

# Zamorna izdržljivost konstrukcijskih detalja na LNG brodovima s membranskim tankovima

---

**Banjedvorec, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:424313>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dominik Banjedvorec**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan, dipl. ing.

Student:

Dominik Banjedvorec

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru rada prof. dr. sc. Smiljku Rudanu na ukazanoj pomoći i strpljenju a posebno na prenesenom znanju.

Također se zavaljujem svojoj obitelji koja mi je tokom svih godina školovanja pružala neizmjernu podršku i ljubav, a posebno svojoj djevojci koja je bila uz mene kroz dobre i loše faze tokom studija.

Posebne zahvale kolegi Stanku Kitaroviću na konstantnoj dostupnosti, znanju i iskustvu kojim je uvelike pomogao u izradi ovog rada.

Special thanks and unforgettable gratitude to my friend and colleague Marcin Szumaczuk for his support, patience and shared experience throughout this thesis. And a big thanks to 7waves (John Riss and Torgeir Solvin) for technical support and for making this thesis happen.

Dominik Banjedvorec



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



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Banjedvorec** JMBAG: 0035215559

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zamorna izdržljivost konstrukcijskih detalja na LNG brodovima s membranskim tankovima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fatigue strength of structural details on LNG ships with membrane tanks**

Opis zadatka:

Zamor materijala na brodovima nije rijetka pojava. Brod je izložen čitavom nizu cikličkih opterećenja tijekom svojeg životnog vijeka pri čemu se zamor materijala postupno akumulira i u konačnici rezultira oštećenjem brodske konstrukcije. Manja zamorna oštećenja uobičajeno se otklanjaju postupcima održavanja broda no veća zamorna oštećenja mogu ugroziti dijelove broda ili čitav brod. Problem zamora materijala naročito je bitan na brodovima koji prevoze opasan teret, poput brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG) s membranskim spremnicima.

U okviru diplomskog zadatka potrebno je najprije proučiti problem zamora u kontekstu LNG brodova s membranskim spremnicima kroz pregled literature. Posebno, potrebno je proučiti postojeće propise za određivanje zamorne čvrstoće klasifikacijskog društva DNV te ustanoviti hodogram jednostavnih i složenijih postupaka određivanja zamornog vijeka specifičnih konstrukcijskih detalja.

Na osnovi dostupnih nacrti potrebno je zatim izraditi mrežu konačnih elemenata za model LNG broda u opsegu od tri brodska skladišta na paralelnom srednjaku broda. Na istom modelu potrebno je identificirati kritične detalje konstrukcije te za više njih odrediti faktore koncentracije naprezanja.

Pomoću postojećih S-N krivulja ukazati na ovisnost zamornog vijeka odabranih konstrukcijskih detalja o izračunatim naprezanjima te predložiti konstrukcijska poboljšanja koja mogu produžiti njihov očekivani zamorni vijek.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

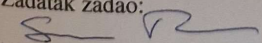
Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

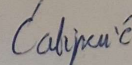
17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović



**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	VI
POPIS DIJAGRAMA .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK .....	IX
SUMMARY .....	X
1 UVOD .....	1
2 BRODOVI ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA .....	3
3 ZAMOR BRODSKIH KONSTRUKCIJA .....	6
3.1 Mehanizam zamaranja materijala .....	6
3.2 Uzroci zamora materijala brodskih konstrukcija .....	8
3.2.1 Brodovi za prijevoz ukapljenog plina .....	9
3.3 Zamorna izdržljivost .....	11
3.3.1 S-N krivulje .....	11
3.3.1.1 Standardne S-N krivulje .....	12
3.3.1.2 Univerzalne S-N krivulje .....	15
3.3.2 Mehanika loma .....	15
3.3.3 Testiranje prototipa .....	16
3.4 Naprezanja u analizi zamora .....	16
4 METODA ANALIZE I KORIŠTENI SOFTVERSKI ALATI .....	19
4.1 Odabrana metoda analize .....	20
4.1.1 Razina modeliranja .....	21
4.1.2 Koncept opterećenja ekvivalentnog projektnog vala .....	22
4.1.3 Princip balansiranja modela .....	22
4.1.4 Odabir vrste naprežanju za proračun zamora .....	24
4.2 Softverski paket SESAM .....	25
5 STRUKTURNI MODEL .....	27
5.1 Globalni model .....	27
5.2 Opterećenja na model .....	29
5.2.1 Hidrostatički tlak .....	30
5.2.2 Hidrodinamički tlak .....	31
5.2.3 Opterećenje od tankova .....	33
5.2.4 Ubrzanja .....	34
5.3 Balansiranje .....	35
5.4 Rubni uvjeti .....	38
5.5 Podmodeli .....	39
6 ODZIV KONSTRUKCIJE .....	44
6.1 Priprema mreže konačnih elemenata za podmodele .....	49
6.2 Analiza podmodela i ekstrapolacija naprežanja .....	52
7 DINAMIČKA IZDRŽLJIVOST KONSTRUKCIJSKIH DETALJA .....	58

---

7.1	Određivanje zamornog vijeka korištenjem S-N krivulja .....	58
7.2	Zamorno oštećenje korištenjem S-N krivulja .....	59
7.3	Određivanje zamornog oštećenja prema DNV-u za odabrane konstrukcijske detalje 61	
8	ZAKLJUČAK .....	63
	LITERATURA .....	65

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1 IMO klasifikacija LNG brodova prema vrsti tanka [1].....	4
Slika 2-2 Englesko nazivlje tipičnog presjeka membranskog tanka [4].....	5
Slika 2-3 Membranski spremnik(lijevo), sferni (sredina),SPB IHI (desno) [5] .....	5
Slika 3-1 Nastanak i širenje pukotine [10].....	8
Slika 3-2 Shematski prikaz nastanka loma od zamora materijala [11].....	8
Slika 3-3 Presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka LNG broda [14].....	10
Slika 3-4 Veza uzdužnog nosača s okvirnim rebrom LNG broda [14].....	11
Slika 3-5 Shema S-N pristupa određivanju zamornog oštećenja [15] .....	12
Slika 3-6 HSE S-N krivulje [7].....	13
Slika 3-7 (a) IIW S-N krivulja i (b) povezani konstrukcijski detalji s IIW S-N krivuljom [12] .....	14
Slika 3-8 Utjecaj različitih makro geometrijskih oblika na nazivno naprezanje [17].....	16
Slika 3-9 Strukturni detalji i naprezanja [17].....	17
Slika 3-10 Prikaz naprezanja u strukturnom detalju [12] .....	18
Slika 4-1 Hodogram pojednostavljenog proračuna koji je korišten u radu .....	21
Slika 4-2 Hodogram postupka balansiranja 3 tank modela prema DNV-u .....	23
Slika 4-3 Primjena momenta za postizanje željene smične sile [19] .....	24
Slika 4-4 Prikaz distribucije sila za svaki spremnik [19].....	24
Slika 4-5 Prikaz glavnih naprezanja na zavar koja stvaraju pukotine paralelne sa zavarom [18].....	25
Slika 5-1 Globalni model presječen po središnjici .....	27
Slika 5-2 Globalni model bez vanjske oplata .....	28
Slika 5-3 Debljine limova globalnog modela .....	28
Slika 5-4 Prikaz uzdužnjaka i ukrepa globalnog modela.....	29
Slika 5-5 Prikaz valnog opterećenja koje povezuje ostala opterećenja vezana uz dinamiku [26].....	30
Slika 5-6 Distribucija hidrostatičkog tlaka po oplati [26].....	31
Slika 5-7 Kod hidrostatičkog tlaka sa svim vrijednostima potrebnim za izračun.....	31
Slika 5-8 Formule za izračun hidrodinamičkog tlaka [26] .....	31
Slika 5-9 Distribucija hidrodinamičkog tlaka po oplati za <i>HSM-1</i> val [26] .....	32
Slika 5-10 Distribucija hidrodinamičkog tlaka po oplati za <i>HSM-2</i> val [26] .....	32



Slika 5-11 Kod za izračun hidrodinamičkog tlaka sa svim vrijednostima.....	33
Slika 5-12 Prikaz napunjenih balasnih tankova i gotovo praznih teretnih tankova.....	33
Slika 5-13 Vizualizacija opterećenja u Geniu.....	34
Slika 5-14 Prikaz rubnih uvjeta na globalnom modelu.....	39
Slika 5-15 Detaljno izmodeliran presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka .....	40
Slika 5-16 Prikaz debljina presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka.....	40
Slika 5-17 Prikaz rubnih uvjeta na podmodelu presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka .....	41
Slika 5-18 Vizualizacija postavki rubnih uvjeta .....	41
Slika 5-19 Detalj spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom .....	42
Slika 5-20 Prikaz debljina spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom .....	42
Slika 5-21 Prikaz rubnih uvjeta na podmodelu spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom.....	43
Slika 6-1 Raspored čvorova u elementu s 8 čvorova.....	44
Slika 6-2 Prikaz globalnog modela s mrežom konačnih elemenata veličine 800x800.....	45
Slika 6-3 Prikaz tanka 3 s mrežom konačnih elemenata.....	45
Slika 6-4 Prikaz unutarnjeg dijela tanka 3 s mrežom konačnih elemenata.....	46
Slika 6-5 Pomak globalnog modela uslijed zadanih <i>HSM-2</i> opterećenja .....	47
Slika 6-6 Prikaz pomaka za tank3.....	47
Slika 6-7 Prikaz Von Mises naprezanja za spremnik 3.....	48
Slika 6-8 Prikaz koncentracija naprezanja unutar spremnika 3 na nagnutom prijelazu iz dvodna na dvobok .....	48
Slika 6-9 Koncentracije naprezanja spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom.....	49
Slika 6-10 Veličina konačnih elemenata za detalj pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka te prikaz veličina elemenata po prijelazima .....	50
Slika 6-11 Mreža konačnih elemenata na detalju pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka .....	50
Slika 6-12 Veličina konačnih elemenata za detalj spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom te prikaz veličina elemenata po prijelazima.....	51

---

Slika 6-13 Mreža konačnih elemenata na detalju spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom.....	51
Slika 6-14 Metoda ekstrapolacije žarišnih naprezanja pomoću Gaussovih točaka [18].....	52
Slika 6-15 Prikaz koordinata Gaussovih točaka za element s 8 čvorova.....	53
Slika 6-16 Koordinate Gaussovih točaka za element veličine 22 mm.....	53
Slika 6-17 Vektor smjera za odabrano naprezanje .....	54
Slika 6-18 Mjesto za koje se računa žarišno naprezanje i vrijednosti naprezanja u Gaussovim točkama .....	54
Slika 6-19 Glavna naprezanja u elementu .....	56
Slika 7-1 Odnos između broja ciklusa naprezanja i vijeka trajanja konstrukcije pod tim naprezanjima [29] .....	59
Slika 7-2 Različiti pristup S-N krivulje [30].....	59
Slika 7-3 Prikaz korištenja S-N krivulje [31] .....	60
Slika 7-4 S-N krivulja za opterećenja promjenjive amplitude [10] .....	61

**POPIS TABLICA**

Tablica 5-1 Glavne izmjere globalnog modela .....	27
Tablica 5-2 Koeficijenti vezani uz valno opterećenje.....	35
Tablica 5-3 Vrijednosti izračunatih akceleracija .....	35
Tablica 5-4 Vrijednosti smičnih sila koje treba postići .....	36
Tablica 5-5 Vrijednosti sila tokom procesa balansiranja.....	36
Tablica 5-6 Rezultati momenta nakon provedenog postupka balansiranja .....	37
Tablica 5-7 Rubni uvjeti za globalni model.....	38
Tablica 6-1 Koordinate i naprezanja u Gaussovima točkama .....	55
Tablica 6-2 Iščitane vrijednosti naprezanja na kvadratnoj funkciji .....	55
Tablica 6-3 Koordinate i iščitane vrijednosti naprezanja u elementu.....	56
Tablica 6-4 Rezultati provedenih ekstrapolacija prema DNV-u.....	57
Tablica 7-1 Konačne vrijednosti proračuna zamora za detalj pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka .....	62

---

## **POPIS DIJAGRAMA**

Dijagram 5-1 Prikaz distribucije smične sile kroz korake balansiranja.....	37
Dijagram 5-2 Prikaz distribucije momenata kroz korake balansiranja.....	38
Dijagram 6-1 Prikaz distribucija naprezanja kroz cijeli postupak iščitavanja naprezanja sa Gausovim točkama .....	55
Dijagram 6-2 Prikaz linearizacije naprezanja na $t/2$ i $3t/2$ za pojednostavljeni postupak .....	57

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_0$	$m/s^2$	- parametar ubrzanja
$a_{posrtanja}$	$m/s^2$	- ubrzanje uslijed posrtanja broda
$a_{poniranje}$	$m/s^2$	- ubrzanje uslijed poniranja broda
$a_{zalijetanje}$	$m/s^2$	- ubrzanje uslijed zalijetanja broda
$C$	/	- parametar rasta pukotine
$C_B$	/	- koeficijent istisnine
$C_{XS},$ $C_{ZH}, C_{ZP}$	/	- koeficijenti vrste valnog opterećenja
$D$	/	- kumulativno oštećenje
$D_{corossive}$	/	- kumulativno oštećenje uvećano za faktor korozije prema DNV-u
$L$	m	- duljina broda
$l_1, l_2, l_3$	m	- duljina svakog od tri spremnika
$M_{v-targ}$	Nm	- iznos momenta koji je potrebno postići
$M_{SW}$	Nm	- iznos vertikalnog momenta savijana na mirnoj vodi
$M_{WV}$	Nm	- iznos vertikalnog momenta savijanja na valovima
$M_{v-end}$	Nm	- iznos vertikalnog momenta savijanja u rubovima modela
$P_S$	$kN/m^2$	- hidrostatski tlak
$P_{HS}$	$kN/m^2$	- hidrodinamički tlak
$Q_{WV}$	N	- iznos smične sile na valovima
$Q_{SW}$	N	- iznos smične sile na mirnoj vodi
$Q_{targ}$	N	- iznos smične sile koju je potrebno postići
$t$	mm	- debljina konačnog elementa
$\delta w_1, \delta w_2,$ $\delta w_3$	N	- sila koja se primjenjuje na svako rebro radi postizanje određene vrijednosti smičnih sila
$\Delta K$	/	- raspon faktora intezivnosti naprezanja
$\delta w_1, \delta w_2,$ $\delta w_3$	N	- sila koja se primjenjuje na svako rebro radi postizanje određene vrijednosti smičnih sila
$\lambda$	m	- valna duljina
$\xi$	MPa	- parametar mjerila Weibullove razdiobe
$\sigma$	$N/mm^2$	- naprezanje
$\sigma_{HS}$	$N/mm^2$	- žarišno naprezanje
$\Delta\sigma_{HS}$	$N/mm^2$	- raspon naprezanja s kojim se ulazi u S-N krivulju
$DNV$	- Det Norske Veritas	

---

**SAŽETAK**

U kontekstu sve veće energetske potrebe, LNG brodovi su postali ključni u prijevozu energenata. Međutim, gradnja suvremenih LNG brodova uključuje izradu nestandardnih strukturnih detalja koji su često povezani s povećanim rizikom od zamornog oštećenja. U radu je prikazan pojednostavljeni proračun zamornog oštećenja u LNG brodova s membranskim tipom spremnika. Izrađen je globalni model veličine od 3 spremnika te je model bilo potrebno balansirati kako bi se dobila realna distribucija smičnih sila i momenata na spremniku za koji se radio proračun, u ovom slučaju spremnik broj 3. Od opterećenja u pojednostavljenom proračunu uzeti su hidrostatički tlak, te hidrodinamički tlak i ubrzanja koja proizlaze iz valnog opterećenja u kojemu je smjer vala u pramac broda. Provedena su dva postupka ekstrapolacije kvadratna i linearna ekstrapolacija žarišnih naprezanja s podmodela koji su dodatno izrađeni. Na osnovi tih naprezanja i propisane S-N krivulje izračunato je zamorno oštećenje konstrukcijskog detalja na LNG brodu.

Ključne riječi: Analiza tri skladišta, balansiranje modela, žarišna naprezanja, pojednostavljen proračun, zamorno oštećenje

---

**SUMMARY**

In the context of increasing energy demand, LNG (liquefied natural gas) ships have become crucial in energy transportation. However, the construction of modern LNG ships involves the fabrication of non-standard structural details that are often associated with an increased risk of fatigue damage. This paper presents a simplified fatigue analysis for LNG ships with membrane-type tanks. A global model consisting of three tanks was developed, and the model had to be balanced to obtain a realistic distribution of shear forces and moments on the tank under consideration, in this case, tank number 3. The simplified fatigue analysis considered loading conditions such as hydrostatic pressure, hydrodynamic pressure, and accelerations resulting from wave loading, with the wave direction directed towards the bow of the ship. Two extrapolation methods, quadratic and linear extrapolation of hot spot stresses from sub-models, were performed. Based on these stresses and the prescribed S-N curve, the fatigue damage of the structural detail on the LNG ship was calculated.

Key words: Three cargo hold analysis, balancing of the model, hot spot stress, simplified fatigue analysis, fatigue damage

# 1 UVOD

U brodskoj industriji, prijevoz ukapljenog plina (LNG) postao je ključni segment tržišta energetskog prijevoza. Budući da se svjetska potražnja za prirodnim plinom neprestano povećava, LNG brodovi se koriste za učinkovit, siguran i ekonomičan prijevoz ovog energenata preko velikih udaljenosti. Međutim, prijevoz ukapljenog plina postavlja izazove u pogledu zamornog opterećenja brodskih konstrukcija, koje su podvrgnute raznim vrstama dinamičkih naprezanja tijekom plovidbe. U kontekstu brodskih konstrukcija, zamor materijala posebno je osjetljiv problem iz nekoliko razloga. Prvo, brodske konstrukcije sastoje se od velikog broja različitih strukturnih detalja, što povećava mogućnost pojave zamornog oštećenja na različitim mjestima. Nadalje, brodovi su izloženi dugotrajnom valnom opterećenju tijekom svoje službe, što dodatno povećava rizik od zamora materijala. Prisutnost korozivne okoline, odnosno morske vode, dodatno ubrzava proces zamora materijala. Brodska konstrukcija sadrži brojne zavarene spojeve koji zbog svojih nesavršenosti mogu samo povećati rizik od zamornog oštećenja. Zamor materijala je neizbježna pojava, ali redovitim održavanjem se može produžiti vijek trajanja materijala. No to održavanje često izostaje pogotovo kod starijih brodova.

Zbog sve veće optimizacije brodske konstrukcije te korištenjem čelika povišene dolazi do pozitivnog smanjenja mase konstrukcije te uštede materijala ali s druge strane dolazi do relativnog povećanja koncentracije naprezanja. Problemi nastaju kada se na takvim konstrukcijama nastave koristiti uobičajeni konstrukcijski detalji, izrađeni uobičajenim postupcima za koje se ispostavilo da nemaju dostatnu dinamičku izdržljivost u uvjetima viših naprezanja.

Radi postizanja veće pouzdanosti brodova, klasifikacijska društva pružaju detaljne smjernice za proračun zamornog vijeka broda. Proračuni mogu biti vrlo složeni (izravna spektralna analiza) ili pojednostavljeni. Pojednostavljeni proračuni su praktični i jednostavni te se temelje na parametarskim formulama koje uglavnom ovise o osnovnim dimenzijama broda i faktorima korekcije, razvijenim na temelju iskustva klasifikacijskih društva. Međutim, s razvojem računalne tehnologije, postalo je moguće provesti izravnu spektralnu analizu te se ta vrsta proračuna sve više zahtjeva od strane brodovlasnika.

Zadatak ovog rada je upoznati se sa metodama određivanja zamornog opterećenja koje su propisane klasifikacijskim društvom DNV te provesti pojednostavljeni proračun zamora odabranih konstrukcijskih detalja na brodu za prijevoz LNG-a, metodom analize žarišnog



---

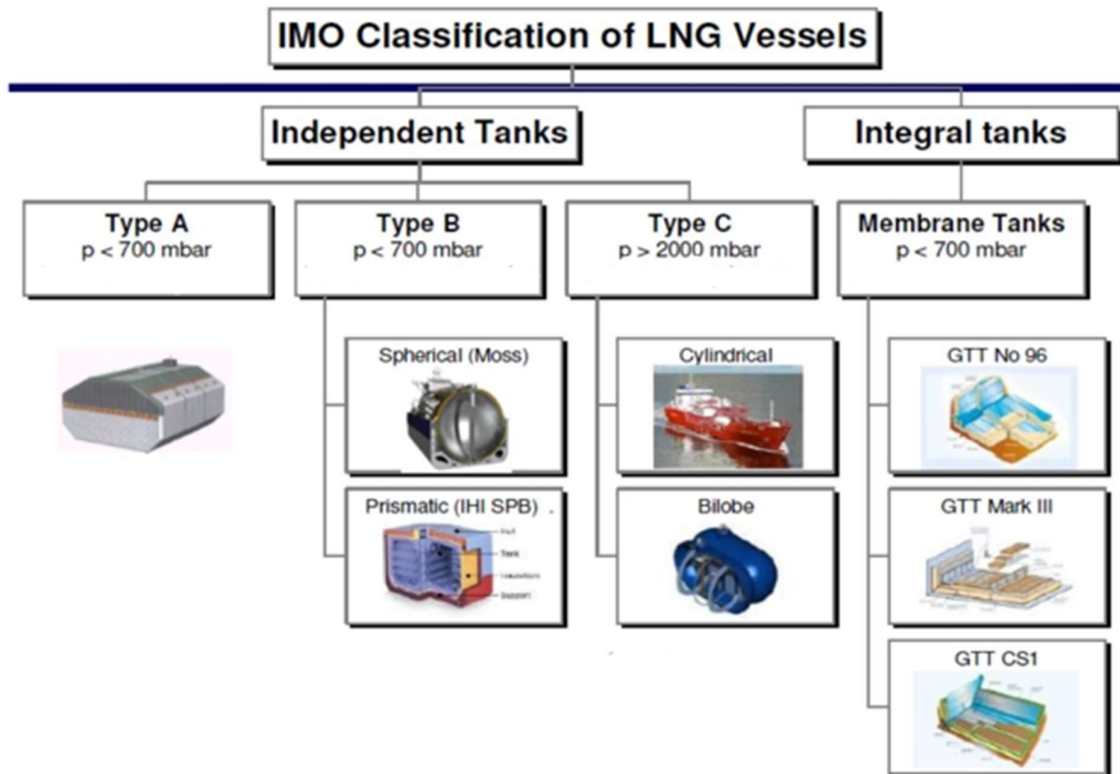
naprezanja (*Hot Spot Stress*) u kombinaciji sa univerzalnom S-N krivuljom za različite konstrukcijske detalje prema klasifikacijskom društvu.

## 2 BRODOVI ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA

LNG (*Liquefied Natural Gas*) brodovi su posebno projektirani brodovi koji se koriste za prijevoz ukapljenog prirodnog plina. Ukapljeni prirodni plin je prirodni plin koji je podvrgnut procesu hlađenja do vrlo niskih temperatura, odnosno  $-165^{\circ}\text{C}$  kada prelazi u tekuću fazu i kao takav se prevozi. Ova tehnologija omogućuje da se prirodni plin pretvori u tekuće stanje u kojem zauzima značajno manji prostor nego u plinovitom stanju, čime se olakšava transport i skladištenje. Dizajn LNG brodova uzima u obzir specifične zahtjeve za siguran i učinkovit prijevoz ukapljenog plina. Spremnici su obloženi toplinskom izolacijom kako bi se održala niska temperatura tekućeg plina. Brodovi su također opremljeni sustavima za upravljanje i nadzor temperature, pritiska i plinskih protoka, kako bi se osigurala sigurnost broda i opreme tijekom cijelog putovanja. Osim toga, LNG brodovi često imaju takav dizajn trupa koji omogućuje lakšu plovidbu kroz ledene vode i razne vremenske uvjete, te su specifični po obliku dvostrukog trupa. Između unutarnjeg trupa i vanjskog nalazi se kombinacija balastnih voda i međuprostora. Unutar svakog spremnika najčešće se nalaze tri uronjene pumpe koje služe za dovod, odnosno odvod plina. LNG brodovi se mogu podijeliti s obzirom na sustav (spremnika) koji koriste za prijevoz ukapljenog plina, te se dijele na samonosivi sustav i sustav sa membranom [1].

Detaljna klasifikacija prema IMO (*International Maritime Organization*) prikazana je na Slika 2-1. Nazivlje detalja na tipičnom membranskom spremniku prema DNV-u dano je na Slika 2-2, te je na Slika 2-3 prikazan presjek sfernog skladišta. Sferni (Moss) tip spremnika ima nisku učinkovitost trupa (iskorištava mali volumen spremnika), velika površina nadgrađa koja je izložena vjetru ograničava prolaz ispod mostova na nekim terminalima te ograničeno područje na palubi za postavljanje opreme. Sferni spremnik je ograničen sa svojim promjerom te je jedini način na koji se može povećati kapacitet LNG-a taj da se poveća duljina broda što je nepoželjno s aspekta stabiliteta i globalne čvrstoće. Veliki LNG brodovi sa sfernim tipom spremnika mogu doživjeti velike probleme od strane torzijskog momenta zbog velikih otvora na palubi te nekontinuiranim poklopcima spremnika. Kritični strukturni detalji s gledišta zamora uključuju uzdužnjake na trupu, unutarnji pokrov uzvoja, spoj spremnika sa temeljima na koje je postavljen te spoj poklopca tanka sa palubom. S druge strane membranski tip spremnika omogućava maksimalnu iskoristivost teretnog prostora te manje troškove za izradu i održavanje. Ovakav tip trupa osigurava ravnu palubu s kojom se omogućuje lakša instalacija opreme te povećava sigurnost i lakšu eksploataciju tereta u spremniku. Sve ove prednosti dovele su do povećanja broja LNG brodova s ovom vrstom tanka, no problem koji se javlja u

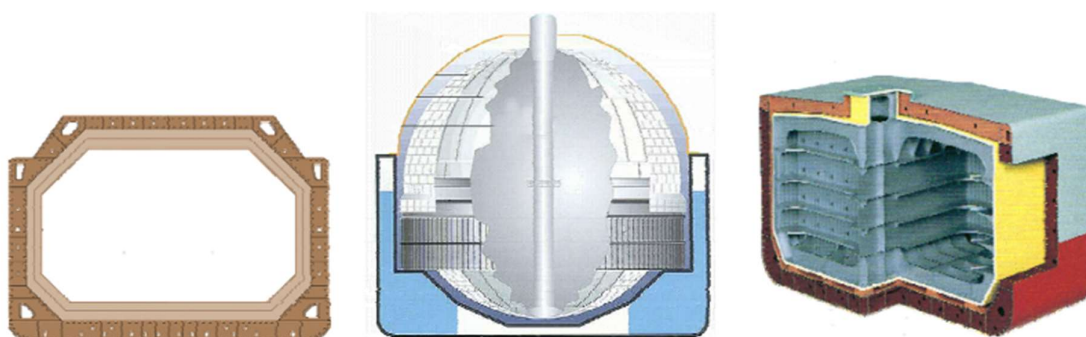
membranskom tipu je problem zapljuskivanja tereta te se njemu pridodaje velika pažnja u procesu projektiranja ovakvih tankova. Taj specifični problem osobito je izražen kada se spremnik parcijalno puni te kod brodova koji imaju velike kapacitete. Veliki LNG brodovi su dosta osjetljivi na globalnu čvrstoću tj. najveće probleme im izaziva vertikalni moment savijanja [2] [3].



Slika 2-1 IMO klasifikacija LNG brodova prema vrsti tanka [1]



Slika 2-2 Englesko nazivlje tipičnog presjeka membranskog tanka [4]



Slika 2-3 Membranski spremnik(lijevo), sferni (sredina),SPB IHI (desno) [5]

### 3 ZAMOR BRODSKIH KONSTRUKCIJA

Zahtjev za povećanjem nosivosti dovodi do optimiziranja konstrukcije i smanjenja težine trupa. Smanjuju se debljine limova a sve više se koristi i čelik povišene čvrstoće, što rezultira povišenjem opće razine naprezanja. Do problema sa zamorom došlo je zbog nastavka primjene uobičajenih konstrukcijskih detalja, izrađenih uobičajenim postupcima (zavarivanja), u novim okolnostima. Slično tome, prilikom projektiranja i gradnje novih vrsta brodova, u nedostatku pravog, koristilo se iskustvo utemeljeno na sličnim brodovima.

Posljednjih godina zamoru brodskih konstrukcija pridaje se posebna pažnja. U potrazi za rješenjima koja će pojeftiniti gradnju broda i učiniti ga ekonomičnijim u eksploataciji, brodske se konstrukcije optimiziraju snižavanjem kriterija stabilnosti, oblikuju se nestandardni ili pojednostavljeni strukturni detalji. Takva rješenja često su praćena povećanim rizicima zamornog oštećenja konstrukcije.

Brodske konstrukcije izložene su izmjenjivom, cikličkom opterećenju uslijed hidrodinamičkog valnog opterećenja, inercijskih sila, vibracija, toplinskih naprezanja i dr. Razina tih naprezanja nalazi se ispod maksimalno dopuštenih naprezanja kroz najveći dio životnog vijeka broda. S druge strane, broj izmjena (ciklusa) mjeri se u milijunima i reda je veličine  $10^7$  do  $10^8$  ciklusa. Takve značajke opterećenja pogoduju nastanku i zatim dugom i stabilnom rastu pukotina.

#### 3.1 Mehanizam zamaranja materijala

Mehanizam zamaranja materijala je proces koji se javlja kada materijal doživljava cikličko opterećenje, što može rezultirati pukotinama. Mehanizam zamaranja započinje stvaranjem mikroskopskih pukotina u materijalu, koje se formiraju zbog koncentriranih naprezanja. U fizikalnom smislu pod pojmom pukotine podrazumijeva se odsutnost veza između dva susjedna sloja atoma u materijalu [6]. Ove pukotine obično započinju na površini materijala ili unutar njega, na mjestima gdje dolazi do koncentracije naprezanja a ta mjesta mogu biti rubovi, praznine ili nepravilnosti u materijalu. Kada se opterećenje ponavlja, te mikroskopske pukotine počinju rasti i širiti se. Tijekom svakog opterećenja, pukotina se otvara i širi, a zatim se tijekom relaksacije opterećenja zatvara djelomično ili potpuno. Ovaj proces otvaranja i zatvaranja pukotina generira toplinu unutar materijala, što dovodi do lokaliziranog zagrijavanja. Ponavljajući ciklusi opterećenja uzrokuju daljnji rast pukotina, koji se kreće kroz materijal pod utjecajem promjenjivog opterećenja.

Proces zamora materijala obično se sastoji od tri faze: začetak (stvaranje) pukotine, rast pukotine i konačni lom. Svaka faza ima svoje karakteristike i važnu ulogu u mehanizmu zamora materijala te su opisane u nastavku:

1. Začetak (stvaranje) pukotine: U ovoj fazi, mikroskopske pukotine ili oštećenja počinju se formirati na površini ili unutar materijala zbog lokaliziranih naprezanja. Ova inicijalna oštećenja mogu biti vrlo sitna i nevidljiva golim okom, ali su ključna jer predstavljaju početnu točku za daljnji rast pukotine.

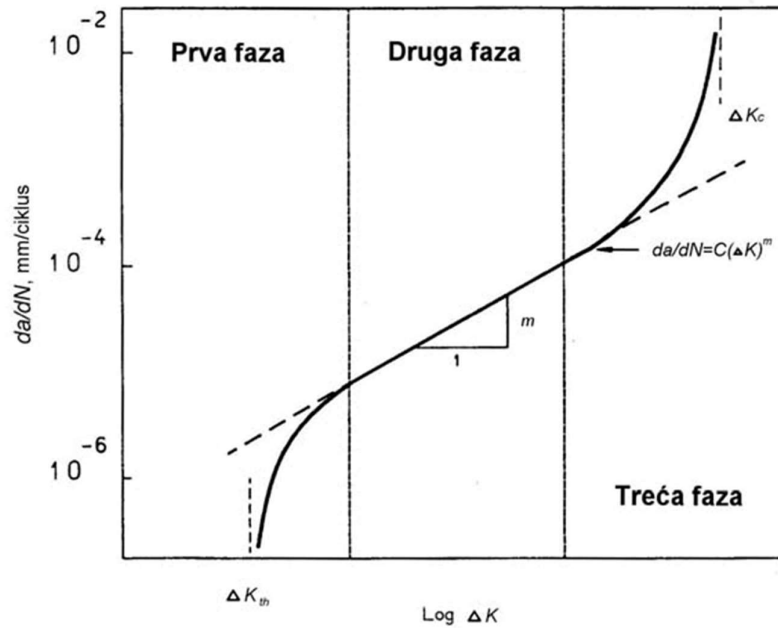
2. Rast pukotine: Ne postoji jasna granica između faze začetka pukotine i faze njenog rasta. Jedna je mogućnost kvalitativno ocijeniti da razdoblje nastanka pukotine završava onda kada rast mikropukotine više ne ovisi o stanju slobodne površine [7]. Drugi kao graničnu točku navode pukotinu određene duljine [8]. Ovu fazu karakterizira progresivan rast pukotine pod utjecajem ponavljajućeg opterećenja. Svaki ciklus opterećenja dovodi do otvaranja i zatvaranja pukotine, što generira lokalizirano zagrijavanje i deformaciju oko pukotine. To dovodi do daljnjeg širenja pukotine u materijalu. U ovoj fazi, pukotina može postati vidljiva na površini materijala i dalje rasti sve dok ne dosegne kritičnu duljinu.

3. Konačni lom: Posljednja faza u procesu zamora je lom materijala. Kada pukotina dosegne kritičnu duljinu, materijal više nije sposoban podnijeti opterećenje i dolazi do loma. Lom materijala može se dogoditi iznenada, bez ikakvih prethodnih vidljivih znakova deformacije ili oštećenja na površini materijala. Ova faza je kritična jer predstavlja krajnji rezultat procesa zamora i može imati ozbiljne posljedice, posebno u slučajevima kada je otkaz materijala povezan s konstrukcijama koje podržavaju težak teret ili nose ljudske živote. Može se javiti preko 3 osnovna mehanizma [9]: krtog loma, žilavog loma i plastičnog popuštanja, ovisno o žilavosti materijala, opterećenju, temperaturi, itd.

Kako rast pukotine pri svakom ciklusu opterećenja ovisi o naprezanjima i deformacijama oko vrška pukotine, može se uspostaviti ovisnost između brzine rasta pukotine i raspona faktora intenzivnosti naprezanja  $\Delta K$ . Rast pukotine u drugoj fazi opisan je Paris-Erdoganovom jednačicom:

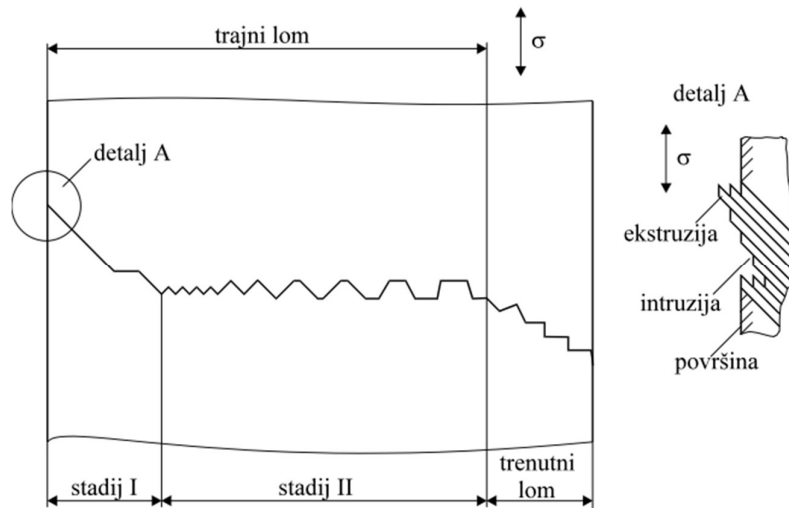
$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (3.1)$$

gdje su  $da/dN$  brzina rasta pukotine, a  $C$  i  $m$  parametri rasta. Tipičan izgled krivulje rasta pukotine prikazan je na Slika 3-1.



Slika 3-1 Nastanak i širenje pukotine [10]

Dodatan prikaz faza nastanka pukotine prikazan je Slika 3-2.



Slika 3-2 Shematski prikaz nastanka loma od zamora materijala [11]

### 3.2 Uzroci zamora materijala brodskih konstrukcija

Postoje razni uzroci pojave zamora brodskih konstrukcija. Neki od glavnih uzroka su [12]:

1. Cikličko opterećenje: stvara promjene naprezanja u materijalu, što može dovesti do zamora.

2. Neravnoteža opterećenja: Nepravilna raspodjela opterećenja može uzrokovati koncentracije naprezanja na brodskim konstrukcijama. Ove točke mogu biti posebno osjetljive na zamor jer su izložene visokim naprezanjima.

3. Nedostatak fleksibilnosti: Brodske konstrukcije moraju biti dovoljno fleksibilne da se prilagode valovima i drugim vanjskim opterećenjima. Ako konstrukcija nije dovoljno fleksibilna ili ako se ne prilagođava na odgovarajući način, može doći do koncentracije naprezanja i pojave zamora.

4. Materijalni faktori: Kvaliteta i svojstva materijala također mogu utjecati na pojavu zamora. Materijali s nižim stupnjem čvrstoće ili osjetljivi na koroziju mogu biti podložniji zamoru. Također, uporaba materijala koji nije prikladan za određene uvjete može dovesti do veće izloženosti zamoru.

5. Starenje i habanje: Tijekom vremena, brodske konstrukcije podliježu procesu starenja i habanju. Ova prirodna degradacija može oslabiti materijal i povećati rizik od zamora.

6. Konstrukcijski nedostaci: Nepravilnosti ili nedostaci u samoj konstrukciji, kao što su oštri rubovi, nepravilnosti u zavarima ili loše postavljene spojevi, mogu stvoriti koncentraciju naprezanja i olakšati pojavu zamora.

Važno je razumjeti ove uzroke i poduzeti odgovarajuće mjere kako bi se minimizirao zamor brodskih konstrukcija. To uključuje upotrebu adekvatnih materijala, pravilno projektiranje konstrukcija, redovito održavanje i inspekciju te primjenu odgovarajućih tehnika za predviđanje i sprječavanje zamora.

### **3.2.1 Brodovi za prijevoz ukapljenog plina**

Fenomen zamora dolazi do izražaja kod brodova za prijevoz ukapljenog plina jer zamor može izazvati puknuće određenih konstrukcijskih detalja koji služe kao granica tanka i vanjske oplata te tako može nastati problem kada temperatura od  $-165^{\circ}$  dođe u kontakt s običnim čelikom iz koje može nastati velika šteta koja može biti opasnost za ljudski život. Zbog ograničenja naprezanja kod savijanja trupa u dijelu tankova uzdužni nosači su projektirani sa određenom rezervom zamorne čvrstoće. Stoga, veća briga leži u zamornoj čvrstoći primarnih elemenata [13]. Neka specifična opterećenja iz kojih mogu proizaći ta naprezanja su:

1. Vibracije i turbulencije: Turbulentni protok tekućeg plina u spremnicima i cjevovodima, kao i vibracije uzrokovane radom strojeva i pogonskih sustava broda, mogu stvarati oscilacijska opterećenja koja mogu dovesti do zamora konstrukcije.

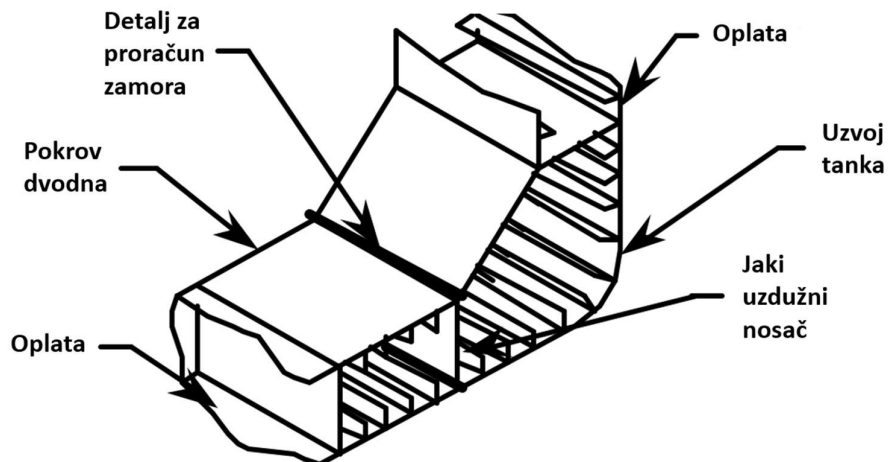


2. Sustavi toplinske izolacije: LNG brodovi imaju složene sustave toplinske izolacije kako bi održali niske temperature tekućeg plina. Promjene temperature i naprezanja uzrokovanih ekspanzijom i kontrakcijom izolacijskih materijala mogu doprinijeti zamoru konstrukcije.

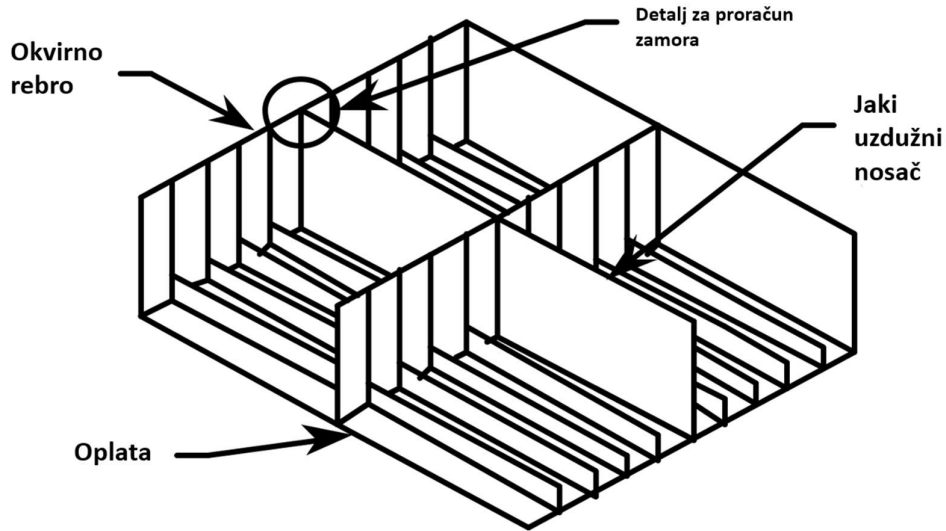
Detalji koji se posebno provjeravaju na zamor kod ovih tipova brodova su [4]:

- presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka
- veza uzdužnog nosača s okvirnim rebrom
- veza bočnog nosača dvostrukog trupa s okvirnim rebrom
- veza otvora i obruča za tekuće spremnike s palubom
- završetak stražnjeg kraja unutarnjeg okvirnog rebra tanka br. 1

Neki od detalja su prikazani su Slika 3-3 i Slika 3-4.



Slika 3-3 Presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka LNG broda [14]



Slika 3-4 Veza uzdužnog nosača s okvirnim rebrom LNG broda [14]

### 3.3 Zamorna izdržljivost

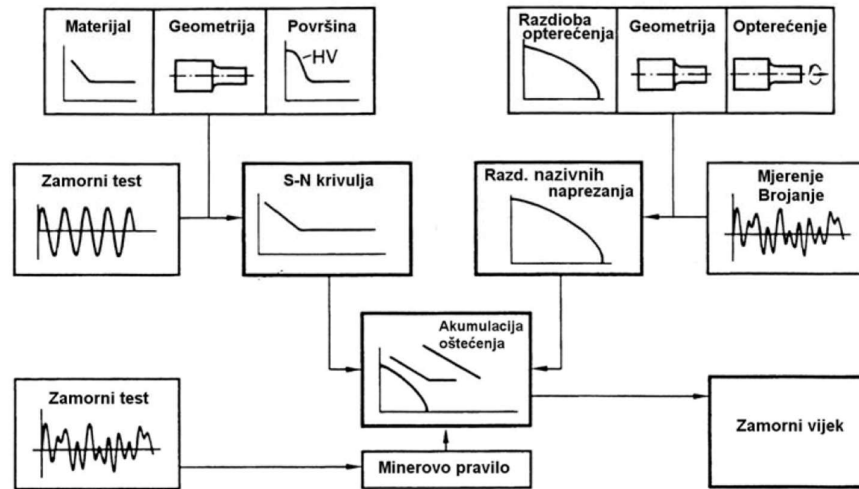
Za proračun zamornog vijeka konstrukcijskih detalja, potrebni su podaci o rasponima naprezanja kao i podaci o otpornosti detalja na zamorno oštećenje. Postoje različiti načini za određivanje otpornosti detalja na zamorno oštećenje.

Tri su osnovne metode analize zamora: metoda kumulativnog oštećenja ili metoda S-N krivulja (Wöhlerovih krivulja), mehanika loma, testiranje prototipa. U nastavku je dan opis S-N krivulja dok će njihova primjena biti detaljno opisana u poglavlju 7.

#### 3.3.1 S-N krivulje

S-N krivulje (Wöhlerove krivulje) nastaju kao rezultat zamornih ispitivanja u kojima se pod kontroliranim uvjetima određuje zamorni vijek strukturnog detalja ovisno o rasponu naprezanja kojem je izložen. Pomoću stvarne raspodjele naprezanja i povezivanjem te raspodjele s odgovarajućom S-N krivuljom moguće je procijeniti akumulaciju oštećenja i zamorni vijek strukturnog detalja te su najčešći način opisivanja otpornosti konstrukcijskih detalja na zamorno oštećenje. One pružaju odnos između primijenjenog raspona naprezanja ( $S$ ) i zamornog vijeka ( $N$ ) pri toj razini naprezanja, pri čemu se zamorni vijek definira kao broj ciklusa opterećenja do popuštanja. Obično se ove krivulje određuju u laboratorijima provođenjem zamornih ispitivanja na uzorcima koji se izlažu ciklusima opterećenja konstantne amplitude sve do popuštanja. Ispitivanje se provodi na identičnim uzorcima pri različitim

razinama raspona napreznja ( $\Delta S$ ), koja predstavljaju ključni parametar opterećenja. Shema S-N pristupa određivanju zamornog oštećenja prikazana je Slika 3-5.



Slika 3-5 Shema S-N pristupa određivanju zamornog oštećenja [15]

Tradicionalni pristup određivanju zamornog vijeka temelji se na klasifikaciji strukturnih detalja i pripisivanju odgovarajućih standardnih S-N krivulja svakoj klasi. Međutim, s obzirom na veliki broj različitih strukturnih detalja, može se suočiti s problemom razdvajanja izračunatih napreznja na ona koja su obuhvaćena S-N krivuljama i na ona koja treba dodatno uzeti u obzir. Praktičnije rješenje je korištenje univerzalnih S-N krivulja koje vrijede za sve strukturne detalje. Ove krivulje uzimaju u obzir širi raspon napreznja i omogućuju procjenu zamornog vijeka za različite strukturne detalje bez potrebe za specifičnim standardnim krivuljama za svaki detalj. Dodatno, u ovom pristupu uzima se u obzir i žarišno napreznje koje se javlja u strukturnim detaljima. Izračunata žarišna napreznja koriste se za procjenu zamornog vijeka detalja u kombinaciji s univerzalnim S-N krivuljama. Korištenje univerzalnih S-N krivulja i žarišnih napreznja omogućuje praktičniju analizu zamornog vijeka strukturnih detalja, eliminirajući potrebu za velikim brojem specifičnih krivulja i pružajući općenitiji pristup u određivanju zamornog vijeka materijala u različitim konstrukcijskim detaljima.

### 3.3.1.1 Standardne S-N krivulje

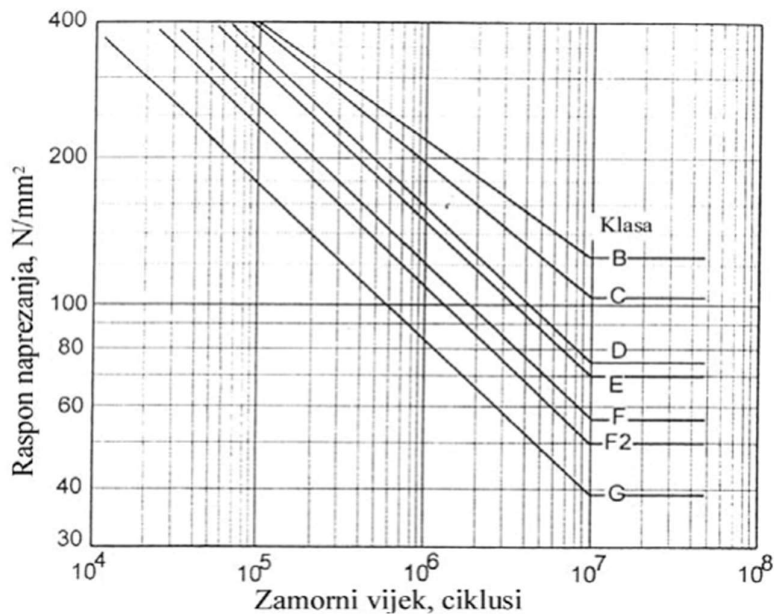
Budući da nazivno napreznje (navedeno u poglavlju 3.4) uzima samo makro geometrijske učinke, tada je nužno da S-N krivulja obuhvati sve učinke koncentracije napreznja. Zavareni spojevi podijeljeni su u različite klase, karakterizirane osjetljivošću na zamorno oštećenje. Analiziranjem podataka dobivenih serijama pokusa zamora, za svaku se klasu usvaja prosječna S-N krivulja. Dvije su osnovne grupe takvih krivulja – one Međunarodnog instituta za

zavarivanje (International Institute of Welding), IIW S-N krivulje; te one Ministarstva energetike Velike Britanije (Department of Energy), DeN S-N krivulje, koje se često nazivaju i HSE (Health and Safety Executive) S-N krivuljama. Obje se grupe krivulja odnose na nekorozivnu sredinu, a pomaknute su dvije standardne devijacije ispod srednjih krivulja dobivenih pokusima, čime osiguravaju vjerojatnost preživljavanja detalja od 97.7% [9].

Osnovne HSE krivulje čine familiju od osam S-N krivulja označenih slovima: B, C, D, E, F, F2, G i W koja ih povezuju sa klasom zavarenih spojeva.. Uobičajeni detalji na brodskim konstrukcijama mogu se podijeliti u šest kategorija [9]:

- detalji bez zavarenih dijelova
- kontinuirani zavar paralelan sa smjerom napreznja
- poprečni zavar
- zavareni spoj na površini ili rubu napregnutog detalja
- zaobljeni i T-zavar koji prenosi opterećenje
- detalji na zavarenim nosačima

Detalji iz različitih kategorija se grupiraju u jednu od klasa zavarenih spojeva temeljem njihove slične dinamičke čvrstoće. Klase zavarenih spojeva se određuju ovisno o smjeru napreznja, potencijalnom mjestu nastanka zamorne pukotine i primijenjenom postupku zavarivanja. Važno je napomenuti da prekidanje zavara i njegovo naknadno nastavljanje rezultira nižom klasom za isti zavareni spoj. To znači da istom zavarenom spoju mogu biti dodijeljene različite klase ovisno o tim faktorima. HSE S-N krivulje prikazane su na Slika 3-6.

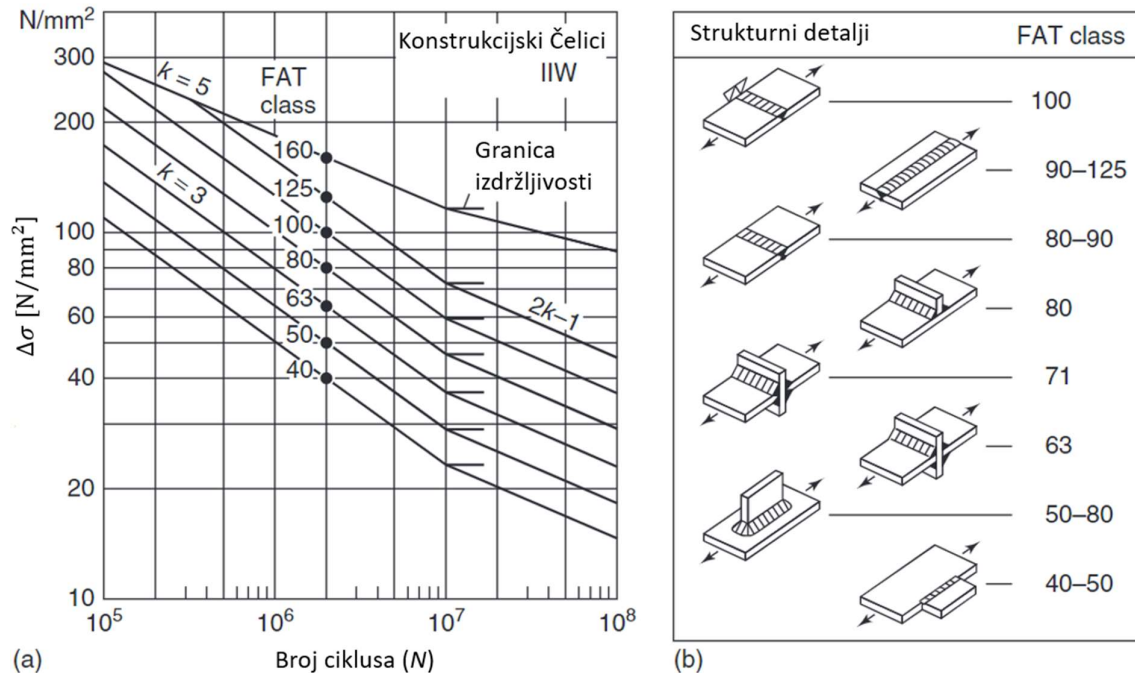


Slika 3-6 HSE S-N krivulje [7]

Na temelju eksperimentalnih istraživanja, Međunarodni institut za zavarivanje uspostavio je skup od 14 S-N krivulja (*IIW S-N krivulja*) koje se odnose na različite vrste zavarenih spojeva. Svaku krivulja karakterizira dinamička izdržljivost pri 2 milijuna ciklusa, što se naziva zamornom klasom IIW krivulje obuhvaćaju niz različitih utjecaja:

- koncentraciju naprezanja u detalju (djelomično)
- lokalnu koncentraciju naprezanja uslijed prisutnosti zavarenog spoja
- veličinu i oblik nesavršenosti zavarenog spoja (djelomično)
- smjer naprezanja
- način metalurške obrade
- vrstu zavarivačkog postupka
- kontrolu kvalitete (ukoliko postoji)
- naknadnu obradu zavarenog spoja (ukoliko postoji)

Kao i kod HSE krivulja, svaka IIW S-N krivulja odnosi se na određenu klasu strukturnih detalja podijeljenih u više kategorija. Krivulje su označene brojkama kako je prikazano na Slika 3-7 na kojoj se može vidjeti i poveznica s određenim konstrukcijskim detaljima.



Slika 3-7 (a) IIW S-N krivulja i (b) povezani konstrukcijski detalji s IIW S-N krivuljom [12]

### 3.3.1.2 Univerzalne S-N krivulje

U brodskim konstrukcijama postoji veliki broj strukturnih detalja koji se razlikuju od onih obuhvaćenih standardnim klasama S-N krivulja. Kod ovih "nestandardnih" detalja nije odmah jasno kako izračunata naprezanja u njima odgovaraju naprezanjima sadržanim u standardnim S-N krivuljama. Drugim riječima, javlja se problem odabira odgovarajuće S-N krivulje. Kako bi se riješio taj problem, neka klasifikacijska društva nastoje definirati univerzalne S-N krivulje koje su primjenjive na sve vrste zavarenih i nezavarenih strukturnih detalja.

Korištenje univerzalnih krivulja temelji se na određivanju faktora koncentracije naprezanja i zarezne vrijednosti naprezanja. Standardne S-N krivulje redovito obuhvaćaju zarezna naprezanja i utjecaj polja naprezanja u okolini pukotine na njezino širenje, jer proizlaze iz zamornih testova. Međutim, određivanje faktora koncentracije naprezanja na temelju modela konačnih elemenata nije dovoljno precizno za obuhvatiti ove efekte.

Univerzalne S-N krivulje se izvode iz standardnih S-N krivulja putem odgovarajućih modifikacija. Negativni recipročni nagib standardnih S-N krivulja za tipične strukturne detalje broda iznosi  $m = 3$ , i taj nagib se također koristi za univerzalne S-N krivulje. Za praktične potrebe brodogradnje, ova razlika nije od velike važnosti jer se veći dio zamornog vijeka detalja odnosi na početnu fazu rasta mikropukotine.

### 3.3.2 Mehanika loma

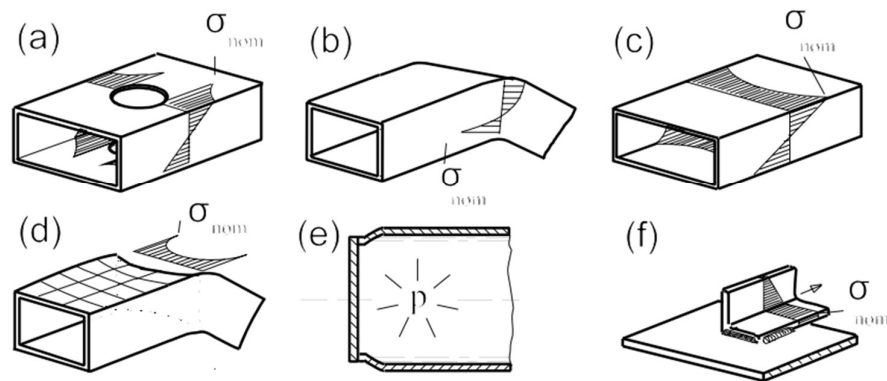
Mehanika loma proučava ponašanje materijala s prisutnošću pukotine, pri čemu rast pukotine predstavlja porast zamornog oštećenja. Njezin osnovni zadatak je utvrditi zakon rasta pukotine i na temelju toga predvidjeti preostali zamorni vijek strukturnog detalja koji sadrži pukotinu. Prilikom analize zamornog oštećenja, plastično područje oko vrška pukotine može se zanemariti, te se problem zamora rješava unutar okvira linearno-elastične mehanike loma. Faktor intenzivnosti naprezanja je faktor koji povezuje lokalno stanje naprezanja i deformaciju u blizini vrška pukotine s globalnim parametrima koji određuju rast pukotine, kao što su opterećenje i geometrija detalja. Brzina rasta pukotine izravno ovisi o tom faktoru. Tijekom razvoja mehanike loma, razvijene su različite metode za određivanje faktora intenzivnosti naprezanja. Postojeća rješenja sabrana su u posebnim priručnicima i mogu se primijeniti na različite probleme. Za složene probleme, faktor intenzivnosti naprezanja može se odrediti primjenom metoda superpozicije standardnih rješenja, upotrebom težinskih funkcija ili drugim pristupima koji su primjereni konkretnom problemu. Ove metode omogućuju analitičko ili numeričko određivanje faktora intenzivnosti naprezanja, što je ključno za procjenu ponašanja pukotine i predviđanje vijeka trajanja strukturnih detalja pod utjecajem zamornog oštećenja.

### 3.3.3 Testiranje prototipa

Izravno određivanje dinamičke čvrstoće konstrukcije ili njezinog elementa je široko korištena metoda u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Kako bi se osigurala reprezentativnost ispitivanog uzorka, koriste se isti materijali kao i u stvarnoj proizvodnji, primjenjujući uobičajene postupke proizvodnje. Konstrukcije se opterećuju putem hidrauličkih cilindara koji se kontroliraju računalom. Broj tih cilindara može varirati ovisno o složenosti opterećenja na konstrukciju, od nekoliko do stotinjak, posebno kod ispitivanja zrakoplovnih konstrukcija u stvarnoj veličini. Hidraulički cilindri se kontroliraju računalom kako bi simulirali opterećenja koja konstrukcija podnosi tijekom uporabe, budući da ispitivanje konstrukcije u prirodnoj veličini s jednostavnim opterećenjem nema smisla. Takve velike konstrukcije zahtijevaju posebnu opremu, stoga su pokusi na prototipovima izuzetno skupi. Visoke troškove opravdavaju samo velike proizvodne serije u automobilskoj industriji ili kritična osjetljivost na pojavu pukotina u zrakoplovnoj industriji. Budući da to nije slučaj u brodogradnji, slični pokusi se preporučuju samo za izuzetne konstrukcijske detalje, kao što su lijevani cijevni spojevi u industriji pomorskih objekata. Rezultat takvih ispitivanja također je S-N krivulja, ali prilagođena tom specifičnom detalju konstrukcije umjesto standardnih krivulja [16].

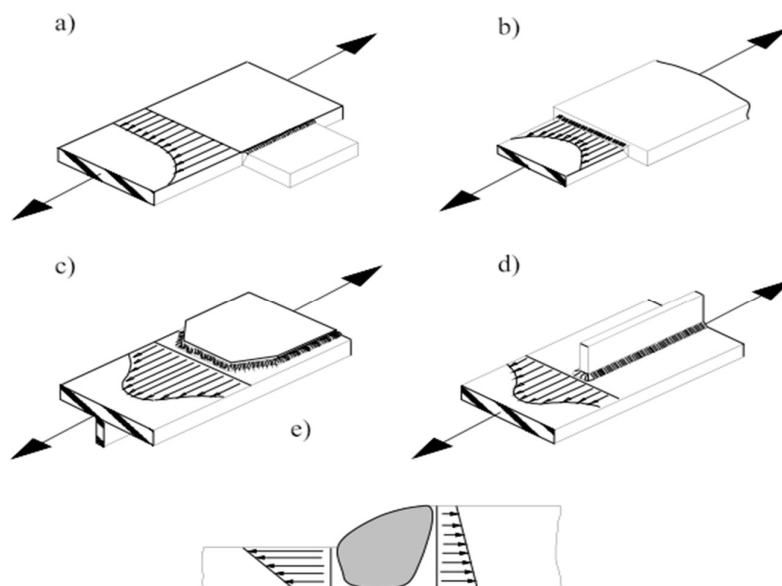
### 3.4 Naprezanja u analizi zamora

*Nazivna naprezanja* su naprezanja koja se izračunavaju na temelju vanjskih opterećenja i geometrije komponente, bez uzimanja u obzir lokalnih efekata koncentracije naprezanja ili prisutnosti pukotina, ali uključuju povećanja naprezanja zbog makro geometrijskog oblika koji se nalazi u blizini npr. veliki izrez. Ova naprezanja se računaju koristeći klasične metode analize naprezanja, kao što su metoda konačnih elemenata (MKE) ili analitičke metode. Utjecaj makro geometrijskog oblika prikazan je na Slika 3-8.



Slika 3-8 Utjecaj različitih makro geometrijskih oblika na nazivno naprezanje [17]

Žarišna naprežanja su lokalna povećanja naprežanja koja se javljaju na mjestima koncentracije naprežanja, kao što su zavareni spojevi, oštri kutovi ili izrezi. Ova naprežanja mogu biti značajno veća od nazivnih naprežanja i mogu biti izvor lokalnog oštećenja ili pucanja materijala. Žarišna naprežanja se često određuju pomoću faktora koncentracije naprežanja, koji kvantificira lokalno povećanje naprežanja na određenoj lokaciji ali točan način određivanja bi bio pomoću ekstrapolacije naprežanja koje se može biti provedeno različitim tehnikama. Žarišna naprežanja se određuju na specifičnim točkama strukturnog detalja gdje se očekuje koncentracija naprežanja. Pri tome se zanemaruje geometrija zavara i zarezna naprežanja pred vrhom zavara. Također se zanemaruju pogreške u geometriji detalja koje proizlaze iz nesavršenosti proizvodnog postupka, a ako su prisutne, moraju se uzeti u obzir na drugi način. Metoda konačnih elemenata koristi se za izračunavanje tih naprežanja. Strukturni detalj može biti modeliran pomoću dvodimenzionalnih (2D) ili trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata, koristeći mrežu koja je dovoljno fina da opisuje polje naprežanja na mjestima koncentracije naprežanja. Pristup strukturnim žarišnim točkama obično se koristi ako ne postoji jasno definirano nazivno naprežanje zbog složenih geometrijskih učinaka ili ako strukturni diskontinuitet nije usporediv s klasificiranim strukturnim detaljima. Može se odrediti pomoću referentnih točaka ekstrapolacijom na vrh zavara koji se razmatra iz naprežanja na referentnim točkama. Strukturni detalji i distribucija njihovih naprežanja prikazani su na Slika 3-9.



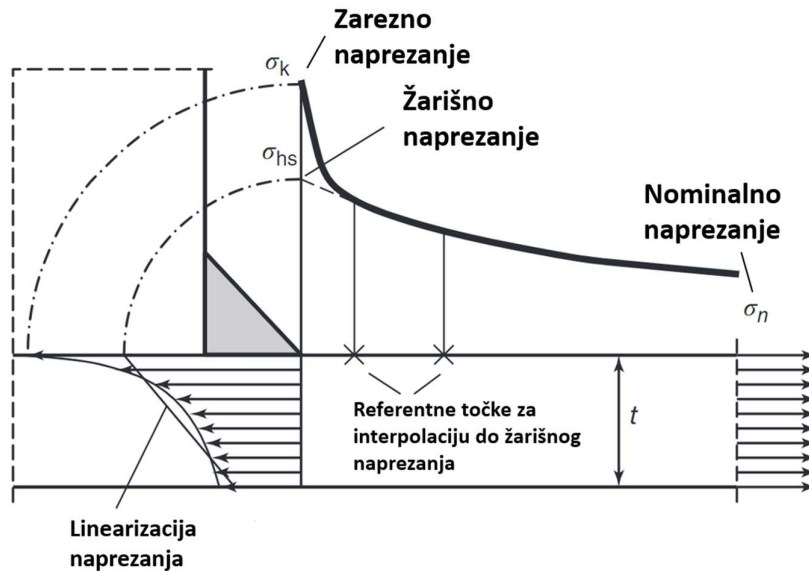
Slika 3-9 Strukturni detalji i naprežanja [17]

Zarezna naprežanja su naprežanja koja se javljaju na vrhu pukotine ili zareza u materijalu. Pukotine ili zarezi djeluju kao koncentratori naprežanja i uzrokuju lokalno povećanje



naprezanja na tim mjestima. Zarezna naprezanja su posebno važna u mehanici loma, jer su odgovorna za inicijaciju i rast pukotine u materijalu. Analiza zarezni naprezanja uključuje određivanje faktora koncentracije naprezanja na vrhu pukotine kako bi se predvidjela vjerojatnost pucanja ili rasta pukotine.

Slika 3-10 prikazuje sve tri vrste naprezanje na strukturnom detalju.



Slika 3-10 Prikaz naprezanja u strukturnom detalju [12]

## 4 METODA ANALIZE I KORIŠTENI SOFTVERSKI ALATI

Klasifikacijska društva su stvorila baze podataka [18] koje omogućuju identifikaciju mjesta posebno osjetljivih na zamorno oštećenje. Ove baze se oslanjaju na informacije o prethodnim slučajevima popuštanja za koje se sumnja da su povezani sa zamorom, kao i na dugogodišnje iskustvo u odobravanju klasifikacijskih nacrti za nove brodove, kontroliranju izgradnje brodova i njihovoj izvedbi u službi. Metoda konačnih elemenata odigrala je važnu ulogu u tome, omogućavajući detaljne analize sumnjivih područja i promjenu konfiguracija svakog pojedinog detalja. Kao rezultat, određena mjesta su se izdvojila kao područja u kojima se tijekom životnog vijeka broda mogu očekivati visoke koncentracije naprezanja.

Pošto je zadano da se proračun izvodi prema DNV-u u nastavku će biti dan pregled metoda koje to društvo propisuje kada dolazi u pitanje proračun zamornog oštećenja.

Ovisno o metodi izračuna naprezanja i modelu koji predstavlja strukturu broda, procjena zamora može se provesti za nazivno naprezanja, žarišno naprezanje ili lokalna naprezanja na rubu ploče bez zavara. Vijek zamora na temelju nominalnih i lokalnih naprezanja može se procijeniti S-N krivuljama (razred FAT) koje se temelje na nazivnom naprezanju. Žarišna naprezanja mogu se izračunati na temelju izravnih proračuna ili na temelju nominalnih naprezanja sa faktorom koncentracije naprezanja (K). Ocjena zamora u dva posljednja slučaja trebala bi se provoditi upotrebom S-N krivulja temeljenih na žarišnom naprezanju.

Dugoročna raspodjela naprezanja ključna je za usporedbu opterećenja zamora s kapacitetom zamora koji dan u obliku S-N krivulja. DNV navodi tri metode za izračun raspona naprezanja [18]:

- 1) Procjenu opterećenja po pravilu dugoročne razdiobe raspona naprezanja, predstavljen dinamičkim rasponom naprezanja na određenoj razini vjerojatnosti i linearnim spektrom naprezanja.
- 2) Pristup direktnom projektnom valu izračunava se za brod da simulira opterećenje vala uz uporabu linearnog spektra.
- 3) Spektralna metoda za izračun dugoročne dinamičke distribucije naprezanja s obzirom na valove koji će se pojavljivati u životnom vijeku broda.

U prvoj se metodi opterećenja temelje na ekvivalentnom projektnom valu (*EDW*), propisanim pravilima i to se primjenjuje na model grede ili modele s konačnim elementima. Komponente opterećenja kombiniraju se propisanim formulama.

U drugoj metodi, utvrđuju se projektni valovi specifični za brod koji predstavljaju opterećenje prema pravilima. Projektni valovi mogu se primijeniti na različite vrste modela konačnih elemenata te na pojednostavljene modele broda kao grede na dva oslonca.

U trećoj se metodi izračunava dugoročna raspodjela naprezanja na temelju izravno izračunatih hidrodinamičkih opterećenja za određeni brod i specifični dijagram raspršenja valova. Sastavni dijelovi opterećenja točno se kombiniraju s obzirom na fazne pomake.

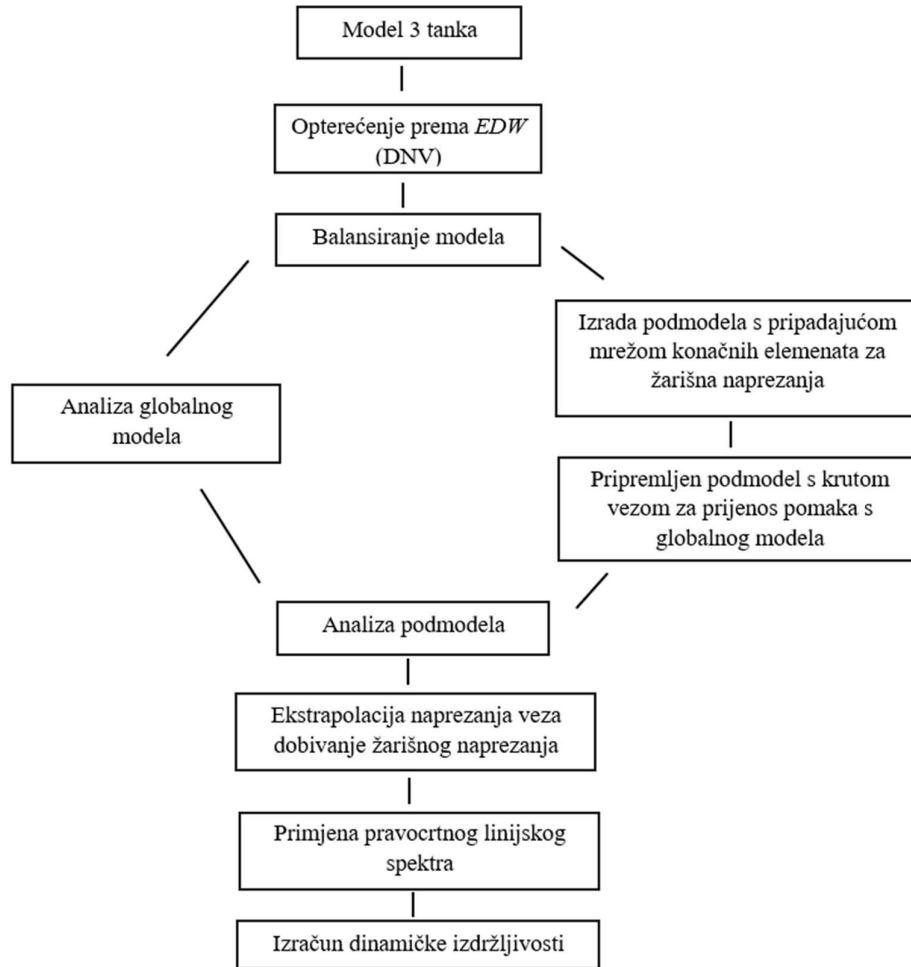
#### 4.1 Odabrana metoda analize

Odabir različitih načina analize može ovisiti o dosta faktora, neki od njih su sljedeći: iskustvo inženjera s različitim metodama na nekim klasičnim detaljima, iskustvo o ponašanju pukotina kod nekih standardnih detalja, položaj detalja na brodske konstrukciji te o dostupnostima nacrti i računalnih alata koje su na raspolaganju projektantu.

U ovom radu će biti obrađen postupak pojednostavljenog proračuna zamora koji obuhvaća analizu metodom konačnih elemenata u kojoj će se analizirati tank broj 3:

- model će biti modeliran tehnikom 3 tanka (eng. three cargo hold method)
- valno opterećenja će se računati prema konceptu ekvivalentnog projektnog vala (*Equivalent Design Wave - EDW*)
- prije analize model će se balansirati tako da se simulira stvarni raspored smičnih sila i momenata, koje nastaju uslijed valnog opterećenja na tanku 3.
- za proračun zamora će se koristiti žarišna naprezanja
- žarišna naprezanja će se iščitavati metodom interpolacije rezultata dobivenih finom mrežom konačnih elemenata
- modeli konstrukcijskih detalja će biti generirani tehnikom podmodeliranja te će se pomaci s globalnog modela prenijeti na podmodele pomoću krutih veza na rubovima podmodela
- zadnji korak je određivanje zamorne izdržljivosti koja će detaljnije biti opisana kasnije u radu.

Hodogram postupka prikazan je na Slika 4-1.



Slika 4-1 Hodogram pojednostavljenog proračuna koji je korišten u radu

#### 4.1.1 Razina modeliranja

Metoda 3 tanka se provodi iz raznih razloga a neki od njih mogu biti ograničenja hardverskih mogućnosti računala na kojem se radi, vrsta analize koja se provodi na određenom dijelu broda te nema potrebe za modeliranjem cijele brodske strukture koja bi uzela previše vremena. Ovom se metodom brod analiza po dijelovima (po tri skladišna prostora – spremnika) pri čemu je fokus na srednjem od ta tri spremnika..

U ovom radu se analizira središnji tank LNG broda te je odabrana metoda 3 tanka za modeliranje. Registar propisuje točno što se tom metodom modelira [19]. Dovoljno je uz središnji tank modelirati tankove s kojima je on spojen. Na kraj tih tankova se stavljaju rubni uvjeti koji su dovoljno daleko od središnjeg tanka tako da ne utječu na analizu, odnosno rubni spremnici umanjuju efekt rubnih uvjeta te na tako generiraju točniji raspored sila i momenata koje djeluju na brod. Takav model smatra se globalnim modelom i registar propisuje da se svi limovi modeliraju kao pločasti elementi kao i svi jaki nosači dok se uzdužnjaci i ukrepe

modeliraju kao gredni elementi. Rupe i prolazi koji su manji od veličine mreže se zanemaruju ili pojednostavljaju. Mreža konačnih elemenata za globalni model će biti veličine udaljenosti između dva uzdužnjaka.

Za proračun zamora registar propisuje koji detalji se obavezno moraju analizirati [20]. Za analizu tih detalja rađeni su podmodeli s finom mrežom te su svi elementi modelirani pločastim konačnim elementima da bi se naprezanje moglo što točnije reprezentirati.

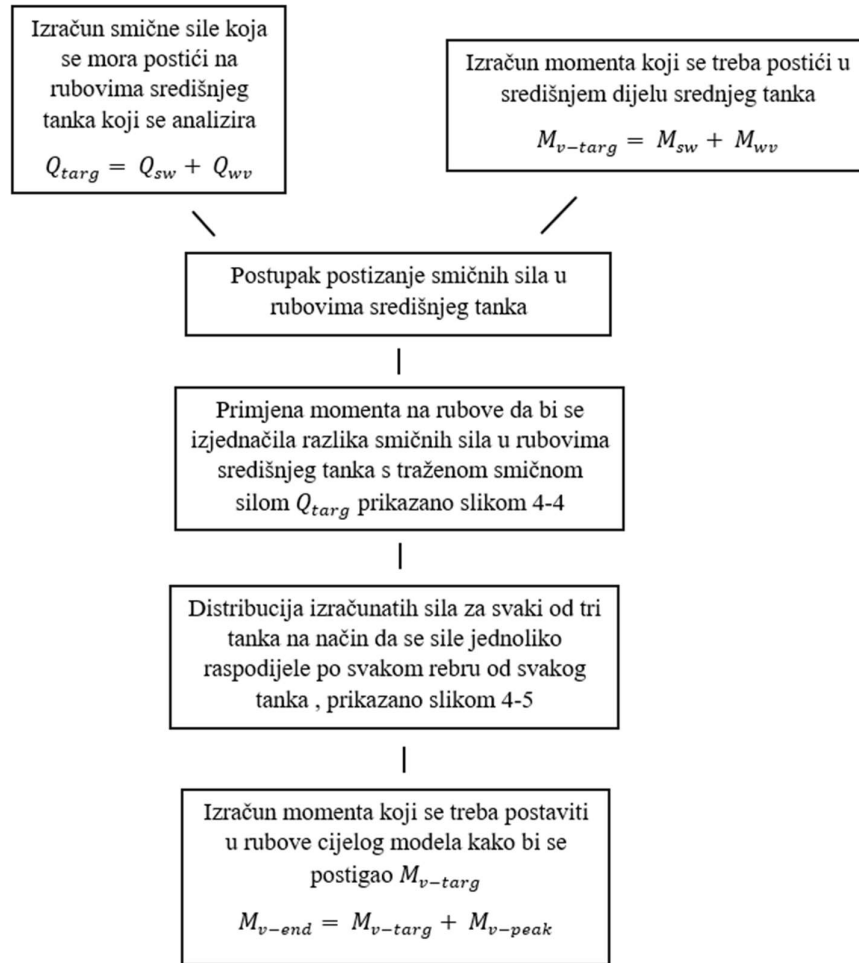
#### **4.1.2 Koncept opterećenja ekvivalentnog projektnog vala**

Metoda ekvivalentnog projektnog vala (*Equivalent Design Wave - EDW*) je postupak razvijen od strane DNV za procjenu strukturnog odgovora pomorskih konstrukcija, kao što su brodovi i platforme na moru, na valna opterećenja. To je pojednostavljeni pristup koji omogućuje inženjerima procjenu maksimalnog odziva strukture na skup projektnih valnih uvjeta, bez izvođenja spektralne analize.

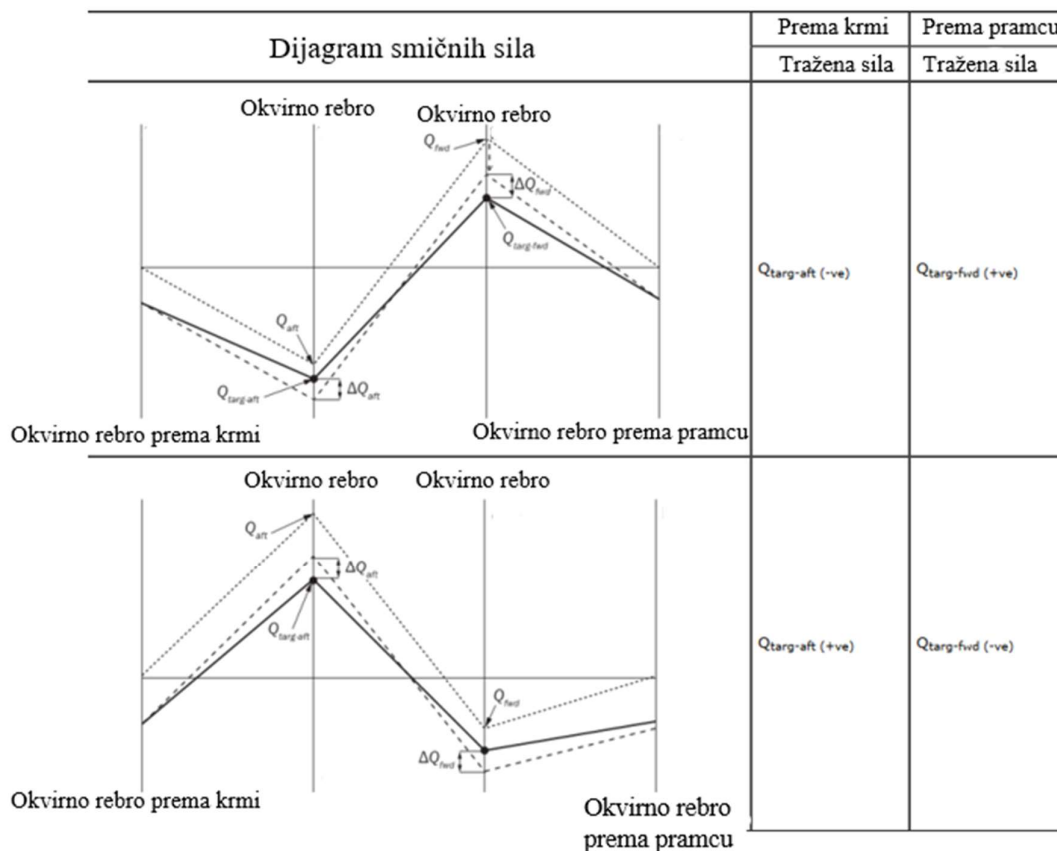
Metoda *EDW* temelji se na konceptu reprezentativnog vala koji obuhvaća karakteristike dizajnerskih valnih uvjeta. Umjesto da se razmatra cijela vremenska povijest vala, jedan reprezentativni val definiran je prema njegovoj značajnoj visini vala, vršnom periodu i spektralnom obliku. Ovi parametri određuju se na temelju statističke analize valne klime na određenoj lokaciji na kojoj će se konstrukcija koristiti [21].

#### **4.1.3 Princip balansiranja modela**

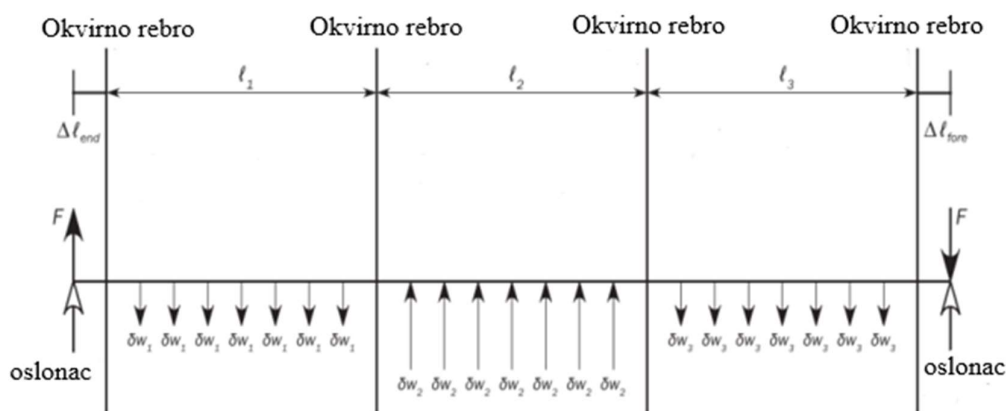
Kada se na model 3 tanka primjene sva prema pravilima izračunata opterećenja događa se to da zbog tih hidrostatičkih i hidrodinamičkih sila dolazi do disbalansa modela u smislu da raspodjela smičnih sila i momenata nije dobro distribuirana na području 3 tanka kako bi inače bila da imamo cijeli globalni model. Kako ne bi trebao modelirati cijeli brod registar propisuje način simuliranja ostatka konstrukcije kroz primjenu dodatnih smičnih sila po modelu te dodavanjem momenata u rubove kako bi se nadomjestio ostatak broda koji nije modeliran. Slika 4-2 prikazuje postupak balansiranja.



Slika 4-2 Hodogram postupka balansiranja 3 tank modela prema DNV-u



Slika 4-3 Primjena momenta za postizanje željene smične sile [19]

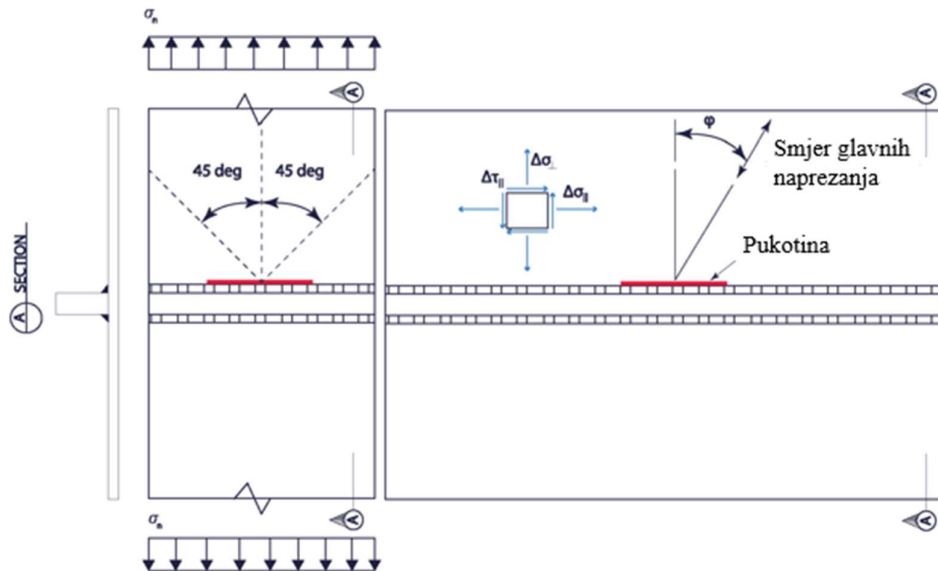


Slika 4-4 Prikaz distribucije sila za svaki spremnik [19]

#### 4.1.4 Odabir vrste naprezanju za proračun zamora

Kod analiza s metodom konačnih elemenata moguće je gledati više vrsta naprezanja na elementu te više smjerova tih istih naprezanja. Registar propisuje točno koje naprezanje se uzima u proračuna, a to su glavna naprezanja te daje više S-N krivulja ovisno o smjeru tog

naprezanja ali propisuje isto tako da se uzimaju ona naprezanja čiji je smjer unutar  $45^\circ$  od normale na zavar jer takva naprezanja mogu stvoriti najveću štetu na sam zavar. Za naprezanja izvan tih kutova moguće je koristiti druge S-N krivulje. Slika 4-5 prikazuje glavna naprezanja na zavar.



Slika 4-5 Prikaz glavnih naprezanja na zavar koja stvaraju pukotine paralelne sa zavarom [18]

## 4.2 Softverski paket SESAM

Kako bi se analiza koja je opisana provela u ovom radu će se koristiti DNV-ov softverski paket SESAM. To je cjeloviti program za ocjenu čvrstoće pomorskih objekata koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Ovaj programski paket ima različite module koji se mogu koristiti ovisno o numeričkoj simulaciji koju je potrebno provest. U ovo radu korišteni su sljedeći modeli:

*Genie* je alat koji se koristi za projektiranje i analizu pomorskih objekata. Može se koristiti kao samostalni alat u kojem korisnik može modelirati konstrukciju, te opremu, okoliš i opterećenja koja se mogu pojaviti na takvim konstrukcijama. Koristi se za linearne statičke analize te nelinearnu analizu grednih konstrukcija koje su fiksirane na morsko dno. Unutar programa se mogu vizualizirati rezultati te se mogu raditi različite analize rezultata, kao i provjera kriterija podobnosti po pravilima DNV-a [22].

*Sestra* je program za linearnu statičku i dinamičku strukturnu analizu unutar *SESAM-a*. Temelji se na formulaciji pomaka u metodi konačnih elemenata. *Sestra* se povezuje s drugim programskim modulima *SESAM-a* tj. modulima za generiranje modela konačnih elemenata, izračun opterećenja te za prikaz i dodatnu evaluaciju rezultata [23].



*Xtract* je alat za prikaz i obradu rezultata analize. Sa svojom 3D grafikom visokih performansi omogućuje jednostavno i učinkovito interaktivno okretanje, zumiranje i pomicanje modela za gledanje i animaciju. Na temelju rezultata analize s *Xtractom* moguće je prikazati razložene komponente naprezanja u dijelove membrane i savijanja, glavna naprezanja i *Von Mises* naprezanja. Može prikazati deformirani model te dodatno može animirati gibanje plovila na valovima [24].

*Submod* je program koji se specifično koristi kod tehnike podmodeliranja. Omogućuje da se dio globalnog modela ponovo analizira kako bi se postigli točniji rezultati. Za lokalni model odvojen od globalnog modela, pomaci iz analize globalnog modela primijenjeni su kao propisani pomaci u rubovima lokalnog modela [25].

## 5 STRUKTURNI MODEL

Globalni modeli koriste grubu mrežu konačnih elemenata kako bi efikasno modelirali cjelokupnu krutost broda. Njihova svrha je pružiti informacije o nazivnim naprezanjima u glavnim strukturnim elementima. Pri izradi globalnih modela često se koristi tehnika superelemenata, što znači da se globalni model podijeli na više dijela te se ti dijelovi kasnije spajaju u cjelinu koja čini globalni model.

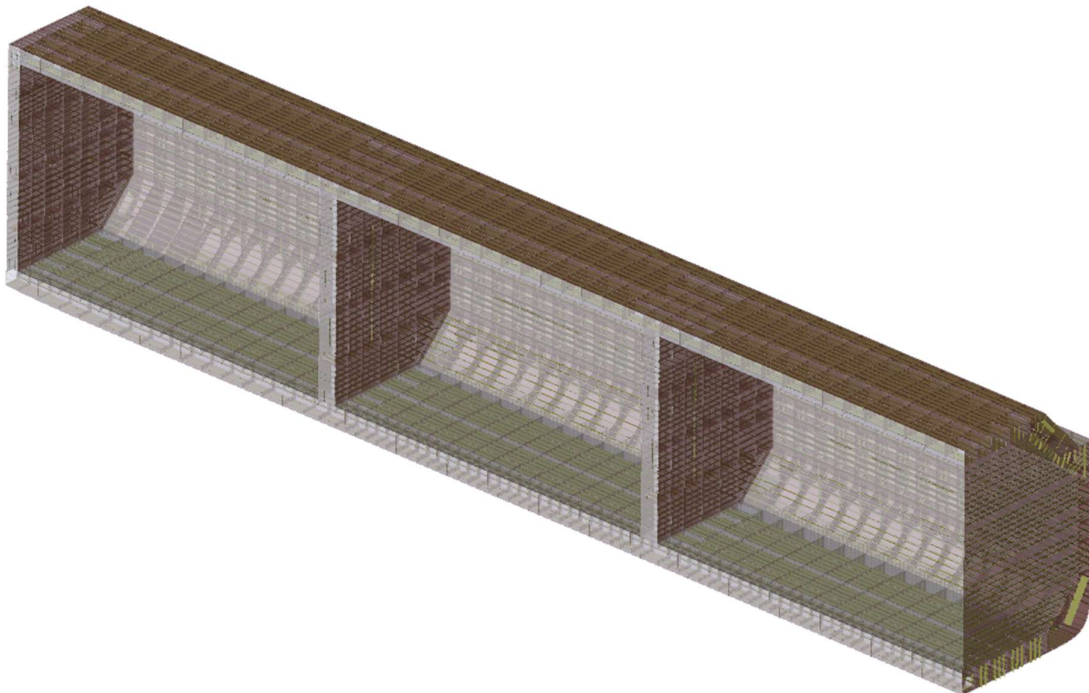
### 5.1 Globalni model

Na temelju dobivenih nacрта izrađen je globalni model u duljini od 3 tanka. Duljina i neke karakteristične pozicije globalnog modela i tanka 3 dane su u Tablica 5-1.

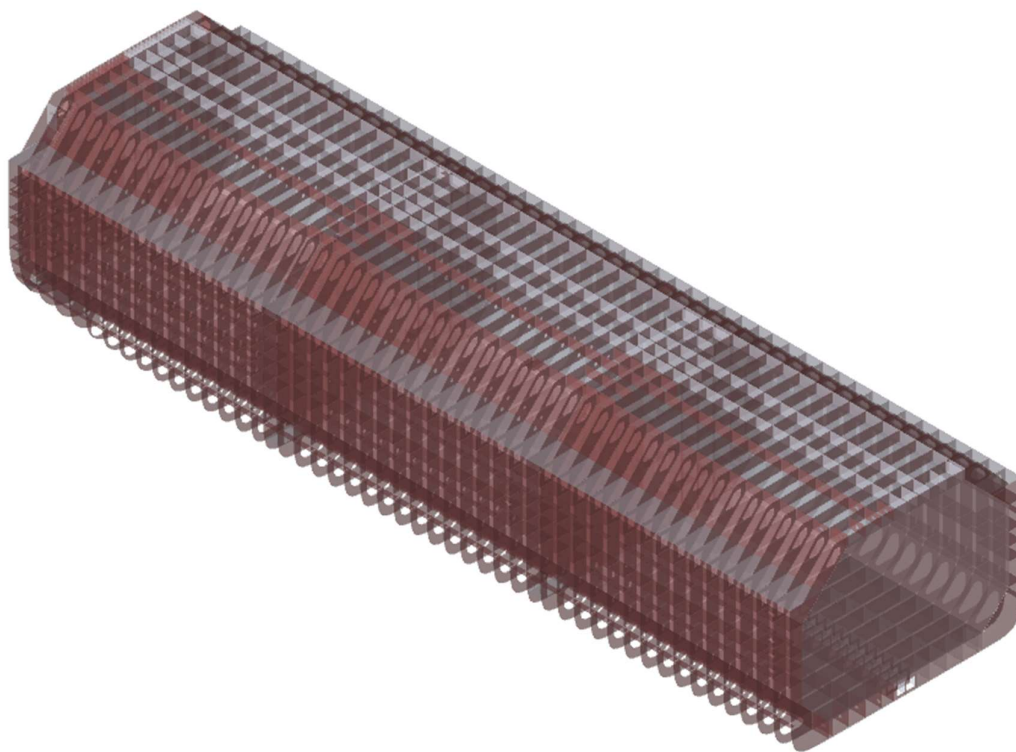
Tablica 5-1 Glavne izmjere globalnog modela

Tank br.3	Rebro	Položaj - x [m]	x/L
Vodonepropusna pregrada (krma)	87	108,23	0,38
Konferdam pregrada (krma)	88	111,035	0,39
Vodonepropusna pregrada (pramac)	103	161,435	0,57
Konferdam pregrada (pramac)	104	164,24	0,58
<b>Duljina tanka br.3 [m]</b>		50,40	
<b>Ukupna duljina globalnog modela [m]</b>		160,36	

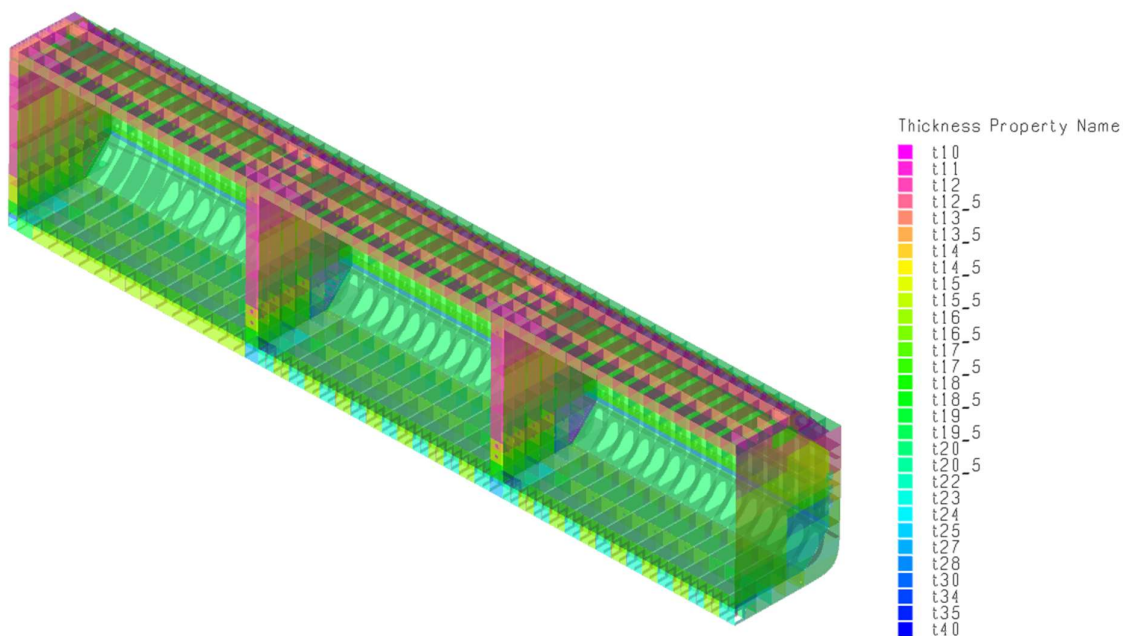
Sljedećim slikama će biti prikazane glavne karakteristike globalnog modela.



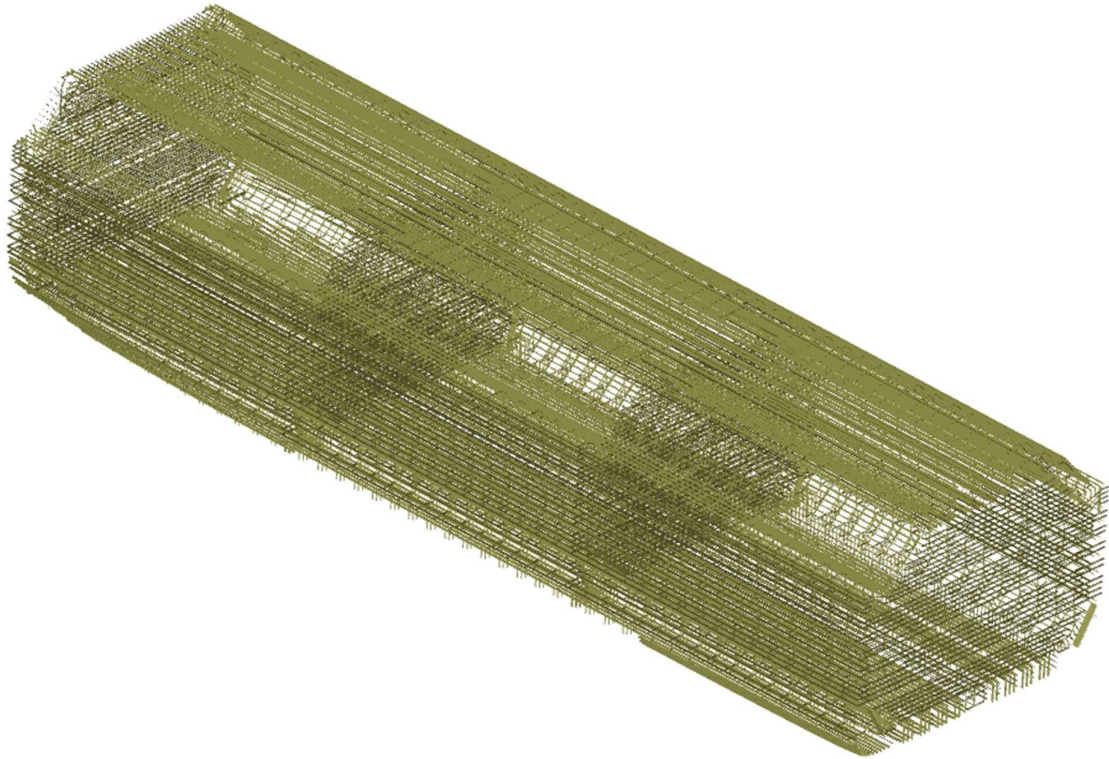
Slika 5-1 Globalni model presječen po središnjici



Slika 5-2 Globalni model bez vanjske oplata



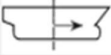
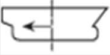




Slika 5-3 Debljine limova globalnog modela



Slika 5-4 Prikaz uzdužnjaka i ukrepa globalnog modela

## 5.2 Opterećenja na model

Koncept opterećenja je opisan u poglavlju 4. Detaljniji opis i sva opterećenja koja su propisana od strane registra mogu se naći u [21]. Za opterećenja koja su implementirana u ovaj model uzeto je sljedeće: vlastita težina modela i opterećenja koja generiraju hidrostatički i hidrodinamički tlak te s njima i uzgon na određenom gazu iz kojih proizlazi distribucija statičkog momenta i smična sila. Valno opterećenje je pojednostavljeno te se uzima samo val u pramac koji može djelovati na dva načina na brod (progib i pregib) u pravilima se oni zovu *HSM (Head sea moment)* 1 i 2. Na osnovi zadanog valnog opterećenja određuju se ubrzanja te hidrodinamički tlak po oplati za ta dva slučaja. Pravila imaju točno specificirane valove za proračun zamornih naprezanja te su oni prikazani na Slika 5-5.

Slučaj opterećenja	Val u pramac-1	Val u pramac-2
Projektni val	Val u pramac	
Smjer	U pramac	
Efekt	Maksimalni moment savijanja	
Vertikalni moment savijanja	Progib	Pregib
Smična sila	Negativna prema krmu Pozitivna prema pramcu	Pozitivna prema krmu Negativna prema pramcu
Horizontalni moment savijanja	-	-
Torzijski moment	-	-
Zalijetanje	Prema pramcu	Prema krmu
$a_{zalijetanje}$		
Zanošenje	-	-
$a_{zanošenje}$	-	-
Poniranje	Smjer prema dolje	Smjer prema gore
$a_{poniranje}$		
Ljuljanje	-	-
$a_{ljuljanje}$	-	-
Posrtanje	Pramac prema dolje	Pramac prema gore
$a_{posrtanje}$		

Slika 5-5 Prikaz valnog opterećenja koje povezuje ostala opterećenja vezana uz dinamiku [26]

### 5.2.1 Hidrostatički tlak

Hidrostatički tlak se računa prema [21] te se u model implementira kao funkcija  $z$  koordinate da bi se dobile točnije vrijednosti tlaka. Tlak se dijeli u dvije zone ispod i iznad vodne linije. Ispod vodne linije tlak se računa kao sila tekućine na površinu:

$$P_s = \rho g (T - z) \quad (5.2)$$

gdje je:

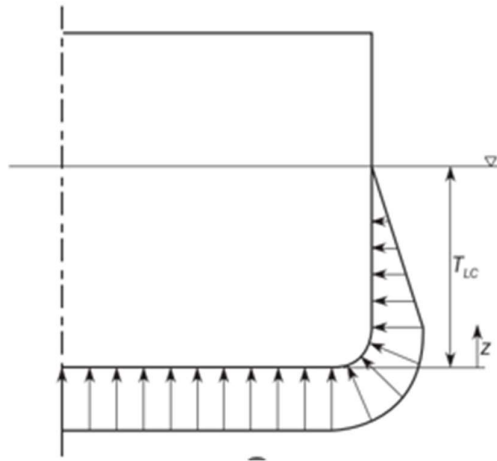
$\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$  – gustoća morske vode

$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$  – akceleracija sile teže

$T$  – gaz za koji se računa hidrostatički tlak

$z$  –  $z$  koordinata, varira kako se pomičemo vertikalno od dna prema vodnoj liniji

Iznad vodne linije nema tekućine te se uzima da je hidrostatički tlak  $P = 0$ . Distribucija hidrostatičkog tlaka prikazana je na Slika 5-6.



Slika 5-6 Distribucija hidrostatičkog tlaka po oplati [26]

*Genie* je program koji podržava programski jezik *JavaScript* te se kroz petlju implementirao taj tlak. Kod koji je stvoren je prikazan na Slika 5-7.

#### HIDROSTATIC

```
Tc1 = 9.729 m;
//
if (z <= Tc1)
{
return 1025 kg/m3 * 9.80665 m/s2 * (Tc1-z);
}
else return 0;
```

Slika 5-7 Kod hidrostatičkog tlaka sa svim vrijednostima potrebnim za izračun

### 5.2.2 Hidrodinamički tlak

Ovaj tlak direktno ovisi o valu koji se implementira (*HSM1* ili *HSM2*) te su i time definirane formule u registru. Hidrodinamički tlak se dijeli u 3 zone te je raspodjela zona prikazana Slika 5-8. Distribucija tlaka za val *HSM-1* odnosno *HSM-2* prikazana je na Slika 5-9 i Slika 5-10.

Slučaj	Hidrodinamički tlak [kN/m <sup>2</sup> ]		
	$z \leq T_{LC}$	$T_{LC} < z \leq h_w + T_{LC}$	$z > h_w + T_{LC}$
HSM-1	$P_W = \max \{-P_{HS}; \rho g(z - T_{LC})\}$	$P_W = P_{WML} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
HSM-2	$P_W = \max \{P_{HS}; \rho g(z - T_{LC})\}$		

Slika 5-8 Formule za izračun hidrodinamičkog tlaka [26]

Formula po kojoj se računa hidrodinamički tlak je:

$$P_{HS} = C_{fT} f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} \quad (5.3)$$

gdje je:

$$C_{fT} = f_T + 0,5 - (0,7f_T - 0,2)C_B \quad (5.4)$$

$f_{nl}$  – koeficijent koji uzima u obzir ne linearnost

$$f_{yz} = C_x \frac{z}{T} + (2 - C_x)f_{yB} + 1 \quad (5.5)$$

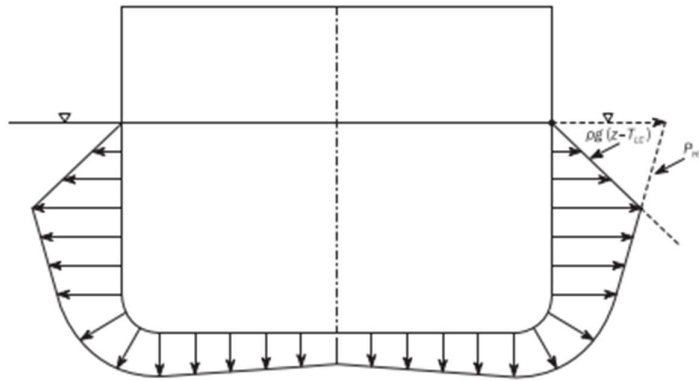
$$C_x = 1,5 - \frac{|x - 0,5L|}{L} \quad (5.6)$$

$$f_h = 3,0(1,21 - 0,66f_T) \quad (5.7)$$

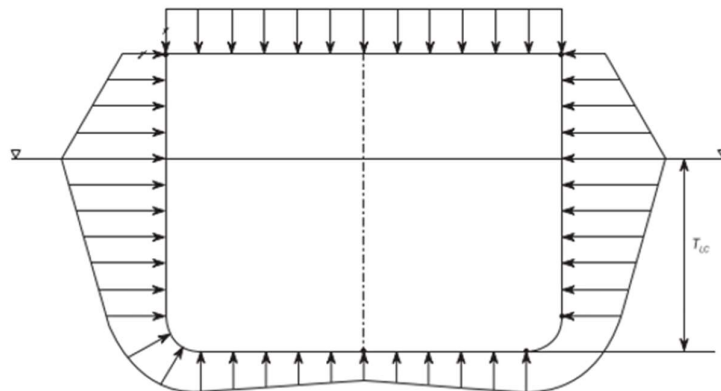
$k_a$  – koeficijent amplitude u uzdužnom smjeru broda

$$\lambda = 0,6(1 + f_T)L \quad (5.8)$$

$k_p$ - koeficijent faznog pomaka



Slika 5-9 Distribucija hidrodinamičkog tlaka po oplati za HSM-1 val [26]



Slika 5-10 Distribucija hidrodinamičkog tlaka po oplati za HSM-2 val [26]

Implementacija je na isti način kao što je prethodno opisana a kod je prikazan na Slika 5-11

HSM2-fatigue

```

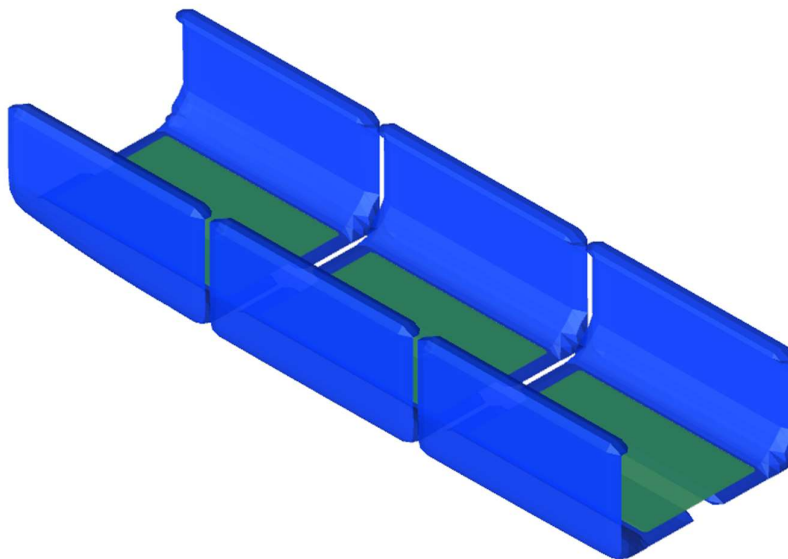
ro = 1025 kg/m^3;
g = 9.80665 m/s^2;
Cw = 10.0034;
fp = 0.17762;
fh = 1.91485;
ka = 1;
lambda = 301.18 m;
kp = 1;
Lo = 282.27 m;
TLC = 9.729 m;
Bx = 46.95 m;
PwL = 13008.24 Pa;
hw = 2.588237 m;
p = 1 Pa;
fyB = Math.abs(2 * y) / Bx;
Cx = 1.5 - Math.abs(x - 0.5 * Lo) / Lo;
fyz = z / TLC + fyB + 1;
if( z <= TLC)
{
    Pw = fp * fh * ka * kp * fyB * Cw * Math.sqrt(( Lo + lambda - 125 m ) / Lo) * 1000 * p;
    stat = ro * g * ( z - TLC );
    return Math.max(Pw, stat);
}
else if( TLC < z && z <= hw + TLC)
{
    return PwL - 0.5* ro * g * ( z - TLC );
}
else
    return 0;

```

**Slika 5-11 Kod za izračun hidrodinamičkog tlaka sa svim vrijednostima**

### 5.2.3 Opterećenje od tankova

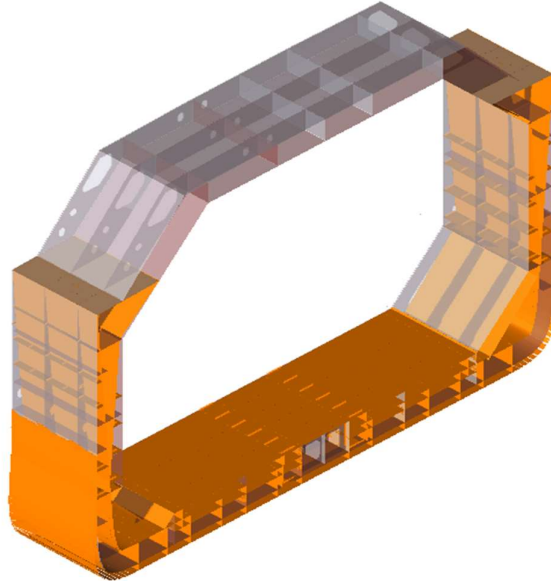
Opterećenje od težine tankova ovisi o slučaju u kojem je brod. U ovom radu se promatra brod u stanju balasta te prema tome su i nakrcani tankovi. Vrijednosti su uzete iz knjige trima i stabiliteta koja je dostupna za ovaj brod. Prikaz nakrcanih tankova za balasno stanje prikazan je na Slika 5-12.



**Slika 5-12 Prikaz napunjenih balasnih tankova i gotovo praznih teretnih tankova**



Na Slika 5-13 narančastom bojom su prikazana opterećenja koja su po vanjskoj oplati generirana od hidrostatičkog i hidrodinamičkog tlaka a s unutarnje strane su opterećenja generirana od težine koja proizlazi iz težine napunjenih tankova.



Slika 5-13 Vizualizacija opterećenja u Geniu

#### 5.2.4 Ubrzanja

Ubrzanja su računata prema formulama iz [26] te su pomnožene s koeficijentom tako da bi korespondirale valu koji je uzet u obzir. Tablica 5-2 prikazani su koeficijenti vezani uz valno opterećenje te u Tablica 5-3 vrijednosti izračunatih akceleracija. Formule po kojim su računata ubrzanja su sljedeće:

$$a_{zalijetanje} = 0,2 \left( 1,6 + \frac{1,5}{\sqrt{gL}} \right) f_p a_0 g \quad (5.9)$$

gdje je:

$$f_p = f_R [0,27 - (15 + 4f_T)L \cdot 10^{-5}] \quad (5.10)$$

$$a_{poniranje} = \left( 1,15 - \frac{6,5}{\sqrt{gL}} \right) f_p a_0 g \quad (5.11)$$

gdje je:

$$f_p = f_R [(0,27 + 0,02f_T) - 17L \cdot 10^{-5}] \quad (5.12)$$

$$a_{posrtanje} = f_p \left( 1,75 - \frac{22}{\sqrt{gL}} \right) \varphi \frac{\pi}{180} \left( \frac{2\pi}{T_\varphi} \right)^2 \quad (5.13)$$

gdje je:

$$f_p = f_R [0,28 - (5 + 6f_T)L \cdot 10^{-5}] \quad (5.14)$$

Tablica 5-2 Koeficijenti vezani uz valno opterećenje

		HSM-2	
Uzdužna ubrzanja	$a_{zaljetanje}$	$C_{XS}$	$0,2f_T - 0,3$
	$a_{poniranje}$	$C_{ZH}$	$0,15 - 0,8f_T$
Vertikalna ubrzanja	$a_{posrtanje}$	$C_{ZP}$	0.6

Tablica 5-3 Vrijednosti izračunatih akceleracija

		HSM-2
		Balanso stanje
$a_{zaljetanje}$		-0,046602852
$a_{poniranje}$		-0,51156698
$a_{posrtanje}$		0,335706968

### 5.3 Balansiranje

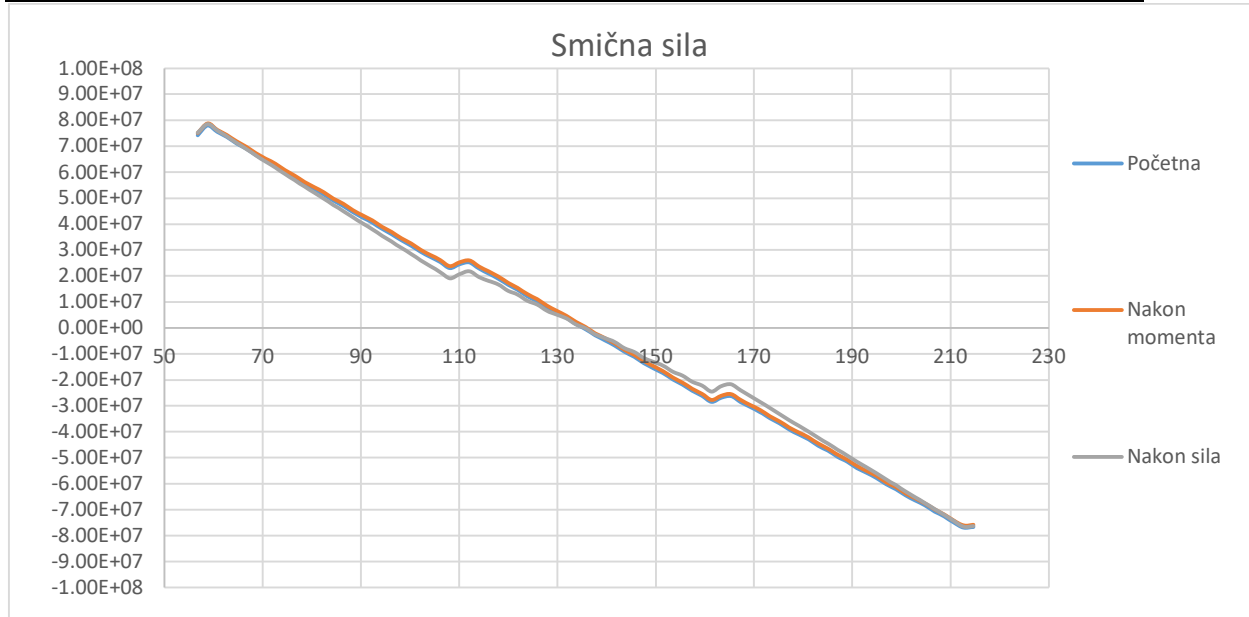
Proces balansiranja opisan je u poglavlju 4. Kao što procedura kaže prvo se treba postići određena vrijednosti smične sile primjenom momenata i sila. U nastavku su prikazane tablice s vrijednostima koje treba postići kao i očitane sile prije i nakon svakog koraka. Tablica 5-4 prikazuje smične sile koje treba postići kako bi model bio uravnotežen, Tablica 5-5 prikazuje vrijednosti sila u svakom koraku procesa balansiranja smične sile. I na kraju je dan Dijagram 5-1u kojem se može vidjeti kako se mijenjala distribucija smičnih sila.

Tablica 5-4 Vrijednosti smičnih sila koje treba postići

Spremnik br 3	Rebro	Položaj - x [m]	x/L	Ciljane vrijednosti [N]
Vodonepropusna pregrada (krma)	87	108,23	0,38	2,16E+07
Konferdam pregrada (krma)	88	111,035	0,39	
Vodonepropusna pregrada (pramac)	103	161,435	0,57	
Konferdam pregrada (pramac)	104	164,24	0,58	-2,363E+07
MAX MOMENT [N*m]				4,57E+09

Tablica 5-5 Vrijednosti sila tokom procesa balansiranja

POČETNO				
Spremnik br 3	Rebro	Položaj - x [m]	x/L	Sila [N]
Vodonepropusna pregrada (krma)	87	108,23	0,38	2,31E+07
Konferdam pregrada (krma)	88	111,035	0,39	5,61E+06
Vodonepropusna pregrada (pramac)	103	161,435	0,57	-8,41E+06
Konferdam pregrada (pramac)	104	164,24	0,58	-2,66E+07
MAX MOMENT [N*m]				-5,78E+09
NAKON IMPLEMENTACIJE MOMENATA				
Spremnik br 3	rebros	Položaj - x [m]	x/L	Sila [N]
Vodonepropusna pregrada (krma)	87	108,23	0,38	2,39E+07
Konferdam pregrada (krma)	88	111,035	0,39	5,61E+06
Vodonepropusna pregrada (pramac)	103	161,435	0,57	-8,41E+06
Konferdam pregrada (pramac)	104	164,24	0,58	-2,58E+07
MAX MOMENT [N*m]				-5,78E+09
NAKON IMPLEMENTACIJE MOMENATA I SILA				
Spremnik br 3	Rebro	Položaj - x [m]	x/L	Sila [N]
Vodonepropusna pregrada (krma)	87	108,23	0,38	1,92E+07
Konferdam pregrada (krma)	88	111,035	0,39	5,61E+06
Vodonepropusna pregrada (pramac)	103	161,435	0,57	-8,41E+06
Konferdam pregrada (pramac)	104	164,24	0,58	-2,21E+07
MAX MOMENT [N*m]				-2,39E+09

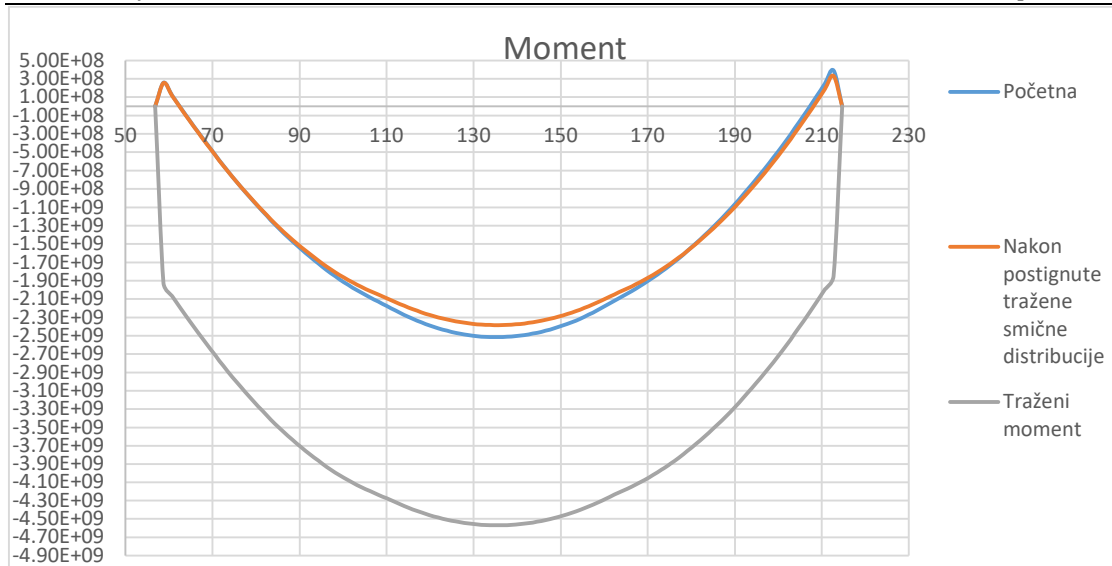


**Dijagram 5-1 Prikaz distribucije smične sile kroz korake balansiranja**

Nakon postizanja zadovoljavajućih vrijednosti smičnih sila još je potrebno postići odgovarajući moment. Postupak je opisan u poglavlju 4. Tablica 5-6 prikazuje rezultate momenta i smične sile nakon balansiranja. Dijagram 5-2 prikazuje distribuciju momenta kroz korake balansiranja.

**Tablica 5-6 Rezultati momenta nakon provedenog postupka balansiranja**

NAKON IMPLEMENTACIJE MOMENATA				
Spremnik br 3	Rebro	Položaj - x [m]	x/L	Sila [N]
Vodonepropusna pregrada (krma)	87	108,23	0,38	1,92E+07
Konferdam pregrada (krma)	88	111,035	0,39	5,61E+06
Vodonepropusna pregrada (pramac)	103	161,435	0,57	-8,41E+06
Konferdam pregrada (pramac)	104	164,24	0,58	-2,21E+07
<b>MAX MOMENT [N*m]</b>	<b>-4,57E+09</b>			



**Dijagram 5-2 Prikaz distribucije momenata kroz korake balansiranja**

Treba napomenuti da se su tražene smične sile i momenti balansirani za tank 3 tj. između x koordinata 108.23 i 164.24 (rebra 87 i 104) te sve izvan tih granica ne ulazi u analizu i ne predstavlja točnu distribuciju smičnih sila i momenata za tank 2 i 4. Za točnu distribuciju u tim područjima trebalo bi se ponovo modelirati globalni model u opsegu 3 tanka gdje bi ili tank 2 ili 4 bili u sredini pa bi se ponovo radilo balansiranje za distribuciju i vrijednosti koje bi ti tankovi generirali.

Ovo je bio postupak za balansiranje sila koje generira *HSM-2*, identičan postupak vrijedi i za *HSM-1*.

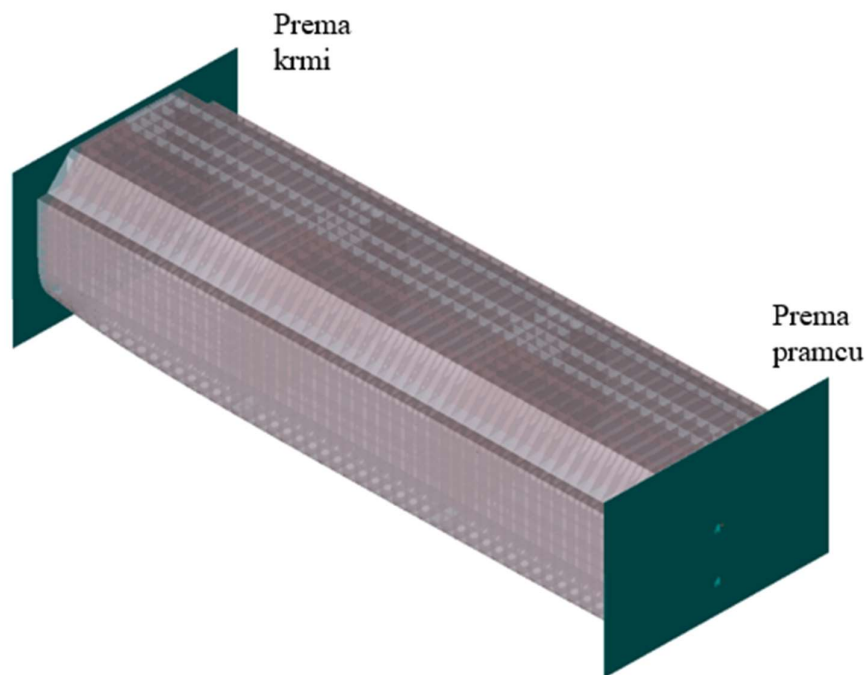
#### 5.4 Rubni uvjeti

Registar propisuje rubne uvjete koji se moraju postaviti za analizu modela koji obuhvaća središnji teretni spremnik te dodatni teretni spremnik sa svake strane [19]. Oni su prikazani u Tablica 5-7.

**Tablica 5-7 Rubni uvjeti za globalni model**

Pozicija	Translacija			Rotacija		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
<b>RIGID LINK</b>						
Kraj prema krmi	slobodan	spriječen	spriječen	spriječen	slobodan	slobodan
kraj prema pramcu	slobodan	spriječen	spriječen	spriječen	slobodan	slobodan
<b>SAMOSTALNA TOČKA</b>						
Sjedište središnjice i dvoboka	spriječen	slobodan	slobodan	slobodan	slobodan	slobodan

Kada se koristi "*rigid link*" u metodi konačnih elemenata, jednačbe ravnoteže se modificiraju kako bi se uzela u obzir tvrda veza između čvorova. Umjesto da se koristi uobičajena matrica krutosti za elemente, koriste se posebne matrice koje omogućuju prijenos sila i momenta između povezanih čvorova. Omogućuje simuliranje idealiziranih čvrstih veza između točaka u analizi struktura, što je posebno korisno u slučajevima kada želimo modelirati spojeve ili dijelove koji se ponašaju kao tvrda tijela [27]. Dodatni rubni uvjet u prednjem djelu modela služi da se spriječi pomak krutog tijela. Na Slika 5-14 prikazana je površina plave boje koja označava vizualizaciju *rigid linka* u *Geniu*.

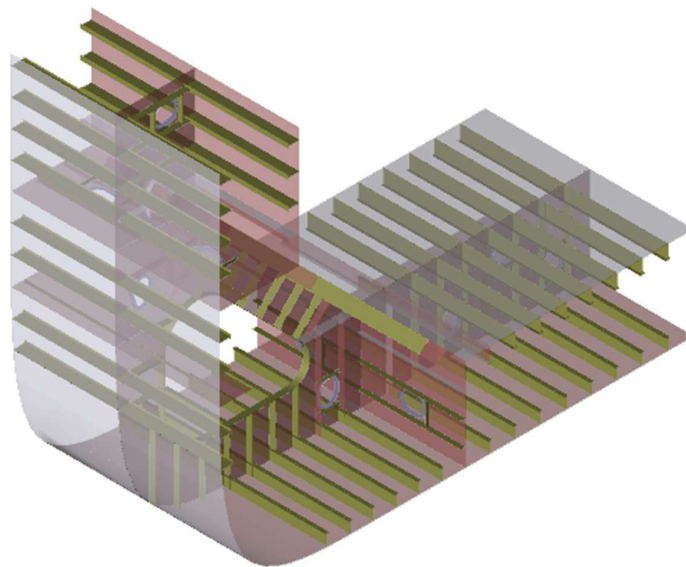


Slika 5-14 Prikaz rubnih uvjeta na globalnom modelu

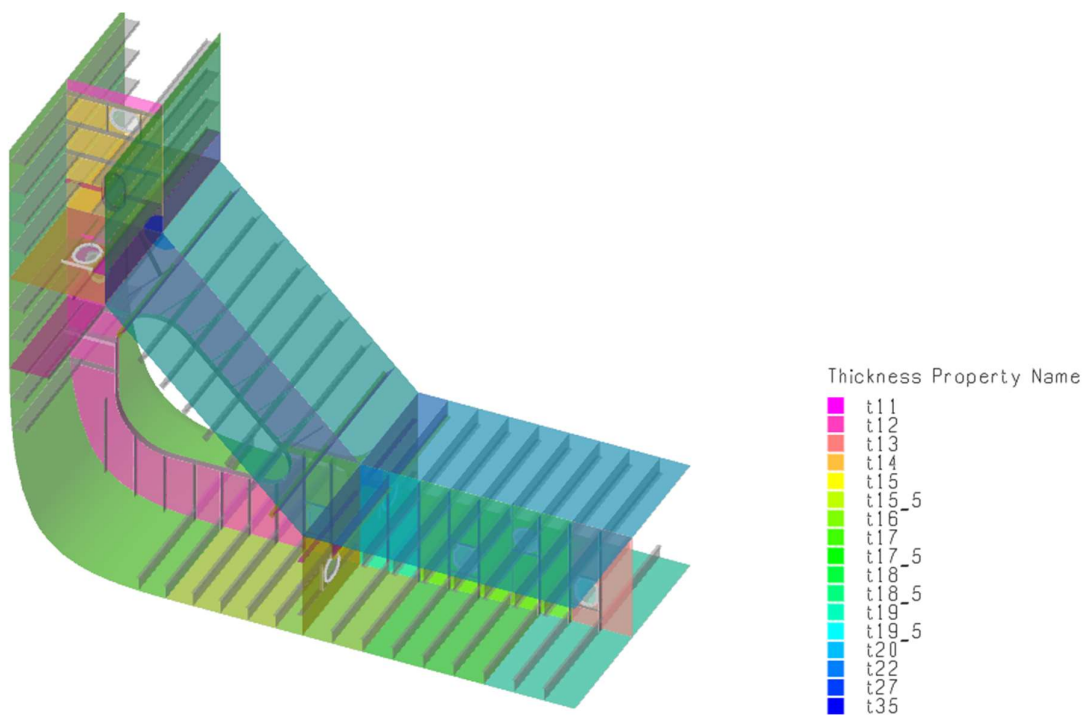
## 5.5 Podmodeli

Podmodeliranje je tehnika kojom se dolazi do točnije distribucije naprezanja u konstrukciji s finijom mrežom konačnih elemenata. Konstrukcijski detalji koji će biti podmodeli propisani u pravilima [20] te oni detalji kod kojih se uočava koncentracija naprezanja koja je dobivena globalnom analizom. Da bi ova tehnika bila uspješna potrebno je imati rezultate globalnog modela koji se prenose na lokalni model preko rubnih uvjeta koji se stavljaju na podmodele. U programu *Genie* rubni uvjeti koji služe za prijenos pomaka prikazani su kao zelene kocke, to se može vidjeti na Slika 5-17 i Slika 5-21. U samim postavkama rubnih uvjeta potrebno je postaviti da su oni „*prescribed*“ to je način na koji program za podmodeliranje prepoznaje

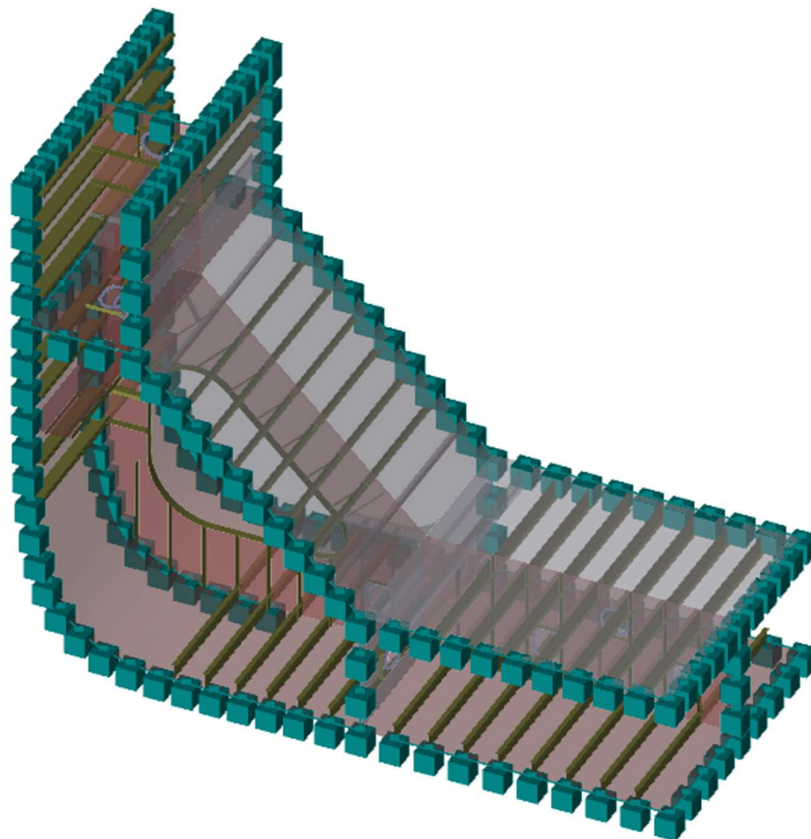
rubne uvjete u koje mora prenijeti pomake sa globalnog modela. Vizualizacija tih postavki u programu *Genie* prikazana je na Slika 5-18 Vizualizacija postavki rubnih uvjeta



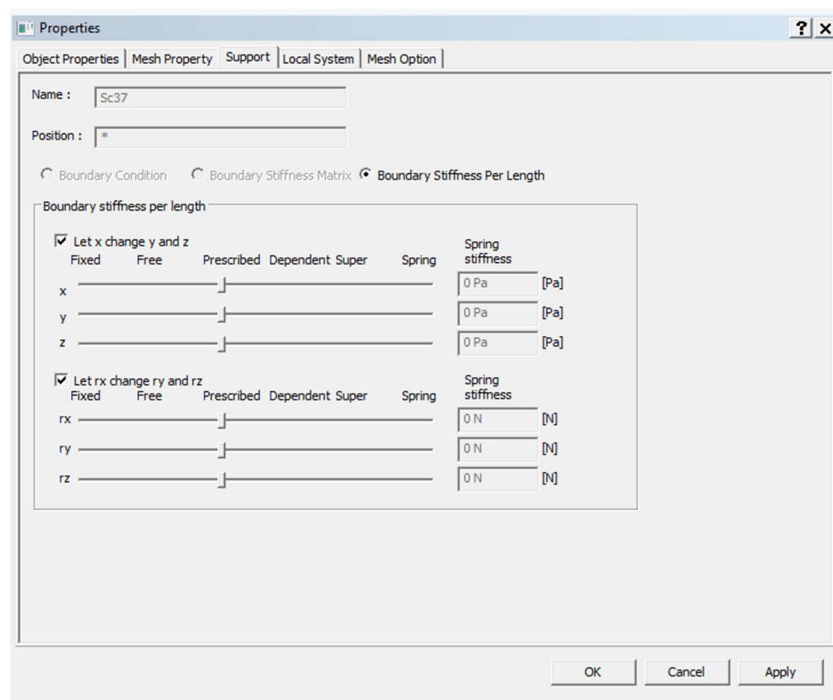
Slika 5-15 Detaljno izmodeliran presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka



Slika 5-16 Prikaz debljina presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka

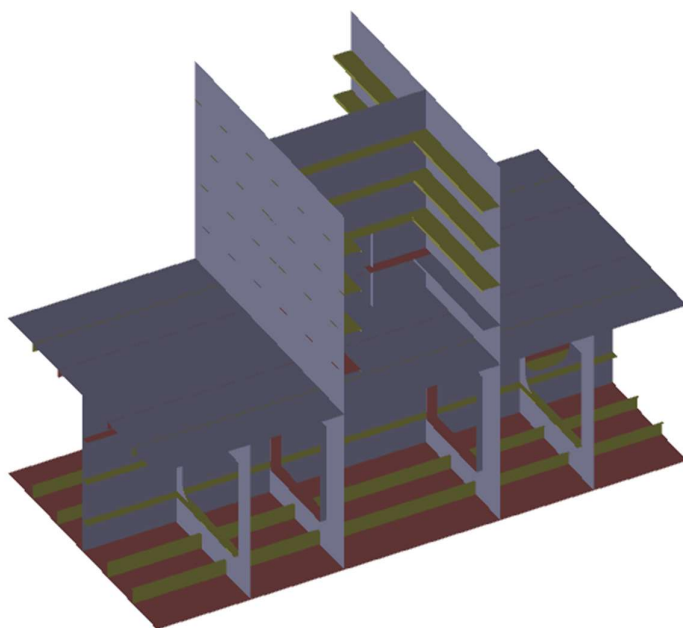


Slika 5-17 Prikaz rubnih uvjeta na podmodelu presjek pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka

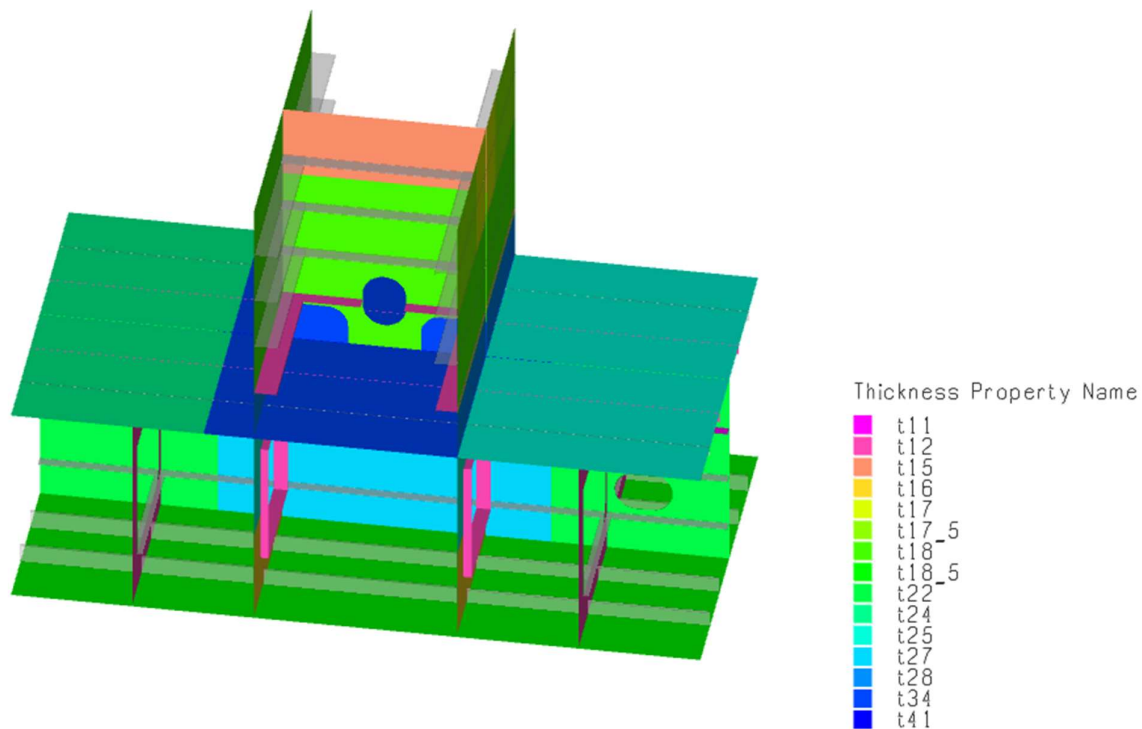


Slika 5-18 Vizualizacija postavki rubnih uvjeta

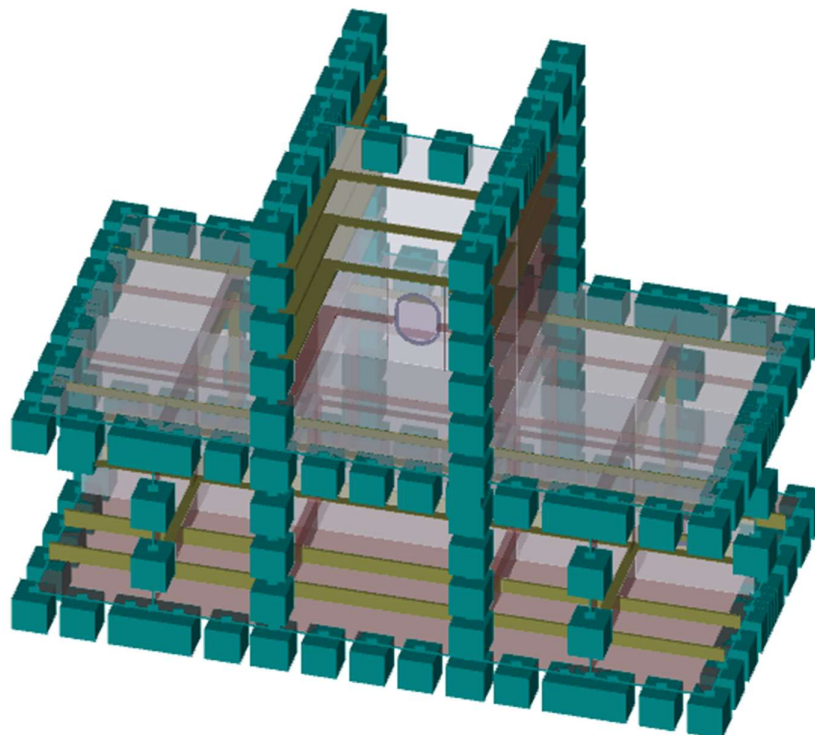




Slika 5-19 Detalj spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom



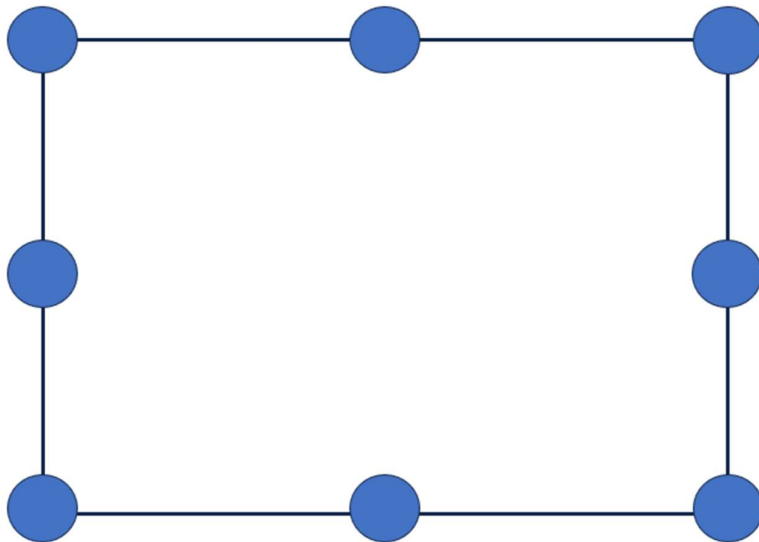
Slika 5-20 Prikaz debljina spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom



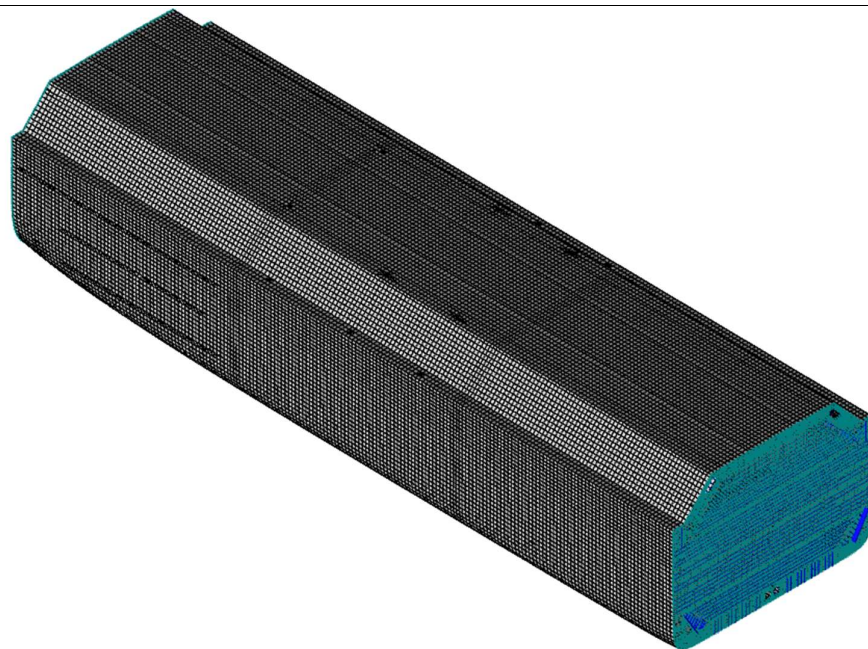
**Slika 5-21 Prikaz rubnih uvjeta na podmodelu spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom**

## 6 ODZIV KONSTRUKCIJE

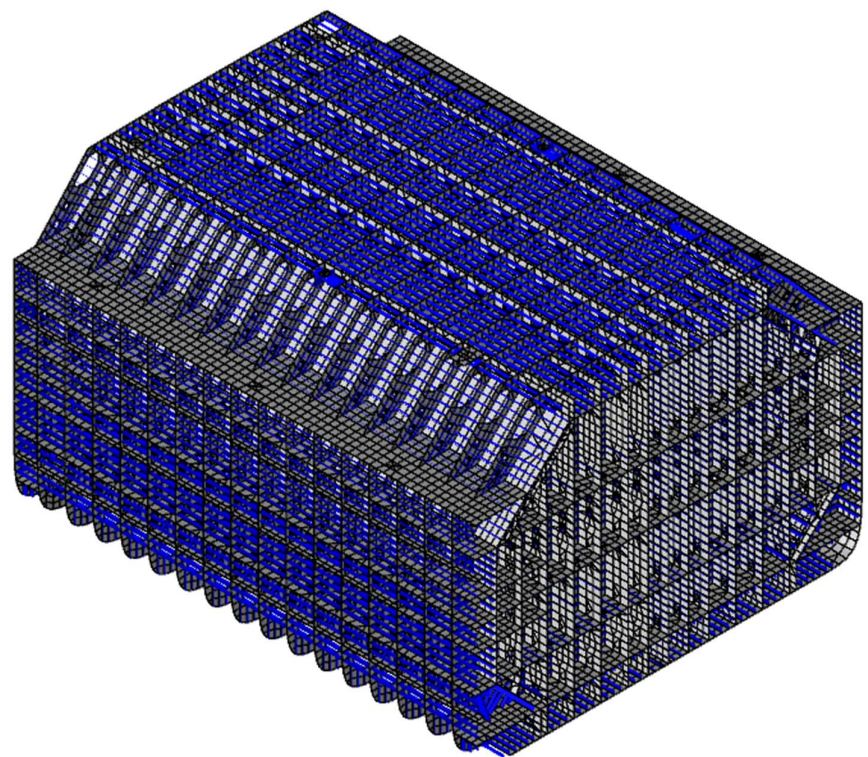
Nakon implementacije opterećenja te provedene metode balansiranja, za globalni strukturni model treba odrediti koja vrsta i veličina konačnih elemenata će se primijeniti. Prema [19] za vrstu elemenata koristiti će se element koji ima 8 čvorova, te s time je i odabrana veličina konačnog elementa 800 mm x 800 mm koja korespondira veličini između dva uzdužnjaka u modelu. Prikaz elementa vidljiv je na Slika 6-1. Globalni odziv služi za određivanje nominalnih naprezanja u primarnim strukturnim elementima te se mogu iz modela uočiti područja koncentracije naprezanja koja uz područja koja propisuju pravila mogu biti podvrgnuta proračunu zamora. Globalni model s mrežom konačnih elemenata prikazan je na Slika 6-2, Slika 6-3, Slika 6-4.



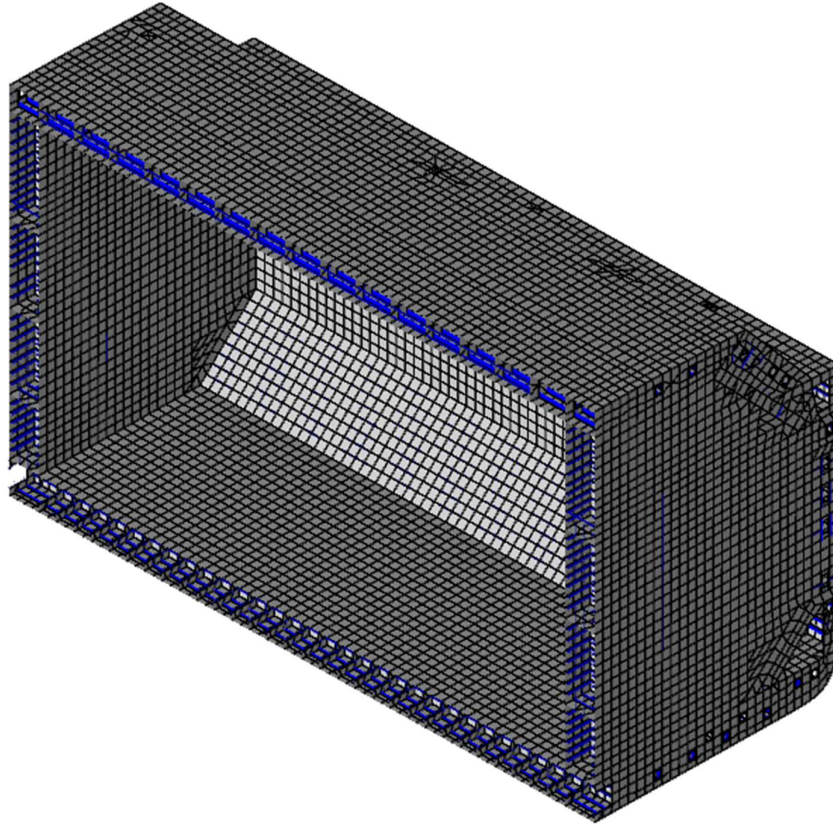
Slika 6-1 Raspored čvorova u elementu s 8 čvorova



**Slika 6-2 Prikaz globalnog modela s mrežom konačnih elemenata veličine 800x800**

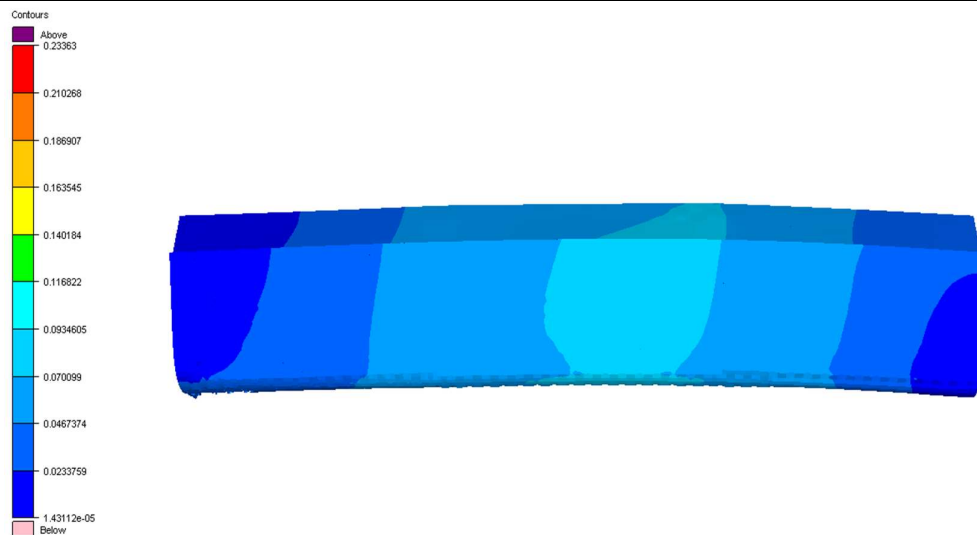


**Slika 6-3 Prikaz tanka 3 s mrežom konačnih elemenata**

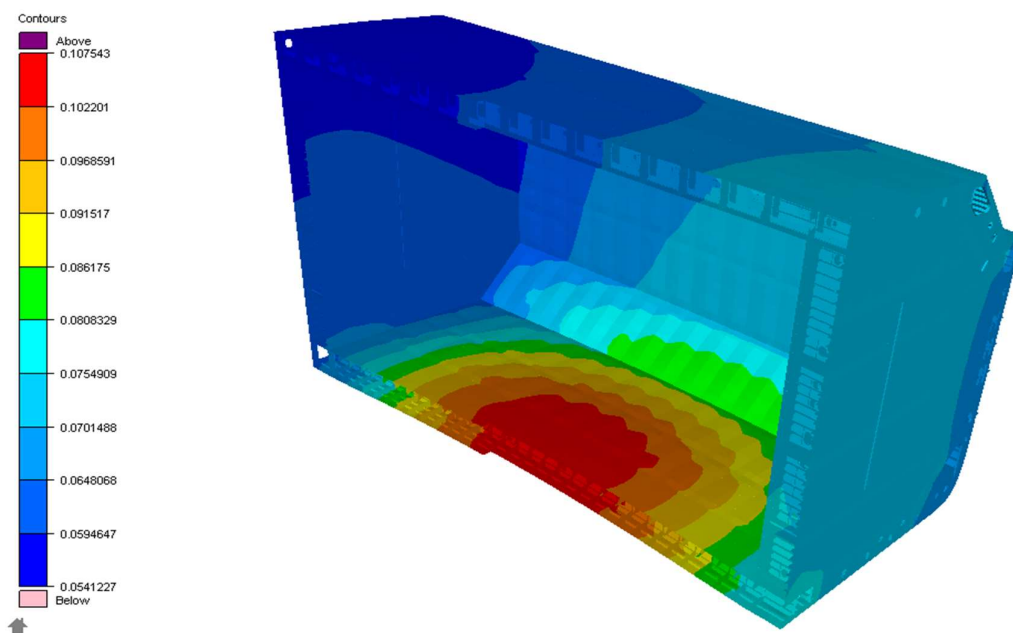


**Slika 6-4 Prikaz unutarnjeg dijela tanka 3 s mrežom konačnih elemenata**

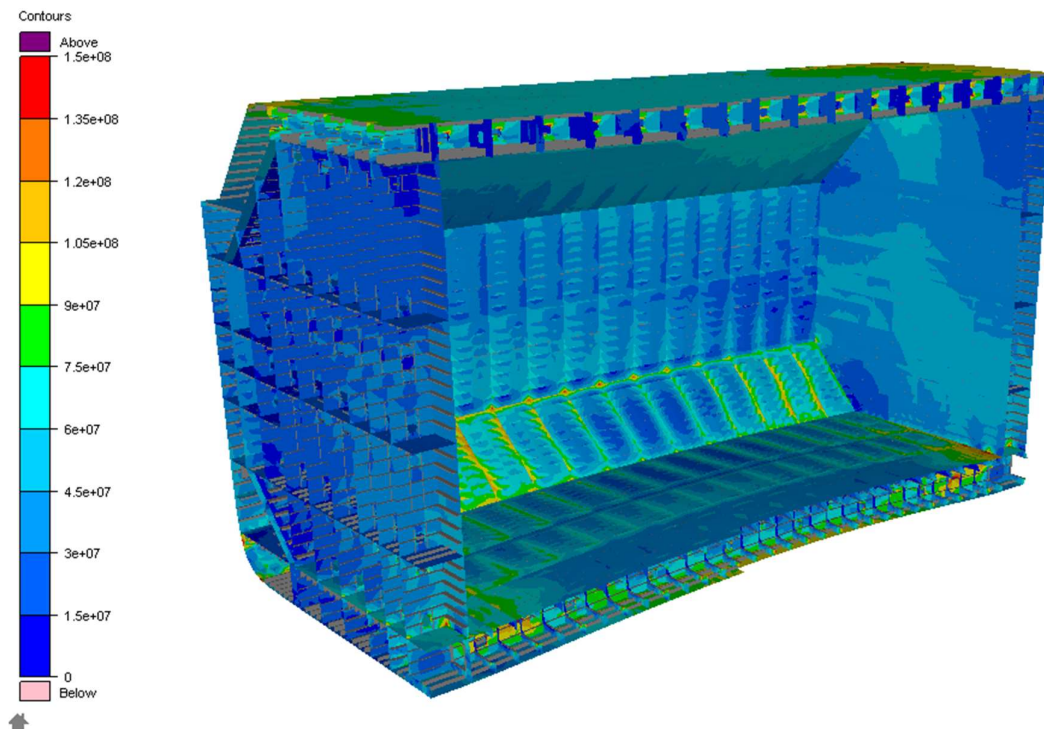
Odziv modela prikazan je slikama Slika 6-5 i Slika 6-6. Na Slika 6-7 prikazan je raspon Von Mises naprezanja. Ta naprezanja nam služe kao pokazatelj koji dijelovi bi mogli biti problematični na zamor, te se njih može uočiti kao mjesta koncentracije naprezanja. Koncentracije naprezanja vidljive su na Slika 6-8 i Slika 6-9. Registar propisuje koji detalji se trebaju provjeriti na zamor ali se i na ovaj način identificiraju dodatne lokacije koje bi mogle biti problematične zbog specifičnosti konstrukcije ili opterećenja.



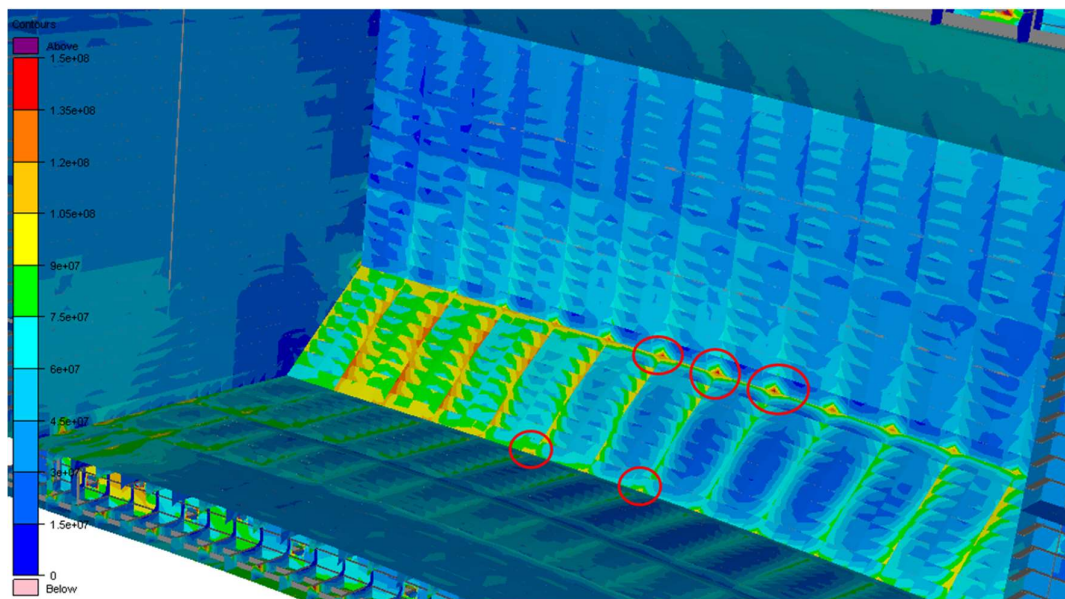
Slika 6-5 Pomak globalnog modela uslijed zadanih *HSM-2* opterećenja



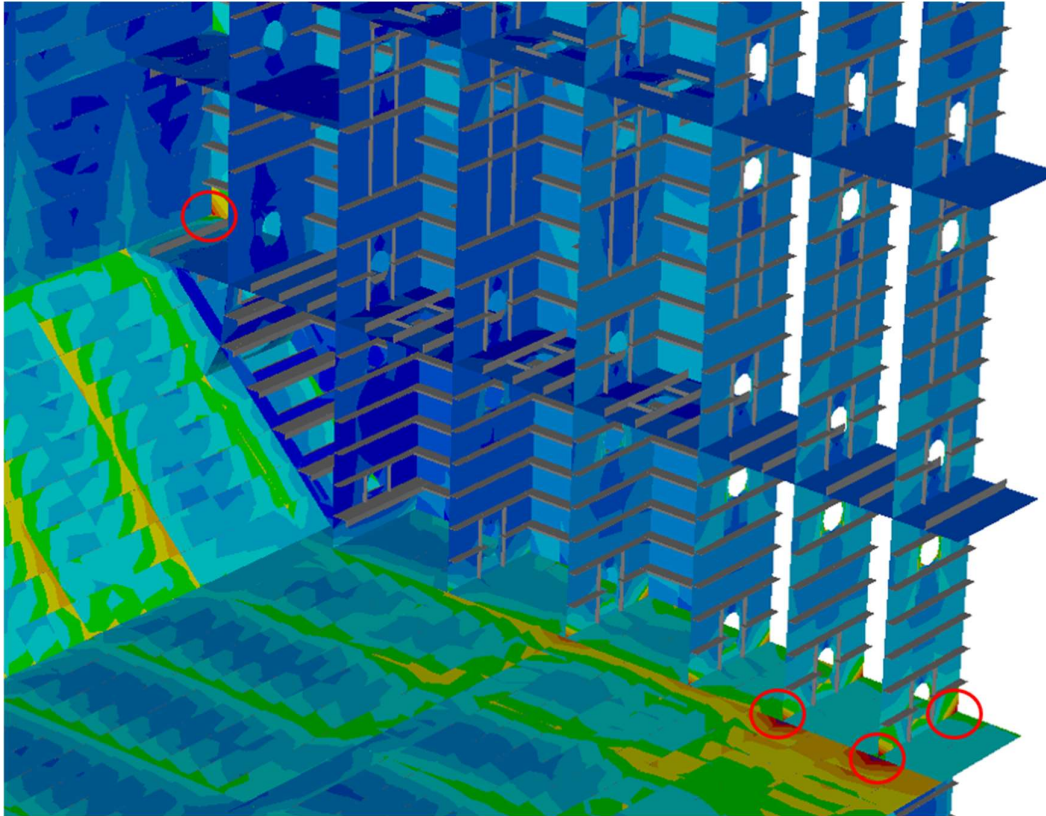
Slika 6-6 Prikaz pomaka za tank3



Slika 6-7 Prikaz Von Mises napreznja za spremnik 3



Slika 6-8 Prikaz koncentracija napreznja unutar spremnika 3 na nagnutom prijelazu iz dvodna na dvobok

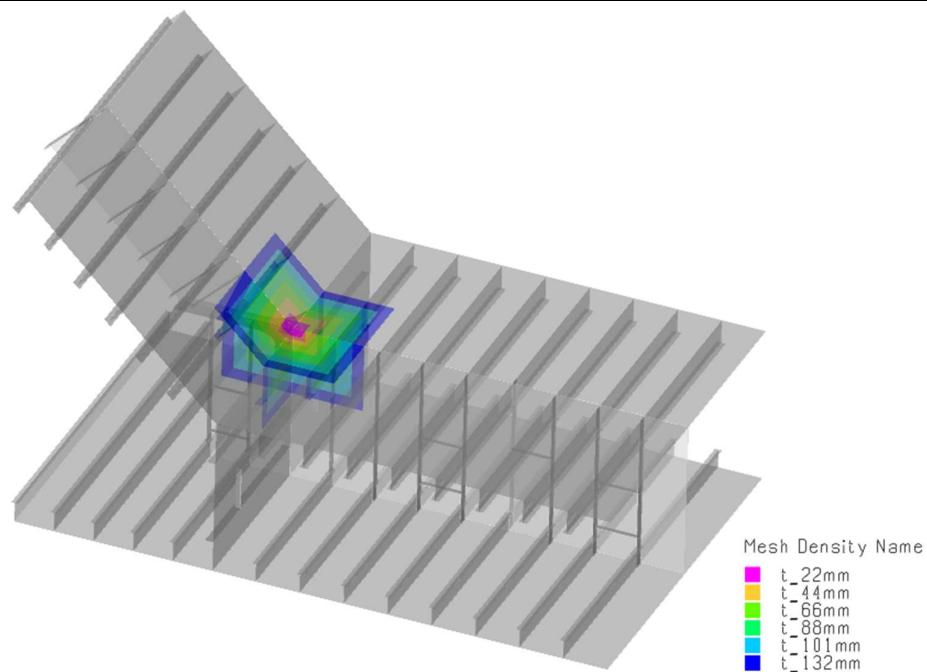


**Slika 6-9 Koncentracije naprezanja spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom**

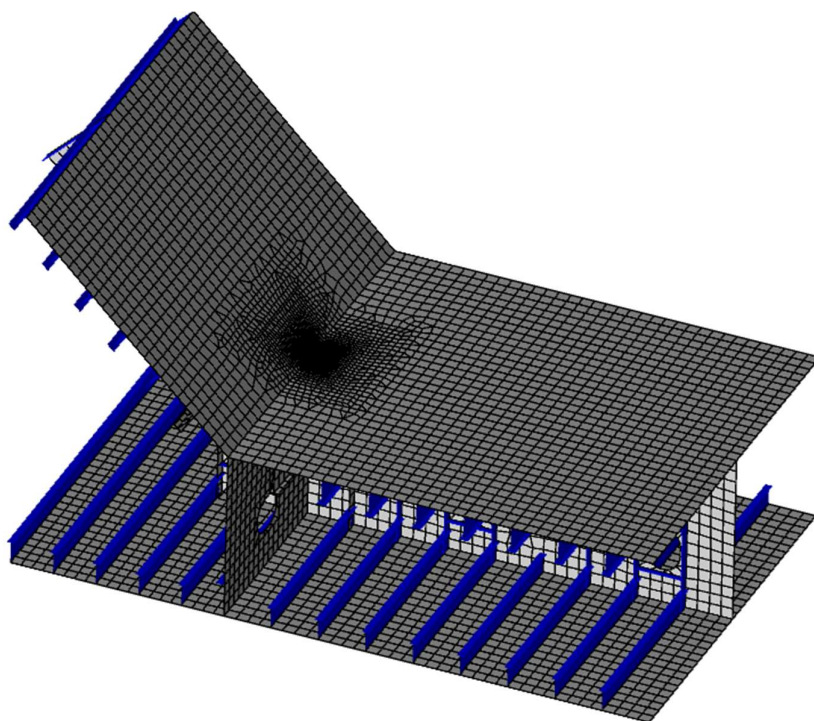
### 6.1 Priprema mreže konačnih elemenata za podmodele

Prema pravilima [18] određuje se veličina mreže konačnih elemenata za detalj koji se analizira. Veličina elemenata se uzima prema debljini lima tj. ona je „ $t \times t$ “. Pošto se detalj nalazi u spoju više limova različitih debljina za veličinu mreže uzet je prosjek debljina na spoju. Za detalj pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvoja određena je veličina konačnog elementa od 22 mm dok je za detalj spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i nepropusnom pregradom veličina konačnog elementa 32mm. Mreža se proteže u svim smjerovima u veličini 10 elemenata, te se nakon nje radi prijelaz u grublju mrežu, prijelaz je rađen postepeno sa veličine  $t$  na  $2t$ ,  $3t$  i tako do  $6t$  radi preciznijeg prijelaza naprezanja u to područje. Veličine mreže konačnih elemenata i prikaz mreže konačnih elemenata prikazan je Slika 6-10Slika 6-11Slika 6-12Slika 6-13.

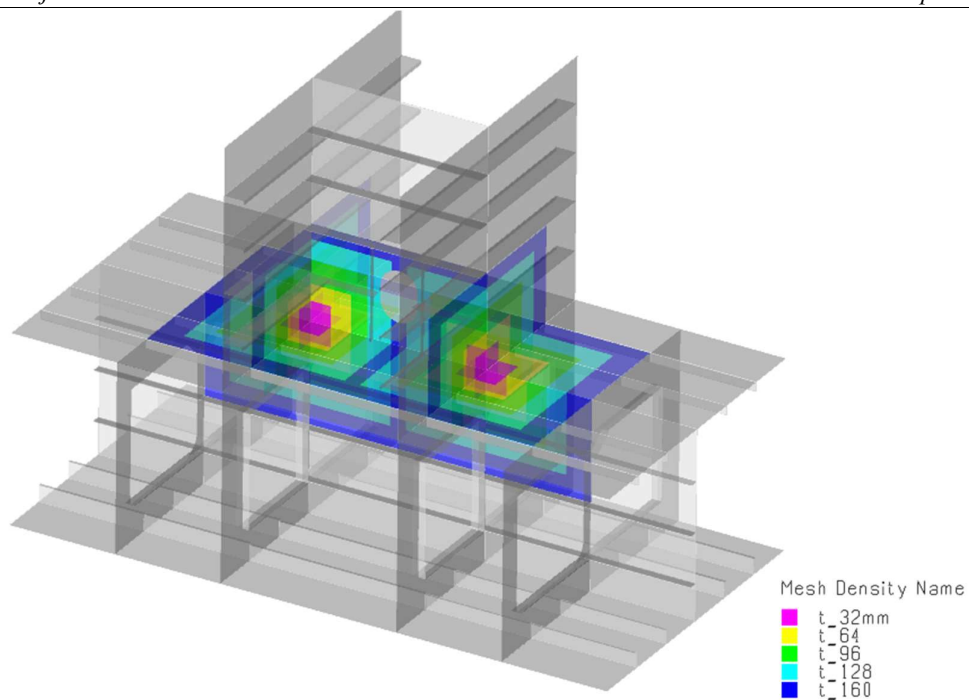




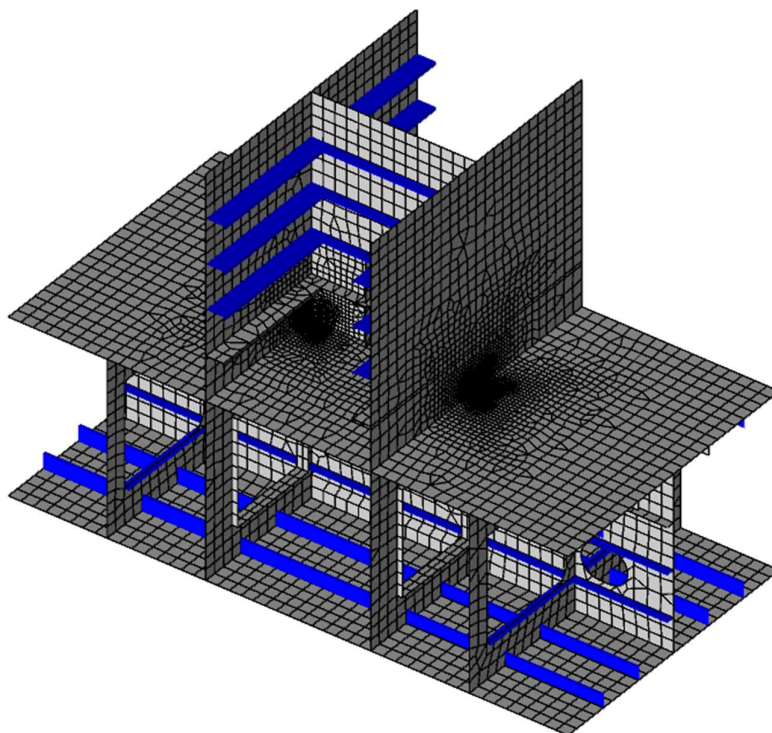
**Slika 6-10** Veličina konačnih elemenata za detalj pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka te prikaz veličina elemenata po prijelazima



**Slika 6-11** Mreža konačnih elemenata na detalju pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka



**Slika 6-12** Veličina konačnih elemenata za detalj spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom te prikaz veličina elemenata po prijelazima



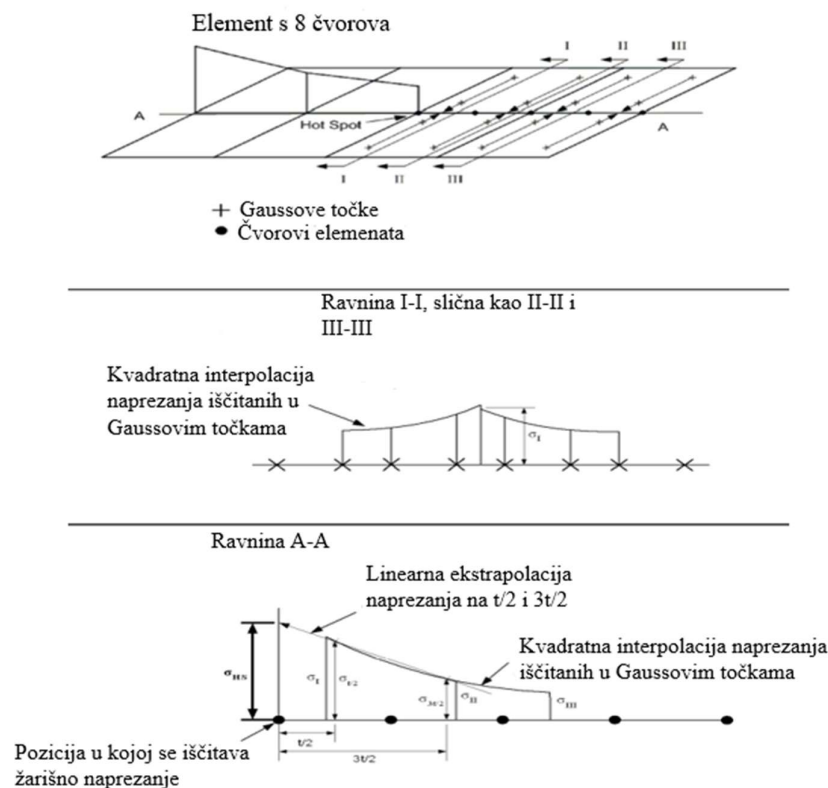
**Slika 6-13** Mreža konačnih elemenata na detalju spoja pokrova dvodna s konferdam rebrom i vodonepropusnom pregradom

## 6.2 Analiza podmodela i ekstrapolacija napreznja

Analiza podmodela se vrši u programu *SubMod*, kroz postupak koji je opisan u poglavlju 5. U pravilima postoji više načina analize zamora detalja. U ovom radu se uzima pristup žarišnih napreznja, te su načini na koji se oni ekstrapoliraju definirani u pravilima. Radi usporedbe radit će se dva načina ekstrapolacije žarišnih napreznja :

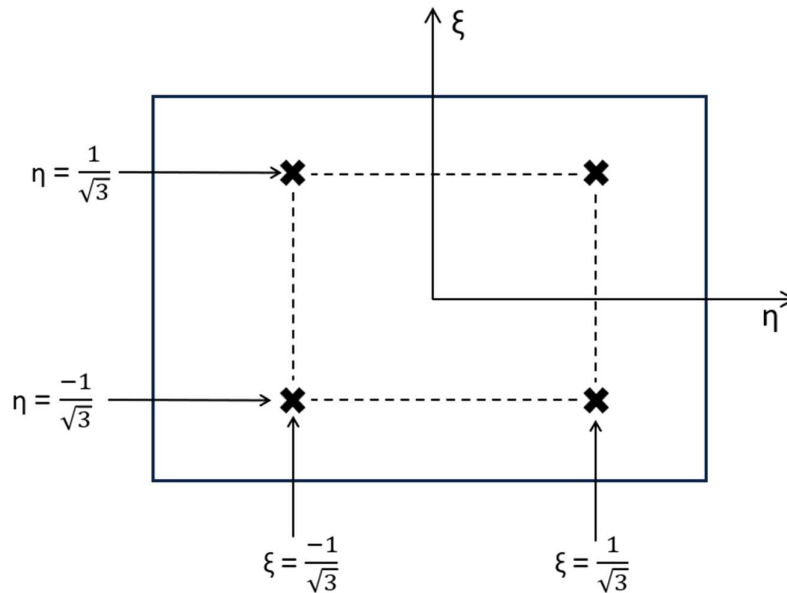
- Iščitavanje napreznja na elementu u točkama  $t/2$  i  $3t/2$  te povlačenje pravca kroz te dvije točke i iščitavanje žarišnog napreznja u detalju (pojednostavljena metoda)
- Iščitavanje napreznja u Gausovim točkama u elementu te kvadratna interpolacija istih do ravnine u kojoj se nalazi detalj, nakon toga na toj krivulji se iščitava napreznje na  $t/2$  i  $3t/2$  i kroz njih se povlači linearna interpolacija iz koje se onda očitava žarišno napreznje. Prikaz ovih koraka prikazan je na Slika 6-14.

Pojednostavljena metoda se obično koristi u praksi radi lakšeg postupka a rezultati koji se dobiju su dovoljno točni dok druga metoda daje realniji prikaz napreznja ali je metoda koja zahtjeva više vremena te program iz kojeg se mogu iščitati napreznja u Gausovim točkama. Postupak za sve ostale detalje je identičan ovom kao i izračun zamornog oštećenja te će u ovom radu biti obrađen samo detalj pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka.

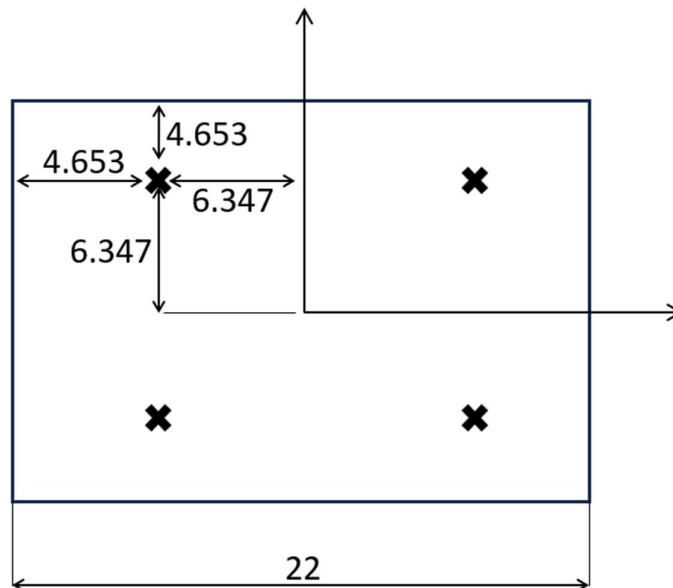


Slika 6-14 Metoda ekstrapolacije žarišnih napreznja pomoću Gaussovih točaka [18]

U slučaju očitavanja naprezanja u Gaussovima točkama program *Xtract* ne daje točne koordinate Gaussovih točaka. Točne koordinate Gaussovih točaka u jediničnom elementu s 8 čvorova dobiju se kroz numeričku integraciju [28], te su vrijednosti tih koordinata prikazane na Slika 6-15. Nakon implementacije tih jediničnih vrijednosti na element koji ima veličinu od 22 mm, dobiju se potrebne koordinate za očitavanje Gaussovih točaka. Koordinate za element veličine 22 mm prikazane su na

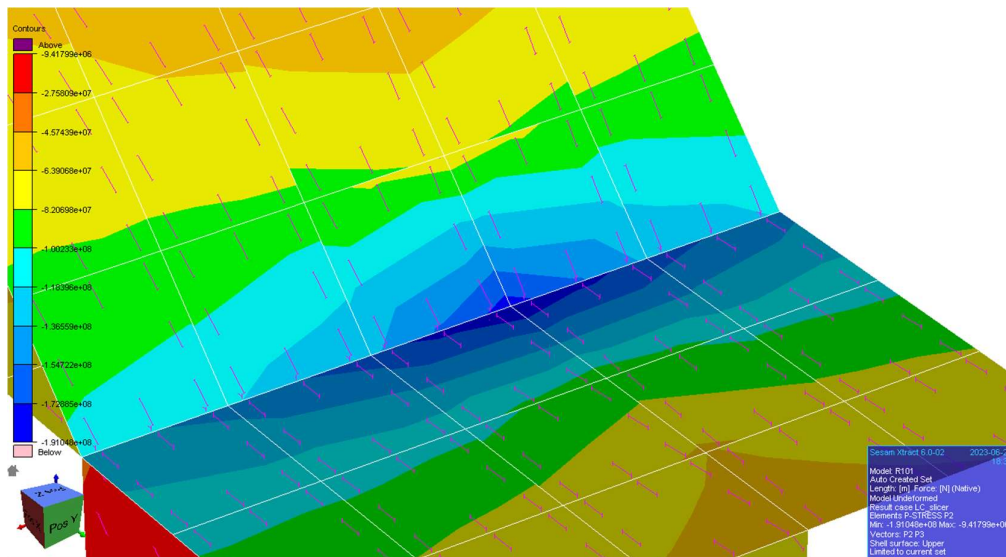


Slika 6-15 Prikaz koordinata Gaussovih točaka za element s 8 čvorova

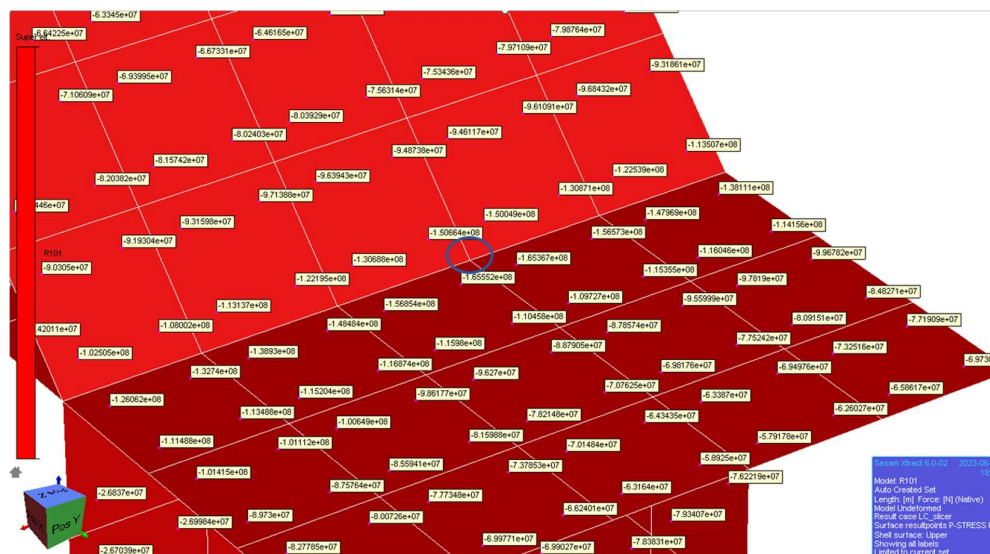


Slika 6-16 Koordinate Gaussovih točaka za element veličine 22 mm

U Tablica 6-1 prikazane su koordinate Gaussovih točaka te iščitana naprezanja u Gaussovima točkama za ravnine I-I, II-II, III-III i IV-IV, ravnine su uzete prema Slika 6-14. Iz svake ravnine se radi kvadratna interpolacija naprezanja kako bi se dobila naprezanja koja se nalaze na ravnini A-A. Distribucija naprezanja na presjeku A-A prikazana je plavom linijom na Dijagram 6-1. Prikaz svih ravnina može se vidjeti na Slika 6-14. Vrijednosti naprezanja u Gaussovima točkama prikazane su Slika 6-18. Ono što potrebno naglasiti je da se u obzir uzimaju glavna naprezanja koja su unutar  $45^\circ$  od normale na zavar kao što je rečeno u poglavlju 4. Program *Xtract* ima mogućnost prikaza vektora naprezanja, što olakšava provjeru jesu li uzeta naprezanja koja su određena pravilima, vizualizacija vektora naprezanja može se vidjeti na Slika 6-17.



Slika 6-17 Vektor smjera za odabrano naprezanje



Slika 6-18 Mjesto za koje se računa žarišno naprezanje i vrijednosti naprezanja u Gaussovima točkama

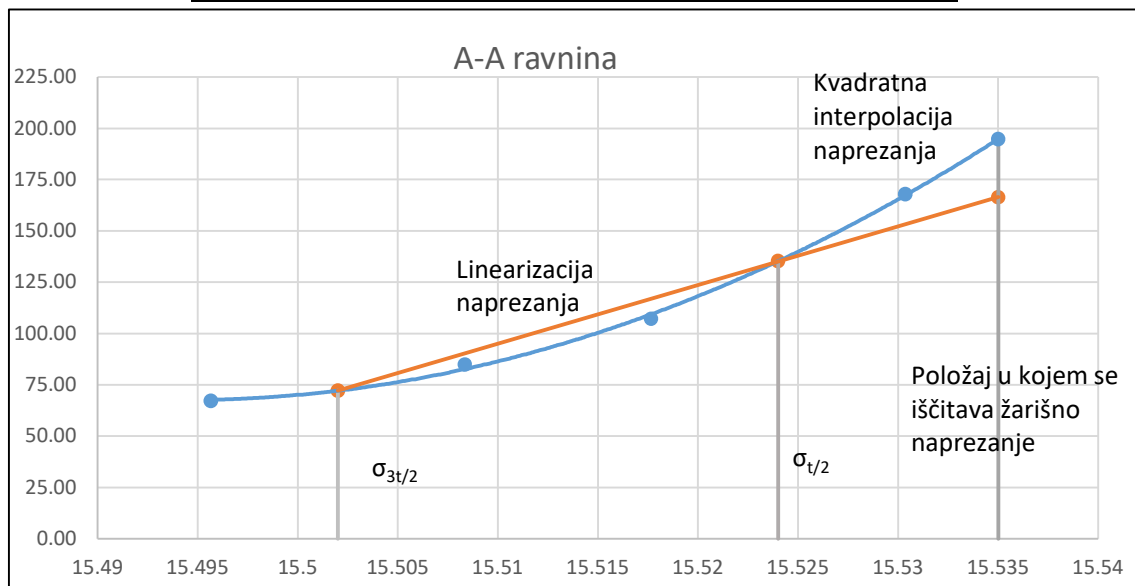
Tablica 6-1 Koordinate i naprezanja u Gaussovima točkama

Naprezanja u Gaussovima točkama				$\sigma$ [A-A]
Položaj [x]	134,550347	134,537653	134,528347	<b>134,555</b>
I-I [ $\sigma_I$ ]	165,552	156,854	148,484	<b>169,86</b>
II-II [ $\sigma_{II}$ ]	110,458	115,98	116,874	<b>109,57</b>
III-III [ $\sigma_{III}$ ]	88,791	96,270	98,618	<b>87,66</b>
IV-IV [ $\sigma_{IV}$ ]	70,7625	78,2148	81,5988	<b>67,21</b>

Nakon dobivene distribucije naprezanja iz Gaussovih točaka potrebno je sa te distribucije očitati naprezanja koja se nalaze na koordinatama  $t/2$  i  $3t/2$ , kako bi se kroz njih mogao provući pravac te u konačnici s tog pravca očitati žarišno naprezanje u detalju kojeg se promatra. Vrijednosti naprezanja u tim točkama te iščitano žarišno naprezanje nakon linearne interpolacije dane su u Tablica 6-1 Koordinate i naprezanja u Gaussovima točkama. Pravac kroz te dvije točke je prikazan narančastom bojom na Dijagram 6-1.

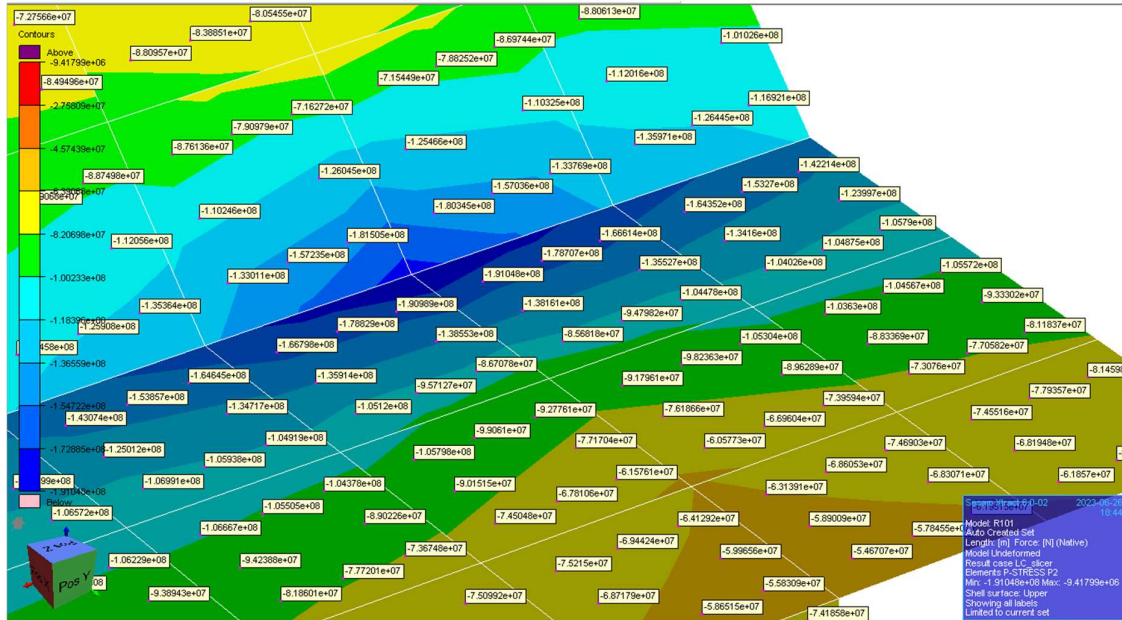
Tablica 6-2 Iščitane vrijednosti naprezanja na kvadratnoj funkciji

Linearna interpolacija			
	$t/2$	$3t/2$	Žarišno
Položaj [y]	15.524	15.502	15.535
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	135.22	72.12	166.38



Dijagram 6-1 Prikaz distribucija naprezanja kroz cijeli postupak iščitavanja naprezanja sa Gaussovima točkama

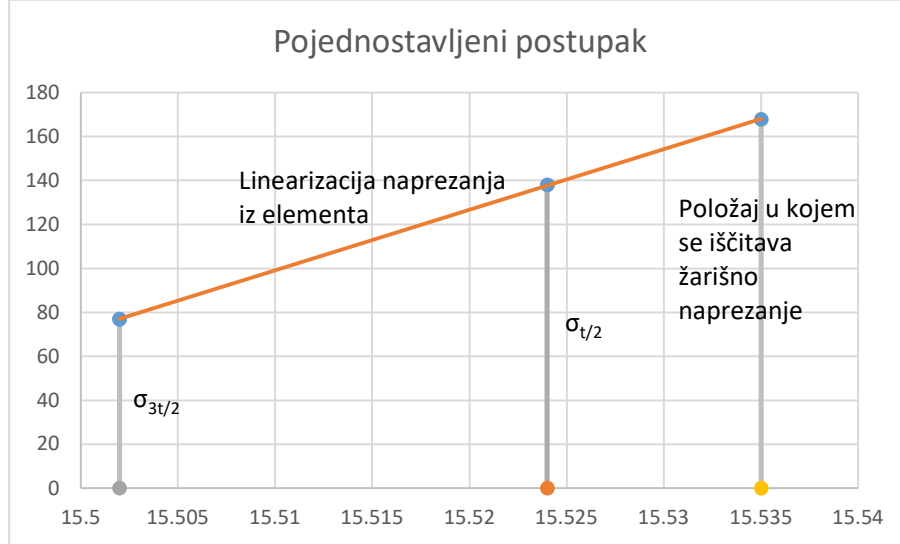
Za pojednostavljeni postupak dovoljno je iščitati dvije točke te iz njih povući pravac. Naprezanja koja se iščitavaju su opet glavna naprezanja ali ovaj put su to naprezanja u elementu, vrijednosti istih prikazane su na Slika 6-19 Rezultati su dani u Tablica 6-3 i linearizacija naprezanja prikazana je Dijagram 6-2.



Slika 6-19 Glavna naprezanja u elementu

Tablica 6-3 Koordinate i iščitane vrijednosti naprezanja u elementu

	t/2	3t/2	Žarišno
Položaj [y]	15,524	15,502	15,535
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	138,553	77,1704	167,8945



**Dijagram 6-2 Prikaz linearizacije napreznja na  $t/2$  i  $3t/2$  za pojednostavljeni postupak**

Za ulaz u S-N krivulju potrebno je dinamičko napreznje tj. raspon napreznja. Zato su se u poglavlju 4 računala opterećenja za dva vala tj. *HSM-1* i *HSM-2*. Isti postupak kao što je ovdje proveden za *HSM-2* proveden je i za *HSM-1* te su krajnji rezultati dani u Tablica 6-4.

**Tablica 6-4 Rezultati provedenih ekstrapolacija prema DNV-u**

		$\sigma_{HS}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta\sigma_{HS}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Pojednostavljeni	HSM1	132,5	35,39
	HSM2	167,89	
Sa Gausovim točkama	HSM1	130,89	35,49
	HSM2	166,38	

Nakon ponavljanja cjelokupnog postupka za detalj spoja pokrova dvodna s komferdam rebrom i nepropusnom pregradom dobivena je jako mala vrijednost raspona napreznja te je zaključak toga da uzeto opterećenje ne generira dovoljna napreznja na tom području da bi se dobio neki značajni raspon napreznja a samim time u ovakvoj analizi onda nema smisla računati zamorno oštećenje jer bi ono imalo zanemarivu vrijednost.



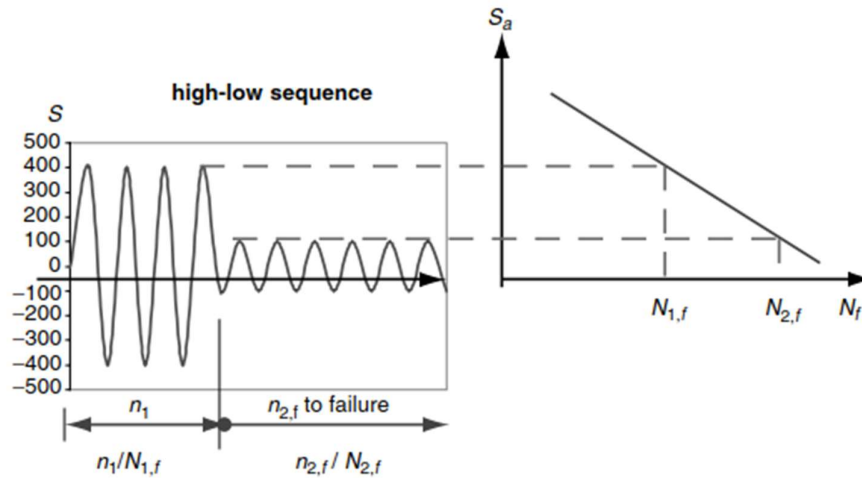
## 7 DINAMIČKA IZDRŽLJIVOST KONSTRUKCIJSKIH DETALJA

Postoje dva glavna pristupa procjeni zamornog vijeka koji se koriste u analizama čeličnih konstrukcija: pristup korištenjem S-N krivulja i pristup mehanike loma. Međunarodni institut za zavarivanje također navodi treći pristup, koji uključuje izravno ispitivanje dijelova ili cijelih konstrukcija u stvarnoj veličini pod utjecajem stvarnih opterećenja u službi. Međutim, ovaj treći pristup se relativno rijetko primjenjuje u brodogradnji i karakterističan je za automobilsku i zrakoplovnu industriju. Pristup procjene zamornog vijeka temeljen na S-N krivuljama koristi se za procjenu dinamičke izdržljivosti detalja koji su izloženi opterećenju promjenljive frekvencije i amplitude. Ovaj pristup pretpostavlja linearnu akumulaciju oštećenja i koristi krivulje životnog vijeka dobivene eksperimentima s opterećenjima konstantne amplitude. Zamor se smatra postupnim procesom akumulacije oštećenja, od početnog neoštećenog stanja do konačnog popuštanja. Nasuprot tome, pristup mehanike loma temelji se na pretpostavci da postoji početna pukotina u ne napregnutoj konstrukciji. Ovaj pristup zahtijeva određivanje brzine napredovanja pukotine, kao i njezine kritične veličine kod koje će širenje pukotine postati nestabilno. Svaki od ova dva pristupa ima svoje prednosti i ograničenja. Upotrebom S-N krivulja i modela apstraktnog oštećenja izbjegava se složena analiza naprezanja u okolini vrška pukotine, a također je moguće obuhvatiti fazu početka pukotine, koja u nekim slučajevima može predstavljati značajan dio projektnog vijeka. S druge strane, pristup mehanike loma omogućuje bolju procjenu preostalog životnog vijeka konstrukcije koja već ima postojeću pukotinu.

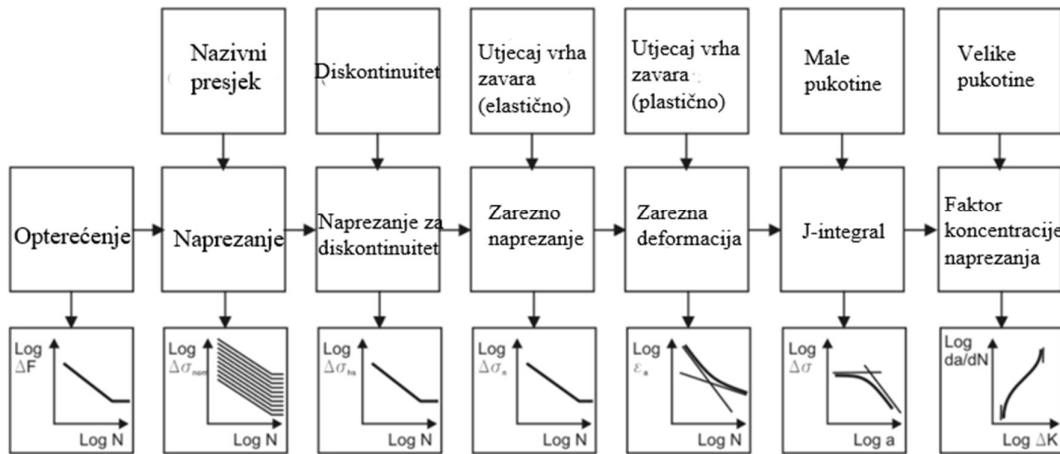
### 7.1 Određivanje zamornog vijeka korištenjem S-N krivulja

Pravila DNV-a temelje se na pristupu korištenja S-N krivulja kao i ostali registri te će taj pristup biti korišten i u ovom radu. Za procjenu dinamičke čvrstoće detalja pomoću ovog pristupa, potrebna su dva skupa ulaznih podataka. Prvi skup podataka je dugoročna razdioba (histogram) naprezanja kojima je izložen razmatrani detalj. Obično se ova razdioba određuje pomoću metode konačnih elemenata, koja pruža detaljan uvid u naprezanja u konstrukciji. Drugi skup podataka koji je potreban je zamorna otpornost konstrukcije. Ova otpornost se dobiva odabirom prikladne S-N krivulje, koja opisuje odnos između broja ciklusa naprezanja i vijeka trajanja konstrukcije pod tim naprezanjima. Odabir odgovarajuće S-N krivulje omogućuje procjenu koliko zamornih ciklusa konstrukcija može izdržati pri određenim naprezanjima. Dakle, za procjenu dinamičke čvrstoće detalja koriste se podaci o dugoročnoj razdiobi naprezanja i odgovarajuća S-N krivulja koja određuje zamornu otpornost konstrukcije. Ova dva skupa

podataka omogućuju analizu zamornog vijeka detalja i donošenje odgovarajućih odluka u pogledu sigurnosti i trajnosti konstrukcije.



Slika 7-1 Odnos između broja ciklusa napreznja i vijeka trajanja konstrukcije pod tim napreznjima [29]



Slika 7-2 Različiti pristup S-N krivulje [30]

### 7.2 Zamorno oštećenje korištenjem S-N krivulja

Za izračunavanje životnog vijeka strukturnog detalja kao posljedice akumulacije zamornog oštećenja, uobičajeno se koristi Palmgren-Minerova formulom:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \tag{7.15}$$

gdje su:

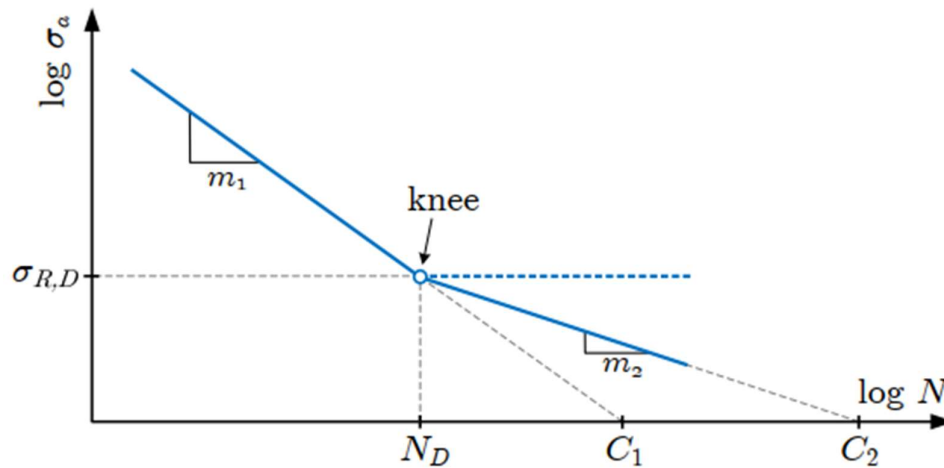
$k$  - broj referentnih vrijednosti raspona napreznja

$n_i$  -broj ciklusa naprezanja za konstantni raspon naprezanja  $\Delta\sigma_i$

$N_i$  -broj ciklusa naprezanja koji uzrokuje lom detalja pri  $\Delta\sigma_i$

Prema Palmgren-Minerova pravilu, lom materijala se događa kada ukupna akumulacija zamornog oštećenja  $D$  dostigne vrijednost jedinice.

Za opterećenje s konstantnom amplitudom broj ciklusa naprezanja do loma za određeno  $\Delta\sigma$  se određuje prema S-N krivulji te se to može vidjeti na Slika 7-3.



Slika 7-3 Prikaz korištenja S-N krivulje [31]

Moguće je kritičan broj ciklusa odrediti i iz analitičkog izraza za S-N krivulju:

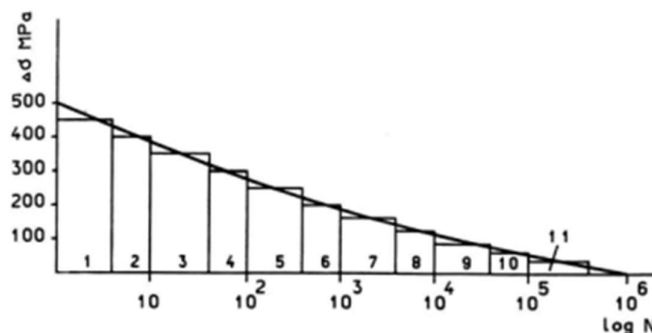
$$\log N = \log \bar{a} - n \log \Delta \sigma \quad (7.16)$$

ili drugačije:

$$N = \bar{a} \Delta \sigma^{-m} \quad (7.17)$$

gdje su  $m$  negativni recipročni nagib krivulje i  $\log \bar{a}$  točka presjecišta  $\log N$  osi.

Kada se radi o promjenljivoj amplitudi opterećenja, dugoročna razdioba raspona naprezanja može se podijeliti na intervale s konstantnim rasponom naprezanja. Za svaki od tih intervala, računa se oštećenje koje odgovara broju ciklusa naprezanja. Zatim se ta oštećenja zbrajaju primjenom Palmgren-Minerovog pravila, kao što je prikazano na Slika 7-4.



## Slika 7-4 S-N krivulja za opterećenja promjenjive amplitude [10]

### 7.3 Određivanje zamornog oštećenja prema DNV-u za odabrane konstrukcijske detalje

Prema DNV-u za određivanje zamornog oštećenja  $D$  koristi se sljedeća formula:

$$D = \frac{N_D}{K_2} \cdot q^m \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{m}{\xi} \right) \leq \eta \quad (7.18)$$

gdje je:

ukupni broj ciklusa naprezanja koje brod doživi u projektom životnom vijeku dan formulom:

$$N_D = 31,557 \cdot 10^6 \cdot \frac{f_0 \cdot T_D}{4 \log_{10}(L)} \quad (7.19)$$

$f_0 = 0,85$  -dio vremena na moru

$T_D = 25$  godina -projektni životni vijek

$\Gamma()$  Gamma funkcija

parametar oblika Weibullove razdiobe dan formulom:

$$\xi = 2,21 - 0,54 \log_{10}(L) \quad (7.20)$$

parametar mjerila Weibullove razdiobe dan formulom:

$$q = \frac{\Delta\sigma}{(\ln n)^{\frac{1}{\xi}}} \quad (7.21)$$

$K_2, m$  parametri S-N krivulje, prema [18] te se koristi krivulja D, prema [20].

Kod računanja Weibullovog parametra mjerila (*scale* parametra)  $q$ ,  $\Delta\sigma$  se uzima izračunati iz poglavlja prethodno ovom a  $n$  je ukupni broj ciklusa za koji se taj  $\Delta\sigma$  računa. Da bi se odredio broj ciklusa za koji se pojavljuje to naprezanje potrebno je znati vjerojatnost prekoračenja za opterećenja koja generiraju taj  $\Delta\sigma$ . U ovom radu se radi sa *EDW* opterećenjima a za njih je definirano da je vjerojatnost premašivanja  $10^{-2}$  prema [26]. Znajući to i ukupni broj ciklusa koji detalj mora preživjeti iz sljedeće formule se može dobiti  $n$  tj. broj ciklusa za koji će se odabrani  $\Delta\sigma$  pojaviti. Ukupni broj ciklusa  $N$  za koji se proračunava detalj određen je prema [32] i uzima se kao pola te vrijednosti zato što se pretpostavlja da brod pola života provede u balastu a pola skroz nakrcan.

$$Q(\Delta\sigma) = \frac{n}{N} \quad (7.22)$$

gdje je:

$$Q(\Delta\sigma) = 10^{-2} \quad \text{vjerojatnost premašivanja}$$

$$N = 0,5 \cdot 10^8 \quad \text{projektni broj ciklusa koji konstrukcija treba izdržati za balasno}$$

stanje

Vrijednosti i krajnji rezultat prikazani su u Tablica 7-1.

**Tablica 7-1 Konačne vrijednosti proračuna zamora za detalj pokrova dvodna i nagnutog pokrova uzvojnog tanka**

$N_D$	$\xi$	$n$	$\Delta\sigma$	$q$	$K_2$	$m$	$\Gamma()$	$D$
7E+07	0.882	500000	35.49	1.9165	4.0E+15	5	390.644	0.0002

Pravila ne određuju S-N krivulju kojom je moguće obuhvatiti utjecaj korozije, nego kažu sljedeće da se zamorno oštećenje koje se dobije pomnoži sa koeficijentom 2 te se na taj način dobije  $D_{corrosive}$  koji za ovaj detalj iznosi  $D_{corrosive} = 0,0004$ .

Očekivano je da će rezultat analize dati malu vrijednost oštećenja zbog pojednostavljena koja su provedena u ovom radu. Kako bi se dobila ukupna vrijednost oštećenja, proračun bi trebao obuhvatiti sve valove koji su specificirani prema pravilima. Nakon zbrajanja svih tih oštećenja, ukupna vrijednost ne bi trebala premašiti 0.5, s obzirom na to da se ovaj proračun odnosi na balasno stanje broda. Isti postupak bi se ponovio za stanje u kojem je brod potpuno napunjen, te bi se ta dva oštećenja zbrojila, pri čemu vrijednost ne bi smjela premašiti 1.

## 8 ZAKLJUČAK

Fenomen zamornog oštećenja metalnih konstrukcija poznat je već dugo vrijeme i sve češće nezaobilazni dio proračuna. Iako katastrofalne posljedice zamornog popuštanja nisu česte, postoje primjeri kao što su lomovi mostova, padovi zrakoplova i potonuća brodova koji su ukazali na ozbiljnost problema. Unatoč relativno rijetkim fatalnim incidentima, zamorna oštećenja mogu proizvesti ogromne štete u pogledu zagađenja okoliša ili u financijskom pogledu. Postupke proračuna zamorne izdržljivosti strukturnih detalja opisuju sva klasifikacijska društva. Ovi postupci se uglavnom temelje na apstraktnom modelu akumulacije oštećenja, koji ne uzima u obzir pojavu i širenje konkretne pukotine. Umjesto toga, zamor se promatra kao proces zbrajanja oštećenja u svakom pojedinom ciklusu opterećenja. Upotrebom Wöhlerovih S-N krivulja, ustanovljena je veza između naprezanja i zamornog oštećenja.

U ovom radu odrađena je procedura proračuna zamornog opterećenja prema pravilima DNV-a. Dok pravila propisuju tri detaljne metode proračuna, za potrebe ovog rada uzet je pojednostavljen proračun koji uključuje samo jedno valno opterećenje iz jednog smjera, hidrostatički tlak, hidrodinamički tlak koji proizlazi iz uzetog valnog opterećenja te tri ubrzanja koje korespondiraju uzetom valnom opterećenju. Učinjeno je balansiranje modela kojim su se dobila stvarna naprezanja u tanku broj 3 broda koji se analizirao. Pravila daju i detaljne postupke ekstrapolacije žarišnih naprezanja te su u ovom radu primijenjena kvadratna (složenija) i linearna (jednostavnija) ekstrapolacija. Nakon provedena oba postupka, utvrđeno je da kvadratna ekstrapolacija rezultira realnijim naprezanjima, dok je pojednostavljeni proračun pružio nešto više konzervativne vrijednosti, ali uz manji utrošak vremena. Iz ovog postupka proizlazi zaključak da razlika između ta dva pristupa naprezanjima nije značajna te da je u industrijskoj primjeni poželjno koristiti pojednostavljeni proračun zbog uštede vremena, uz dodatak sigurnosti s obzirom na blago povećanje naprezanja. U zaključku, provedene analize su pokazale da proračun zamornog oštećenja za LNG brodove s membranskim tankovima zahtijeva korištenje pravilnog pristupa ekstrapolaciji naprezanja, ali da se u industrijskoj praksi često koristi pojednostavljeni proračun koji pruža brže rezultate. Unatoč blagom povećanju naprezanja, sigurnosni aspekt ostaje zadovoljavajući. Konačno, za procjenu ukupnog zamornog oštećenja, potrebno je provesti cjelokupan postupak koji propisuju pravila te osigurati da ukupna vrijednost oštećenja ostane unutar prihvatljivih granica.

Nakon provedenog proračuna, primijećeni su određeni dijelovi koji su predstavljali izazov u interpretaciji DNV-ovih pravila i metoda. Konkretno, primjer takvog izazova pojavljuje se u balansiranju modela kod distribucije smičnih sila, gdje pravila zahtijevaju primjenu dodatnih

sila na svako rebro, pritom ne vodeći računa o njihovom lokalnom utjecaju. Kako bi se smanjio lokalni utjecaj tih sila, primijenjen je alternativni pristup, koji se sastojao od njihove primjene na vertikalne, a ne poprečne elemente rebra. Na taj način je smanjena deformacija koju te sile uzrokuju. Nadalje, izrada podmodela zahtijevala je značajan vremenski angažman zbog visoke razine detalja koju je bilo potrebno modelirati. Proces izrade podmodela bio je obuhvatna i zahtjevna aktivnost koja je uključivala detaljnu analizu i interpretaciju nacрта kako bi se osiguralo da su svi relevantni detalji pravilno modelirani. U procesu provedbe ovog proračuna najizazovniji dio bio je utrošak velike količine vremena u povezivanje različitih dijelova DNV pravila, koja su razdijeljena u nekoliko različitih dokumenata. Stoga, za izgradnju potpunog postupka, bilo je potrebno temeljito proučavanje svakog pravila, njihovo povezivanje i sinteza u smislenu cjelinu.

Ukratko, zamor konstrukcijskih detalja predstavlja važan aspekt u brodogradnji i pomorstvu. Dok proračun zamornog oštećenja još uvijek nije u potpunosti integriran u postupak osnivanja brodskih konstrukcija, klasifikacijska društva pružaju dovoljno detaljne smjernice za proračun zamorne izdržljivosti.

**LITERATURA**

- [1] »Liquefied Gas Carrier,« [Mrežno]. Available: <http://www.liquefiedgascarrier.com/Liquefied-Natural-Gas-Carriers.html>.
- [2] K.Moon, Comparison of Spherical and Membrane Large LNG Carriers in Terms of Cargo Handling, 2005.
- [3] D. Posavec, K. Simon i M. Malnar, »Brodovi za ukapljeni prirodni plin,« *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, svez. 22, pp. 55-62, 2010.
- [4] DNV, DNV-RU-Ship Pt.5 Ch.7 Liquefied gas tankers, July, 2021.
- [5] M. Zalar i N. Moirod, Some aspects of direct calculation methods for the assessment of LNG tank structure under sloshing impacts, 2007.
- [6] D. Šumarac i D. Krajčinović, Osnovi mehanike loma, Beograd: Naučna knjiga, 1990.
- [7] J. Schijve, Fatigue of Structures and Materials, Delft, 2008.
- [8] M. Sharp, G. Nordmark i C. Menzemer, Fatigue Design of Aluminium Components, New York: McGraw-Hill, 1996.
- [9] A. Almar-Næss, Fatigue Handbook, Trondheim: Tapir Publishers, 1985.
- [10] S. Rudan, Spektralna analiza zamora brodskih konstrukcija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2002.
- [11] M. Franz, Mehanička svojstva materijala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1998.
- [12] W. Fricke, »Fatigue and Fracture of Ship Structures,« u *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering Marine Ship Structures*, Hamburg, 2017, pp. 1-12.
- [13] K. Sato, H. Ohira, M. Tatani i T. Yoshida, »Long-term Fatigue Monitoring For LNG Carrier,« 2005.
- [14] Glen, Dinovitzer, Paterson, Luznik i Bayley, »Fatigue resistant detail design guide for ship structures,« Washington, 1999.
- [15] D.Radaj, »Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters,« *Int. J. Fatigue*, svez. 18, br. 3, pp. 153-170, 1996.
- [16] S. Tomašević, Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003.
- [17] A. Hobbacher, »Recommendations for fatigue design of welded joints and components,« u *IIW Fatigue Recommendations IIW-1823-07/XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07*, Paris, International Institute of Welding, 2008.
- [18] DNV, DNV-CG-0129 Fatigue assessment of ship structures, July,2021.
- [19] DNV, DNV-CG-0127 Finite element analysis, July, 2021.
- [20] DNV, DNV-CG-0136 Liquefied gas carriers with membrane tanks, July, 2021.
- [21] DNV, DNV-CG-0130 Wave loads, July, 2021.
- [22] DNV, Sesam user manual - Genie, 2016.
- [23] DNV, Sesam user manual - SESTR, 2023.
- [24] DNV, Sesam user manual-Xtract, 2021.
- [25] DNV, Sesam user manual- Submod, 2021.
- [26] DNV, DNV-RU-SHIP Pt. 3 Ch.4 Loads, 2021.



- 
- [27] S. Y. Fialko, »Application of rigid links in structural design models,« *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, svez. 13, br. 3, 2017.
- [28] H. Sönerlind, »Introduction to Numerical Integration and Gauss Points,« *COMSOL Blog*, 2019.
- [29] L. Yung-Li, *Fatigue Testing and Analysis (theory and Practice)*, 2005.
- [30] M. A. M. B. A.M. Horn, »Fatigue and Fractures,« u *17th International ship and offshore structures congress*, Seoul, Korea, 2009.
- [31] M. M. Pedersen, »Introduction to Metal Fatigue,« u *Concepts and Engineering Approaches*, Aarhus University, 2018.
- [32] DNV, DNV-RU-SHIP Pt.3 Ch.9 Fatigue, 2021.