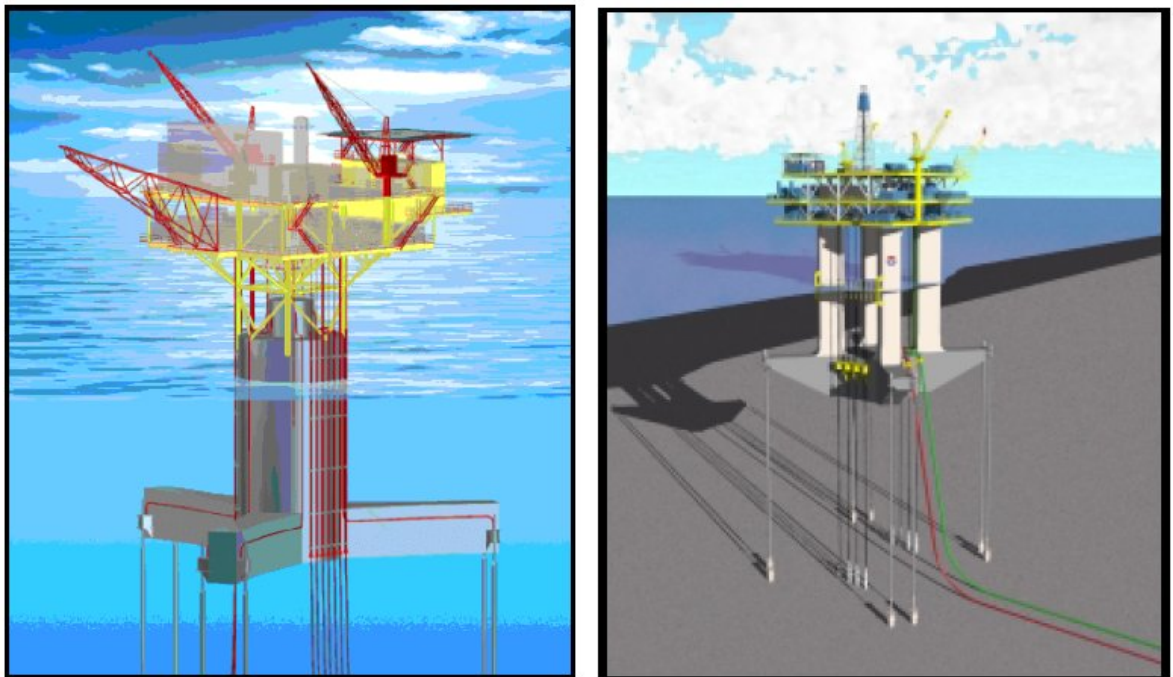


**Slika 3. Spar platforma**

### 3.4 TLG PLATFORMA

TLG (Tension Leg Platform) je platforma fiksno vezana tzv. vlačnom nogom velike čvrstoće. Upravo to omogućuje znatno reduciranje odziva izazvanog poniranjem, posrtanjem i ljuljanjem, dok je odziv od preostala 3 gibanja još uvijek relativno velik.

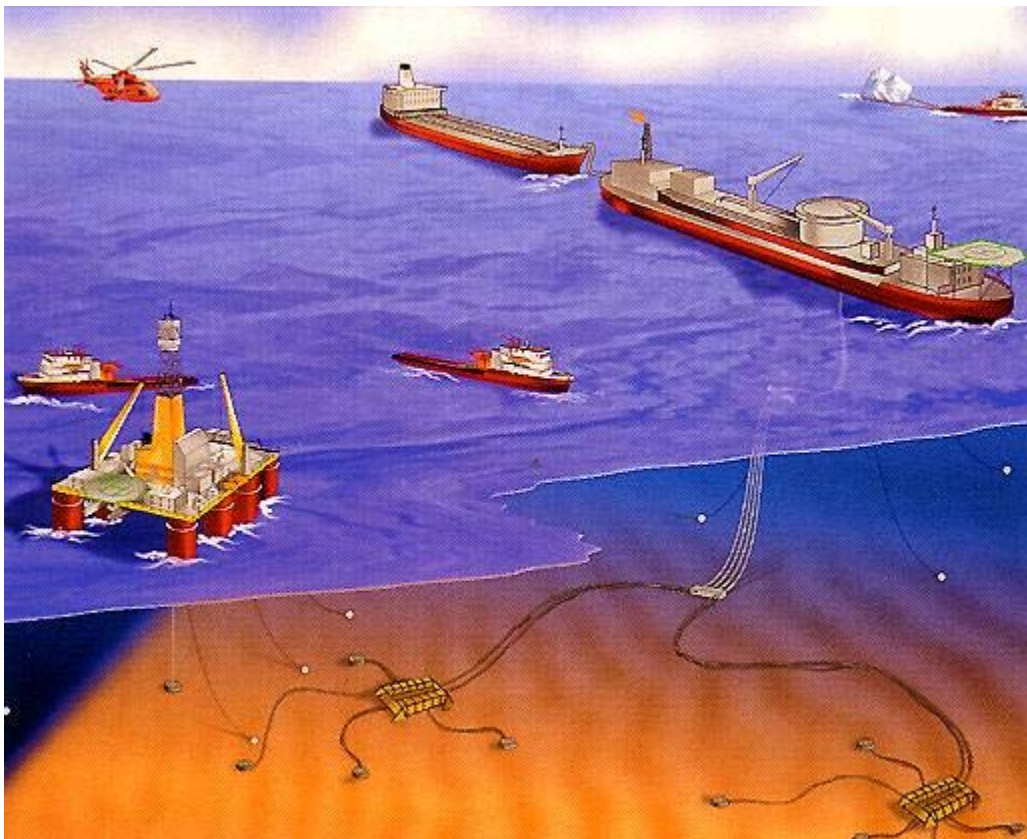
Upotreba takve platforme nije namijenjena spremanju zaliha; nadalje, potreban joj je sustav cjevovoda ili FPSO zajedno sa tankerom koji prevozi proizvedenu naftu do obale.



Slika 4. TLG platforma

### 3.5 FPSO

FPSO (Floating Production Storage and Offloading Units) je, kako je već naznačeno i u samom uvodu, pomorska konstrukcija čija je osnovna zadaća proizvodnja i skladištenje sirove nafte. Konstrukcija samog objekta zahtjeva određene performanse, kojima se osigurava dugogodišnje boravljenje u surovim uvjetima na otvorenom moru. FPSO u svojoj osnovnoj formi nalikuje konvencionalnom tankeru (čijom rekonstrukcijom ujedno i nastaje, o čemu će nešto više biti riječi u nastavku ovog rada); sa dodatkom određenih sistema koji osiguravaju namjenu FPSO jedinice.

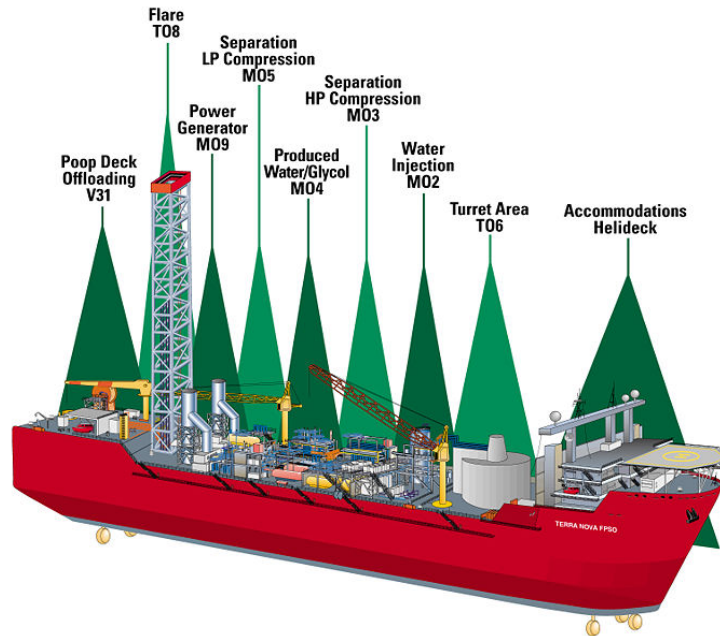


Slika 5. Shematski prikaz operativnog područja FPSO jedinice

FPSO sistem skladišti proizvedenu naftu ili plin u tankove smještene unutar plovila. Povremeno, produkti se iskrcavaju i prevoze do obale uz pomoć tankera ili prekoceanskih teglenica.

FPSO u odnosu na ostale plutajuće strukture ima mnoge prednosti kada govorimo o širokom području rada, kapacitetu, čvrstoći strukture, cijeni izrade te podobnost konverziji i prenamjeni. Ipak, slično kao kod ostalih plutajućih formi, volumen istisnine ispod vodne linije je relativno velik, što direktno utječe i na velik odziv strukture uslijed utjecaja valova, vjetra i struja pa tom problemu treba pristupiti pažljivo prilikom izrade projekta. Dinamički pritisak uslijed udaranja pramca u valove, te prelijevanja mora na palubu također treba biti uračunat u ranoj fazi.

Postoji nekoliko metoda sidrenja FPSO konstrukcije, a najčešći je tzv. „turret“ sustav, koji omogućuje njihovo pozicioniranje uvijek pramcem u valove. Na taj se način u najvećoj mjeri smanjuju sile na sidreni sustav. U mirnijim područjima koriste se uobičajeni sidreni sustavi pomoću raspodijeljenih užadi koja, s druge strane, onemogućuju okretanje broda ali u ovakvom okolišu imamo puno manju potrebu za tim.



Slika 6. Shematski prikaz FPSO konstrukcije

- Accommodations → smještaj posade
- Helideck → platforma za slijetanje helikoptera
- Turret area → „turret“ sistem povezivanja FPSO-a sa sustavom pod morem
- Water injection → ubrizgavanje tretirane morske vode za rezervoar
- Separation-high pressure compression → prva faza separacije nafta-voda
- Produced water/glycol mixture → spremnik glikola koji sadrži apsorbiranu vodu
- Separation-low pressure compression → druga faza separacije nafta-voda
- Power generation → generatori snage
- Flare → izgaranje odzračnih plinova
- Poop deck-offloading → područje ukrcaja i iskrcaja za brodove opskrbe

Projektiranje ovakve konstrukcije, zbog njene sličnosti sa uobičajenim brodovima, radi se po pravilima za preookeanske brodove. Međutim takav pristup nije potpuno opravdan prvenstveno iz razloga što je FPSO brod uvijek pozicioniran na jednom mjestu, permanentno okrenut pramcem u valove te mora zadovoljavati „offshore“ pravila, koja su stroža od pravila za projektiranje uobičajenih brodova. Nedavno izvršena istraživanja njihove pouzdanosti, pokazuju da se pravila za uobičajene brodove mogu primijeniti za proračun elemenata poprečne čvrstoće, dok je momente savijanja i smične sile za proračun uzdužne čvrstoće potrebno odrediti izravnom hidrodinamičkom analizom.

Otpornost FPSO-a na zamor materijala predstavlja poseban i vrlo važan zadatak, upravo zbog 100-postotnog provedenog vremena u službi sve do 25 god.

### **3.5.1 EKONOMIJA FPSO KONSTRUKCIJE**

Ubrzana eksploatacija FPSO konstrukcije opravdana je i iz ekonomskih razloga. Uspoređujući je sa klasičnim preookeanskim brodovima, možemo reći da se dnevna likvidnost FPSO-a mjeri u milionima dolara u odnosu na tisuće dolara kada je riječ o trgovačkim brodovima.

Jedina zapreka tako efikasnoj operativnosti, mogla bi biti pogreška u projektnoj fazi. Održavanje jedinice u toj fazi bilo bi neekonomično, što nužno nameće za posljedicu prijevremeno zatvaranje crpnog područja.

### 3.5.2 STRUKTURA FPSO KONSTRUKCIJE

MARPOL (Maritime pollution)- Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja s brodova zahtjeva dvostruku oplatu trupa, kako bi se spriječilo zagađenje mora uslijed oštećenja. Važno je napomenuti kako u ovom slučaju korozija je i veći problem nego kod trgovačkih brodova uslijed izostanka dokiranja. Vrhunac takvog problema nastaje nakon 15 do 17 god. kada otpada premaz.

Dvostruka oplata, također omogućuje bolje zadržavanje topline kao i brže čišćenje tankova.

Glavna paluba zahtjeva određena pojačanja kako bi uspješno preuzela sva naprezanja prouzročena instalacijama koje se nalaze na njoj te teret koji se prebacuje sa proizvodne palube.

Smještaj posade mora biti osiguran na dovoljnoj udaljenosti od područja rada.

### 3.5.3 TANKER U ODNOSU NA FPSO

Iako tanker i FPSO formom izrazito nalikuju u nastavku su naglašene njihove osnovne razlike.

TANKER	FPSO
projektiran za rad na širem području	projektiran za rad na jednom specifičnom području
povratni period valnog opterećenja je 20-25 god.	povratni period je 100 god.
limitiran broj ukrcaja i iskrcaja	veći broj ukrcaja i iskrcaja
limitiran broj različitih stadija krcanja	veći broj različitih stanja krcanja
70 % vremena na otvorenom moru;	100% vremena na otvorenom moru
ostatak u luci ili doku	



---

dokiranje svakih 5 god.

bez dokiranja

---

### 3.5.4 KONVERZIJA TANKERA U ODNOSU NA NOVO SAGRAĐENI FPSO

Prednosti i mane novo sagrađene forme i prenamjene tankera, postoje i trebaju se uzeti u obzir prilikom projektiranja.

Prednosti nove konstrukcije uključuju slijedeće:

- otpornost broda na zamor materijala se može lakše osigurati
- kraći rok projektiranja sustava koji zadovoljava sigurnosne uvijete u nepristupačnom okruženju
- tehnički i komercijalni zahtjevi lakše ostvarivi

Prednost prenamjene tankera:

- krajnji troškovi su reducirani
- vrijeme izrade projekta i konstrukcije je kraće
- manje nadzornih tijela kod projektiranja

Odabir se u grubim crtama odnosi na dugotrajnost, što je na strani nove jedinice; dok ekonomsku računicu bolje pokriva konverzija. Stoga, ukoliko crpilište zahtjeva 20-to godišnju konstantnu operativnost, prednost se daje prvo ponuđenoj opciji.

Troškovi gradnje nove konstrukcije ovise, naravno, o mnogim aspektima uključujući i kapacitet proizvodnje te čuvanja zaliha; ali u grubim crtama, kada govorimo o većem crpilištu, mogu rasti i do 100-200 miliona \$. Usporedo s tim konverzija tankera je mnogo ekonomičnija; i tu govorimo o cijeni od 60 miliona \$.

## **4 ČVRSTOĆA TRUPA**

Ključ projektnog zadatka FPSO broda je čvrstoća trupa, pod tim najviše mislimo na uzdužnu čvrstoću trupa.

### **4.1 IZDRŽLJIVOST BRODSKOG TRUPA**

Izdržljivost broda određuju mehanička svojstva materijala, a to su u prvom redu čvrstoća materijala, njegova elastična svojstva, udarna žilavost i otpornost na stvaranje pukotina, te načini na koje su materijal raspoređeni.

### **4.2 GRANIČNA ČVRSTOĆA**

Granična čvrstoća predstavlja krajnje stanje koje dovodi do loma strukture. Kolaps strukture podrazumijeva gubitak cjelokupne krutosti i sposobnosti podnošenja opterećenja. Provjerom granične čvrstoće nastoji se odrediti veličina i kombinacija opterećenja koja dovode do takvog stanja. Analiza se može odnositi na pojedinačne dijelove konstrukcije kao i na brodski trup u cjelini.

Metoda, kojom bi se omogućila potpuna i točna analiza sloma broskog trupa do sada još nije izvedena. U tu svrhu koristi se metoda konačnih elemenata ali je cijeli postupak vremenski i numerički previše zahtjevan, te se iz praktičnih razloga još uvijek koriste pojednostavljeni i približni postupci sa raznim ograničenjima posebno prilagođeni baš za brodski trup. Tako se, klasifikacijska društva za sada oslanjaju na skupinu inkrementalno – iterativnih postupaka analize progresivnog sloma s izračunatim krivuljama naprezanje – deformacija uključenih u jedinstvene propise uzdužne čvrstoće IACS – a.

### 4.3 MATERIJALI U BRODOGRADNJI

Općenito u brodogradnji se upotrebljavaju slijedeći materijali:

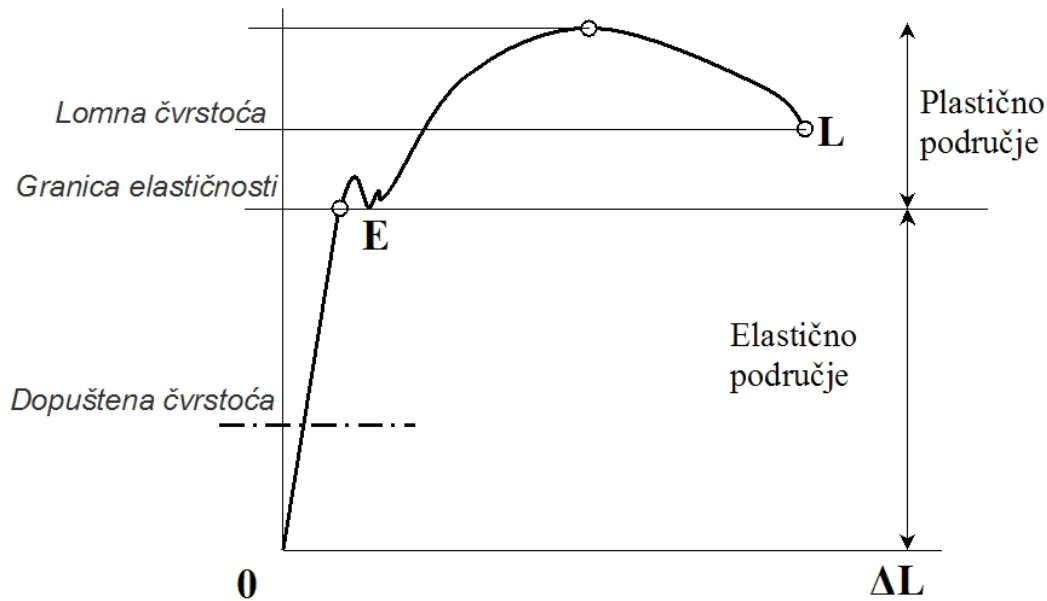
- Čelik
- Drvo
- Aluminijske legure
- Plastika
- Beton

Ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika se vrši prema zahtjevima klasifikacijskih udruga. Sva ispitivanja moraju obavljati školovane osobe primjenjujući umjerene strojeve.

Potrebna su slijedeća ispitivanja:

- ispitivanje rastezanjem; tj. pokus vlačne čvrstoće
- ispitivanje udarne žilavosti

Za brodograđevne čelike se koriste podaci iz vlačnih pokusa, koji se vrše rastezanjem glatko ispolirane epruvete standardiziranih dimenzija sve do loma, pri čemu se, zaključuje o karakteristikama materijala.



**Dijagram 1. Naprezanje  $R$  u funkciji o relativnim deformacijama  $\Delta L$  kod čelika**

Dijagram 1. prikazuje tipičnu krivulju rastezanja uobičajenih čeličnih materijala. Početni dio krivulje je linearan, tj. produženje epruvete proporcionalno je sili rastezanja do točke E, koju zovemo granicom elastičnosti. Ako se obustavi rastezanje bilo gdje u području između 0 i E, epruveta će se vratiti na prvobitnu dužinu bez ikakvih trajnih deformacija, tj. u rasponu naprezanja 0 - E materijal se ponaša potpuno elastično.

Prekoračenjem točke E, rastezanjem u uzdužnom smjeru uzrokuje se suženje epruvete na najslabijem mjestu (što je posljedica nehomogenosti materijala), što se na dijagramu čvrstoće reflektira koljenom iza točke E. Daljnje povećanje opterećenja uzrokuje daljnji porast dužine epruvete, međutim područje E - M više nije elastično, tj. u slučaju prekida pokusa epruveta će se nešto skratiti, ali će ipak ostati trajno deformirana. To se stoga zove područjem plastične deformacije.

Najveće dostignuto opterećenje bilježi se kao maksimalna čvrstoća materijala, koja međutim u slučaju trgovačkih čelika nema praktične vrijednosti.

Nakon dosizanja točke maksimalne čvrstoće, epruveta se produžuje čak i ako opterećenje smanjujemo. Suženje presjeka na najslabijem mjestu epruvete naglo raste i u točki L nastupa lom epruvete, što nazivamo točkom loma.

Zbog sigurnosnih razloga, nećemo dopustiti da se materijal u normalnoj uporabi napregne do granice elastičnosti.

Ispitivanjem udarne žilavosti utvrđuje se utrošena energija udara (prijeloma), uobičajeno u džulima (J). Pokus se obavlja pomoću epruvete kvadratnog presjeka sa V ili U izrezom te se mjeri potreban rad za kidanje tog probnog materijala.

### 4.3.1 BRODOGRAĐEVNI ČELIK

Brodograđevni čelik je najrasprostranjeniji materijal kada je riječ o trgovačkoj brodogradnji. Dijeli se prema mehaničkim svojstvima, tehnologiji izrade i kemijskom sastavu na četiri kategorije označene slovima A, B, D i E (postojala je i kategorija C, ali se s vremenom pokazala suvišnom), koje se odnose na svojstvo udarne žilavosti pri sniženim temperaturama. Oznaka klase F se odnosi na čelike za primjenu na niskim temperaturama ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Primjena pojedine kategorije ovisi o položaju i debljini lima, o tipu broda, te uvjetima pod kojim prometuje ( u tropima ili u ledenim područjima).

Brodograđevni čelik normalne čvrstoće je čelik za konstrukciju trupa s minimalnom nominalnom granicom razvlačenja od  $R_e = 235\text{ N/mm}^2$ , a rastezna čvrstoća mu je od  $R_m = 400$  do  $490\text{ N/mm}^2$ .

To je meki čelik koji ima ove karakteristike:

- ☒ čvrstoća (otpornost na kidanje)
- ☒ žilavost (otpornost na stvaranje pukotina)
- ☒ oblikuje se u toplom i hladnom stanju
- ☒ nije krhak (pri naglim udarcima ne puca nego se samo deformira)
- ☒ dobro je zavarljiv

Brodograđevni čelik povišene čvrstoće je čelik za konstrukciju trupa sa minimalnom nominalnom granicom razvlačenja koja se razmatra u četiri grupe:  $R_e = 315, 355$  i  $390\text{ N/mm}^2$ .

Koriste se za visokonapregnute dijelove brodske konstrukcije i kod nosača koji bi bili predebeli da se rade običnog čelika.

Prednosti čelika povišene čvrstoće:

- ☒ otpornosti na zamor materijala
- ☒ građevni dijelovi su tanji i lakša je konstrukcija
- ☒ manje podložan krhkom lomu

Nedostaci:

- ☒ teško se zavaruje (na temperaturi većoj od 1050 °C narušava se struktura)
- ☒ veća su zaostala naprezanja nakon zavarivanja
- ☒ ima isti modul elastičnosti kao i običan čelik pa je gotovo jednako podložan deformiranju kao i običan čelik iako ima veću vlačnu čvrstoću
- ☒  $\sigma$  ovisi o  $E$  pa treba stoga treba paziti kod dimenzioniranja kako ne bi došlo do izvijanja i deformiranja
- ☒ korozivan je (potrebna površinska zaštita)
- ☒ skup

#### 4.3.2 OSTALI BRODOGRAĐEVNI MATERIJALI

U ovom poglavlju daje se samo kratki pregled ostalih brodograđevnih materijala (iako nisu od značaja za sam rad) kako bi se povukla paralela sa osnovnim svojstvima, nama najzanimljivijeg, čelika.

Aluminijske legure se upotrebljavaju kod kratkih nadgrađa, palubnih kućica, unutarnjih pregrada; te od lakih slitina pod strogim nadzorom klasifikacijskih društava, izrađuju se i neki dijelovi nepropusnih pregrada, unutarnje pregrade koje nose teret te tankovi goriva.

Upotreba aluminijskih legura ima određene prednosti kao što su mala težina, nepodlijezanje krhkom lomu, nemagnetičnost; ali i nedostataka kao skupoća, teško zavarivanje te osjetljivost na koroziju.

Drvo se koristi za manje brodove ili neke elemente čeličnih brodova (jarboli, unutarnja oprema). Koriste se uglavnom prerađeni proizvodi od drva (panel ploče, šperploče) koji imaju bolja mehanička i tehnološka svojstva. Ono je lagano, elastično i žilavo, lako obradivo sa velikim odnosom čvrstoće prema težini ali i nehomogeno, lako zapaljivo i brzo prorada.

Pod plastičnim masama podrazumijevamo poliesterske i epoksilne smole ojačane staklenim vlaknima. Prednosti takve konstrukcije je izrada čitavog trupa iz jednog komada, što odlazi na stranu veće nepropusnosti, neosjetljivost na koroziju, nemagnetičnost, manja obraštanja; dok su mane skupoća i mala krutost.

Armirani beton služi za izradu specifičnih objekata kao što su dokovi, pontoni, teglenice, te omogućuje brzu i jeftinu gradnju, duži vijek trajanja, niže troškove održavanja. Razlog zbog kojeg nije raširen u brodogradnji je veća težina u odnosu na čelične brodove, neelastična konstrukcija te mali odnos čvrstoće prema težini.

#### **4.4 IZDRŽLJIVOST BRODSKOG TRUPA NA SAVIJANJE**

Poprečne sile i momenti uslijed savijanja trupa kao posljedica vanjskih opterećenja i opterećenja od tereta u službi broda predstavljaju zahtjeve na konstrukciju broda.

Izdržljivost broskog trupa na uzdužno savijanje ovisi od materijala, neposredno od uzdužno usmjerenih elemenata poprečnog presjeka broskog trupa u koji se ubrajaju svi elementi konstrukcije koji se dovoljno učinkovito prostiru po dužini broda, a posredno i od poprečnih elemenata koji osiguravaju oslonce uzdužnim elementima i održavanje potrebnog oblika broskog trupa.

Momentima savijanja se opire moment otpora poprečnog presjeka kao posljedica materijala trupa i geometrije presjeka.



## 4.5 ZAMOR MATERIJALA

Uzdužna čvrstoća, kao okosnica pri konstruiranju broda, popraćena je veoma važnim čimbenikom koji se pojavljuje uslijed cikličkog opterećenja, a tu pojavu nazivamo zamor materijala.

Zamor materijala nastaje na mjestima gdje vladaju velike koncentracije naprezanja, kao što su strukturni diskontinuiteti, velike promjene krutosti, neravnine, linije zavara i sl., a manifestira se u obliku pukotina. Uključuje tri glavne faze a to su stvaranje pukotine, širenje pukotine te konačni lom.

Problemi zamorne čvrstoće postali su sve uočljiviji razvojem optimiziranih struktura te upotrebom čelika povišene čvrstoće, produkt čega je lakši brod. Važno je napomenuti kako je zamorna čvrstoća općenito slična za obje vrste čelika, te bi veća dozvoljena naprezanja mogla rezultirati kraćim vijekom trajanja strukturnih dijelova. Stoga valja posvetiti posebnu pažnju projektiranju detalja.

## 4.6 OPTEREĆENJA BRODSKE KONSTRUKCIJE

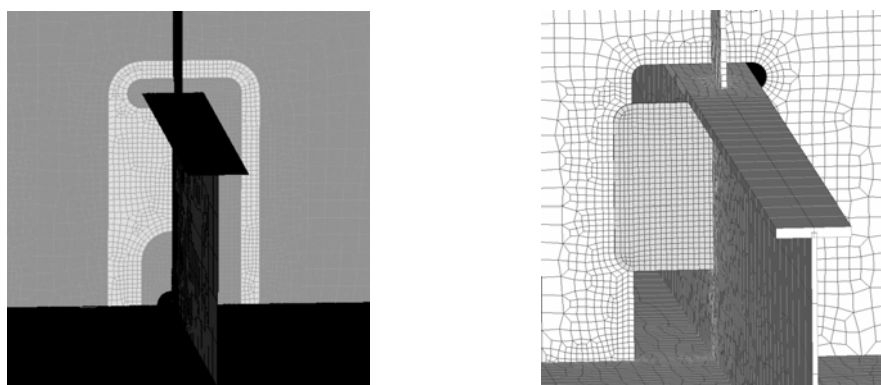
Stvarna se opterećenja promatraju kao ona koja se javljaju u uobičajenim uvjetima službe broda (za razne slučajeve krcanja broda i dokovanja), a posljedica su raznih vanjski utjecaja na brod od vjetra, valova, struja, promjena temperatura, leda, snijega, obrastanja; te na izvanredna opterećenja koja nastaju pri udesima i nesrećama kao sudari, nasukavanja ili drugi nepredvidivi slučajevi. Nastoje se predviđati postupcima pomorstvenosti i teorije broda.

Projektna se opterećenja ne pojavljuju kao takva u naravi, nego se pretpostavljaju na razne načine za potrebe projektiranja brodske konstrukcije. Primjenjuju se kao tlakovi, distribuirana opterećenja, ubrzanja, te koncentrirane sile i momenti.

Opterećenja promatramo kao globalna, promatrajući brodski trup kao gredu, i lokalna. Nadalje, promatramo ih i kao opterećenja na mirnoj vodi, tzv. statička i opterećenja na valovima ili dinamička.

Lokalna statička opterećenja broda na mirnoj vodi se promatraju kao vanjski hidrostatički tlakovi mora na podvodni, uronjeni dio broskog trupa i kao unutarnje sile i tlakovi uslijed vlastitih težina, ukrcanih tereta i zaliha.

Lokalna dinamička opterećenja su posljedica gibanja broda na valovima.



Slika 7. Načini pojačanja strukturnih dijelova

## 5 MODEL BRODA

U proračunskom dijelu rada analiziramo postojeći naftni tanker projektiran prema pravilima klasifikacijskih društava. Tanker se naknadno prenamjenjuje u FPSO brod za službu u Sjevernom moru.

Model poprečnog presjeka glavnog rebra tankera izrađen je u programu MARS, te su prikazani proračuni uzdužne čvrstoće i dinamičke izdržljivosti. Zatim se ista konstrukcija promatra kao FPSO i analizira utjecaj prenamjene na uzdužnu čvrstoću i dinamičku izdržljivost.

Model broda za koji ispitujemo čvrstoću trupa te hidrodinamičke značajke ima slijedeće karakteristike:

$$L_{OA} = 243,8 \text{ m}$$

$$L_{PP} = 233,0 \text{ m}$$

$$B = 42,0 \text{ m}$$

$$H = 21,3 \text{ m}$$

$$T = 14,7 \text{ m}$$

---

## 6 MARS

Program za provjeru poprečnih presjeka brodskog trupa prema pravilima klasifikacijskih društava Bureau Veritas.

Postupci provjere čvrstoće trupa u MARS-u:

- ✚ Uzdužna (globalna) čvrstoća – promatranje broda kao grednog nosača
  - 📖 Provjera momenta otpora poprečnog presjeka
  - 📖 Provjera graničnog momenta savijanja
  - 📖 Provjera smičnih naprezanja grednog nosača
- ✚ Lokalna čvrstoća
  - 📖 Lokalno savijanje i izvijanje uzdužnjaka između okvira (uz uključen utjecaj globalnog savijanja trupa)
  - 📖 Lokalno savijanje i izvijanje opločenja između uzdužnjaka i okvira (uz uključen utjecaj globalnog savijanja trupa)
  - 📖 Provjera minimalnih dimenzija prema pravilima
  - 📖 Dinamička izdržljivost uzdužnjaka (prolazi kroz okvire)

Koraci u provjeri čvrstoće trupa:

1. Definiranje opterećenja
2. Odziv konstrukcije na zadana opterećenja, tj. određivanje naprezanja u konstrukciji
3. Definiranje oblika oštećenja
4. Određivanje kritičnih naprezanja koja dovode do određenog oblika oštećenja
5. Provjera kriterija sigurnosti konstrukcije (omjer naprezanja u konstrukciji i kritičnog naprezanja)

Opterećenja u MARSU dijelimo:

- ⊞ Prema obimu opterećene konstrukcije :
  - Lokalna opterećenja→ tlakovi koji opterećuju uzdužnjake i opločenje na savijanje
  - Globalna opterećenja→ momenti savijanja i poprečne sile trupa kao grednog nosača
- ⊞ Prema vremenskoj promjenjivosti:
  - Statička opterećenja→ vanjski i unutarnji hidrostatički tlakovi (na mirnom moru i tlakovi tereta); momenti savijanja i poprečne sile na mirnom moru (uslijed nejednolike raspodjele težina i uzgona)
  - Dinamička opterećenja s frekvencijom valova→
    - dinamički tlakovi valova na oplatu broda
    - inercijska opterećenja kojima teret djeluje na stjenke tankova uslijed njihanja broda na valovima
    - opterećenja od prelijevanja vode na palubu
    - momenti savijanja i poprečne sile izazvane valovima, tj. njihanjem broda na valovima (uslijed nejednolike raspodjele inercijskih sila i dinamičkih tlakova)

Kada govorimo o projektnom opterećenju u MARS-u, pravilima su definirani različiti projektni slučajevi opterećenja (brod na valnom brijegu, dolu, nagnuti brod...). Nadalje, pravilima su zadana projektna dinamička opterećenja koja treba uzeti za taj slučaj u obzir a za to postoje kako fizikalne, tako i iskustvene formule.

Ukupno projektno opterećenje u pojedinom slučaju dobije se zbrajanjem statičkih i dinamičkih opterećenja; i to vrijedi zasebno za globalna i lokalna opterećenja.

Naprezanja u konstrukciji za globalnu čvrstoću dobivamo samo zbrajanjem globalnih naprezanja; dok za lokalnu čvrstoću zbrajanjem lokalnih i globalnih naprezanja. U tu svrhu MARS koristi metode nauke o čvrstoći, gdje se za teorija savijanja grede koristi i za globalnu i za lokalnu čvrstoću (uzdužnjaci), te teorija savijanja ploča (opločenje; lokalna čvrstoća)

Odziv konstrukcije se računa na “čistim” debljinama, tj. odbijajući korozijska istrošenja prema pravilima. Potrebne debljine konstrukcijskih elemenata se zatim računaju ponovno dodavajući korozijska istrošenja. Korozijska istrošenja su propisana pravilima i ovise o položaju konstrukcijskog elementa – u prvom redu o vrsti ili vrstama odjeljka kojem taj element pripada. Zato je ispravna definicija odjeljaka u MARS-u od ključne važnosti.

Oblici oštećenja u MARS-u:

- ✚ Tečenje materijala – oštećenje koje nastaje kada naprezanja u materijalu pređu granicu tečenja materijala
- ✚ Gubitak stabilnosti – nagli otklon iz ravnotežnog položaja konstrukcijskih elemenata izloženih tlačnom naprezanju
- ✚ Dinamička izdržljivost (zamor materijala) – popuštanje konstrukcijskih detalja izloženih relativno niskoj razini naprezanja ali koje se često ponavlja
- ✚ Granična čvrstoća – maksimalna nosivost uzimajući u obzir istovremeno tečenje materijala i gubitak stabilnosti.

Svi spomenuti oblici oštećenja mogu se promatrati na lokalnoj (uzdužnjaci i opločenje) i globalnoj razini (gredni nosač).

## 7 HIDRODINAMIČKA ANALIZA

Valna opterećenja nisu konstantne amplitude već se mijenjaju od jednog do drugog vala. Hidrodinamička analiza predviđanja odziva velikih struktura na valovlju primjenjuje razne numeričke metode. Iako konzistentno trodimenzionalno rješenje linearnog njihanja i opterećenja konstrukcija još uvijek ne postoji, teorije koje se primjenjuju opisuju realno stanje u relativno dobrom približenju, što je u preliminarnoj fazi potpuno zadovoljavajuće.

Za analizu linearnih odziva velikih struktura na pravilnim valovima najčešće se koriste panel-metode koje se temelje na teoriji potencijala; dok se za praktične proračune još uvijek preporučuje vrpčasta teorija, premda ona ne obuhvaća u potpunosti sve fizikalne efekte. Ipak u mnogim će slučajevima vrpčasta teorija pokazivati relativno dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima, te je primijenjena u ovom radu.

### 7.1 ODZIV BRODA

Odziv broda definiramo kao ponašanje broda na valovima; njegovo njihanje i opterećenje. Razvoj pomorstvenosti primjenjuje analizu njegova odziva na morskim valovima radi procjene operativnosti i sigurnosti na nemirnom moru.

Brod u tom slučaju promatramo kao „filtrar“ koji mijenja ulazni „signal“ (morski valovi) i izlazni ovisno o značajkama samog broda.

Linearna teorija je najjednostavnija teorija progresivnog površinskog vala a može vrlo dobro opisati valovljem izazvana gibanja i opterećenja brodova, poluuronjivih i ostalih velikih struktura. Strukture se promatraju na nailaznom pravilnom valovlju amplitude  $\zeta_a$ .

## 7.2 ODZIV BRODA NA NEPRAVILNOM VALOVLJU

Princip superpozicije koji se primjenjuje u linearnoj teoriji prikazuje nepravilan val, iako je on stohastički proces, kao sumu harmonijskih valova različitih značajki, stoga je od primarne važnosti brodskoj hidrodinamici analiza ponašanja konstrukcije na harmonijskim valovima male strmine.

Spektralna analiza obuhvaća sljedeće korake:

- ✚ Proračun prijenosnih funkcija opterećenja na harmonijskim valovima jedinične amplitude za razne duljine valova i kuteve nailaska broda na valove
- ✚ Određivanje spektra opterećenja za različita stanja mora i kuteve nailaska broda na valove (stanje mora se opisuje dvoparametarskim spektrom valova ovisnim o  $H_s$ ,  $T_z$ )
- ✚ Određivanje kratkoročne učestalosti amplituda opterećenja za pojedina stanja mora i kuteve nailaska broda na valove.

## 7.3 PRORAČUN PRIJENOSNIH FUNKCIJA GIBANJA I OPTEREĆENJA

Prijenosna funkcija predstavlja najpogodniji način prikazivanja odziva plovnog objekta na harmonijskim valovima različitih frekvencija, a definira se kao omjer amplitude odziva broda i amplitude vala.

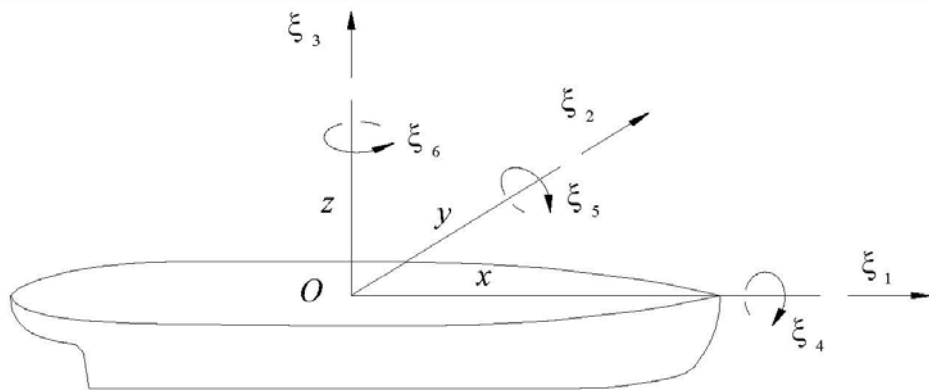
$$|H(\omega)| = \frac{\zeta_{ja}}{\zeta_a}$$

gdje su  $\zeta_{ja} \rightarrow$  amplituda odziva j

$\zeta_a \rightarrow$  amplituda vala



Njihanje broda na valovima podrazumijeva model sa 6 stupnjeva slobode gibanja.



Translacijski stupnjevi slobode su:

- ⊕  $\zeta_1 \rightarrow$  zalijetanje (surge)
- ⊕  $\zeta_2 \rightarrow$  zanošenje (sway)
- ⊕  $\zeta_3 \rightarrow$  poniranje (heave)

Rotacijski stupnjevi slobode su:

- ⊕  $\zeta_4 \rightarrow$  valjanje (roll)
- ⊕  $\zeta_5 \rightarrow$  posrtanje (pitch)
- ⊕  $\zeta_6 \rightarrow$  zaošijanje (yaw)

### 7.3.1 PRORAČUN PRIJENOSNE FUNKCIJE KOD PONIRANJA

Za potrebe analize čvrstoće FPSO broda, među ulazne podatke nužno je uvrstiti odziv broda, za što nam je potreban analitički proračun prijenosnih funkcija.

$$H_w =$$

gdje su  $H_w$  → prijenosna funkcija kod poniranja

→ funkcija hidrodinamičkog opterećenja

$$\eta = \sqrt{(1 - 2kT\alpha^2)^2 + \left(\frac{A^2}{kB\alpha^2}\right)}$$

Ovdje je  $k$  valni broj koji definiramo formulom

$k =$  gdje je frekvencija vala, a gravitacija

$T \rightarrow$  gaz broda

$B \rightarrow$  širina broda

parametar  $\alpha = 1 - Fn\sqrt{kL_0}$  za koji uočavamo da ovisi o Froude-ovom

broju  $Fn$ ; dok je  $Fn = \frac{V}{\sqrt{gL_0}}$ ; za naš slučaj konstrukcija stoji na jednom mjestu pa kako

je u tom slučaju  $V=0$  i  $Fn=0$ .

$$A = 2 \sin\left(\frac{1}{2}kD\alpha^2\right) \exp(-kT) \text{ bezdimenzionalni omjer između ulazne i}$$

izlazne valne amplitude

$$F = \kappa f \frac{2}{k_e L} \sin\left(\frac{1}{2}k_e D\alpha^2\right)$$

gdje je  $k_e = |k \cos \beta|$  efektivni valni broj;  $\beta = 11^\circ$  jer proučavamo samo slučaj

kada valovi idu direktno u pramac

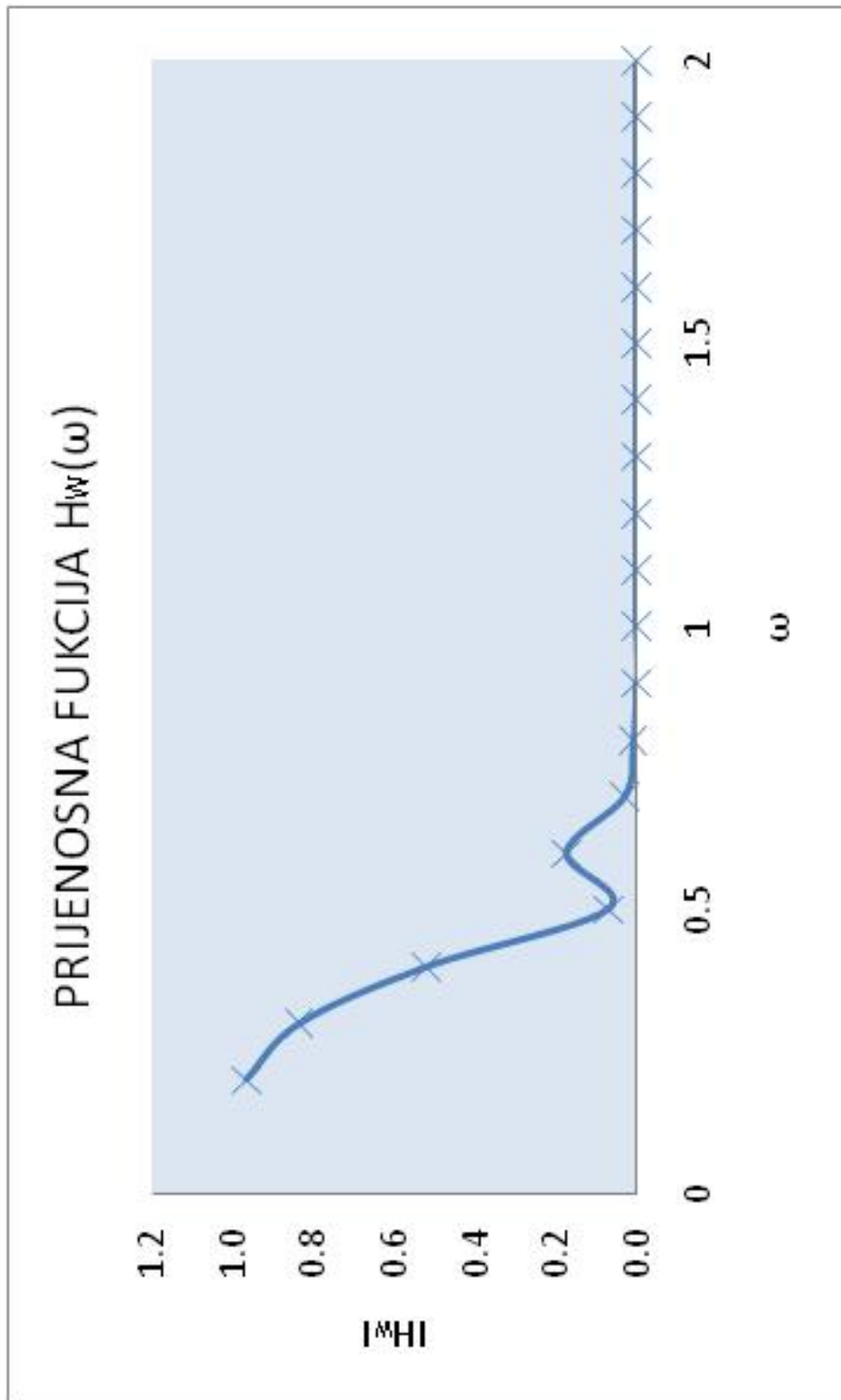
$$\kappa = \exp(-kL) \rightarrow \text{Smith-ov korekcionni faktor}$$

$L \rightarrow$  duljina broda

$$f = \sqrt{(1 - kT)^2 + \left(\frac{A^2}{k^2 B^2 \sigma}\right)}$$

Dijagram koji prikazuje ovisnost prijenosne funkcije poniranja o frekvenciji vala, prikazan je na sljedećoj str.

Tablica koja prati taj dijagram dana je u prilogu.



Dijagram 2. Prijenosna funkcija poniranja u ovisnosti o frekvenciji vala

## 7.4 PRORAČUN PRIJENOSNE FUNKCIJE KOD RELATIVNOG GIBANJA

Pod pojmom relativnog gibanja opisujemo gibanje u odnosu na valnu površinu (za razliku od apsolutnog koji podrazumijeva neporemećenu slobodnu površinu)

$$H_R = \sqrt{(H_W - \cos \xi(x))^2 + (xH_\theta + \sin \xi(x))^2}$$

gdje je  $\eta$  → prijenosna funkcija kod relativnog gibanja

$\xi(x) = 0$ ; stoga što promatramo sredinu broda gdje je postavljeno središte

koordinatnog sustava

$$\xi(x) = \varepsilon_r + \varepsilon_p +$$

$$\cos \varepsilon_p = \frac{1}{kT}; \quad \sin \varepsilon_p = \frac{A}{kT}$$

$$\cos \varepsilon_r = (1 - 2kT\alpha); \quad \sin \varepsilon_r = \frac{A}{kB}$$

$$\eta = \sqrt{(1 - 2kT\alpha)^2 + \left(\frac{A^2}{kB^2}\right)}$$

→ prijenosna funkcija kod poniranja

→ prijenosna funkcija kod postiranja

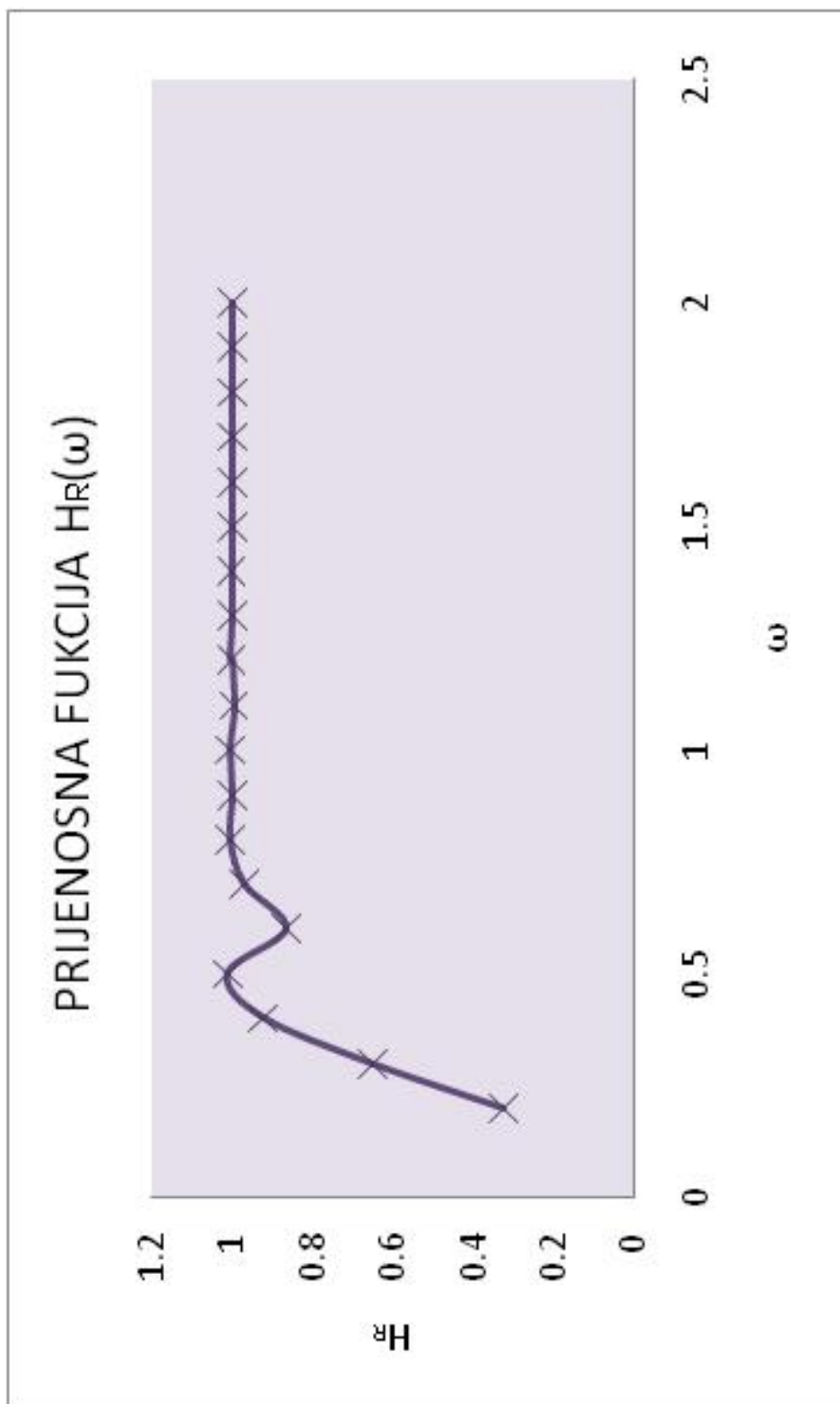
$T \rightarrow$  gaz broda

$k \rightarrow$  valni broj

$\rightarrow$  parametar

$A \rightarrow$  bezdimenzionalni omjer između ulazne i izlazne valne amplitude

$B \rightarrow$  širina broda



Dijagram 3. Prijenosna funkcija poniranja u ovisnosti o frekvenciji vala

## 7.5 PRORAČUN PRIJENOSNE FUNKCIJE KOD MOMENTA SAVIJANJA

$$\frac{M_{\text{pr}}}{\rho g B_0 L^3} = K \frac{1-KT}{(k_g L)^3} \left[ 1 - \cos\left(\frac{k_g L}{2}\right) - \frac{k_g L}{4} \sin\left(\frac{k_g L}{2}\right) \right] E_v(Fn) E_C(\dots)$$

→ prijenosna funkcija kod momenta savijanja

gdje je  $C_h$  korekcijski faktor za blok koeficijent a odgovara formuli:

$$E_C(C_h) = [(1 - \vartheta)^2 + 0,6\alpha(2 -$$

$$\vartheta = 2,5(1 -$$

$$C_h = \max(0,5;$$

$$E_v(Fn) = 1 + 3.$$

$E_v(Fn)$  koeficijent korekcije brzine (u ovom slučaju jednak je 1

jer se govori o FPSO konstrukciji koja je nepomična)

→ Smith-ov korekcijski faktor

→ gustoća vode

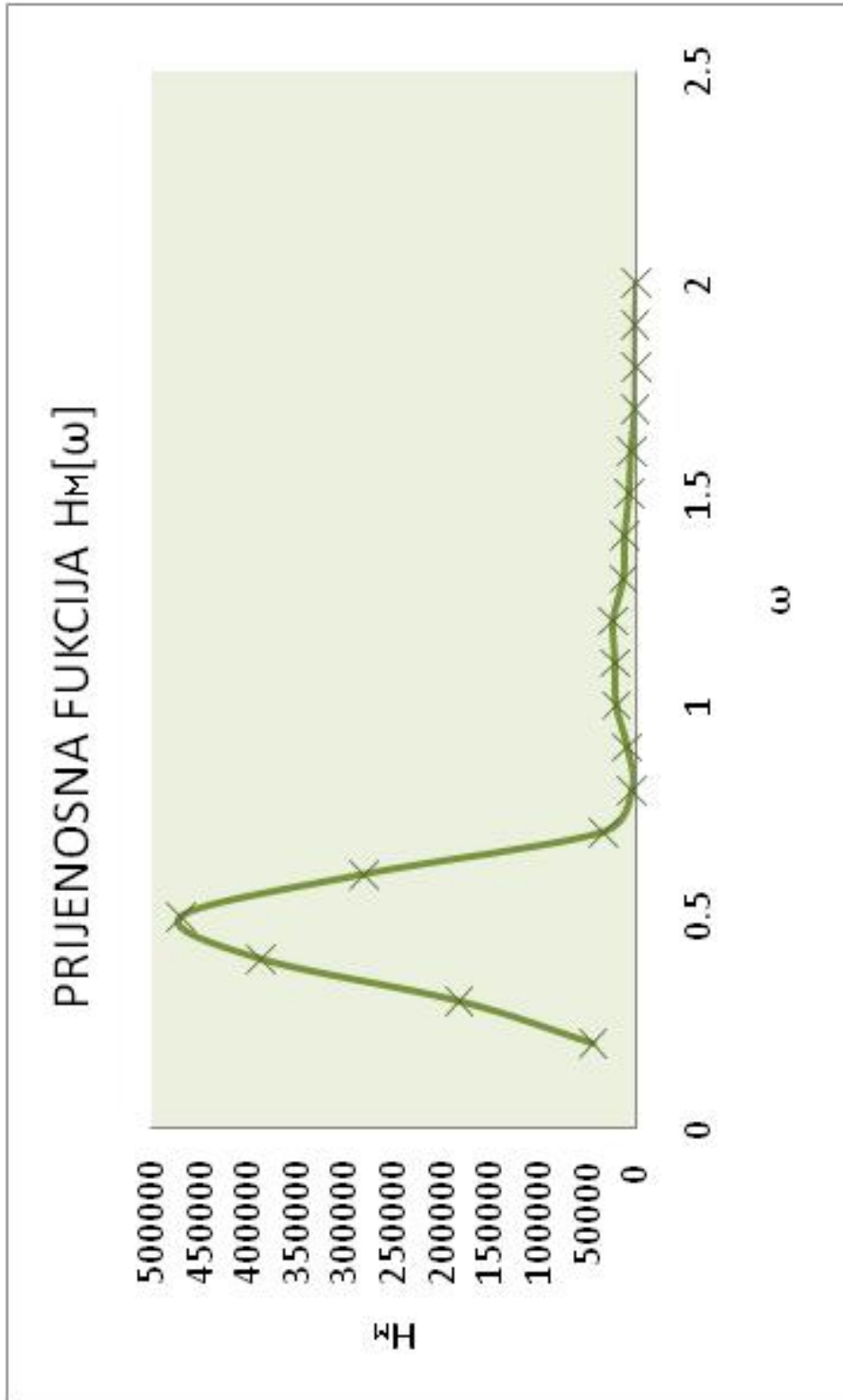
L → duljina broda



$k \rightarrow$  valni broj

$k_e \rightarrow$  efektivni valni broj

$T \rightarrow$  gaz broda



Dijagram 4. Prijenosna funkcija momenata savijanja u ovisnosti o frekvenciji vala

## 7.6 PRORAČUN SPEKTRA ODZIVA

Nakon što su izračunate prijenosne funkcije, vrlo lako se može izračunati spektar odziva; množenjem kvadrata prijenosne funkcije sa spektrom valova.

$$S_R = |H|^2 S$$

Za potrebe ovog rada korišten je teorijski spektar valova JONSWAP (Joint North Sea Wave Project, 1968.), koji prikazuje pokušaj opisa uvjeta nevremena te opisuje karakteristike valova u ograničenom akvatoriju; u ovom slučaju Sjeverno ledeno more.

$$S_J = S_{PM}(\omega) \frac{1}{F_1} \gamma^{\exp\left[-\frac{1}{2} \left( \frac{9.848 F_2 T_S \omega}{g} \right)^2\right]}$$

gdje je  $S_{PM}$  Pierson-Moskowitz spektar valova:

$$S_{PM}(\omega) = 173 H_S^2 T_S (\omega T_S)^{-5} g^{-6.92 (\omega T_S)}$$

→ frekvencija vala

→ značajna valna visina

→ valni period

$$T_S = T_Z \frac{\sqrt{(10.8F + \gamma)(1)}}{6.774 + \gamma}$$

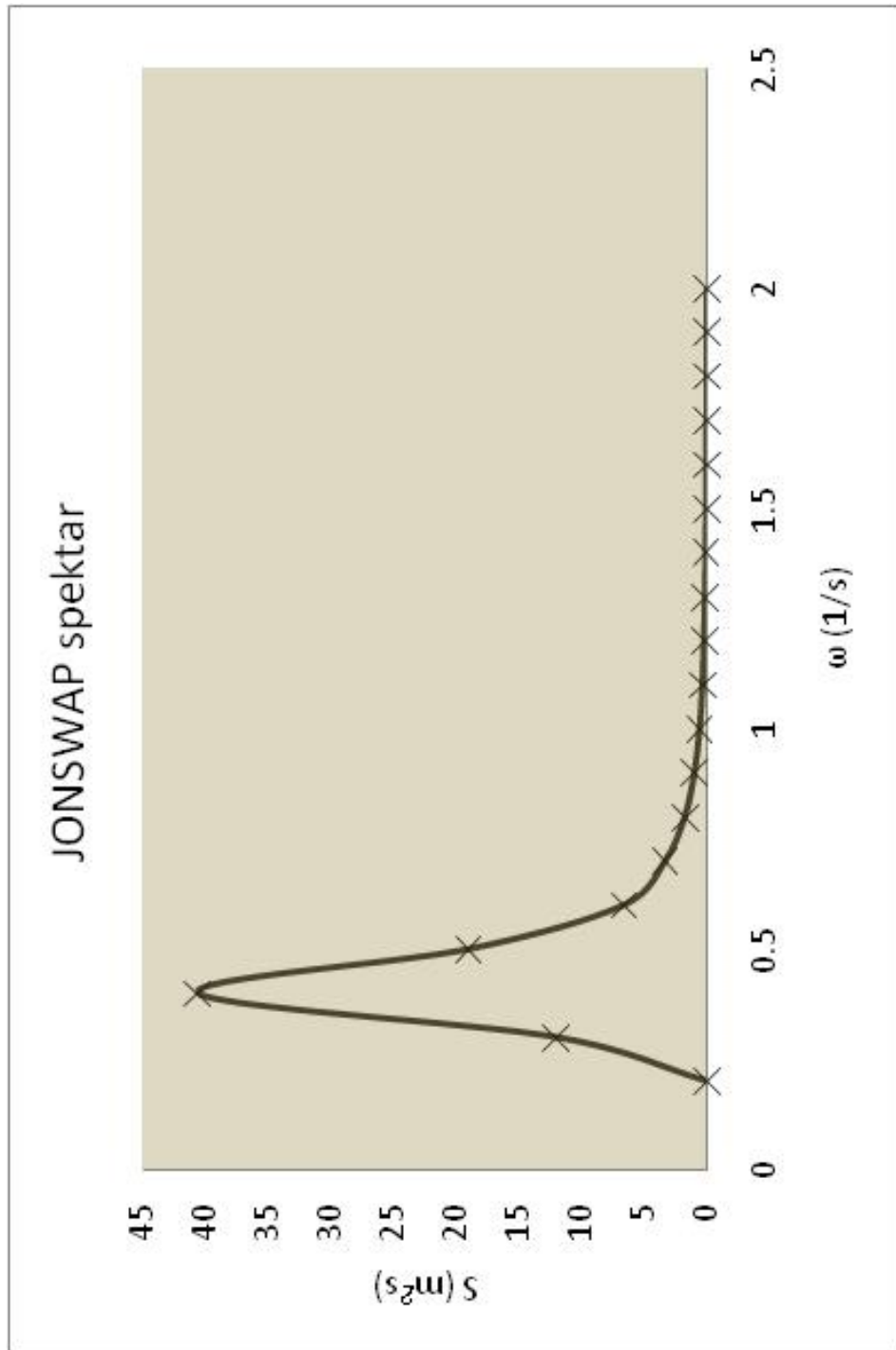
→ multi valni period

$\gamma \rightarrow$  faktor povećanja najviše točke

Za  $2 \leq \gamma \leq 3$ :  $F_1 = 0,22\gamma + 0,8$ ;  $F_2 = -0,02\gamma + 1$

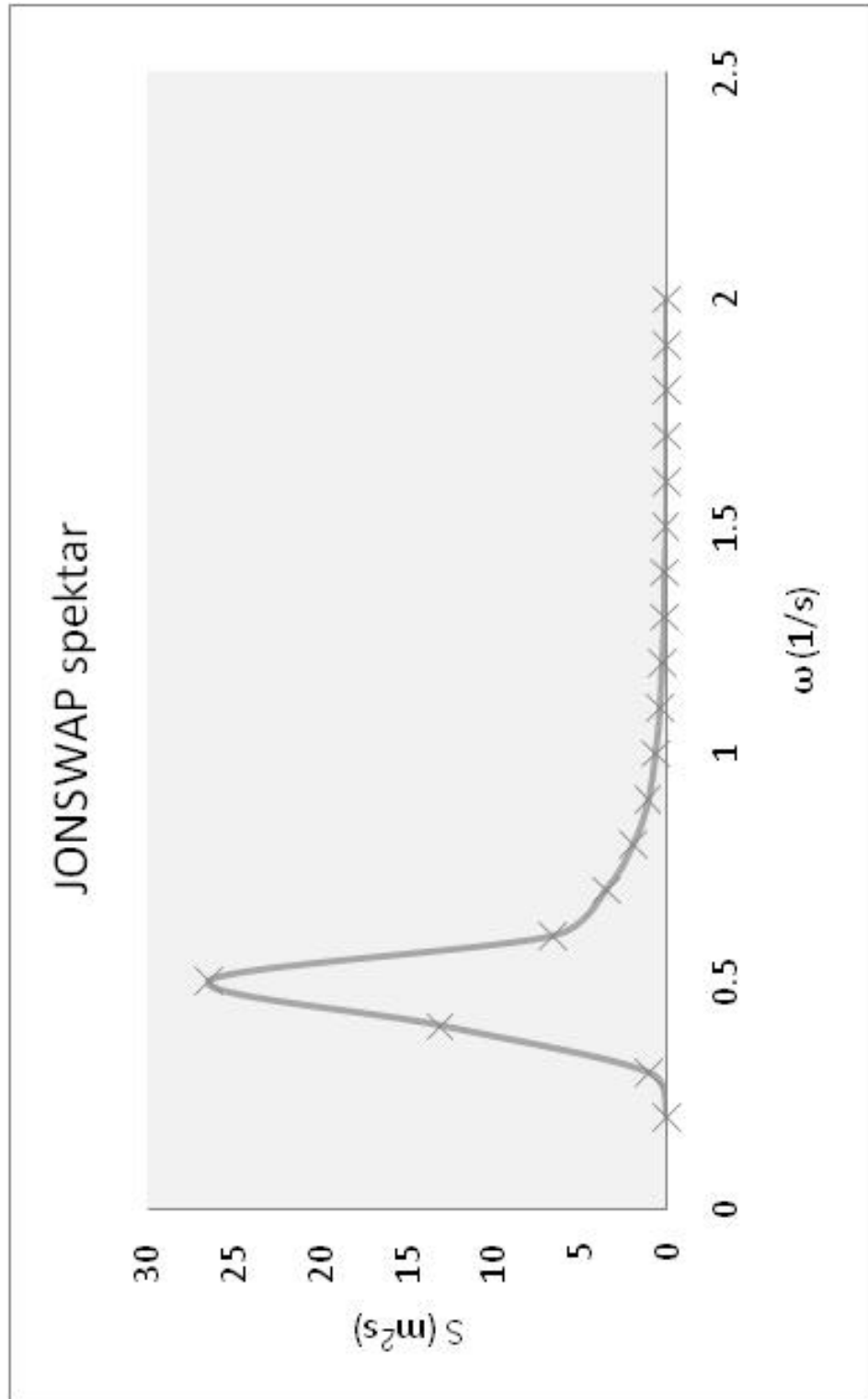
$\sigma = 1$  kada je  $0,206F_2T_s\omega$

$\sigma = 1$  kada je  $0,206F_2T_s\omega$



Dijagram 5. Prikaz JONSWAP N°8;  $H_s = 12,4$  i  $T_s = 12$

7.7



7.8

7.9 Dijagram 6. Prikaz JONSWAP N°8;  $H_s=9,8$  i  $T_s=10,3$

## 7.10 STATISTIKA KRATKOROČNOG ODZIVA

Pri kratkoročnoj prognozi značajna valna visina i valni period smatraju se konstantnim tijekom razmatranog vremenskog perioda. Vremenski period odziva u kratkoročnom stanju mora je od 30 min do nekoliko sati.

Kod JONSWAP N°8 valnog spektra razmatrani vremenski period je 3 sata; dok kod JONSWAP N°23 govorimo o jednom satu.

$$\sigma_R^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

→ varijanca ili srednja kvadratna vrijednost procesa

Značajna valna amplituda odziva koja prikazuje prosječnu vrijednost trećine najviših amplituda određuje se kao:

$$\zeta_{1/3} = :$$

Najvjerojatnija ekstremna amplituda u  $n$  ciklusa odziva dobiva se iz izraza:

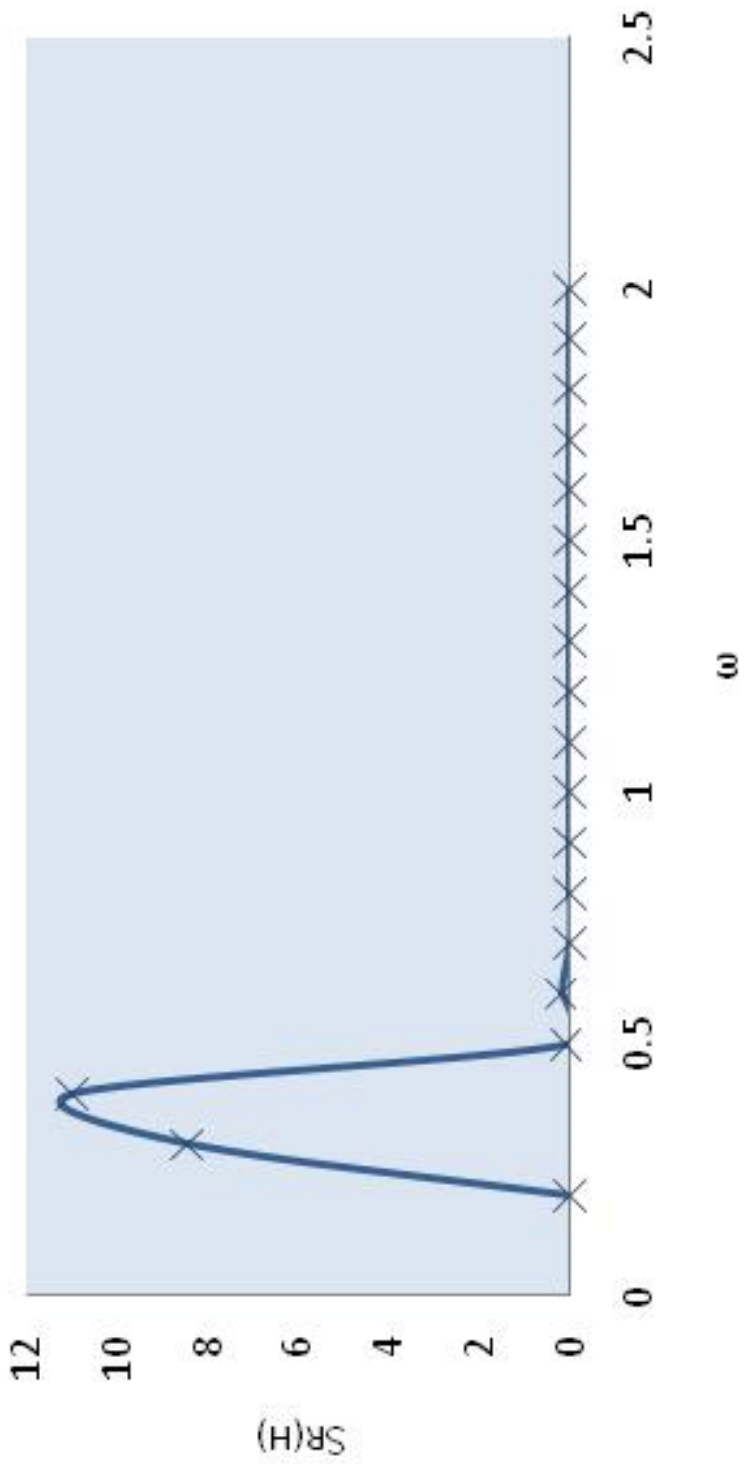
$$\zeta_n^* = \sqrt{2} \sigma_R \sqrt{n}$$

gdje je  $N$  broj ciklusa odziva u vremenskom periodu  $T$  određen je kao:

$$N = \frac{T}{T_p} \rightarrow \text{nulti valni period}$$

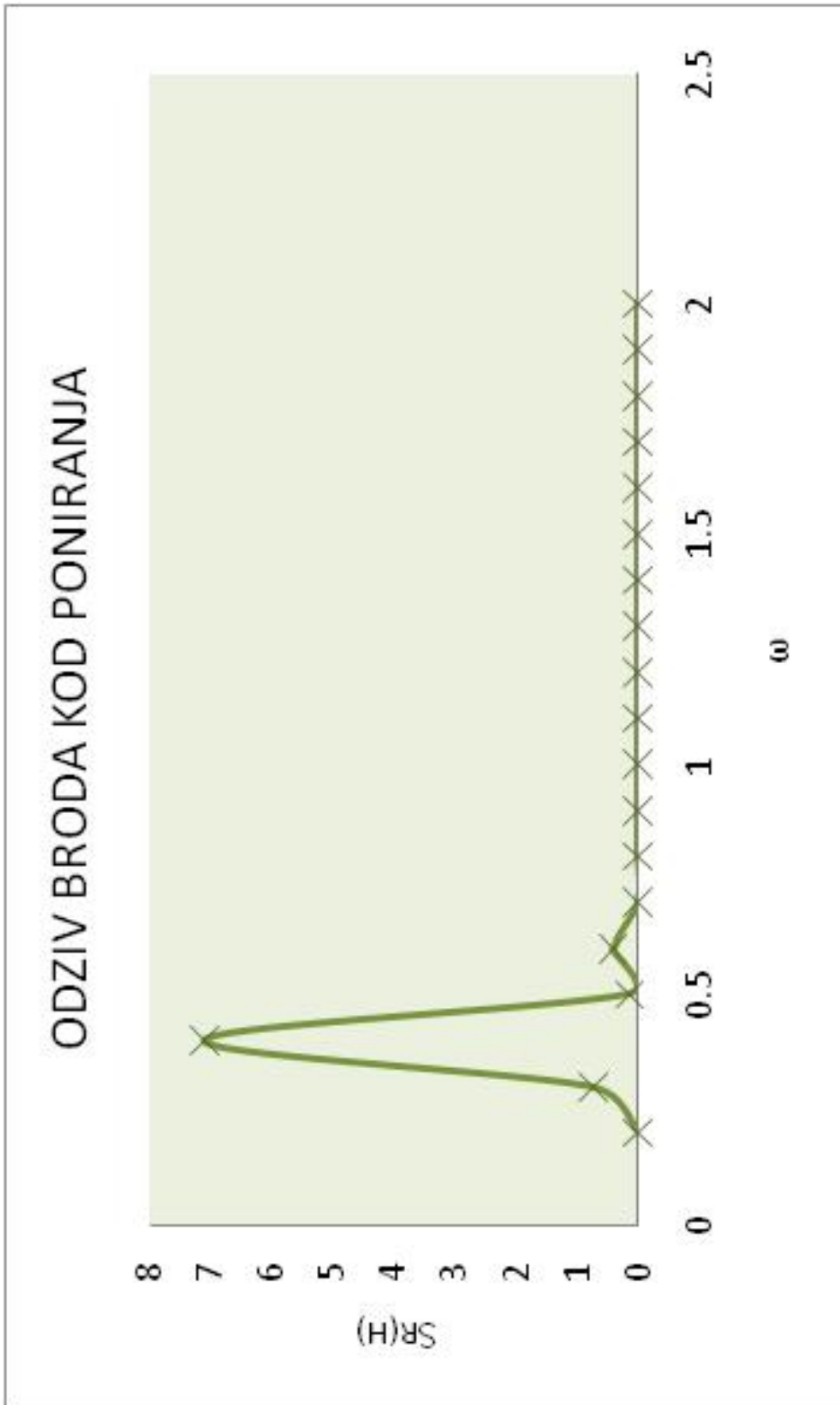
Dijagrami odziva broda prikazani su na slijedećim stranama.

ODZIV BRODA KOD PONIRANJA

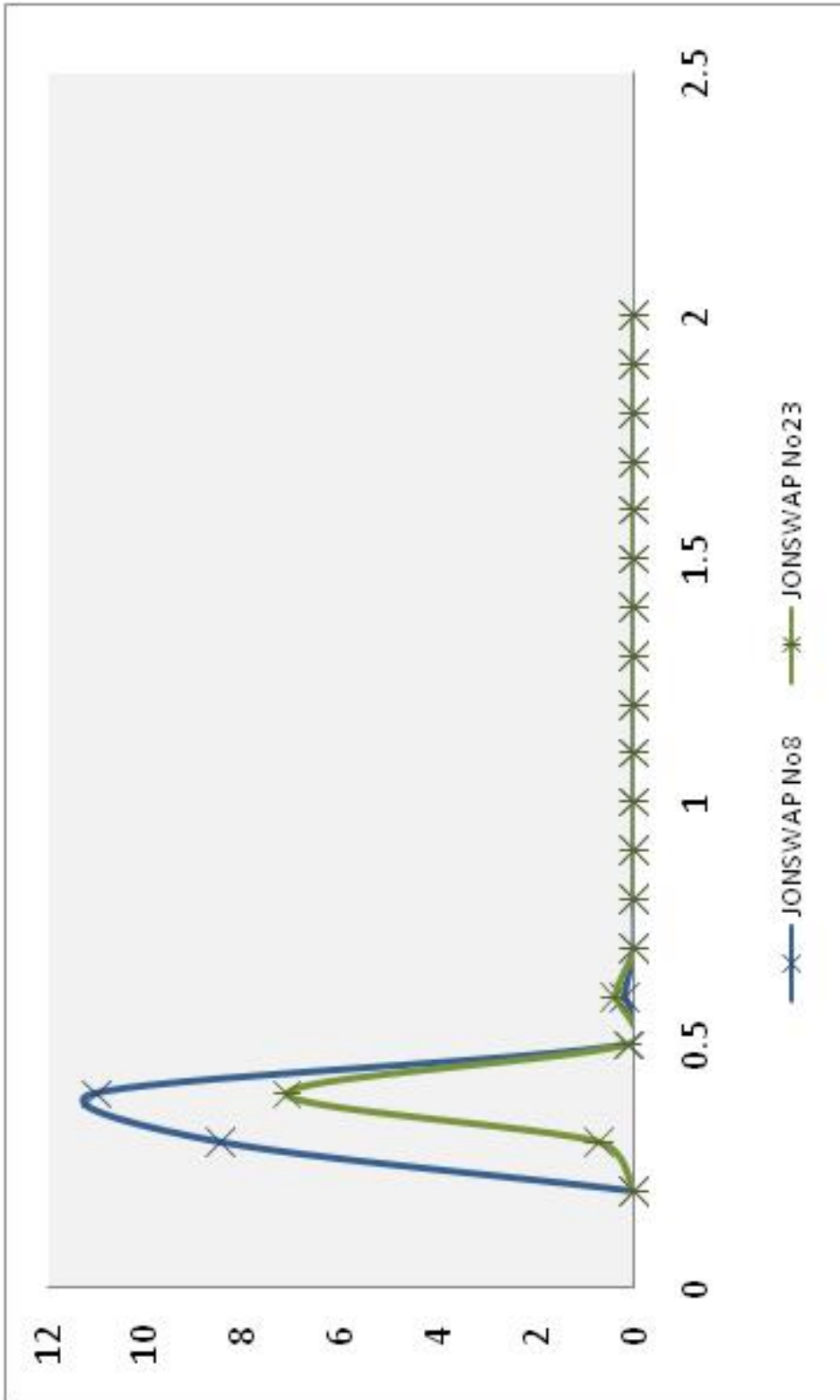


Dijagram 7. Prikaz odziva konstrukcije kod poniranja za valni spektar JONSWAP N°8

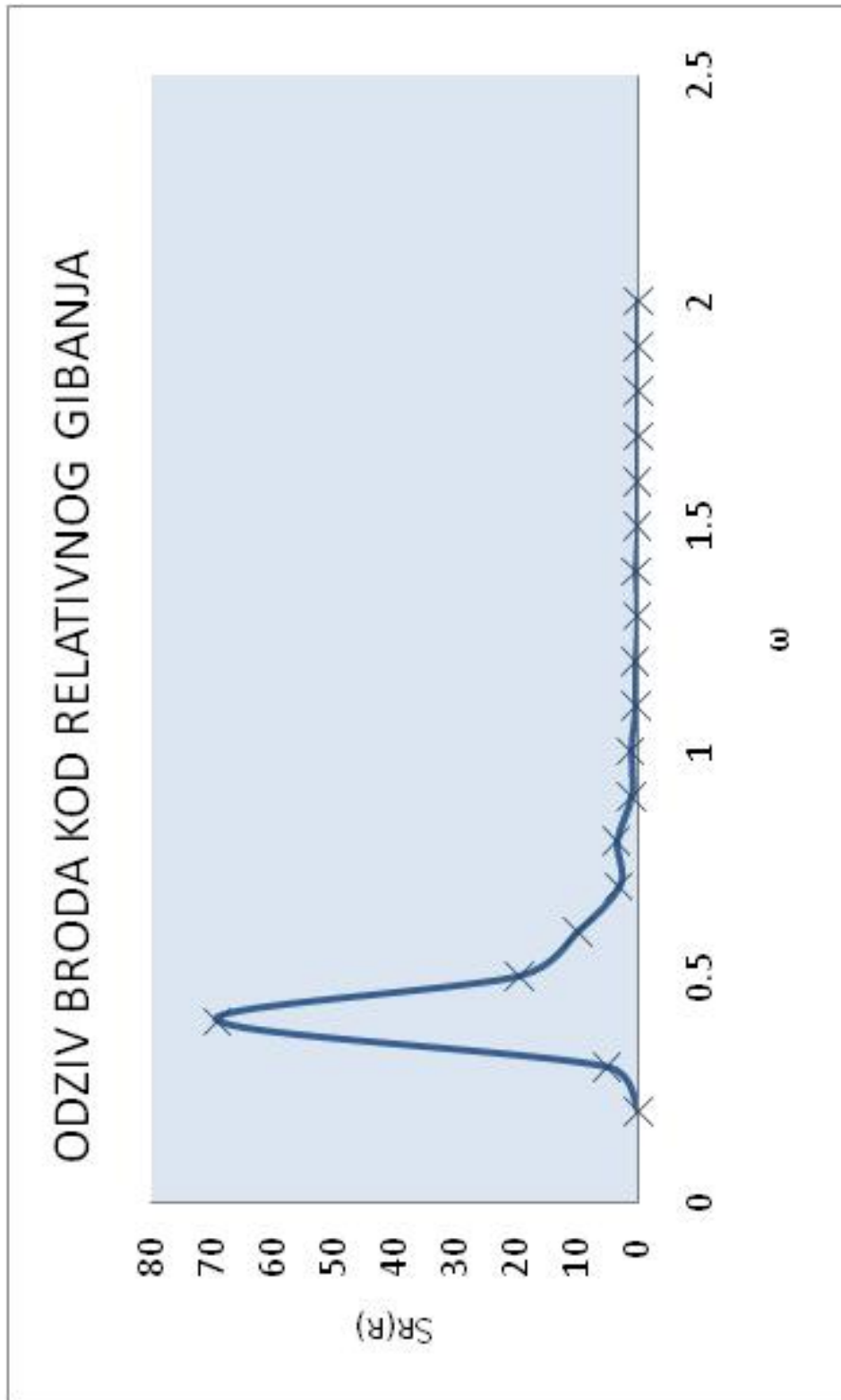




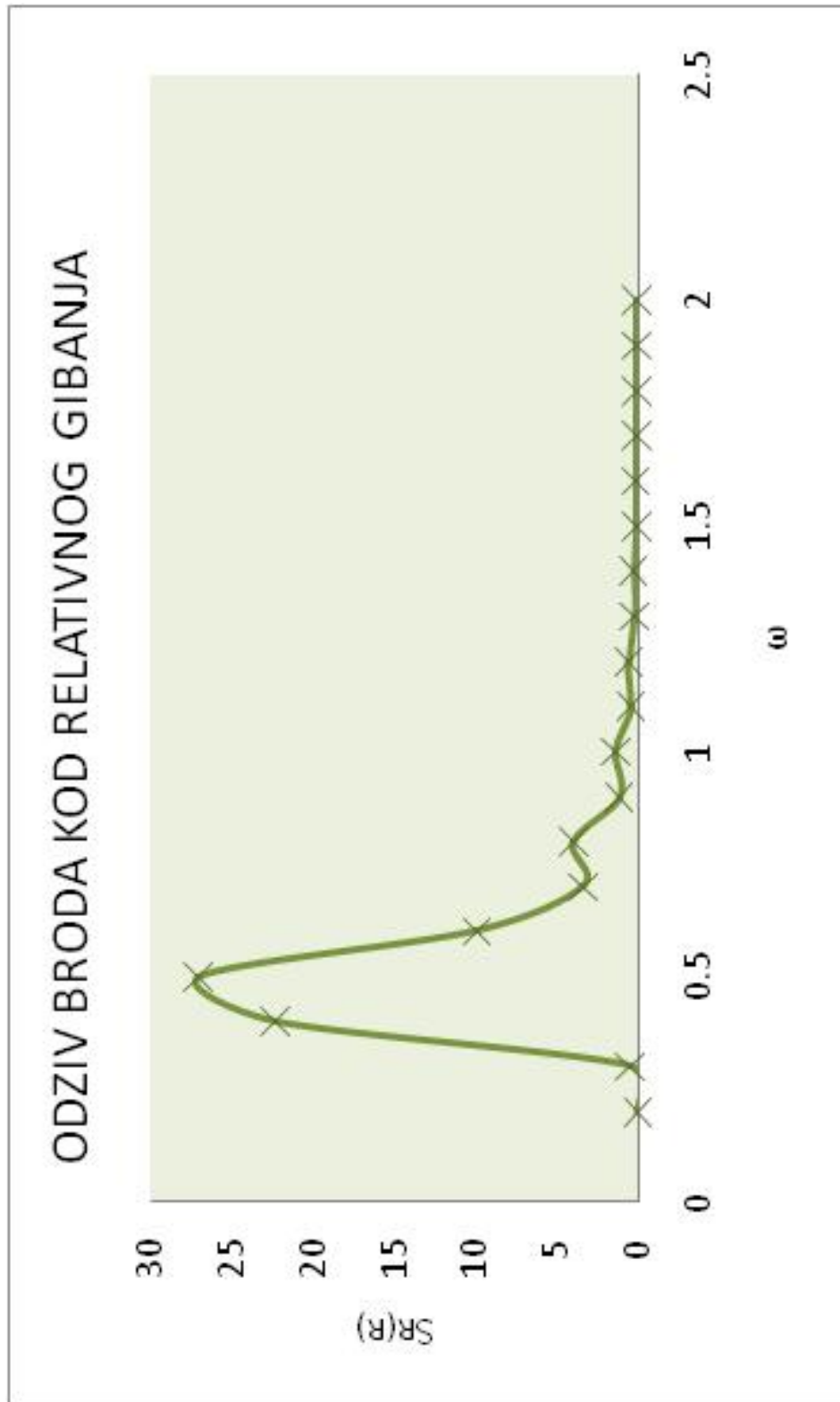
Dijagram 8. Prikaz odziva konstrukcije kod poniranja za valni spektar JONSWAP №23



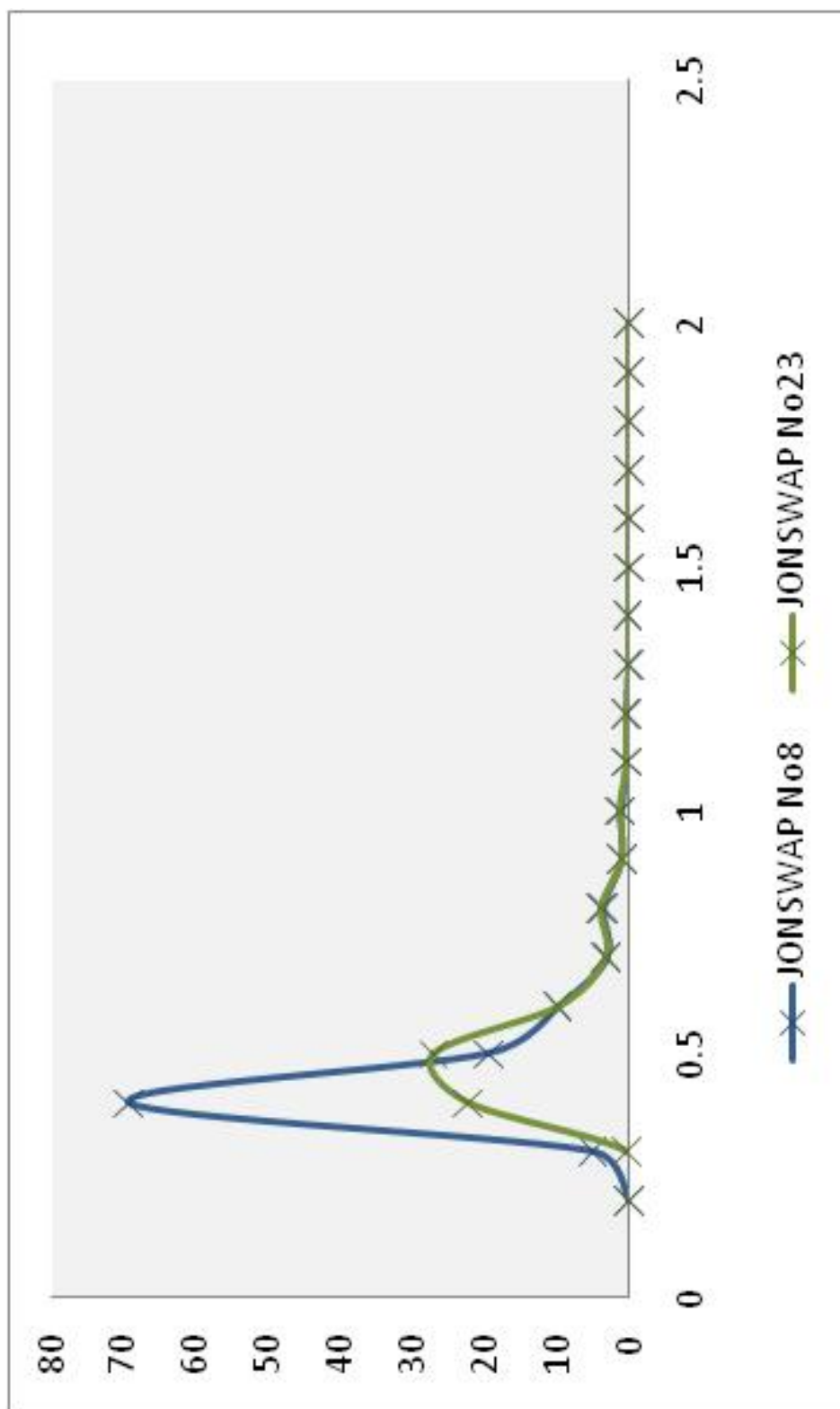
Dijagram 9. Prikaz odziva konstrukcije kod poniranja za različite spektre valova



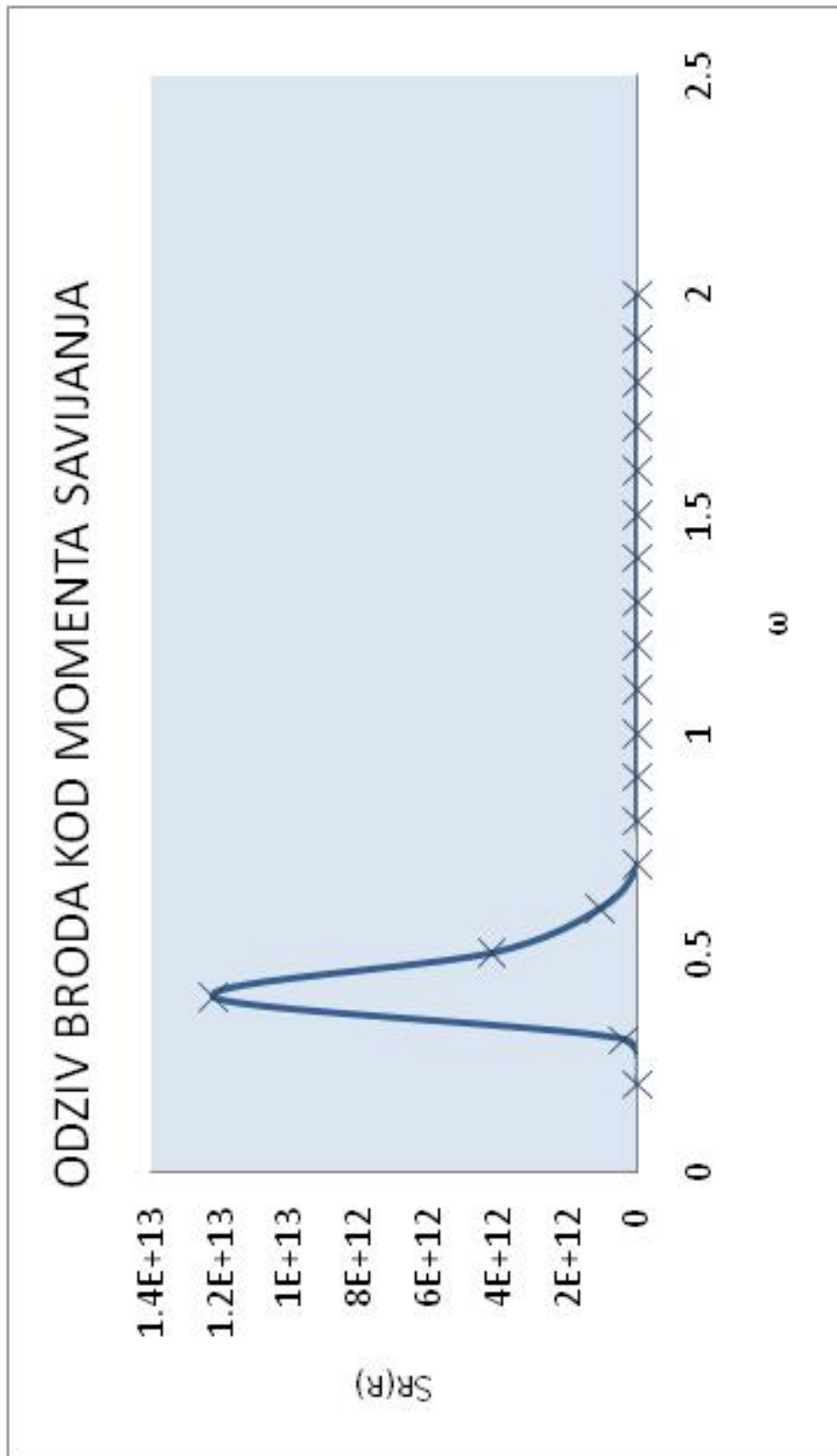
Dijagram 10. Prikaz odziva konstrukcije kod relativnog gibanja za valni spektar JONSWAP N°8



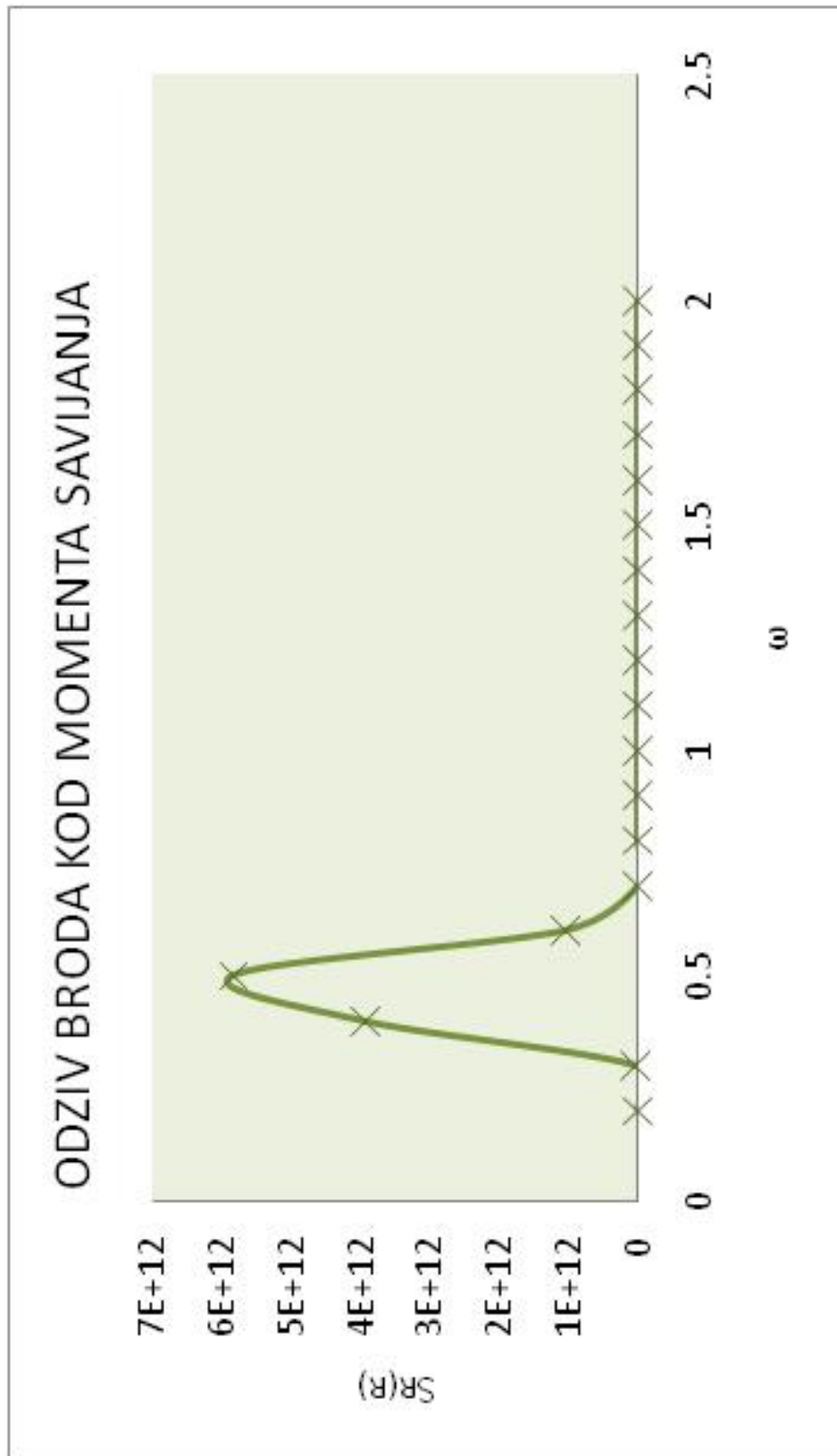
Dijagram 11. Prikaz odziva konstrukcije kod relativnog gibanja za valni spektar JONSWAP №23



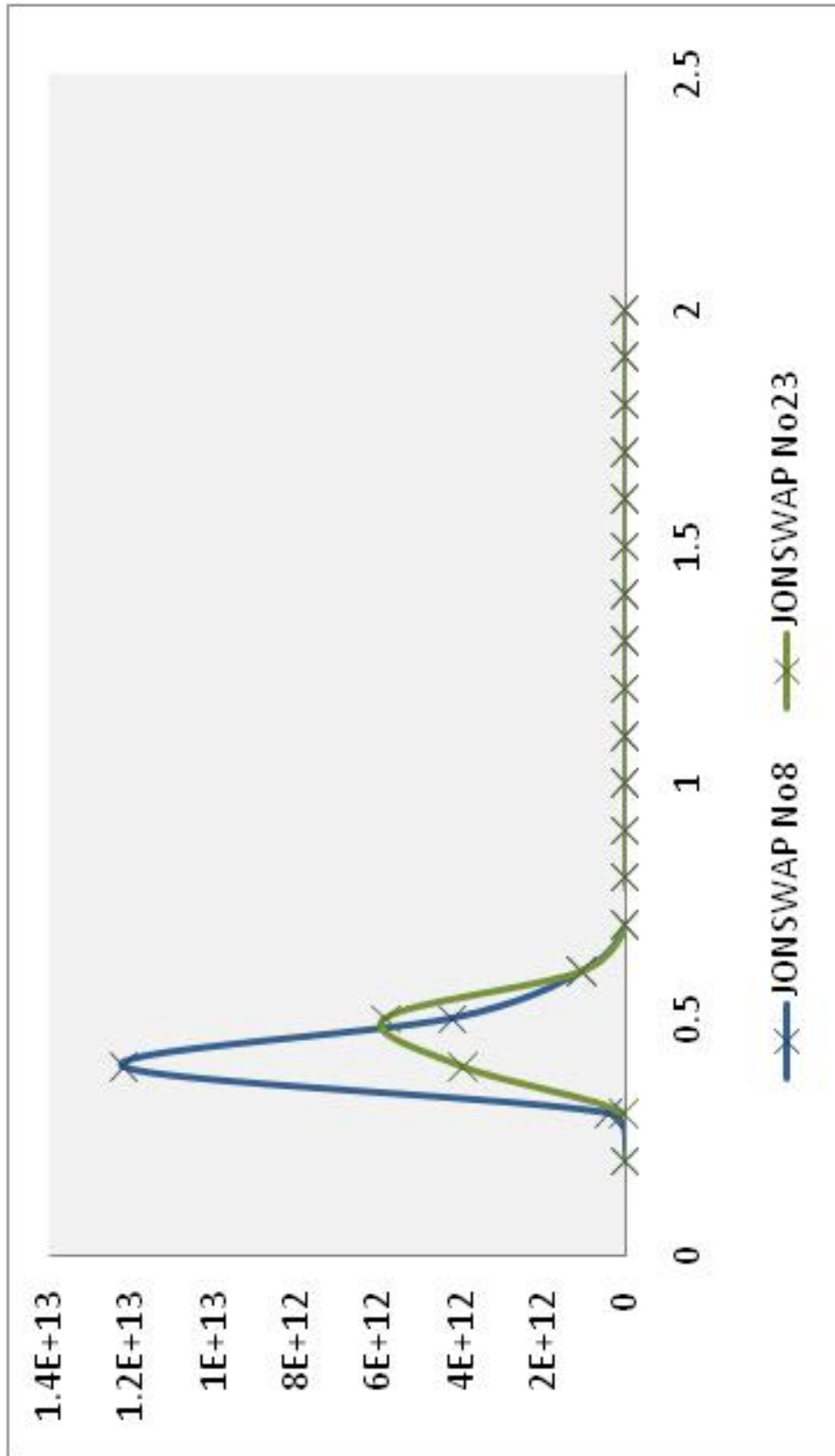
Dijagram 12. Prikaz odziva konstrukcije kod relativnog gibanja za različite spektre valova



Dijagram 13. Prikaz odziva konstrukcije kod momenta savijanja za valni spektar JONSWAP N°8



Dijagram 14. Prikaz odziva konstrukcije kod momenta savijanja za valni spektar JONSWAP N°23

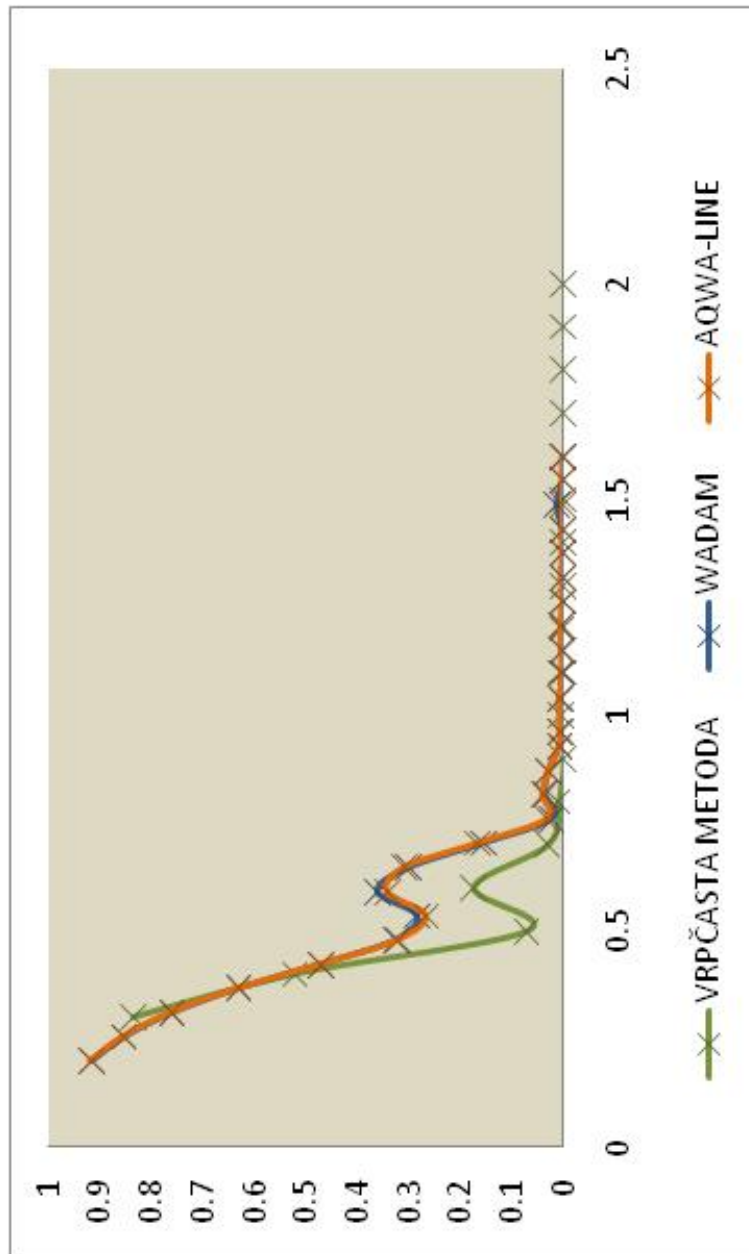


Dijagram 15. Prikaz odziva konstrukcije kod momenta savijanja za različite spektre valova

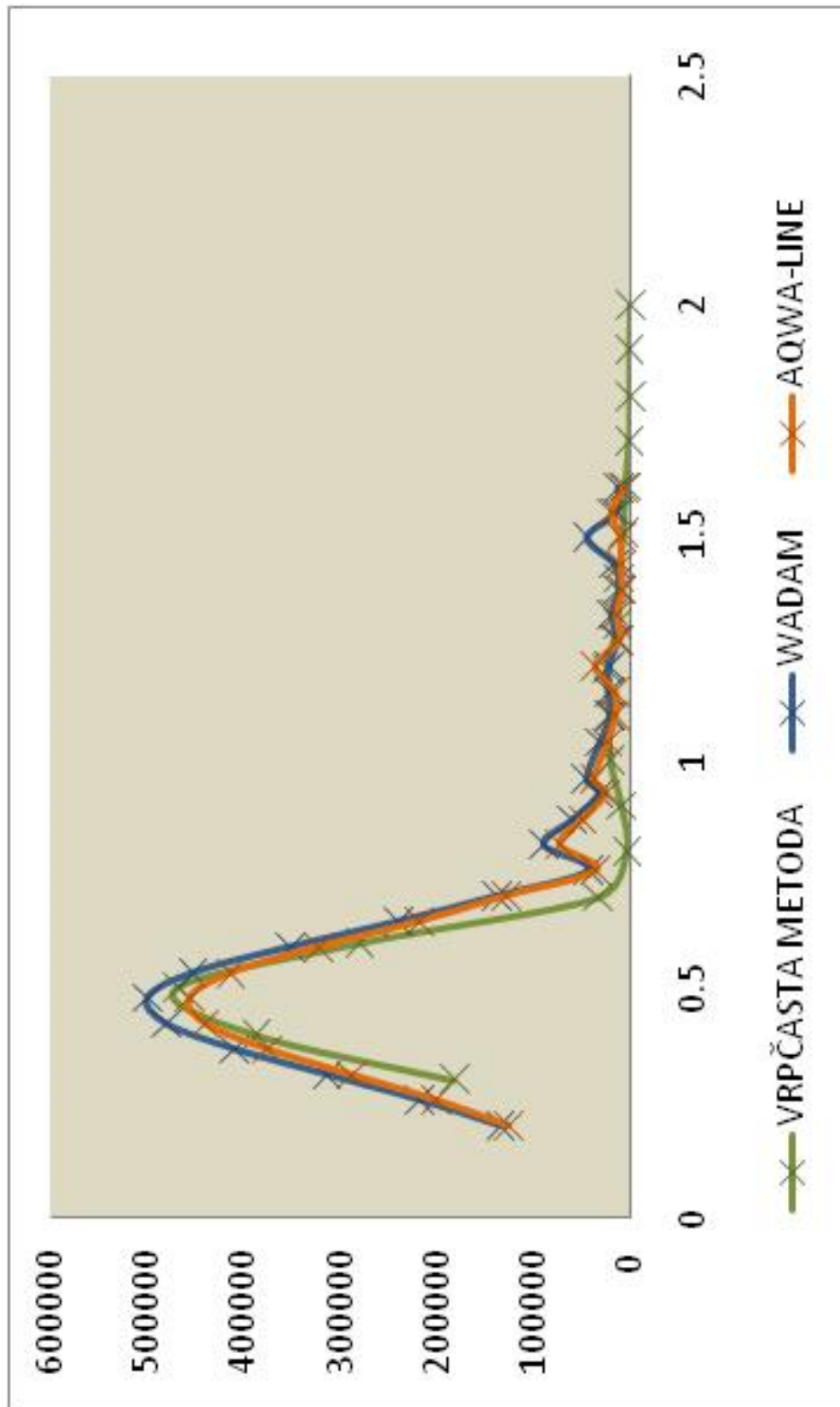


Slijedeći dijagram prikazuje usporedne rezultate koji su dobiveni ovom metodom, programom WADAM ( koji se temelji na difrakcijsko-radijacijskoj potencionalnoj metodi i Morisonovoj metodi) te programom AQWA-LINE.

Popratne tablice dane su u prilogu.



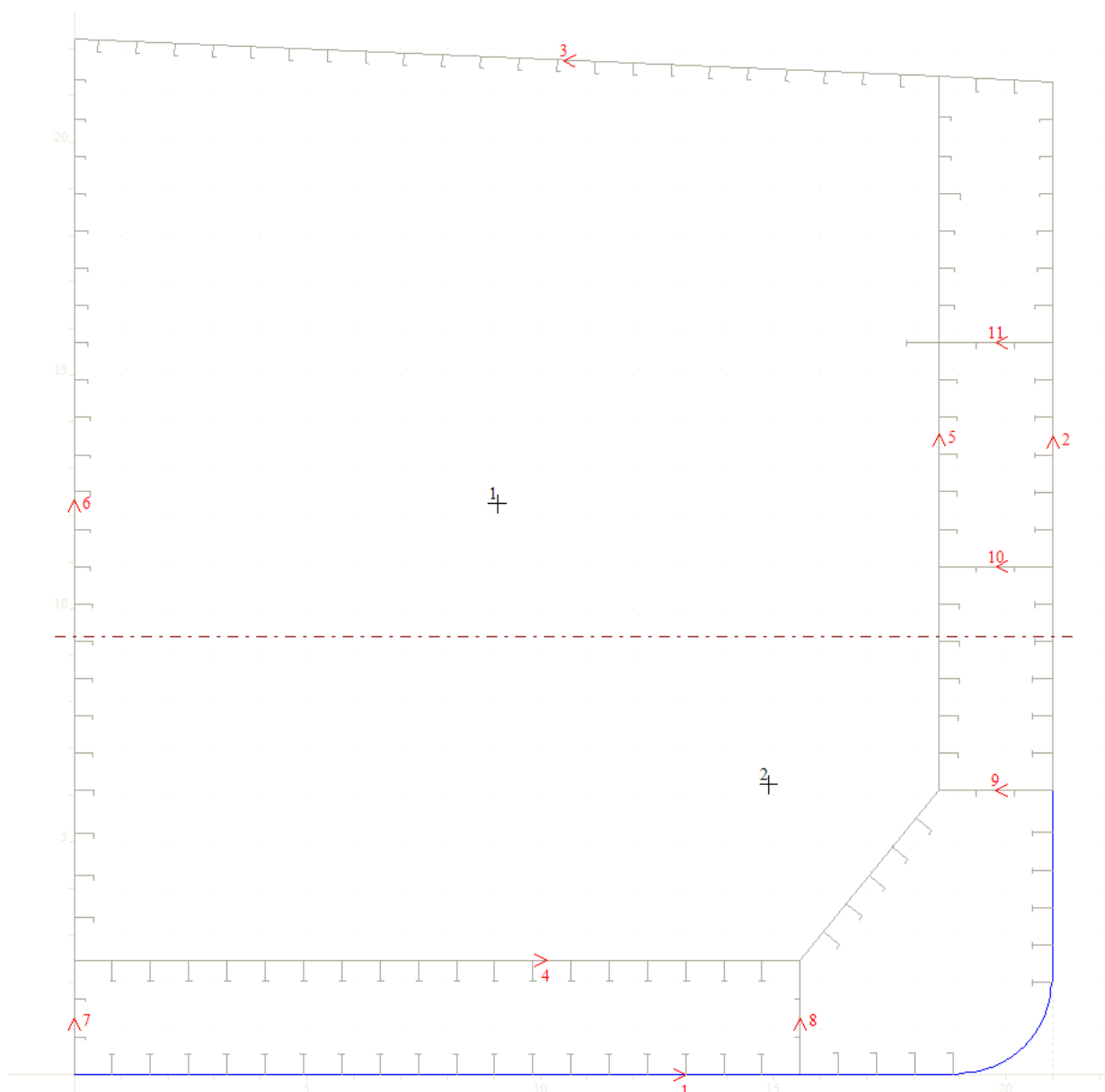
Dijagram 16. Usporedni rezultati prijenosnih funkcija dobiveni upotrebom različitih programa



Dijagram 17. Usporedba rezultata prijenosnih funkcija kod momenata savijanja upotrebom različitih programa

## 8 PRORAČUN ČVRSTOĆE BRODA U PROGRAMU MARS

Slijedeća slika prikazuje model naftnog tankera u MARSU kojeg promatramo i kao FPSO konstrukciju.



Slika 8. Model broda u MARS-u

## 8.1 ANALIZA GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA

Povećanje opterećenja dovodi do povećanja naprezanja te se kod više strukturnih elemenata javljaju oštećenja uzrokovana popuštanjem, izvijanjem, lomom ili njihovom kombinacijom. Takva uzastopna oštećenja dovode do smanjenja krutosti konstrukcije. Lom nekoliko strukturnih elemenata ne mora nužno dovesti do kolapsa, međutim povećanje broja takvih elemenata nužno ima to za posljedicu.

Metodom, kojom se računa granično opterećenje broskog trupa, moraju se odrediti kritična stanja kod kojih dolazi do loma svih glavnih uzdužnih elemenata. Do loma konstrukcije tankera najprije će doći zbog popuštanja palubnih strukturnih elemenata. To se događa uslijed toga što su naprezanja u tim elementima veća, a također je i sama konstrukcija palube slabija od konstrukcije dvodna. Najnepovoljnije stanje je stanje progiba u kojem su palubni elementi tlačno opterećeni. U obzir se uzima samo utjecaj vertikalnog momenta savijanja dok se utjecaji smične sile, torzijskog opterećenja i horizontalnog momenta savijanja zanemaruju.

Provjera granične čvrstoće broskog trupa vrši se usporedbom vertikalnog momenta savijanja na mirnoj vodi i momenta savijanja na valovima.

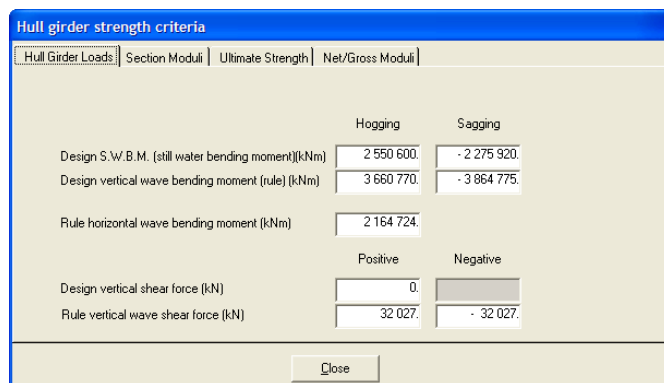
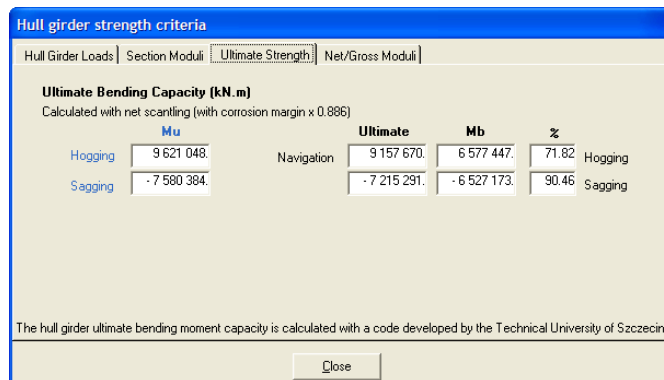
$$\gamma_S M_{SW-SAG} + \gamma_W M_{WW-SAG} \leq$$

$\gamma_S$  → faktori sigurnosti na mirnoj vodi

→ faktori sigurnosti na valovima

→ faktori sigurnosti materijala

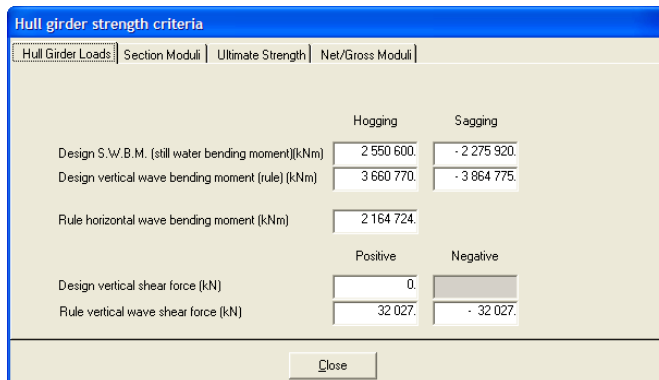
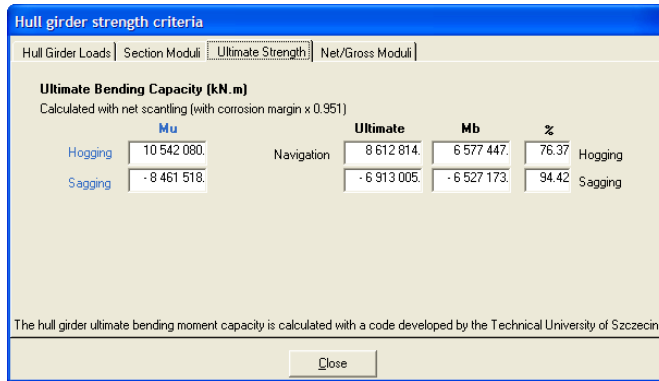
Rezultati granične čvrstoće za tanker prema programu MARS:



$\gamma_w$	$\gamma_M$	$M_{SW-SAG} + \gamma_w M_{WW-SAG}$	$\frac{M_u}{\gamma_M}$
1,1	1,05	6302767	7219413,33

Tablica 1. Provjera granične čvrstoće kod tankera

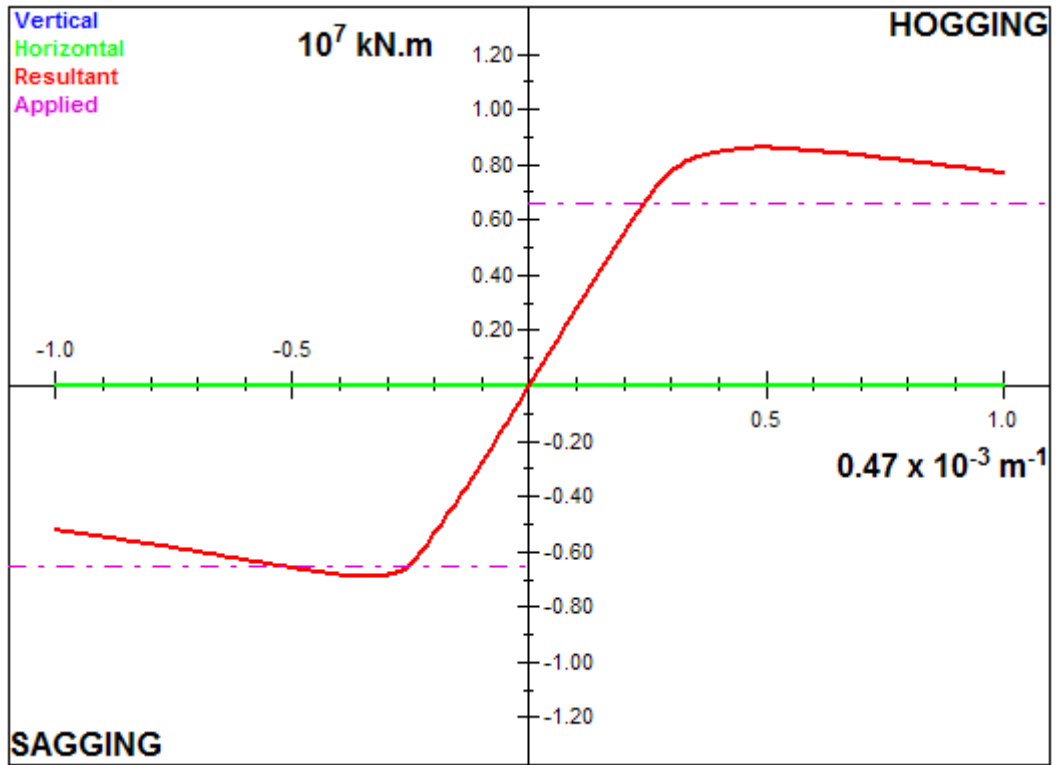
Iz prikazane tablice slijedi kako razmatrani prototip zadovoljava graničnu čvrstoću što je i ujedno najvažniji podatak za ovu analizu. Na isti način u nastavku su prikazani rezultati granične čvrstoće kod FPSO konstrukcije.



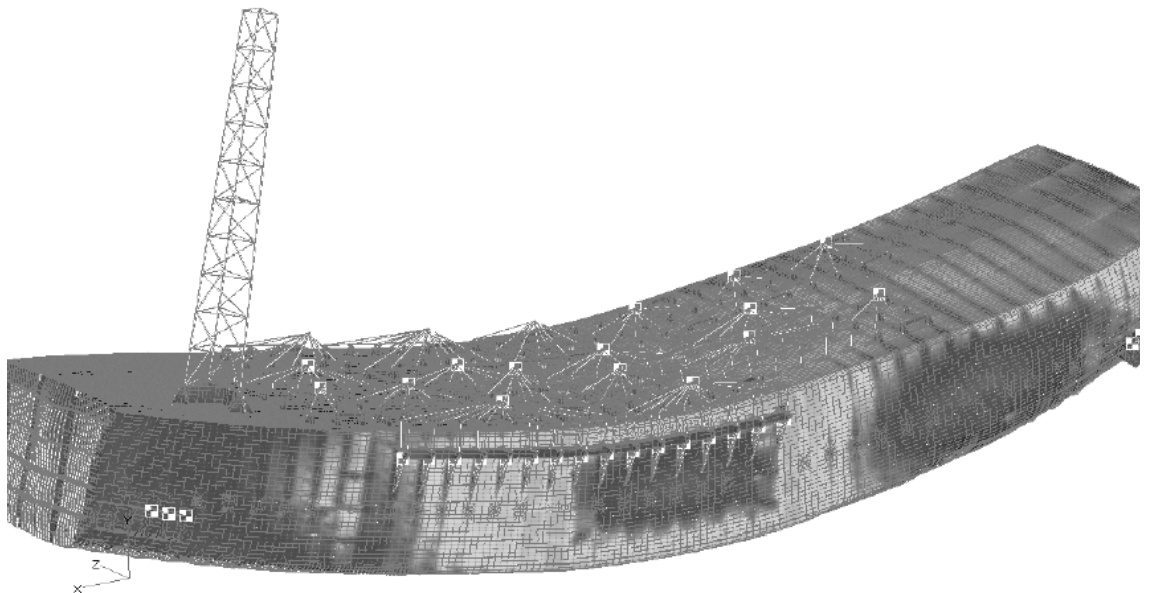
$\gamma_w$	$\gamma_M$	$M_{SW-SAG} + \gamma_w M_{WW-SAG}$	$\frac{M_U}{\gamma_M}$
1,06	1,22	6372581,5	6935670,49

Tablica 2. Provjera granične čvrstoće kod FPSO konstrukcije

Rezultati za FPSO jedinicu su, također, zadovoljavajući. Može se još samo napomenuti kako je faktor materijala u ovom slučaju veći nego kod tankera kako bi se zadovoljila sigurnost.

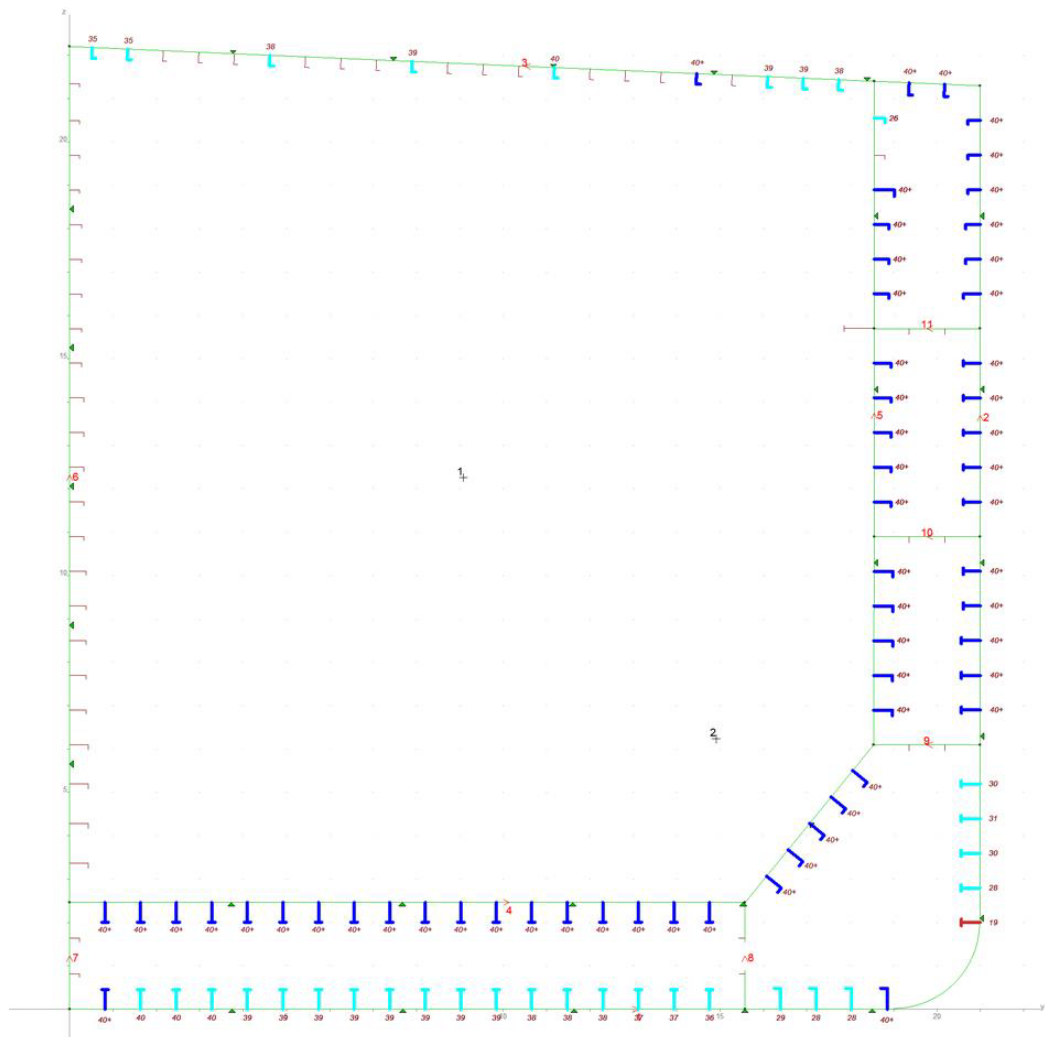


Dijagram 18. Krivulja izdržljivosti trupa na moment čistog savijanja u ovisnosti od zakrivljenosti trupa



Slika 9. Odziv konstrukcije uslijed maksimalnog momenta savijanja

## 8.2 PROVJERA ZAMORA MATERIJALA



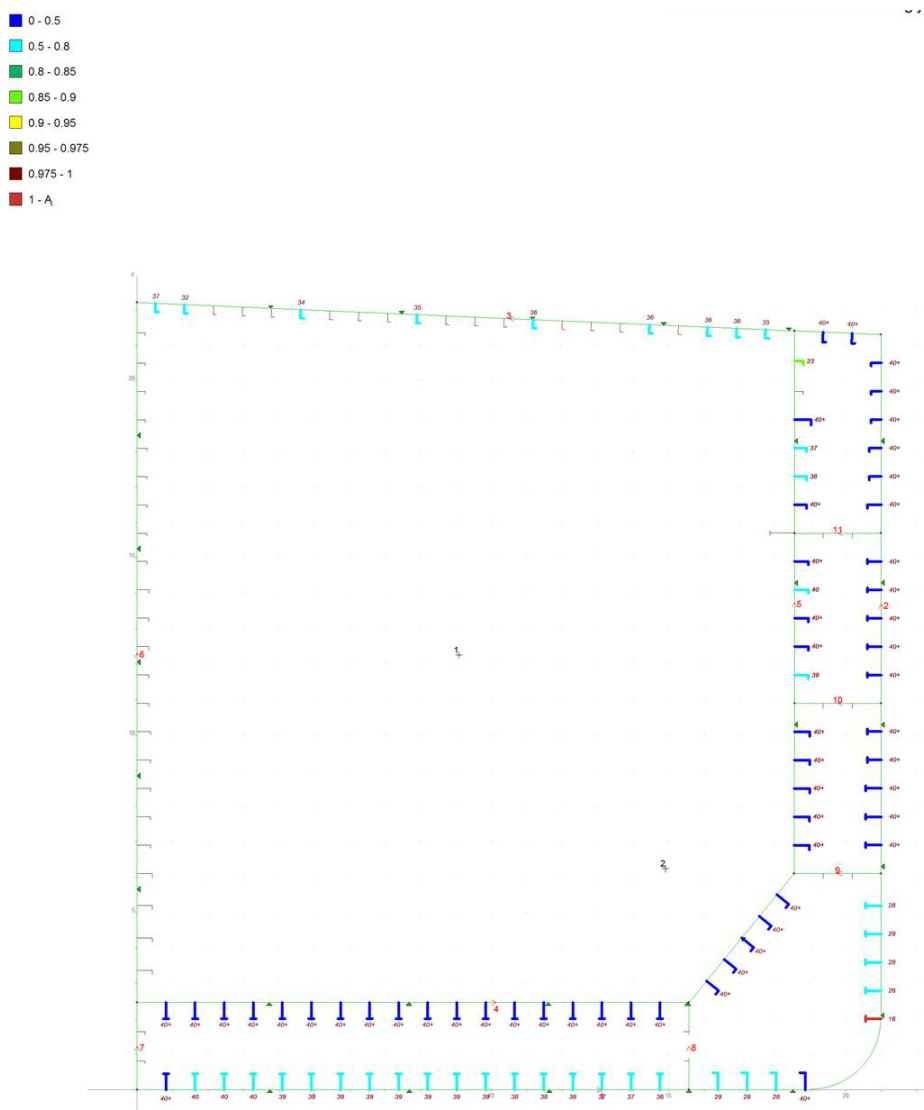
Slika 10. Prikaz zamornog vijeka pojedinih uzdužnjaka kod tankera



Iz prethodne slike, se može uočiti kako svi uzdužnjaci zadovoljavaju propisani i očekivani životni vijek.

Uzdužnjak obojan u crveno, prema izračunu ne ulazi u tu kategoriju; međutim u ovom slučaju se zanemaruje taj podatak budući da sam program MARS ima poteškoća u točnoj analizi podataka za zamor materijala kod uzdužnjaka na uzvoju.

Možemo primijeniti istu analogiju kod FPSO.



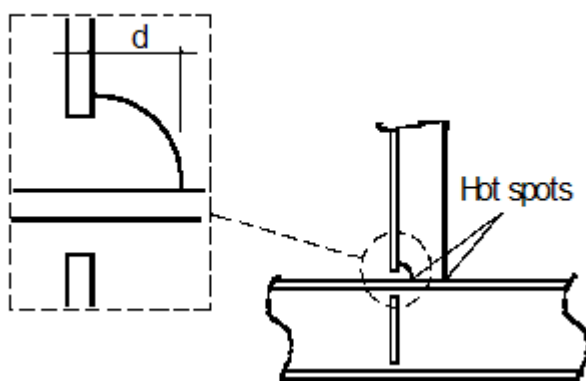
Slika 11.  
konstrukcije

Prikaz zamornog vijeka pojedinih uzdužnjaka kod FPSO

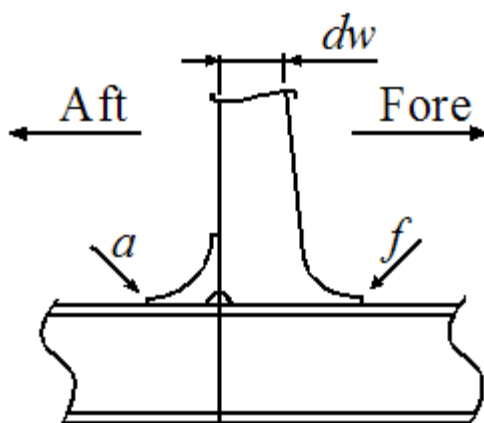
Zamor materijala je od ključne važnosti kod projektiranja konstrukcije, gdje kao posljedica starenja i akumulativnih pojava oštećenja u brodskim konstrukcijama, u najblažem slučaju izazivaju znatnije troškove održavanja, a u krajnjim slučajevima, osim oštećenja i moguće slomove s vrlo teškim posljedicama.

Pravila registara za konverziju tankera u FPSO brod, moraju sadržavati određena pojačanja na strani sigurnosti zbog karakterističnog operativnog vijeka FPSO-a. U tom slučaju detalji se poboljšavaju „omekšavanjem“ vrha i simetričnim dodavanjem koljena (prikazana na slijedećim slikama) kako bi se ravnomjerno rasporedilo opterećenje.

### Dno



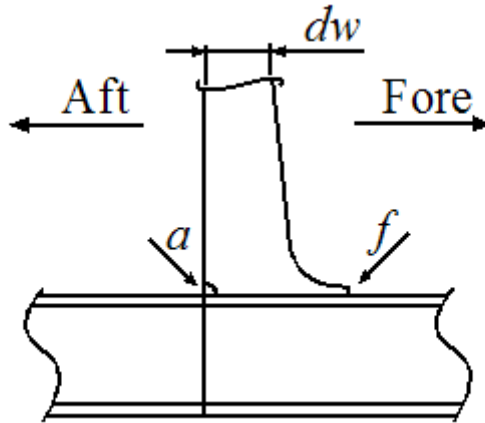
Slika 12. Ukrepe uzdužnjaka dna kod tankera



Slika 13. Ukrepe uzdužnjaka dna kod FPSO („omekšan“ vrh i simetrično postavljeno koljeno)

Zamorni vijek možemo zadovoljiti i dodavanjem samo jednog koljena (na mjestima gdje je to izvedivo) kao što je u ovom slučaju vrijedilo za palubu tankera dok su uzdužnjaci palube FPSO-a pojačani na isti način kao i uzdužnjaci dna.

Slijedeća slika prikazuje upravo takvu izvedbu.



Slika 14. Ukrepe uzdužnjaka palube kod tankera

## **9 ZAKLJUČAK**

Cilj ovog rada je proračun čvrstoće trupa, kako tankera tako i FPSO konstrukcije. U tu svrhu korišten je program MARS, kojim su proračunate globalna i lokalna čvrstoća te zamor materijala.

Jedno od najneistraženijih područja brodograđevne struke je ponašanje broda na valovima. U prvom djelu proračuna provedena je hidrodinamička analiza s ciljem određivanja kratkoročne razdiobe vertikalnih momenata savijanja. Usporedbom dobivenih rezultata koja predviđaju pravila vidljivo je da ona je predviđaju potpuno pouzdano ekstremna opterećenja.

FPSO konstrukcija zahtjeva određena pojačanja zbog sigurnosti broda i posade. Povećanje sigurnosti broda za sobom nužno nosi veću cijenu ugrađenog materijala, a time i veću cijenu samog broda.