Utjecaj različitog načina implementacije valnog opterećenja na primarni odziv brodske konstrukcije

Lajtner, Iva Klara

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:921639

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Klara Lajtner

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori: Student:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing. Iva Klara Lajtner

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću na vodstvu, dobroj volji i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Iva Klara Lajtner

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Mat. br.:

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

Naslov rada na engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan: Rok predaje rada: Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ……....*I*

POPIS SLIKA……*II*

POPIS TABLICA……..*IV*

POPIS OZNAKA……...*V*

1. UVOD 1

2. PRORAČUN VALNOG MOMENTA 3

2.1 Proračun valnog momenta prema pravilima *LR-a* 3

3. MKE MODELI 6

3.1 Izrada MKE modela 6

3.1.1 Model M1 7

3.1.2 Model M2 8

3.1.3 Model M3 8

3.2 Rubni uvjeti 9

3.3 Implementacija opterećenja 10

4. ANALIZA REZULTATA 15

4.1 Analiza distribucije σ_x naprezanja po visini trupa borda 15

4.2 Analiza distribucije smičnih naprezanja 26

4.3 Analiza naprezanja po širini trupa broda 32

4.4 Analiza pomaka 34

5. ZAKLJUČAK 35

POPIS SLIKA

Slika 1 Distribucija ukupnog vertikalnog valnog valnog momenta duž broda za pregibni i progibni val 4
Slika 2 Distribucija kontinuiranog opterećenja uzduž broda za pregibni projektni val 5
Slika 3 Distribucija vertikalne poprečne sile uzduž broda za pregibni projektni val 5
Slika 4 Polovinski MKE model M1 7
Slika 5 Polovinski MKE model M2 8
Slika 6 Polovinski MKE model M3 9
Slika 7 Rubni uvjeti modela 10
Slika 8 Distribucija ukupnih čvornih sila po duljini broda 12
Slika 9 Prikaz stanja opterećenja „Glall“ 13
Slika 10 Prikaz stanja opterećenja „Glside“ 13
Slika 11 Distribucija poprečne sile generirane u programu MAESTRO za stanje pregiba 14
Slika 12 Distribucija momenta savijanja generiranog u programu MAESTRO za stanje pregiba 14
Slika 13 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M1 modela na glavnom rebru, na poziciji CL 15
Slika 14 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M1 modela na glavnom rebru, na poziciji B/4 16
Slika 15 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M1 modela na glavnom rebru, na poziciji B/2 16
Slika 16 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M2 modela na glavnom rebru, na poziciji CL 17
Slika 17 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M2 modela na glavnom rebru, na poziciji B/2 17
Slika 18 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M2 modela na glavnom rebru, na poziciji B/4 18
Slika 19 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M3 modela na glavnom rebru, na poziciji CL 18
Slika 20 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M3 modela na glavnom rebru, na poziciji B/2 19
Slika 21 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M3 modela na glavnom rebru, na poziciji B/4 19
Slika 22 Prikaz σ_x naprezanja modela M1 za slučaj „Glall“ 24
Slika 23 Prikaz σ_x naprezanja modela M2 za slučaj „Glall“ 24
Slika 24 Prikaz σ_x naprezanja modela M3 za slučaj „Glall“ 25
Slika 25 Smična naprezanja na modelu M2 za slučaj „Glall“ 26
Slika 26 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M1 na boku 26
Slika 27 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M2 na boku 27
Slika 28 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M3 na boku 27
Slika 29 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M3 na uzdužnoj pregradi 28
Slika 30 Prikaz smičnih naprezanja jednog modula MKE modela M1 za slučaj „Glall“ ... 30
Slika 31 Prikaz smičnih naprezanja jednog modula MKE modela M2 za slučaj „Glall“ ... 31
Slika 32 Prikaz smičnih naprezanja jednog modula MKE modela M1 za slučaj „Glall“ ... 31
Slika 33 Raspodjela σ_x naprezanja modela M1 po širini palube šest 32
Slika 34 Raspodjela σ_x naprezanja modela M2 po širini palube šest 32

Slika 35 Raspodjela σ_x naprezanja modela M3 po širini palube šest 33
Slika 36 Progib modela M1 u ovisnosti o dvije implementacije opterećenja 34

POPIS TABLICA

Tablica 1 Glavne dimenzije razmatranog broda 6
Tablica 2 Prikaz rubnih uvjeta na modelu 9
Tablica 3 Rubni uvjeti simetrije 10
Tablica 4 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M1 na poziciji uzdužne simetralne ravnine (u CL-u) 20
Tablica 5 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M1 na polovini poluširine (B/4) 20
Tablica 6 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M1 u neposrednoj blizini boka (B/2) 21
Tablica 7 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M2 na poziciji uzdužne simetralne ravnine (u CL-u) 21
Tablica 8 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M2 na polovini poluširine (B/4) 21
Tablica 9 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M2 u neposrednoj blizini boka (B/2) 21
Tablica 10 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M3 na poziciji uzdužne simetralne ravnine (u CL-u) 22
Tablica 11 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M3 na polovini poluširine (B/4) 22
Tablica 12 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M3 u neposrednoj blizini boka (B/2) 22
Tablica 13 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M1 po boku 28
Tablica 14 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M2 po boku 29
Tablica 15 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M3 po boku 29
Tablica 16 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M3 po uzdužnoj pregradi 29
Tablica 17 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja za sva tri modela u neposrednoj blizini boka 33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
P_1	kN/m	kontinuirano valno opterećenje
SF_1	kN	vertikalna poprečna sila
BM_1	kNm	vertikalni valni moment savijanja po SDA proceduri
M_W	kNm	vertikalni valni moment savijanja po Pravilima
f_{fH}	/	korekcijski faktor pregibnog momenta
f_{fS}	/	korekcijski faktor pregibnog momenta
x	/	bezdimenzijska udaljenost
C_1	/	faktor valnog momenta savijanja
L	m	računska duljina broda
B	m	širina broda
T	m	gaz broda
Cb	/	koeficijent punoće
σ_x	N/ mm^2	normalno uzdužno naprezanje
τ_{xy}	N/ mm^2	smično naprezanje

SAŽETAK

Završni rad bavi se analizom primarnog odziva brodske konstrukcije u ovisnosti o različitoj implementaciji valnog opterećenja na konstrukciju.

U uvodu je kratko opisan postupak provođenja linearno statičkog proračuna složenih brodskih konstrukcija prema pravilima klasifikacijskog društva *Lloyd's Register*. Unatoč jasno definiranim koracima u postupku provođenja proračuna temeljenog na metodi konačnih elemenata, problematika se javlja kod općenitog definiranja implementacije valnog opterećenja što može dovesti do različitog strukturnog odziva.

Za zadanu geometriju glavnog rebra napravljena su tri pojednostavljena modela različitih topologija glavnog rebra višepalubnog broda. Potom je proveden proračun vertikalnog valnog momenta savijanja prema pravilima [2] i proračun relevantnog iznosa čvornih sila na pojedinom presjeku. Sljedeći korak bilo je implementirati čvorne sile u tri MKE modela duž modela na dva različita načina po širini i visini presjeka.

Zatim su se detaljno analizirale razlike u distribuciji dvije komponente naprezanja. Raspodjela normalnih uzdužnih σ_x naprezanja analizirana je na dva poprečna presjeka, na 0,5xL što odgovara rebru 100 i blizu rebra 75. Raspodjela smičnih naprezanja analizirana je na poprečnom presjeku na udaljenosti 0,25xL gdje imaju maksimalnu pozitivnu vrijednost. Prethodno spomenute analize provedene su na svakom pojedinom MKE modelu, ovisno o dva načina implementacije čvornih sila.

Ključne riječi: primarni odziv, valno opterećenje, MKE model, čvorne sile, normalno naprezanje, smično naprezanje

SUMMARY

This study deals with analysis of global structural response of ship construction depending on different implementation of wave load.

In the introduction is briefly described the process of linear static calculation according to classification societies rules. While the steps in process of calculation based on finite elements method are well defined, the problem occurs in generally defined implementation of wave loads that can cause different global structural response. For established geometry of main frame of multiple deck ship there were made [4] three simplified models with different topologies of main web frame. Then, the calculation of the vertical wave bending moment according to the rules [2] and the calculation of the relevant nodal forces at each section were performed. Next step was to implement nodal forces on thee FEM models along full length of the model on two different ways of the discretisation.

Finally, the differences in distribution of normal longitudinal σ_x and shear stresses were analysed in detail. The distribution of normal stresses were analysed in two cross sections, first located at 0,5xL which is, as well, frame 100 and second located at frame 75. The shear stresses were analysed in cross section located at 0,25xL where they have maximum positive values. Previously mentioned analysis were carried out on each FEM model, depending on two methods of implementation of nodal forces.

Key words: global structural response, wave load, vertical wave bending moment, global FEM model, nodal forces, normal stress, shear stress

1. UVOD

Proračun strukturne analize koristeći 3D MKE model cijelog broda je propisan za brodove čiji se globalni odziv ne može dovoljno točno odrediti upotrebom klasične teorije grede. To se odnosi, na primjer, na kontejnerske brodove koji su značajno podvrgnuti torzijskim deformacijama, putničke brodove i brodove za krstarenja s nepoznatim doprinosom nadgrađa u globalnoj čvrstoći trupa broda, Ro-Ro brodove i brodove za prijevoz automobila koji imaju malu poprečnu krutost zbog nedostatka poprečni pregrada. U tim slučajevima, proračun zahtjeva više napora u svakom dijelu postupka analize u odnosu na pristup 3-skladišnog MKE modela koji se propisano koristi kao metoda za tankere i brodove za rasuti teret.

U početnim projektnim fazama vrijeme je jedna od glavnih varijabli, zbog toga se za strukturnu analizu najčešće koristi linearno statički proračun metodom konačnih elemenata (MKE). Klasifikacijska društva definiraju postupak provođenja direktnog proračuna složenih brodskih konstrukcija raznim projektnim smjernicama u okviru svojih pravila. Na taj način pomažu projektantu da se projekt završi u predviđenom vremenskom roku i da u konačnici ima odobrenu konstrukciju prema zahtjevima pravila. U cilju izrade strukturnog (MKE) modela su jasno definirani i utvrđeni svi koraci. Međutim, nije propisan jedinstven pristup implementacije valnog opterećenja na MKE model. Distribucija valnog opterećenja može se definirati koristeći panel metodu kao rezultat direktnog proračuna ili projektnim formulama prema pravilima klasifikacijskih društava.

Stoga se ovaj rad fokusira na provjeru utjecaja implementacije, prema pravilima definiranog, valnog opterećenja na dva različita načina na MKE model cijelog broda i ime uzrokovan različit globalni odziv konstrukcije. U radu je analiziran samo vertikalni globalni valni moment savijanja, torzijski i horizontalni valni momenti nisu razmatrani. Za procjenu valnog opterećenja odabran je pravilima definiran proračun prema klasifikacijskom društvu *Lloyd's Register* [2].

Prema LR-u [2] za analizu globalnog odziva cijelog broda potrebno je na MKE model implementirati kombinaciju opterećenja. Naprezanja uzrokovana kombinacijom opterećenja su relevantna te se ona provjeravaju zadovoljavaju li kriterije podobnosti. Zasebno se promatraju kombinacije opterećenja za pregib i za progib. Propisana kombinacija opterećenja u pregibu obuhvaća savijanje broda na mirnoj vodi u pregibu, na projektnom pregibnom valu i na lokalnom valnom brijegu. Za progib se zbrajaju opterećenja uslijed savijanja broda na mirnoj vodi u progibu, na projektnom progibnom valu i na lokalnom valnom dolu. Tako

definirano ukupno opterećenje daje najveće, kritično opterećenje jer se u svakom zasebnom slučaju promatra maksimum mogućeg opterećenja. Posljedično s time se u elementima MKE modela javljaju najveća naprezanja i odziv koji u relevantni za provjeru podobnosti konstrukcije i prema kojima se eventualno redimenzioniraju strukturni elementi.

U svrhu analize globalnog odziva konstrukcije uspoređeni su rezultati za dva različita stanja opterećenja implementirana na tri MKE modela različitih topologija glavnog rebra. Detaljnija analiza naprezanja i odziva nalazi se u poglavlju 4.

2. PRORAČUN VALNOG MOMENTA

2.1 Proračun valnog momenta prema pravilima *LR-a*

Klasifikacijsko društvo *Lloyd's Register* propisuje postupak za određivanje i implementaciju projektnog vertikalnog valnog momenta savijanja $BM_1(x)$ u sklopu *SDA Primary Structures of Passenger Ships, January 2018*, za proračun putničkih brodova. [2]

SDA pravila [2] daju približnu formulu za kontinuiranu raspodjelu opterećenja, $P_1(x)$, preko kojeg se generira projektni vertikalni valni moment savijanja, $BM_1(x)$, i poprečna sila, $SF_1(x)$. U konačnici, implementirani valni moment na model s konačnim elementima generira zahtijevani globalni moment savijanja trupa broda.

$$P_1(x) = \frac{M_W}{L^2} \cdot \left(20a_1x^3 + 12a_2x^2 + 6a_3x + 2a_4\right) \text{ [kN/m]} \quad \textbf{(1)}$$

$$SF_1(x) = \frac{M_W}{L}\left(5a_1x^3 + 4a_2x^2 + 3a_3x + 2a_4\right)x \text{ [kN]} \quad \textbf{(2)}$$

$$BM_1(x) = M_W\left(a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4\right)x^2 \text{ [kNm]} \quad \textbf{(3)}$$

Gdje je valni moment, M_W, različit za pregibni (4) i progibni (5) val proračunat prema [1].

$$M_W = f_{fH} \cdot M_{WO} \text{ [kNm]} \quad \textbf{(4)}$$

$$M_W = f_{fS} \cdot M_{WO} \text{ [kNm]} \quad \textbf{(5)}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 7,841 \\ a_2 &= -1,457 \\ a_3 &= -20,609 \\ a_4 &= 14,225 \end{aligned} \quad \textbf{(6)}$$

Bezdimenzijska udaljenost, x, predstavlja omjer udaljenosti mjerene od krmenog kraja u metrima, d, i računske duljine, L. (7)

$$x = \frac{d}{L} \quad \textbf{(7)}$$

Korekcijski faktor pozitivnog pregibnog momenta je f_{fH}, a f_{fS} je korekcijski faktor negativnog pregibnog momenta. (8)

$$\begin{aligned} f_{fH} &= 0,877 \\ f_{fS} &= -1,397 \end{aligned} \quad \textbf{(8)}$$

$$M_{WO} = 0{,}1 \cdot C_1 \cdot L^2 \cdot B_{WL} \cdot (Cb + 0{,}7) = 1082871{,}5 \ \text{[kNm]} \quad \textbf{(9)}$$

Gdje je

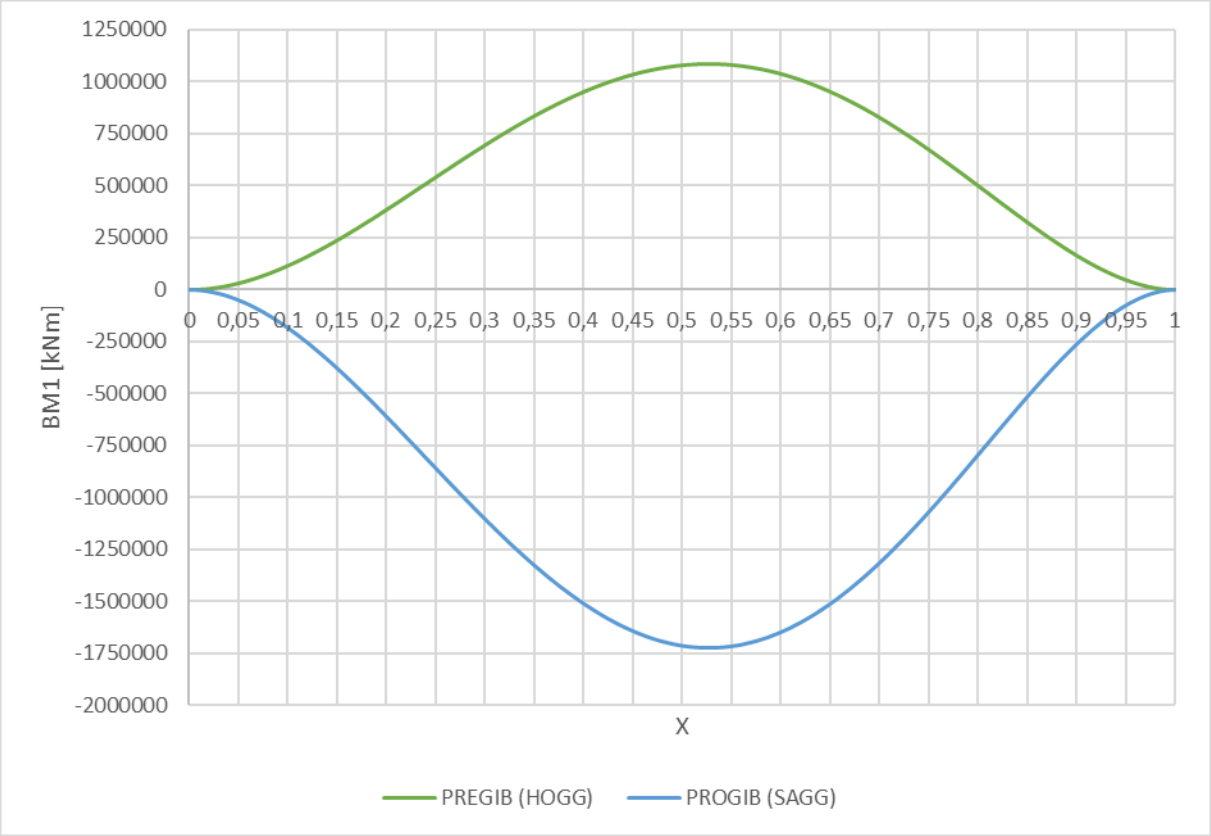
$$C_1 = 10{,}75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1{,}5} = 9{,}2678 \ \text{ za } \ 90 \le L \le 300 \quad \textbf{(10)}$$

$$L = 170 \ \text{[m]}$$

$$B_{WL} = 31{,}1 \ \text{[m]}$$

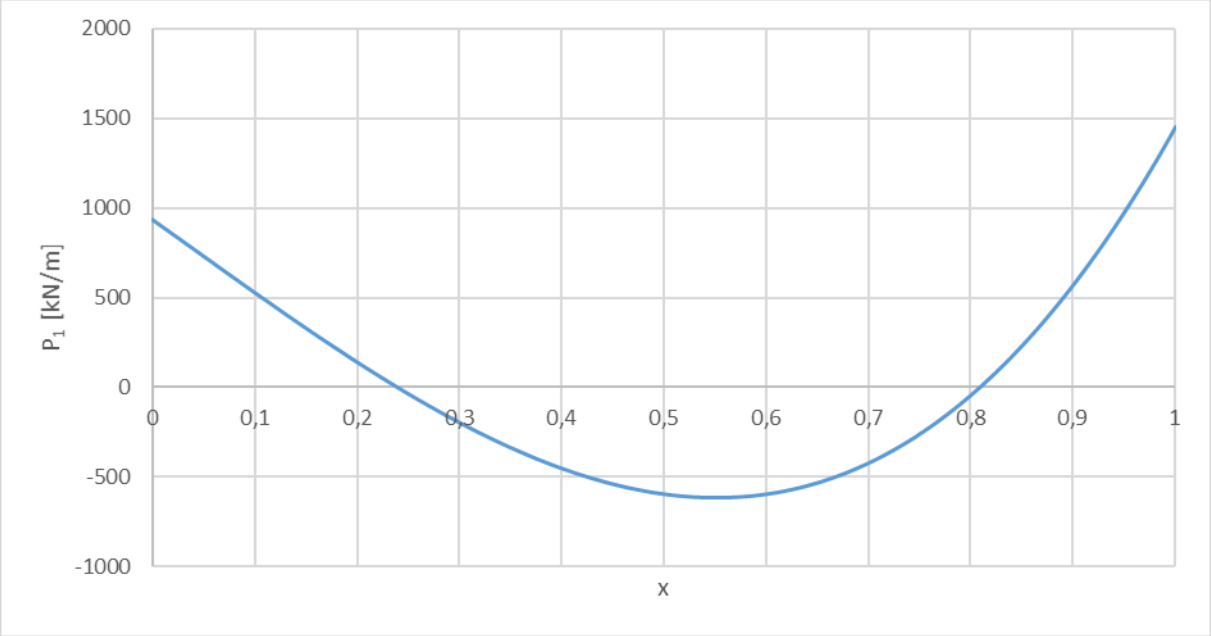
$$Cb = 0{,}6$$

Prikaz dobivenih rezultata raspodjele vertikalnog pregibnog (hogging) i progibnog (sagging) valnog momenta duž broda prema (3) prikazani su na Slika 1.

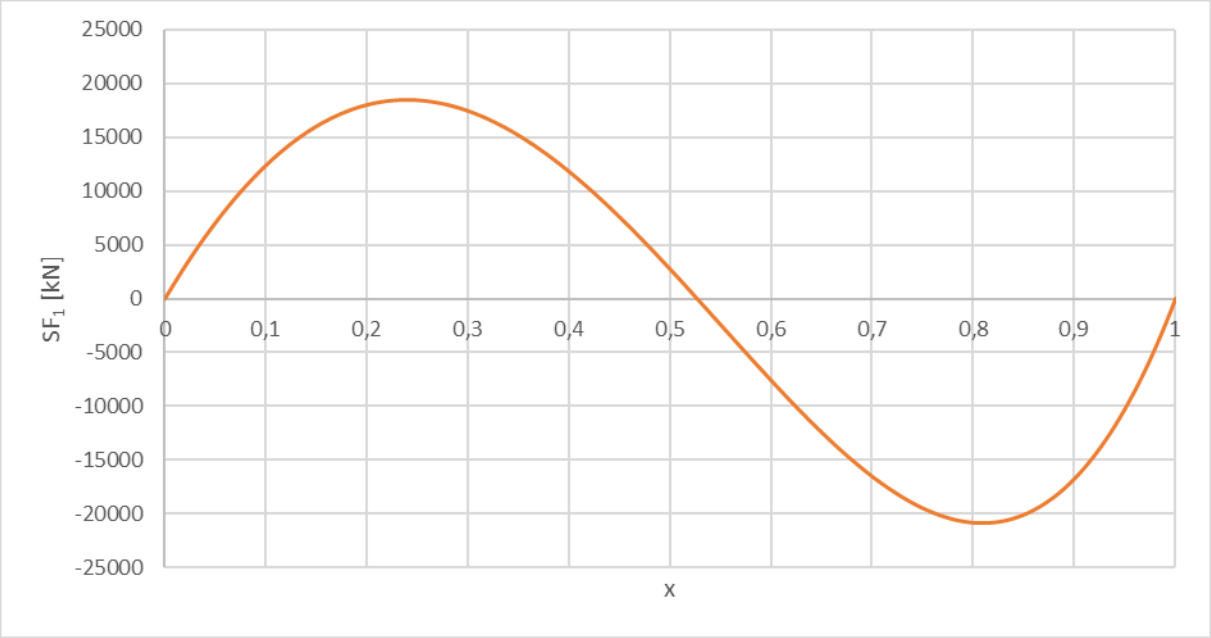


Slika 1 Distribucija ukupnog vertikalnog valnog valnog momenta duž broda za pregibni i progibni val

Za daljnju usporedbu rezultata proizvoljno su uzete vrijednosti dobivene za pregibni valni moment, stoga su prikazane i krivulje distribucije kontinuiranog opterećenja, $P_1(x)$, prema (1) i poprečne sile, $SF_1(x)$, prema (2) u ovisnosti o bezdimenzijskoj udaljenosti, x, za pregibni projektni val, vidi Slika 2 i Slika 3.



Slika 2 Distribucija kontinuiranog opterećenja uzduž broda za pregibni projektni val



Slika 3 Distribucija vertikalne poprečne sile uzduž broda za pregibni projektni val

3. MKE MODELI

Složenu brodsku konstrukciju (višepalubni brod) nije moguće promatrati kao gredu, odn. tankostijeni kutijasti nosač iz čega proizlazi da nije moguće primijeniti jednostavnu teoriju grede. Nepoznat je doprinos nadgrađa u primarnoj čvrstoći broda jer ne možemo pretpostaviti linearnu distribuciju naprezanja po visini trupa broda. Zato je, u svrhu analize naprezanja, bilo potrebno izraditi modele u programskom paketu MAESTRO [4]. MKE modeli omogućavaju realno ponašanje konstrukcije jer uzimaju u obzir interakciju elemenata pri prijenosu opterećenja koje su im narinuta.

3.1 Izrada MKE modela

Izrađena su tri MKE modela, koja imaju različitu topologiju glavnog rebra, broda za prijevoz stoke, glavnih dimenzija prikazanih u Tablica 1.

Brod ima 11 paluba za smještaj stoke razdijeljene u kaveze povezane koridorima. Veliki broj ventilacijskih čeličnih cijevi omogućava dotok i strujanje zraka i do najnižih paluba.

Tablica 1 Glavne dimenzije razmatranog broda

Računska duljina, *L*	170 m
Širina, *B*	31,1m
Gaz, *T*	8,7 m
Koeficijent punoće, *Cb*	0,6

Prvo je izrađen polovinski MKE model M1 cijelog broda, a modeli M2 i M3 dobiveni su modifikacijom glavnog rebra modela M1.

MKE model je izrađen s grubom mrežom konačnih elemenata ekstrudirajući glavno rebro, odn. bez promjene forme. Smješten je u MAESTRO-vom koordinatnom sustavu koji je definiran na sljedeći način:

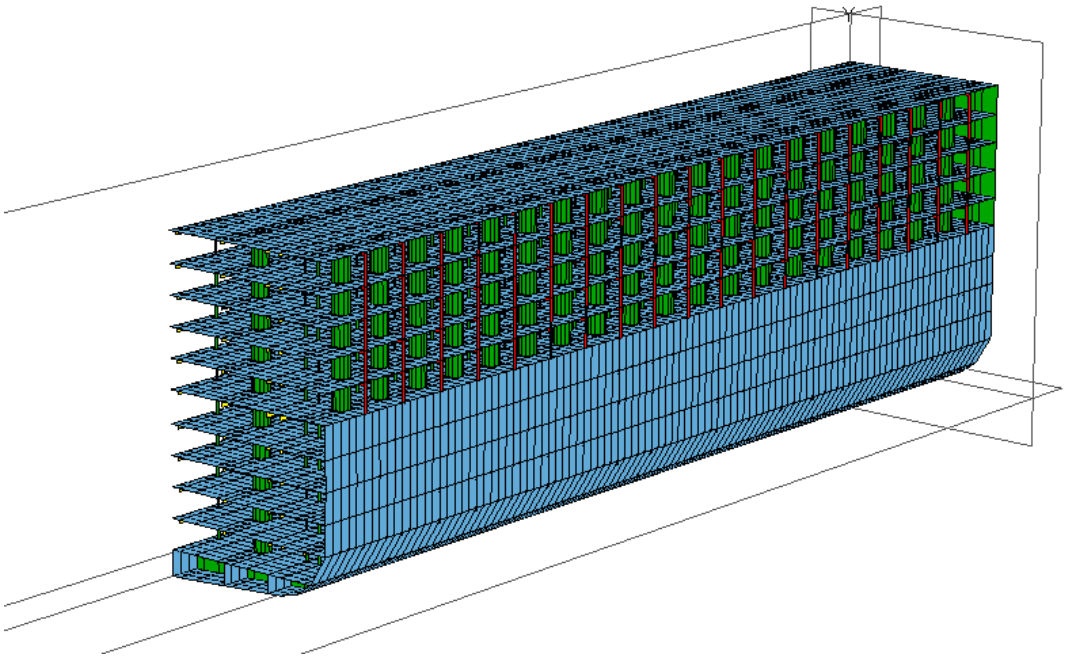
- ishodište se nalazi u sjecištu uzdužne ravnine simetrije broda i osnovice
- globalna X os se proteže u smjeru duljine broda i pozitivna je prema naprijed
- globalna Z os se proteže u poprečnom smislu i pozitivna je prema desno od osi X
- globalna Y os se proteže u vertikalnom smjeru i pozitivna je prema gore

3.1.1 Model M1

Model M1 jednak je topologiji razmatranog broda. Karakteriziraju ga dvodno, jedanaest paluba, upore, ventilacijske cijevi i otvoren bok od palube 6 do palube 11. Ventilacijske cijevi velike krutosti djeluju kao upore, pa djelomično doprinose uzdužnoj čvrstoći trupa.

Koraci postupka izrade modela:

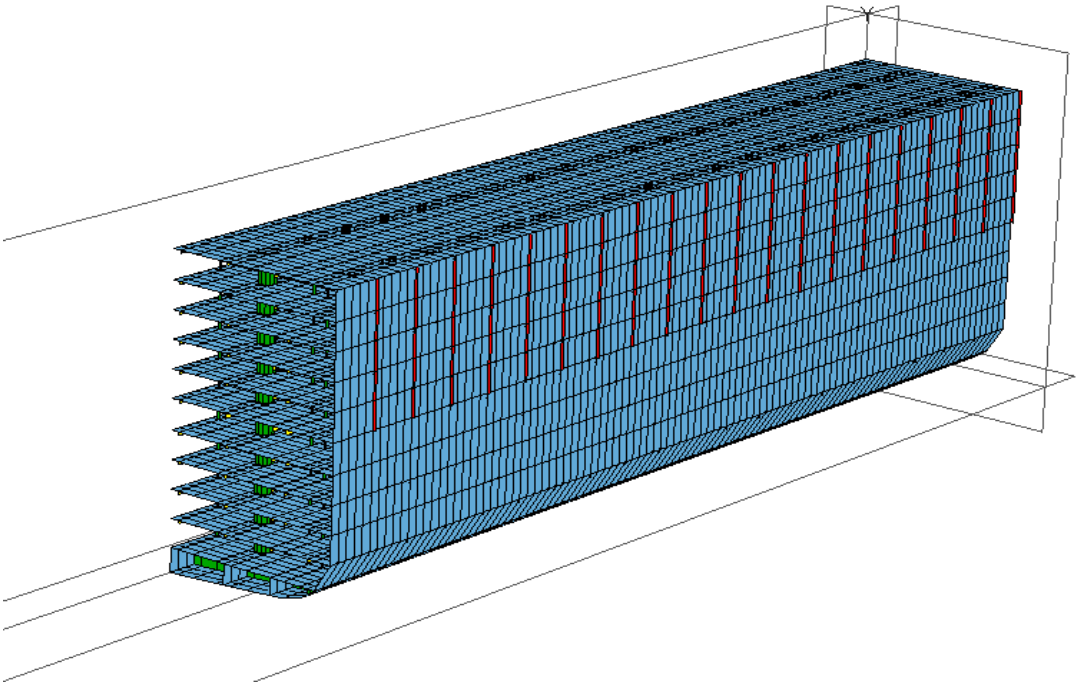
- postavljanje čvorova u prostoru; nije proizvoljno, nego se nužno postavljaju na mjesta gdje se konstrukcija mijenja, a daljnjim postavljanjem se generira željena gustoća mreže modela
- povezivanje odgovarajućih čvorova prikladnim konačnim elementima u vidu vojeva koji imaju definirana svojstva materijala, debljinu, ukrepe, podveze i rebrenice te u vidu poprečnih grednih elemenata kao što su upore i rebrenice
- tako dobiveno glavno rebro se ekstrudiralo te se dobio modul
- cijeli model dobiven je spajanjem šest takvih modula



Slika 4 Polovinski MKE model M1

3.1.2 Model M2

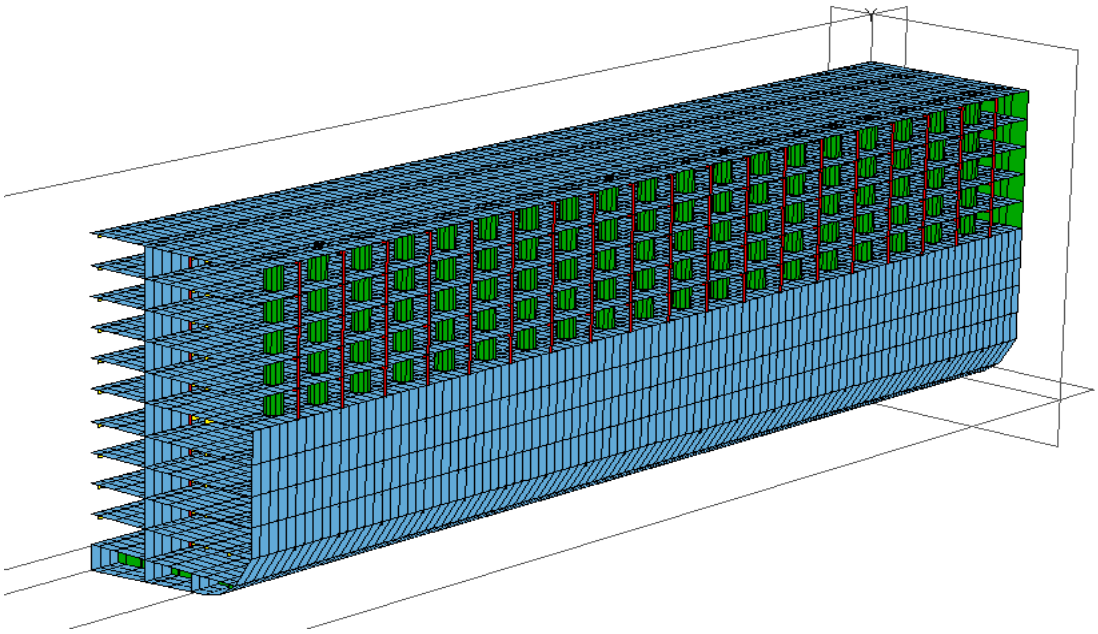
Model M2 je nastao modifikacijom M1 modela, a razlikuje se u zatvorenom boku od palube 6 do palube 11 (14530-26750 mm). Bok je zatvoren generiranjem pločastog elemente, voja, između četiri čvora koji je uzdužno i poprečno orebren. Ovakva topologija približno odgovara brodovima za prijevoz automobila („car carrier“).



Slika 5 Polovinski MKE model M2

3.1.3 Model M3

Nastao je modifikacijom početnog, M1 modela. Model M3 ima na poziciji 5250 m udaljenoj od ravnine simetrije (CL-a) uzdužnu pregradu koja se proteže duž cijelog modela i po punoj visini modela. Ovaj model približno odgovara topologiji velikih putničkih brodova za kružna putovanja. Na toj poziciji bilo je potrebno izbrisati ventilacijske cijevi po dužini broda i povezati čvorove na odgovarajućim pozicijama konačnim elementima u vidu voja. Bilo je potrebno izbrisati odgovarajuće gredne poprečne konačne elemente (compounds) ručno na svim palubama. Pošto analiza čvrstoće broda nije bila relevantna u ovom radu, odnosno iznosi naprezanja nisu bili predmet promatranja, nije rađen proračun za određivanje strukture uzdužne pregrade. Uzdužna pregrada je izrađena od niza vojeva koji teku u uzdužnom smislu. Definiraju se između dva čvora kao pravokutni element s debljinom, ukrepama i poprečnim elementima.



Slika 6 Polovinski MKE model M3

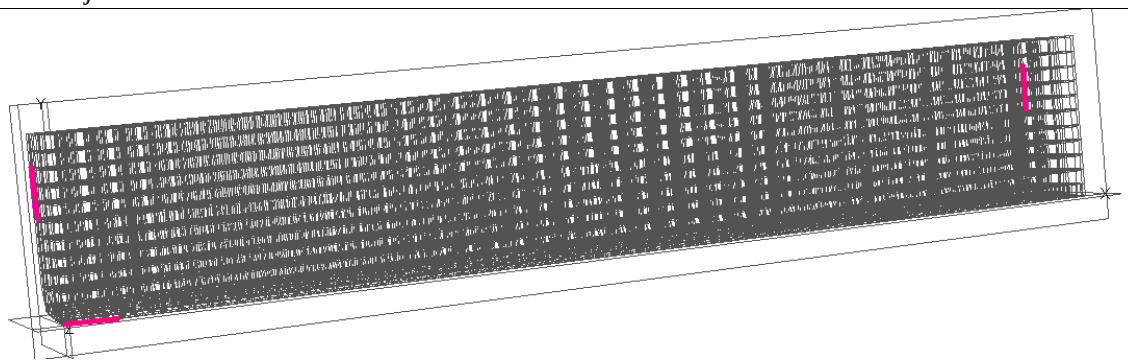
3.2 Rubni uvjeti

Sva tri modela imaju jednake rubne uvjete, a njihov broj je minimalan. Prva grupa rubnih uvjeta služi za sprječavanje neželjenog pomaka konstrukcije kao krutog tijela. Definirani su kao onemogućene translacije u smjeru osi X postavljene u ishodištu i onemogućene translacije u smjeru osi Y postavljene na početku i kraju modela na sjecištu vanjske oplate, poprečne pregrade i oplate palube šest, vidi Tablica 2 i Slika 7.

Budući da rubni uvjeti predstavljaju oslonce postavljaju se u sjecištima jakih strukturnih elemenata kako bi imali što manji utjecaj na odziv konstrukcije. U MEASTRO-u je zapis pomaka šifriran s definiranim vrijednostima kao 0-slobodno i 1-spriječeno.

Tablica 2 Prikaz rubnih uvjeta na modelu

POZICIJA	X	Y	Z	R_X	R_Y	R_Z
x=0, z=B/2	0	1	0	0	0	0
x=L, z=B/2	0	1	0	0	0	0
x=0, z=0	1	0	0	0	0	0



Slika 7 Rubni uvjeti modela

Druga grupa rubnih uvjeta su uvjeti simetrije na uzdužnoj ravnini simetrije. Prilikom izrade polovinskog modela, gdje je nužno druga polovica simetrična, program automatski zada rubne uvjete simetrije, vidi Tablica 3.

Rubni uvjeti simetrije su sljedeći:

- pomak u smjeru osi X je slobodan
- pomak u smjeru osi Y je slobodan
- pomak u smjeru osi Z je spriječen
- zakret oko osi X je spriječen
- zakret oko osi Y je spriječen
- zakret oko osi Z je slobodan

Tablica 3 Rubni uvjeti simetrije

X	Y	Z	R_X	R_Y	R_Z
0	0	1	1	1	0

3.3 Implementacija opterećenja

Klasifikacijska društva daju različite smjernice za postupak implementacije valnog opterećenja. U općenitom smislu propisuju zadavanje vertikalnih čvornih sila po oplakanoj površini na čvorove modela s konačnim elementima.

Prema *Lloyd's Register-u* [2] se distribuirano kontinuirano opterećenje zadaje na model s konačnim elementima kao vertikalne čvorne sile po vanjskoj oplati, svaki razmak okvira koliko god je moguće (ograničenje je diskretizacija konačnih elemenata, gustoća mreže). No, ne isključuju i uporabu drugačije implementacije. Za provjeru točnosti postupka zadavanja

čvornih sila u [4] treba se zadovoljiti jednakost ukupnog vertikalnog valnog momenta savijanja generiranog iz čvornih sila i izračunatog prema pravilima registra (3).

Za primjer klasifikacijsko društvo *Det Norske Veritas (DNV)* [3] zahtjeva implementaciju projektnog opterećenja na MKE model bez detaljnih uputa, ne ograničava na koje sve čvorove oplakane površine zadati sile. Međutim dozvoljava i upotrebu alternativne metode kojom se implementirano linijsko opterećenje dobije kao druga derivacija momenta savijanja. Zadaje se na čvorove boka i/ili čvorove dna kao čvorne sile.

Iz proračuna dobiveno kontinuirano opterećenje (1) zamjenjuje se čvornim vertikalnim silama. Njihov iznos jednak je spomenutom opterećenju pomnoženom s duljinom konačnog elementa. Pri tome treba obratiti pozornost na manje preinake kako bi se osigurala jednakost valnog ukupnog momenta izračunatog prema pravilima i generiranog u programu. Pod time se misli na:

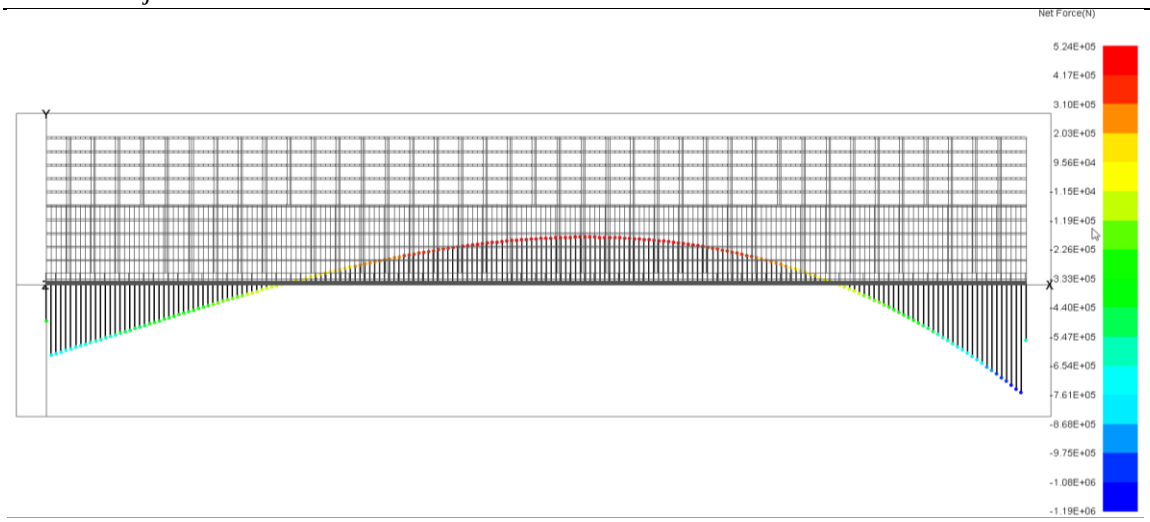
- promjenu predznaka prilikom unošenja sila u program jer je pregib definiran kao negativan
- dijeljenje ukupne čvorne sile na određenoj poziciji po X osi s dva jer je izrađen polovinski model, pa je i opterećenje upola manje

$$F_2 = P_1(x = 0,005) \cdot \frac{d}{2}$$
$$F_3 = P_1(x = 0,01) \cdot \frac{d}{2} \qquad \textbf{(11)}$$
$$F_{n-1} = P_1(x = 0,995) \cdot \frac{d}{2}$$

- dijeljenje sile na početku i kraju modela s još dva jer opterećenje djeluje samo na pola duljine konačnog elementa

$$F_1 = P1(0) \cdot \frac{d}{4}$$
$$F_n = P1(1) \cdot \frac{d}{4} \qquad \textbf{(12)}$$

Čvorne sile dobivene na prethodno opisan način predstavljaju ukupnu vertikalnu silu na određenom presjeku koja ima promjenjivu distribuciju duž modela, vidi Sliku 8. [Slika 8]



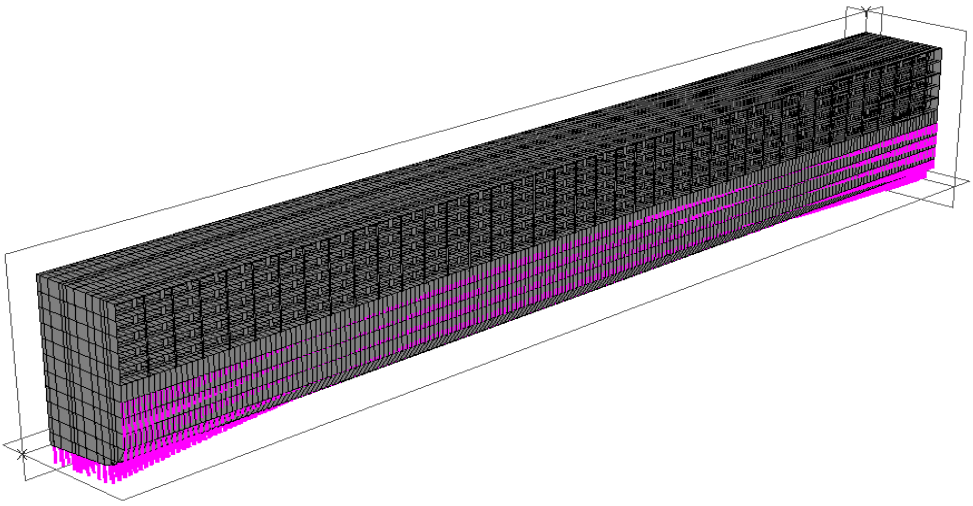
Slika 8 Distribucija ukupnih čvornih sila po duljini broda

Takva sila po pojedinom presjeku se zadaje u MAESTRO MODELER na grupu odabranih čvorova vanjske oplate što rezultira raspodjelom sile na niz čvornih sila, jednakih po iznosu i smjeru, po čvorovima u grupi.

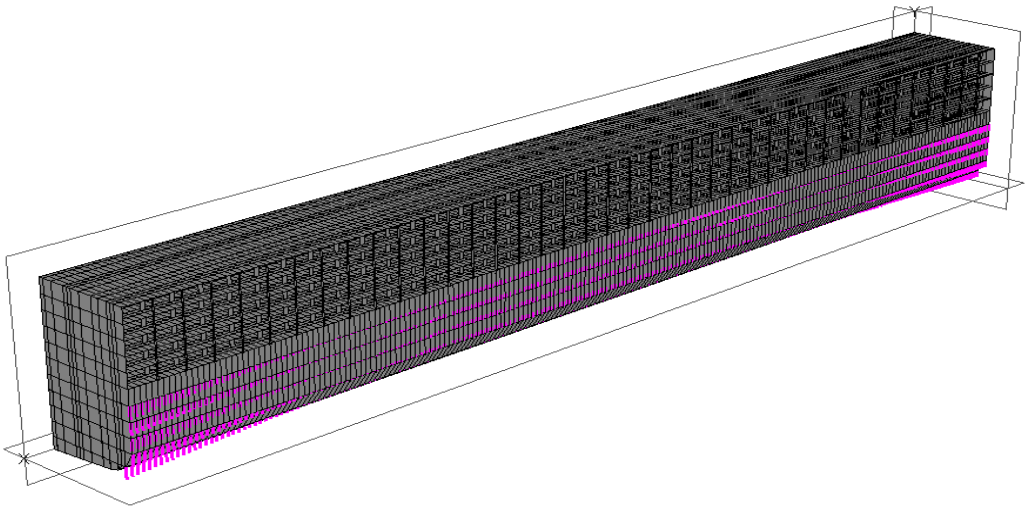
U ovom radu su se zbog ocjene senzitivnosti MKE modela različitih topologija na različito zadavanje valnog opterećenja koristile dvije distribucije čvornih sila. U oba slučaja odabrana je što gušća mreža, pa su čvorne sile postavljene u svakom raspoloživom čvoru po oplakanoj površini. U prvom slučaju su ukupne vertikalne čvorne sile zadane na grupu čvorova koji obuhvaćaju i čvorove po dnu i čvorove po boku te je to stanje opterećenja imenovano „Glall (Global load-all)“, Slika 9

Dok su u drugom slučaju čvorne sile zadane samo na grupu čvorova po boku pod imenom „Glside (Global load-side)“, Slika 10

Za zadavanje čvornih sila na grupe čvorova po duljini modela korišten je program 3D VIEW [5] razvijen na FSB-u.



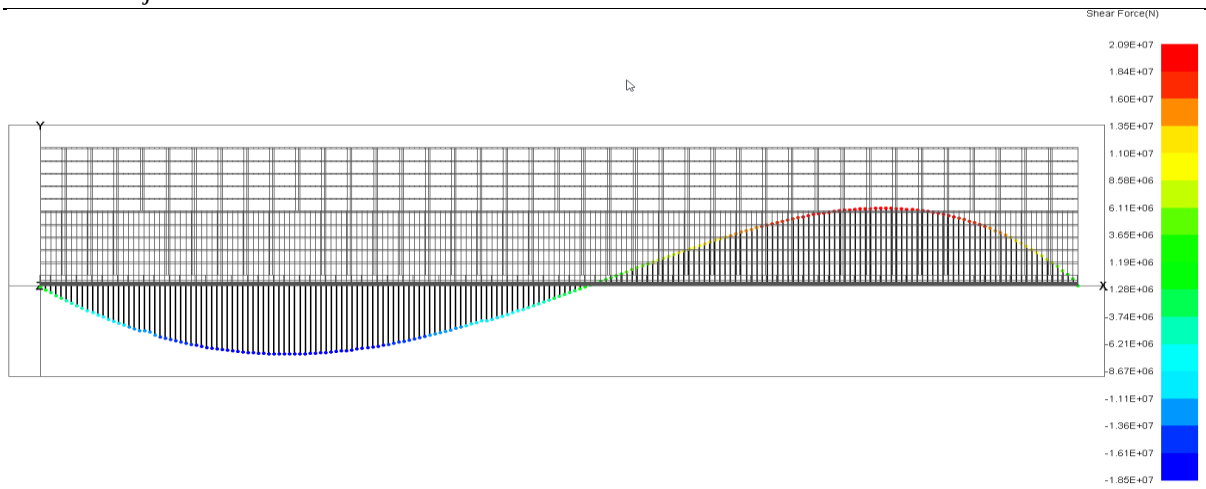
Slika 9 Prikaz stanja opterećenja „Glall“



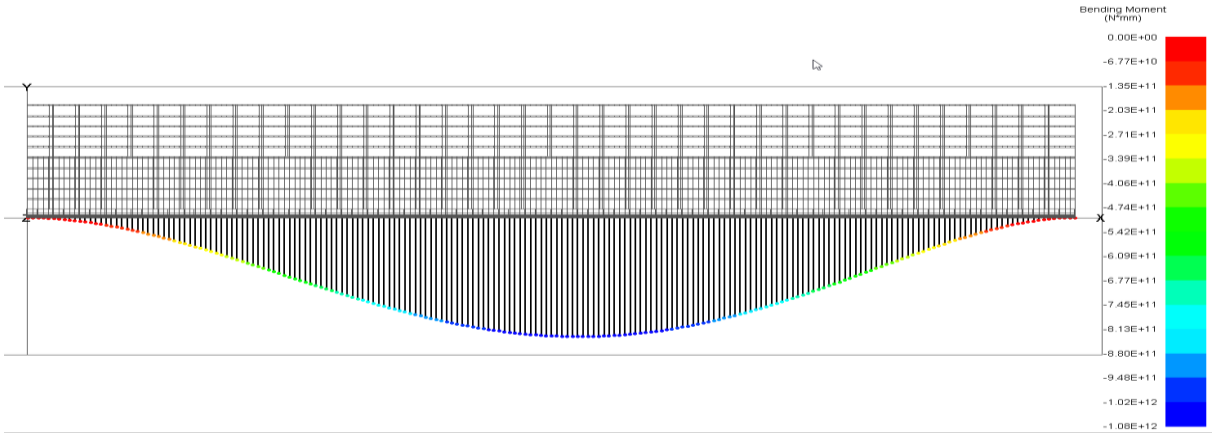
Slika 10 Prikaz stanja opterećenja „Glside“

Program MAESTRO [4] generira na osnovu definiranih čvornih sila distribuciju vertikalne poprečne sile i vertikalnog globalnog valnog moment duž broda, vidi Slika 11 i Slika 12.

Oni odgovaraju izrazima (2) i (3) prema Pravilima.



Slika 11 Distribucija poprečne sile generirane u programu MAESTRO za stanje pregiba



Slika 12 Distribucija momenta savijanja generiranog u programu MAESTRO za stanje pregiba

4. ANALIZA REZULTATA

Nakon izgradnje modela, implementacije opterećenja i definiranih rubnih uvjeta provedena je linearno statička MKE analiza u programu MAESTRO.

4.1 Analiza distribucije σ_x naprezanja po visini trupa borda

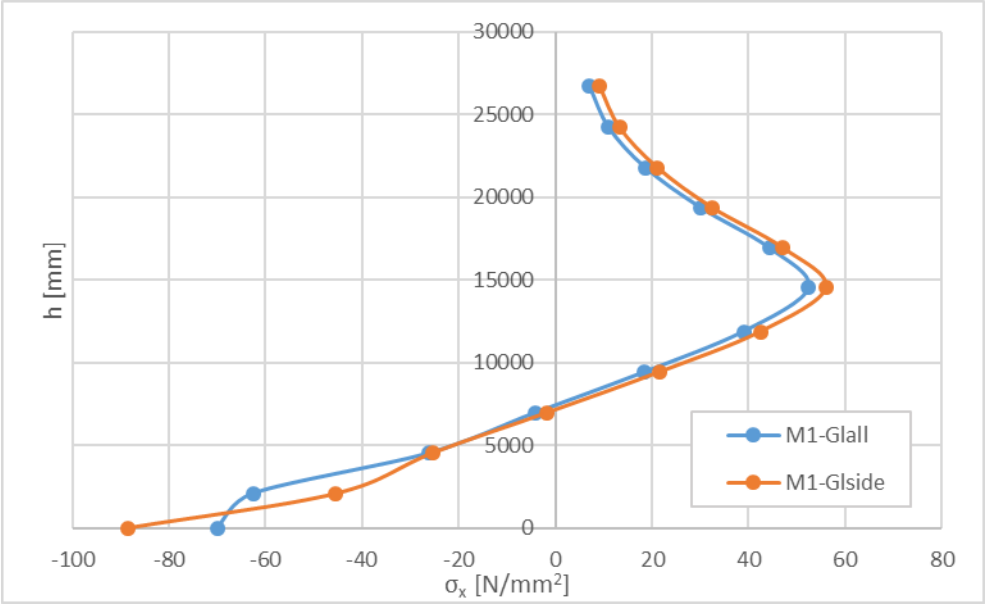
U sljedećoj analizi rezultata provedena je usporedba normalnih uzdužnih naprezanja ovisna o dvije različite implementacije opterećenja. Za analizu, odabrane su dvije uzdužne pozicije, poprečni presjek glavnog rebra i poprečni presjek koji odgovara rebru 75. Na oba presjeka očitana su normalna naprezanja, σ_x, u težištu elementa na tri pozicije po širini modela:

a) u ravnini simetrije

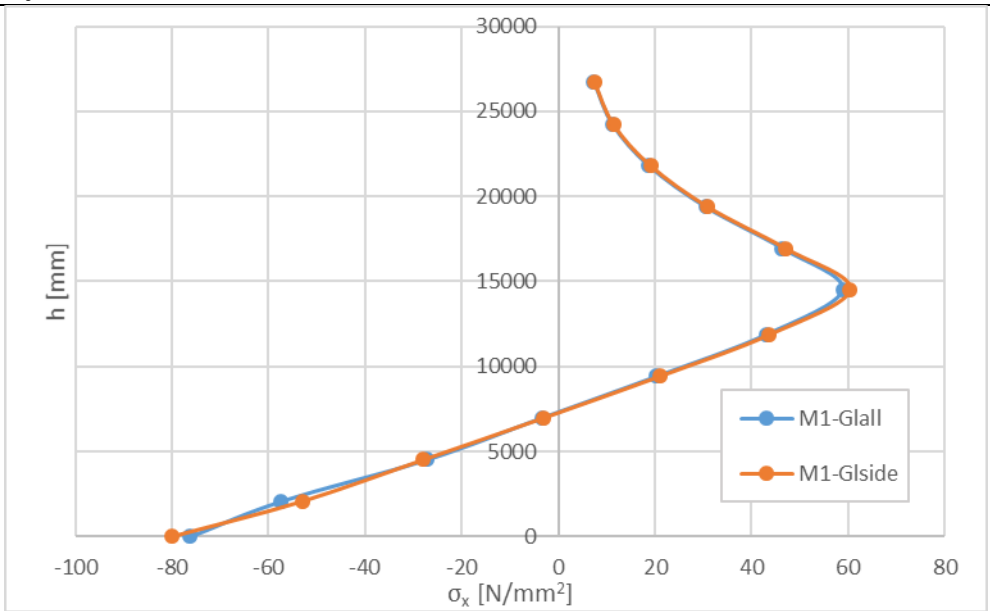
b) na polovini poluširine (7,775 m)

c) na neposrednoj blizini boka (14,775 m)

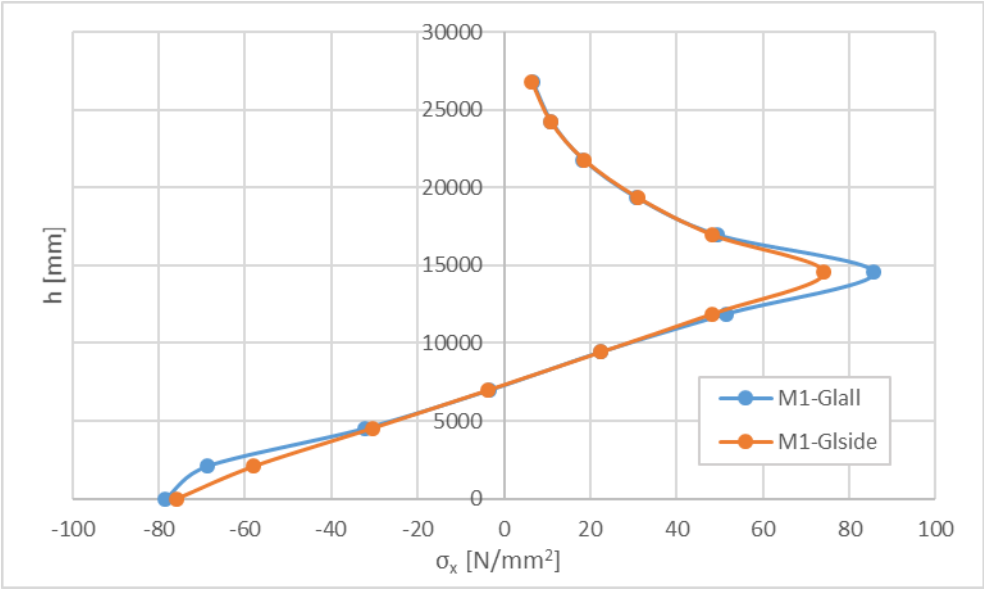
Rezultati su prikazani za sva tri razmatrana modela (M1, M2 i M3) u dijagramima koji su priloženi u nastavku, ali samo za očitanja na uzdužnoj poziciji glavnog rebra jer nisu uočene bitne razlike u analizi na uzdužnoj poziciji rebra 75. Na pojedinom dijagramu prikazane su dvije krivulje distribucije normalnog uzdužnog naprezanja, σ_x, po visini modela za isti model i poziciju po širini modela, ali za različite raspodjele opterećenja, „Glall“ i „Glside“.



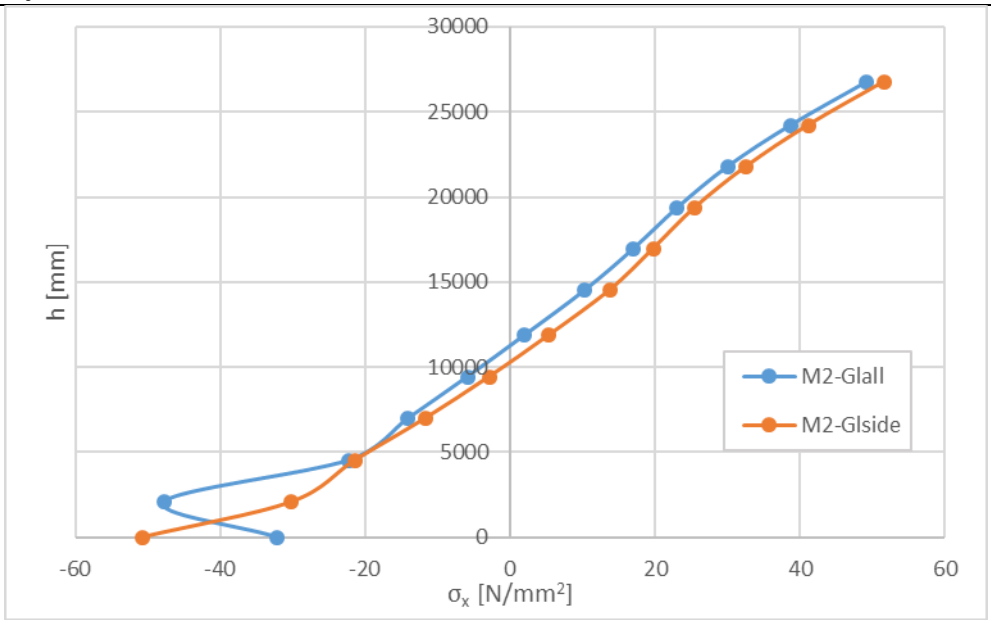
Slika 13 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M1 modela na glavnom rebru, na poziciji CL



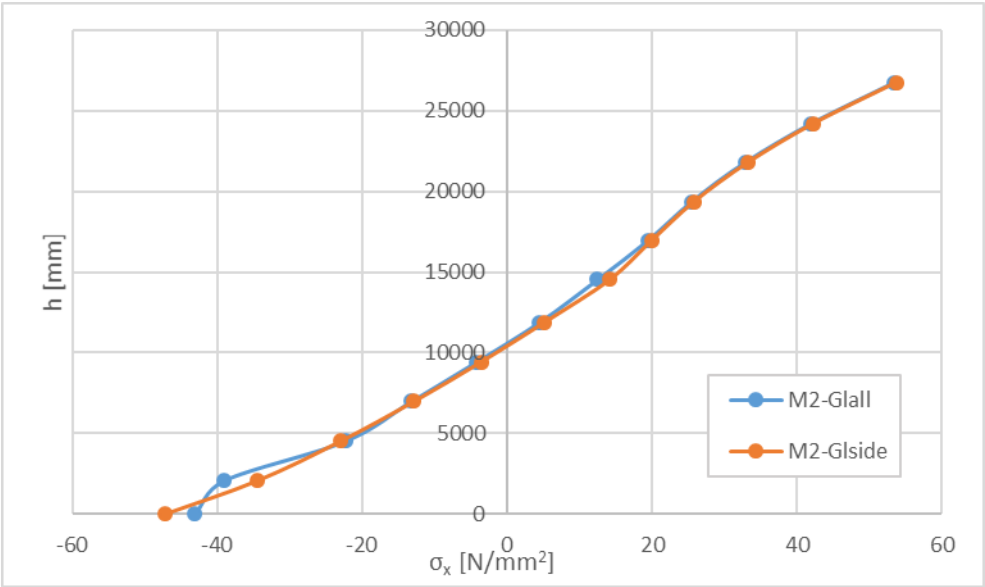
Slika 14 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M1 modela na glavnom rebru, na poziciji B/4



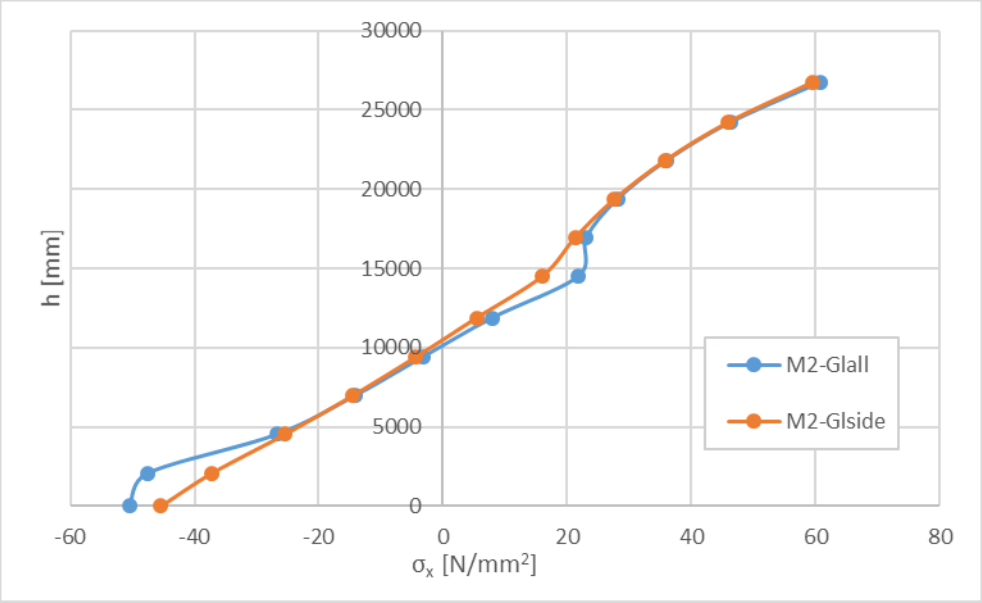
Slika 15 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M1 modela na glavnom rebru, na poziciji B/2



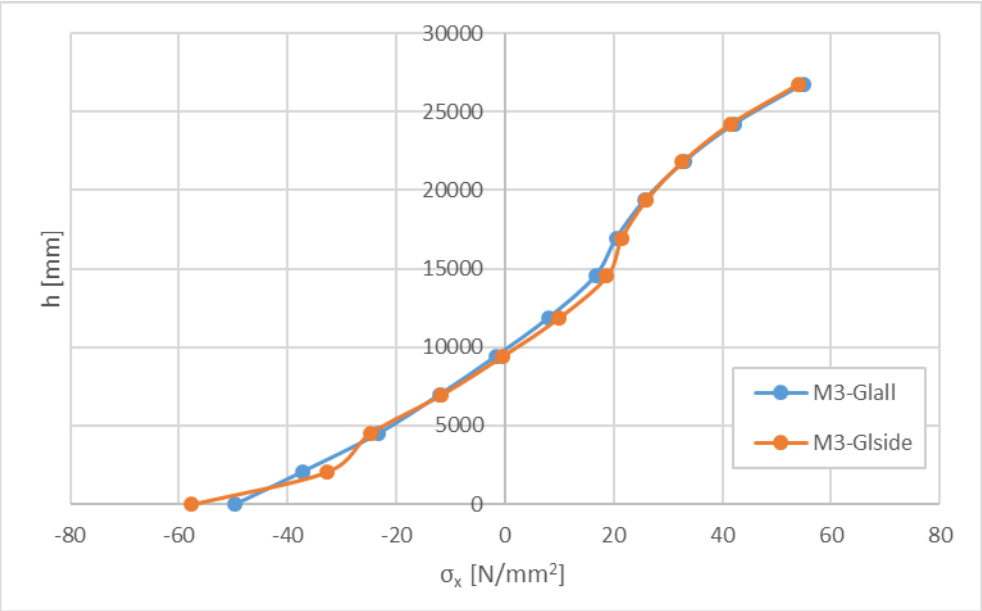
Slika 16 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M2 modela na glavnom rebru, na poziciji CL



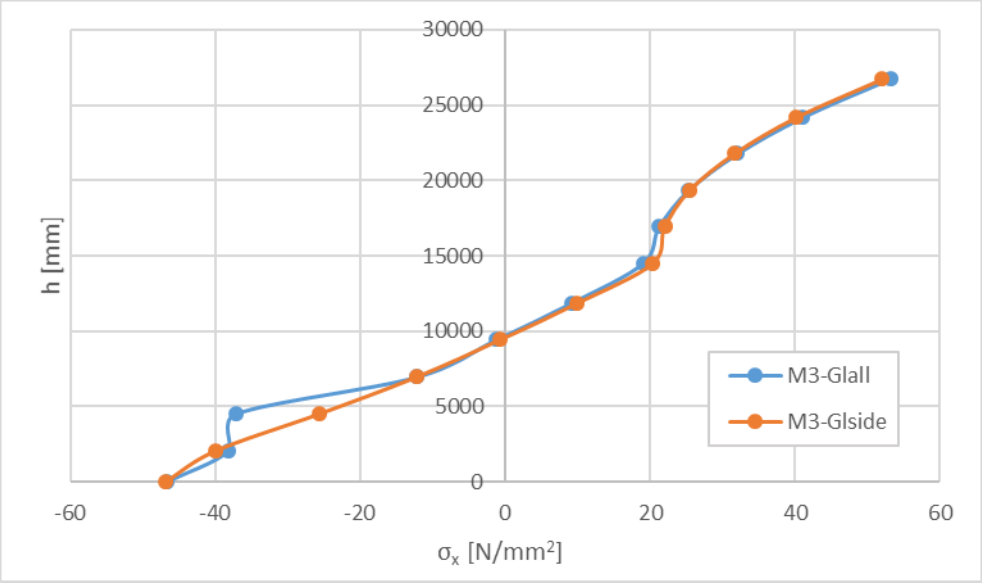
Slika 17 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M2 modela na glavnom rebru, na poziciji B/2



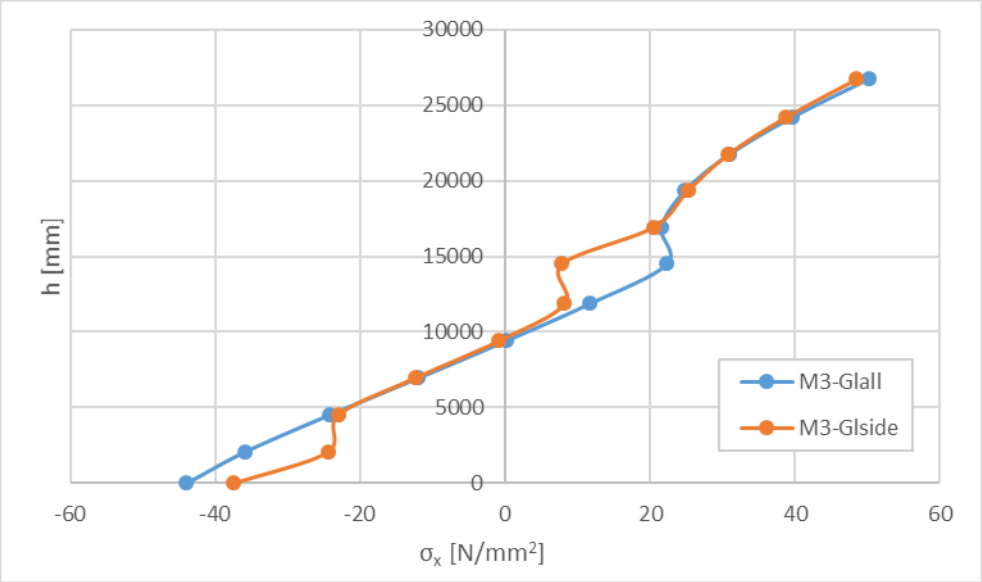
Slika 18 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M2 modela na glavnom rebru, na poziciji B/4



Slika 19 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M3 modela na glavnom rebru, na poziciji CL



Slika 20 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M3 modela na glavnom rebru, na poziciji B/2



Slika 21 Raspodjela σ_x naprezanja po visini M3 modela na glavnom rebru, na poziciji B/4

Iz prezentiranih dijagrama je vidljivo da se krivulje distribucije ne razlikuju puno. Jednako se naprezanja prenose do najgornjih paluba za dva različita opterećenja. Pa se može zaključiti da globalni odziv i ponašanje sva tri modela nisu senzitivni na različitu diskretizaciju implementiranog valnog opterećenja.

U sljedećim tablicama prikazani su iznosi istih očitanih naprezanja po tri odabrane visine, na palubi 1, 6 i 11 i u ovisnosti o dvije različite implementacije opterećenja. U pojedinoj tablici prikazani rezultati se odnose na jedan određeni model i jednu odabranu poziciju.

Razlike između očitanih uzdužnih, σ_x, naprezanja za opterećenja „Glall“ i „Glside“ izražene su u postotku.

$$\Delta\sigma_x = \frac{\left|\sigma_{x_all} - \sigma_{x_side}\right|}{\left|\sigma_{x_all}\right|} \cdot 100\% \qquad \textbf{(13)}$$

Tablica 4 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M1 na poziciji uzdužne simetralne ravnine (u CL-u)

σ_x [N/ mm^2]	M1-Pozicija CL		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-62,601	-45,433	27,4
Paluba 6	52,459	56,025	6,8
Paluba 11	7,059	9,093	28,8

Tablica 5 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M1 na polovini poluširine (B/4)

σ_x [N/ mm^2]	M1-Pozicija B/4		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-57,383	-53,007	7,6
Paluba 6	58,859	60,436	2,7
Paluba 11	7,303	7,406	1,4

Tablica 6 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M1 u neposrednoj blizini boka (B/2)

σ_x [N/ mm^2]	M1-Pozicija B/2		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-68,856	-58,014	15,7
Paluba 6	85,603	74,128	13,4
Paluba 11	6,591	6,448	2,2

Tablica 7 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M2 na poziciji uzdužne simetralne ravnine (u CL-u)

σ_x [N/ mm^2]	M2-Pozicija CL		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-47,772	-30,196	36,8
Paluba 6	10,344	13,776	33,2
Paluba 11	49,219	51,588	4,8

Tablica 8 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M2 na polovini poluširine (B/4)

σ_x [N/ mm^2]	M2-Pozicija B/4		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-39,05	-34,414	11,9
Paluba 6	12,462	14,198	13,9
Paluba 11	53,462	53,728	0,5

Tablica 9 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M2 u neposrednoj blizini boka (B/2)

σ_x [N/ mm^2]	M2-Pozicija B/2		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-47,526	-37,267	21,6
Paluba 6	21,875	16,01	26,8
Paluba 11	60,867	59,593	2,1

Tablica 10 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M3 na poziciji uzdužne simetralne ravnine (u CL-u)

σ_x [N/ mm^2]	M3-Pozicija CL		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-37,336	-32,726	12,3
Paluba 6	16,647	18,743	12,6
Paluba 11	54,946	54,04	1,7

Tablica 11 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M3 na polovini poluširine (B/4)

σ_x [N/ mm^2]	M3-Pozicija B/4		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-38,213	-39,937	4,5
Paluba 6	19,078	20,401	6,9
Paluba 11	53,167	52,093	2

Tablica 12 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja modela M3 u neposrednoj blizini boka (B/2)

σ_x [N/ mm^2]	M3-Pozicija B/2		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
Paluba 1	-35,901	-24,468	31,8
Paluba 6	22,355	7,879	64,8
Paluba 11	50,151	48,526	3,3

Iz prikazanih rezultata možemo donijeti slijedeće zaključke o relativnoj razlici naprezanja u ovisnosti o načinu zadavanja valnog opterećenja:

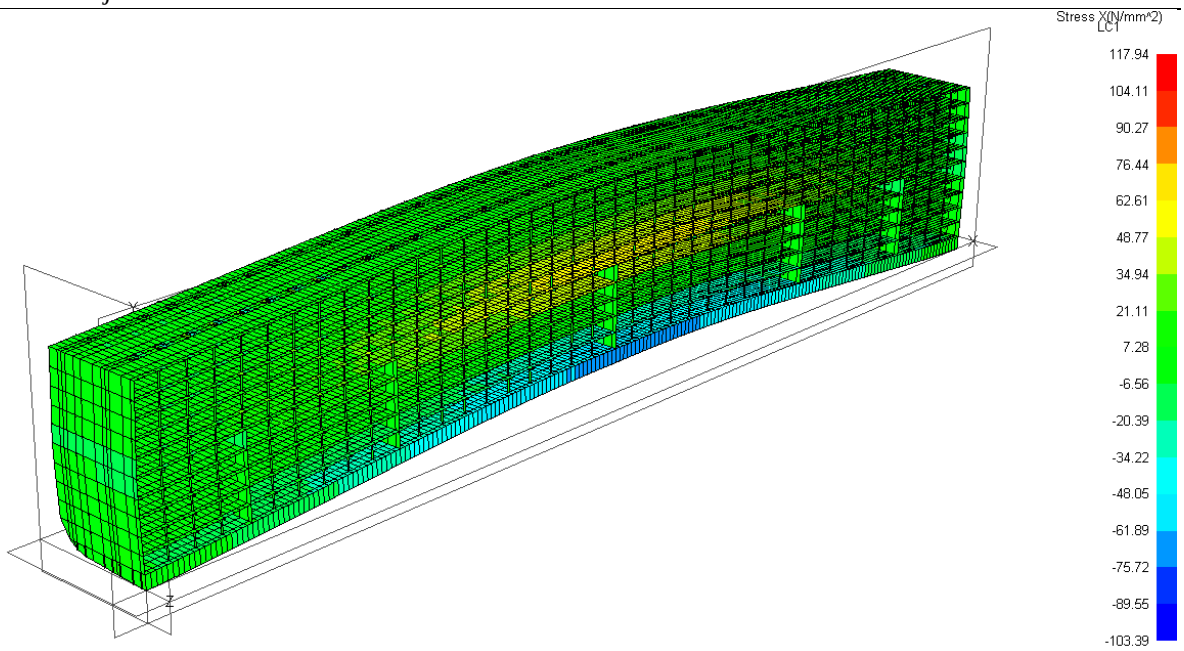
- model M1- na palubi 6, koja je za ovu topologiju paluba najvećih naprezanja, razlika u naprezanjima je od 3 do 13% i najveća je na spoju oplate boka i palube. Najgornja paluba nadgrađa (paluba 11) zbog relativno male razine naprezanja nije relevantna.

- Model M2 i M3- na palubi 11, koja je za obje topologije paluba najvećih naprezanja, razlika u naprezanjima je ispod 5%. Najgornja paluba trupa (paluba 6) zbog relativno male razine naprezanja nije relevantna iako ima veliku razliku u naprezanjima.

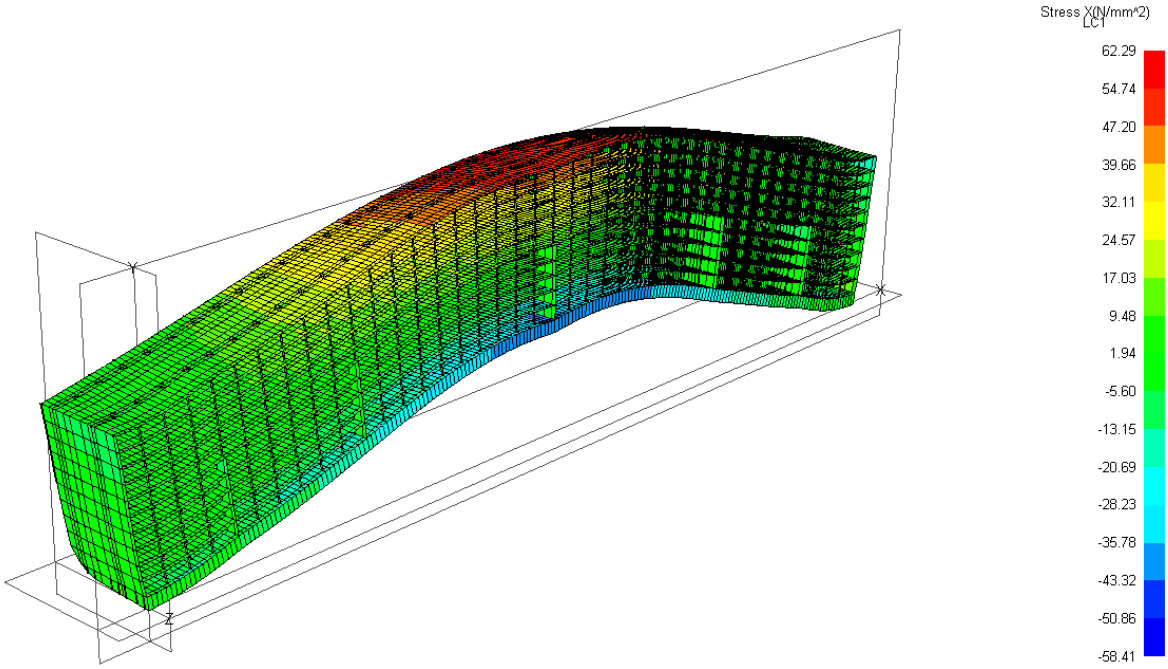
Za sve modele primjećuju se najznačajnije razlike u naprezanjima na visini pokrova dvodna. Takav skok u naprezanju događa se zbog sekundarnog odziva roštilja dvodna uslijed opterećenja po oplati dna za opterećenje tipa „Glall“ dok sekundarni odziv kod opterećenja „Glside“ izostaje. Čvorne sile zadane i po dnu modela lokalno savijaju dvodno između poprečnih pregrada. Na tim mjestima zbrajaju se primarno naprezanje sa sekundarnim (uslijed savijanja roštilja dvodna) te dobijemo ukupno normalano naprezanje. Ta pojava najvidljivija je na sredini broda gdje su čvorne sile najveće po iznosu. Sekundrani odziv djeluje na dno modela neposredno uz poprečnu pregradu na način da ga vlačno opterećuje što smanjuje ukupno naprezanje na dnu jer je naprezanje uslijed globalnog savijanja tlačno opterećenog dna negativno, vidi Slika 16.

Treba uzeti u obzir da valno opterećenje koje je jedino promatrano u ovom radu čini samo jednu od tri komponente opterećenja koje se implementira na MKE modele. Kao zadnje od tri opterećenja se na model implementira još i lokalno opterećenje valnog brijega, u slučaju pregibnog projektnog vala, i valnog dola, u slučaju progibnog projektnog vala. Za objašnjenje uzet je pregibni projektni val. Na model se po cijeloj duljini broda implementira opterećenje uslijed tlaka visine valnog brijega. Maksimalna visina vala distribuira se duž broda kako bi se nestacionaran val ipak mogao zadati na model kao stacionaran s maksimalnim iznosom što posljedično prouzročuje najveća naprezanja.

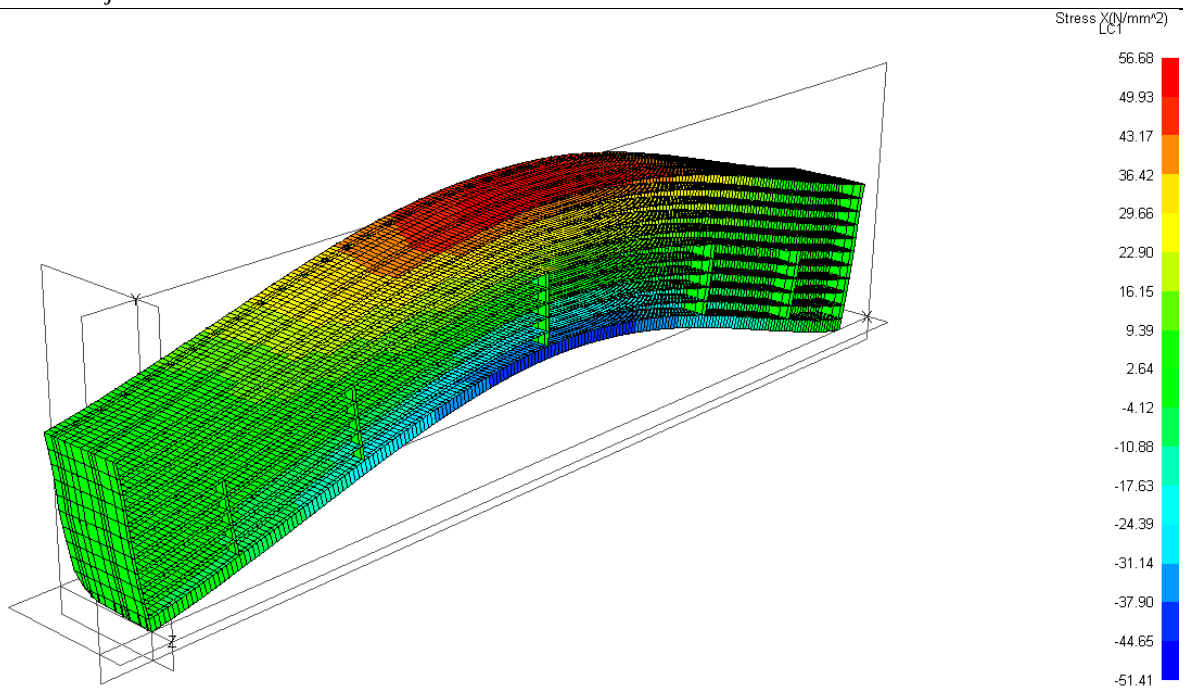
Slijedi da bi se u prvom opisanom slučaju opterećenja, „Glall“, tlak zadan i na dno u idućem koraku projektnog postupka zbrojio s lokalnim opterećenjem valnog brijega što bi moglo prouzročiti prevelik, za stvarnu konstrukciju, nerealan sekundarni odziv odn. posljedično dovesti i do predimenzioniranja strukturnih elemenata dna.



Slika 22 Prikaz σ_x naprezanja modela M1 za slučaj „Glall“



Slika 23 Prikaz σ_x naprezanja modela M2 za slučaj „Glall“



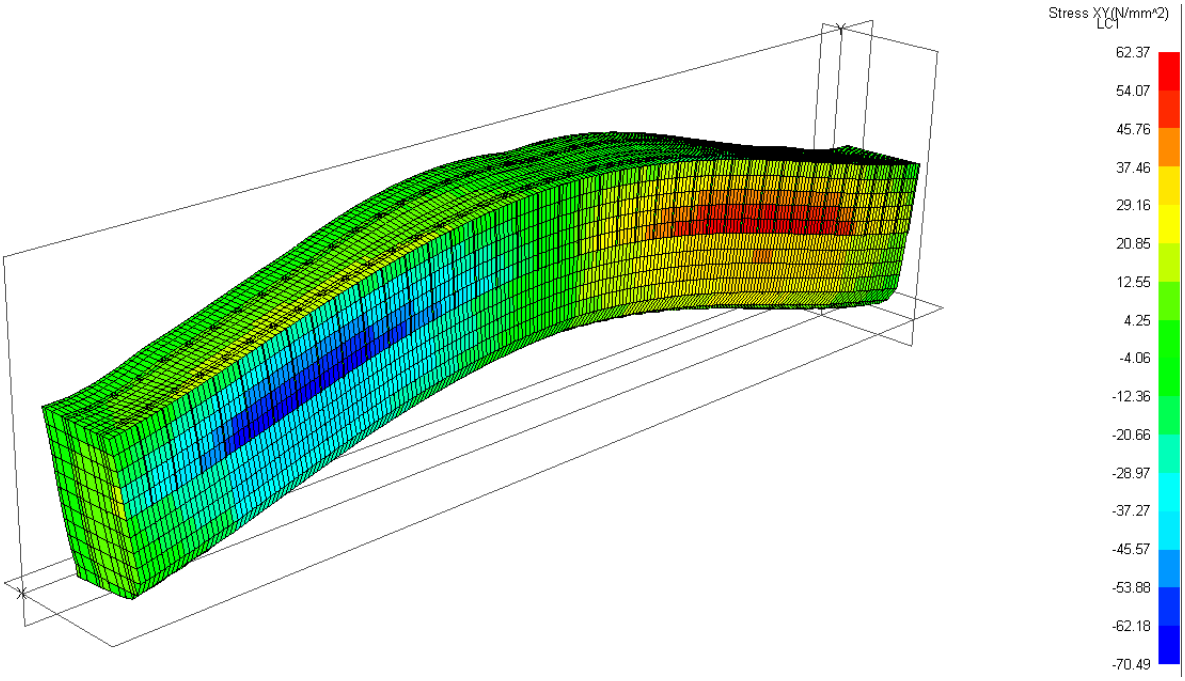
Slika 24 Prikaz σ_x naprezanja modela M3 za slučaj „Glall“

U prethodnim slikama jasno se vidi doprinos paluba uzdužnoj čvrstoći. Na modelu M1, paluba čvrstoće je paluba šest. Uzdužna naprezanja po visini rastu i na palubi šest postižu najveće vrijednosti. Nakon te visine ona značajno padaju tako da najgornja paluba samo djelomično sudjeluje u uzdužnoj čvrstoći broda. Razlog tome je nepostojanje oplate boka broda između palube 6 i palube 11 (cijelom visinom nadgrađa). To uzrokuje izrazito smanjenu smičnu krutost te posljedično vrlo malo sudjelovanje nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda.

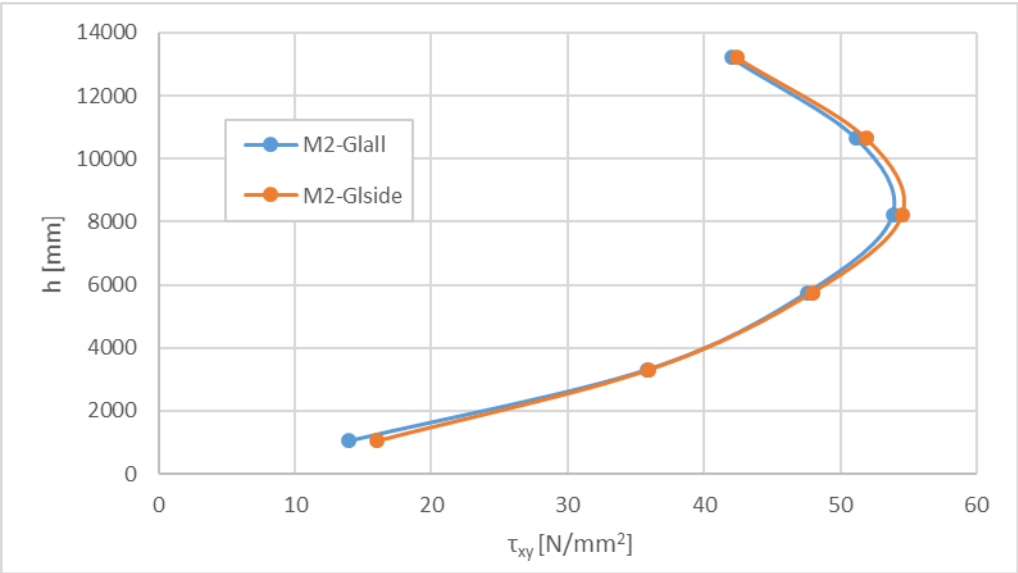
Za razliku od modela M1, modeli M2 i M3 imaju gotovo linearnu distribuciju uzdužnih naprezanja po visini zbog uzdužnih struktura koje se rasprostiru od dna do vrha modela. Normalna naprezanja proporcionalno rastu s visinom do najgornje palube gdje su naprezanja najveća po iznosu. Najgornja paluba jedanaest je ujedno i paluba čvrstoće kod modela M2 i M3. Za model M2 zbog postojanja zatvorenog boka cijelom visinom broda gornje palube nadgrađa su čvrsto spojene s trupom te „snažno“ sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći broda. Slična stvar je i s modelom M3 koji od palube 6 do palube 11 umjesto boka ima jaku uzdužnu pregradu koja povezuje palube nadgrađa i trup broda te prisiljava nadgrađe da slijedi zakrivljenost trupa te „snažno“ sudjeluje u uzdužnoj čvrstoći.

4.2 Analiza distribucije smičnih naprezanja

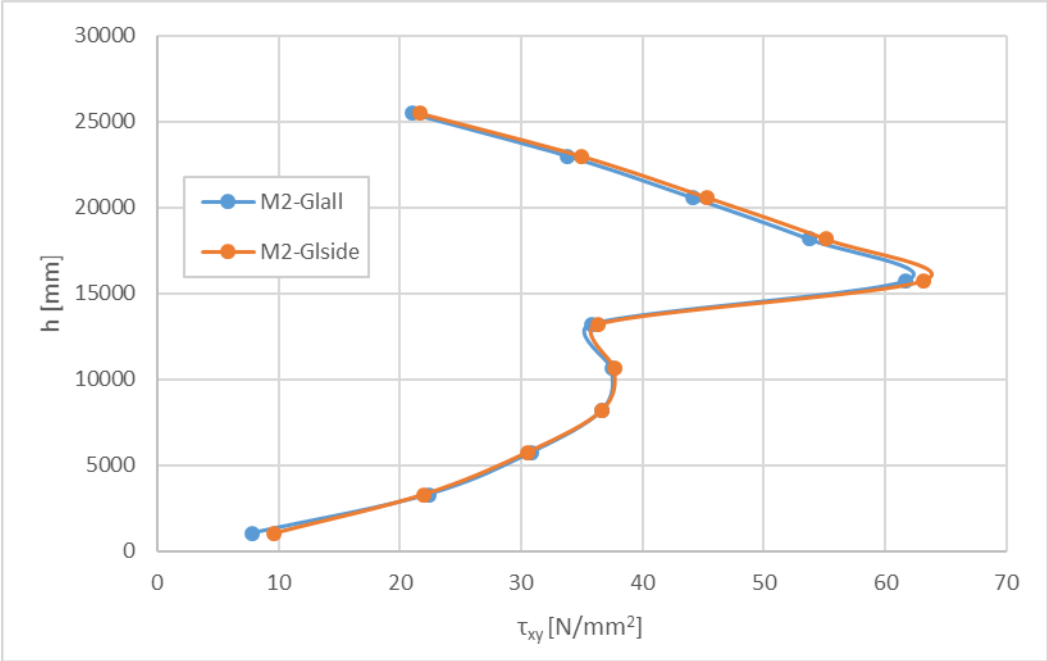
Analiza je provedena očitavanjem vrijednosti smičnih naprezanja u težištu konačnih elemenata koji teku uzdužno, na oplati boka i/ili uzdužnoj pregradi, za dva stanja opterećenja. Smično naprezanje očitano je tamo gdje je najveće i pozitivno, na četvrtini modela. Analogno tome maksimum postiže i na duljini od ¾, ali je tamo negativnog predznaka. To se lijepo vidi na Slika 25 gdje su maksimalne negativne vrijednosti prikazane tamno plavom bojom, a pozitivne maksimalne vrijednosti crvene boje. Smično naprezanje je minimalno u središtu modela, na glavnom rebru, jer je tamo poprečna sila jednaka nuli.



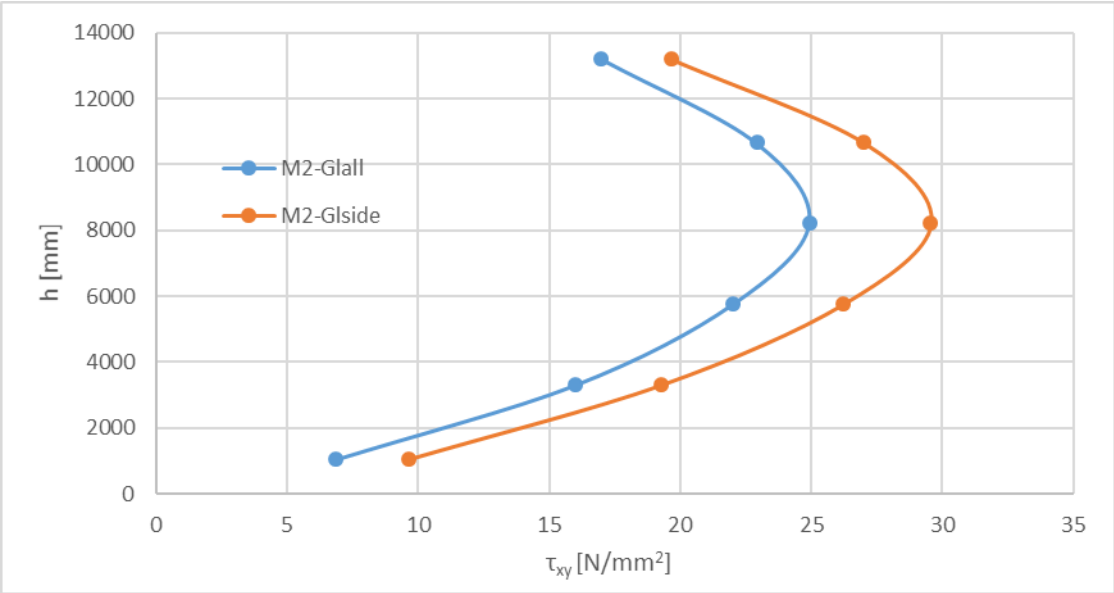
Slika 25 Smična naprezanja na modelu M2 za slučaj „Glall“



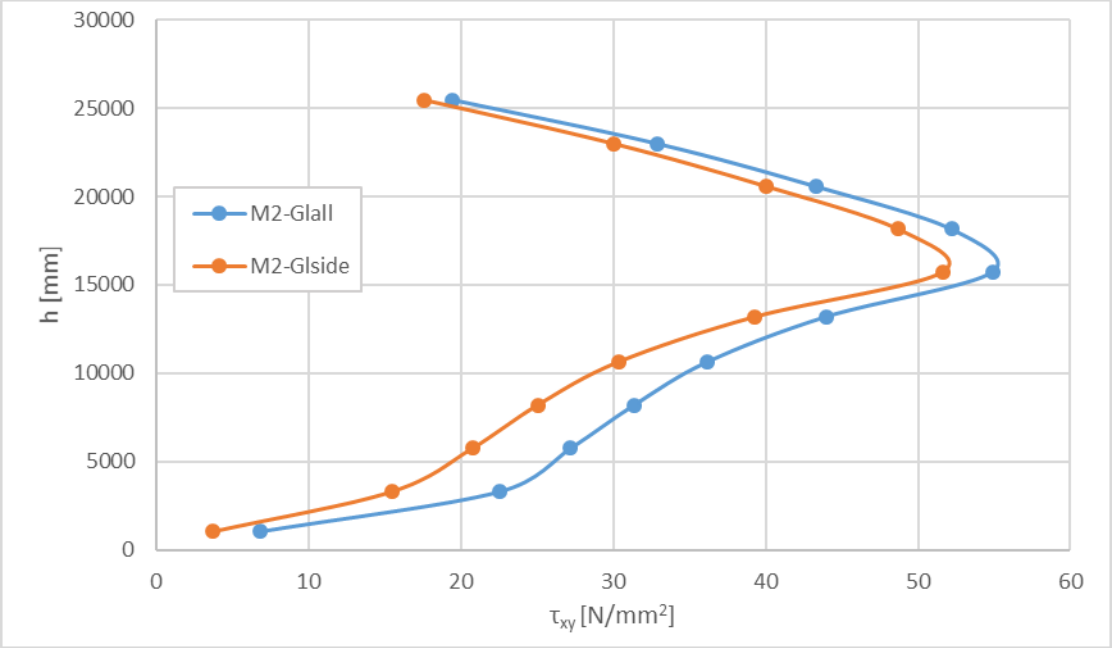
Slika 26 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M1 na boku



Slika 27 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M2 na boku



Slika 28 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M3 na boku



Slika 29 Distribucija smičnih naprezanja po visini modela M3 na uzdužnoj pregradi

Iz prethodnih dijagrama prikazana je ovisnost smičnog naprezanja po visini, pa se na apscisi nalazi smično naprezanje τ_{xy}, a na ordinati udaljenost od osnovice *h*. Vidljivo je da se za modele M1 i M2 za dva različita opterećenja dobije gotovo jednaka distribucija smičnih naprezanja, Slika 26 i Slika 27.

Tablica 13 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M1 po boku

τ_{xy} [N/ mm^2]	M1-Pozicija bok		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\ \tau_{xy}$, %
Y=1040 m	13,918	16,012	15
Y=3305 m	35,804	35,965	0,4
Y=8205 m	53,855	54,521	1,2
Y=13205 m	42,018	42,434	1

Tablica 14 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M2 po boku

τ_{xy} [N/ mm^2]	M2-Pozicija bok		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\ \tau_{xy}$, %
Y=1040 m	7,821	9,665	23,6
Y=3305 m	22,372	22,014	1,6
Y=15740 m	61,716	63,176	2,4
Y=25480 m	21,005	21,7	3,3

Tablica 15 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M3 po boku

τ_{xy} [N/ mm^2]	M3-Pozicija bok		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\ \tau_{xy}$, %
Y=1040 m	6,869	9,613	39,9
Y=3305 m	16,007	19,268	20,4
Y=8205 m	24,923	29,553	18,6
Y=25480 m	16,992	19,647	15,6

Tablica 16 Usporedba raspodjele smičnih naprezanja modela M3 po uzdužnoj pregradi

τ_{xy} [N/ mm^2]	M3-Pozicija LGBH		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\ \tau_{xy}$, %
Y=1040 m	6,7934	3,701	45,5
Y=3305 m	22,548	15,456	31,5
Y=15740 m	54,906	51,593	6,03
Y=25480 m	19,443	17,552	9,7

Prema vrijednostima danim u tablicama moguće je zaključiti da je u svakom modelu najveća razlika očitanog smičnog naprezanja u konačnom elementu najbliže dnu. Međutim u modelima M1 i M2 već se u očitanom naprezanju idućeg elementa po visini vrijednosti približe i ne prelaze razliku od 2%. Neznatne razlike smičnih naprezanja za model M1 i M2

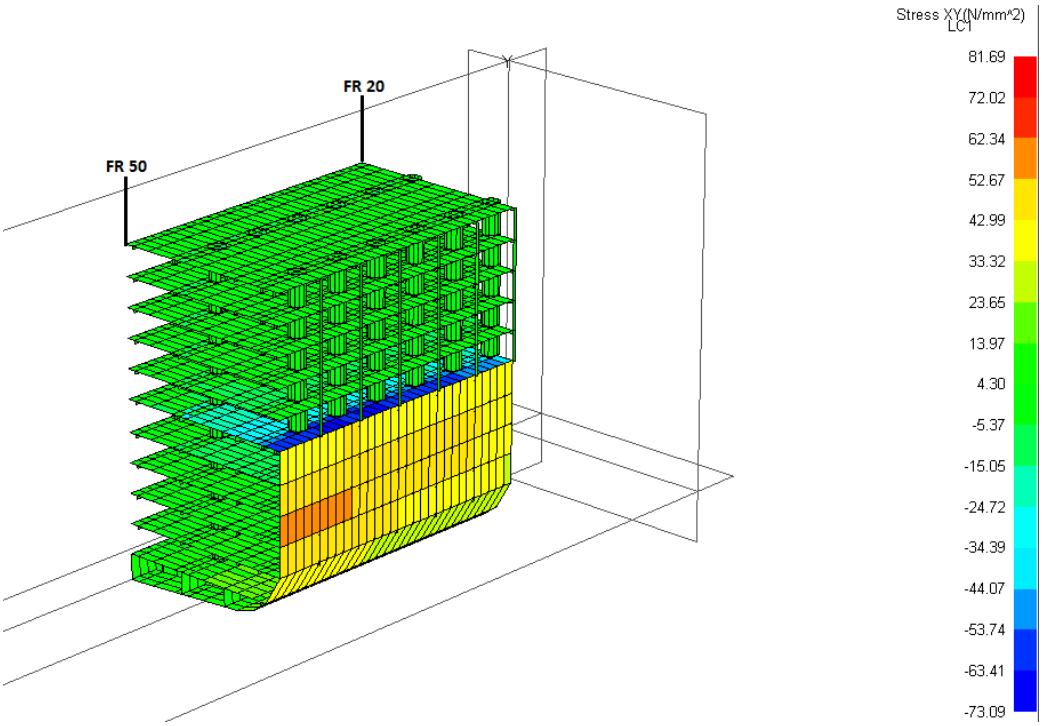
po cijeloj visini boka, izuzev visine u neposrednoj blizini dna, ne prelaze 4% što je zanemarivo malo na utjecaj globalne čvrstoće trupa, Tablica 13 i Tablica 14.

Međutim, na modelu M3 vidi se utjecaj različitog zadavanja opterećenja na model. Iako krivulje imaju jednake trendove, po iznosima se bitno razlikuju od 16-20% na boku i od 10-32% na uzdužnoj pregradi, Tablica 15 i Tablica 16Slika 29. Ekvivalentno prethodnoj prikazanoj analizi normalnih uzdužnih, σ_x, naprezanja, smična naprezanja u neposrednoj blizini dna zbog relativno male razine naprezanja nisu relevantna iako imaju veliku razliku u naprezanjima.

Takve razlike su bile očekivane jer su u prvom slučaju opterećenja, „Glall“, vertikalne čvorne sile su zadane i po dnu, odn. izravno djeluju na uzdužnu pregradu, pa ona preuzme više smičnih sila u odnosu na drugo zadano opterećenje, „Glside“, gdje se ona posljedično pregibne s ostatkom modela zbog sila po boku.

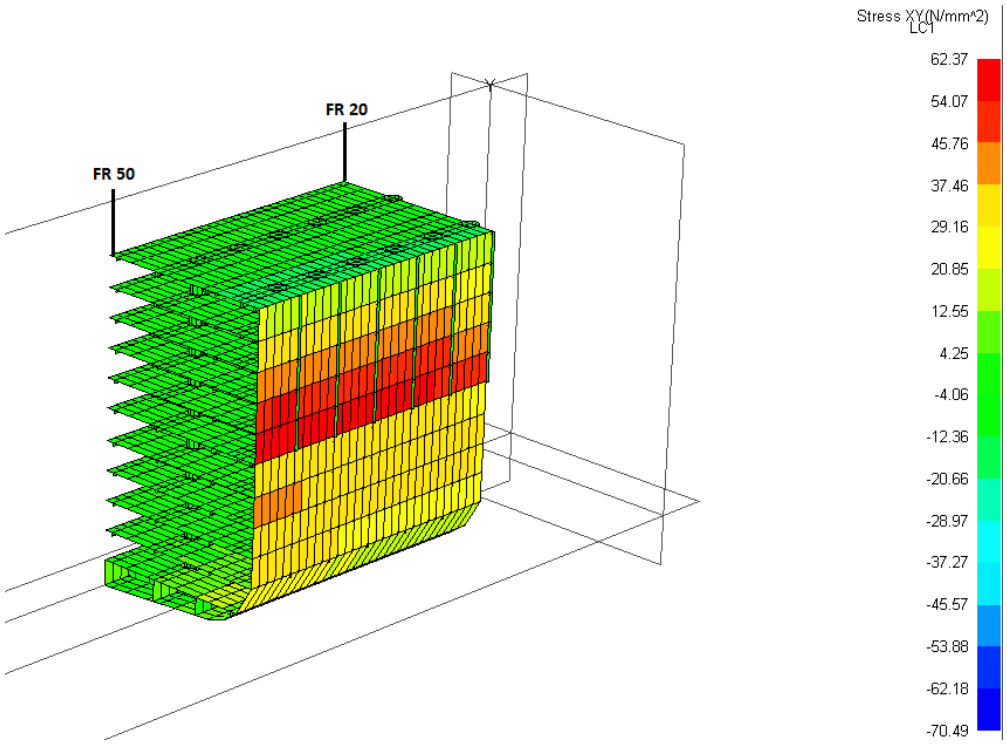
Smična naprezanja najvećim dijelom preuzimaju vertikalni konstrukcijski elementi koji teku uzdužno, odn. na brodu u cjelini su to bok, dvobok i uzdužne pregrade.

Na modelu M1 najviše smične sile preuzima zatvoren bok jer je to jedini dio konstrukcije koji se pruža u udzužnom smislu. Dio smičnog naprezanja preuzima i paluba šest koja je paluba čvrstoće. Po širini na palubi je smik najveći u blizini boka modela, a opada prema sredini modela i u ravnini simetrije jednak je nuli, Slika 30.



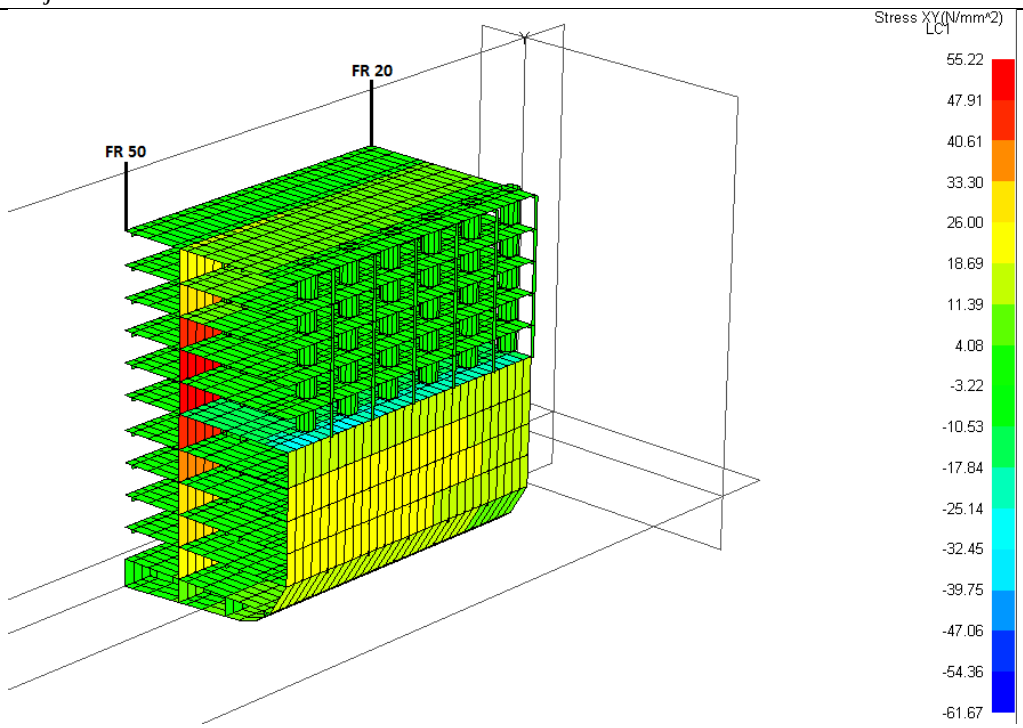
Slika 30 Prikaz smičnih naprezanja jednog modula MKE modela M1 za slučaj „Glall“

Kod modela M2 smik preuzima samo bok. Zbog toga su naprezanja i nešto veća u odnosu na naprezanja po boku modela M1. Skok u naprezanju nastao je zbog različite debljine oplate boka. Do palube šest oplata je deblja u odnosu na oplatu od palube šest do gornje palube jedanaest, Slika 31.



Slika 31 Prikaz smičnih naprezanja jednog modula MKE modela M2 za slučaj „Glall“

Za razliku od prošla dva modela, model M3 ima najviše elemenata koji preuzimaju smik. To su zatvoren bok, uzdužna pregrada te s manjim doprinosom i paluba šest, Slika 32.



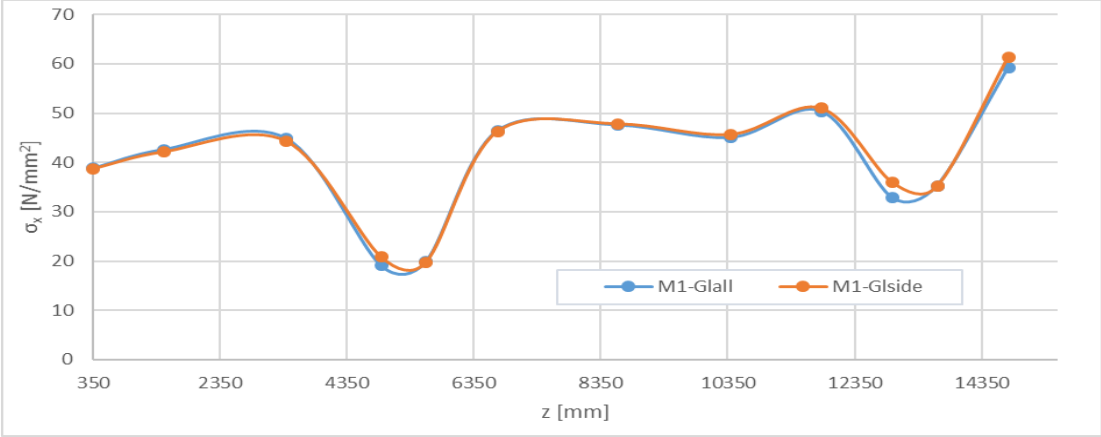
Slika 32 Prikaz smičnih naprezanja jednog modula MKE modela M1 za slučaj „Glall“

4.3 Analiza naprezanja po širini trupa broda

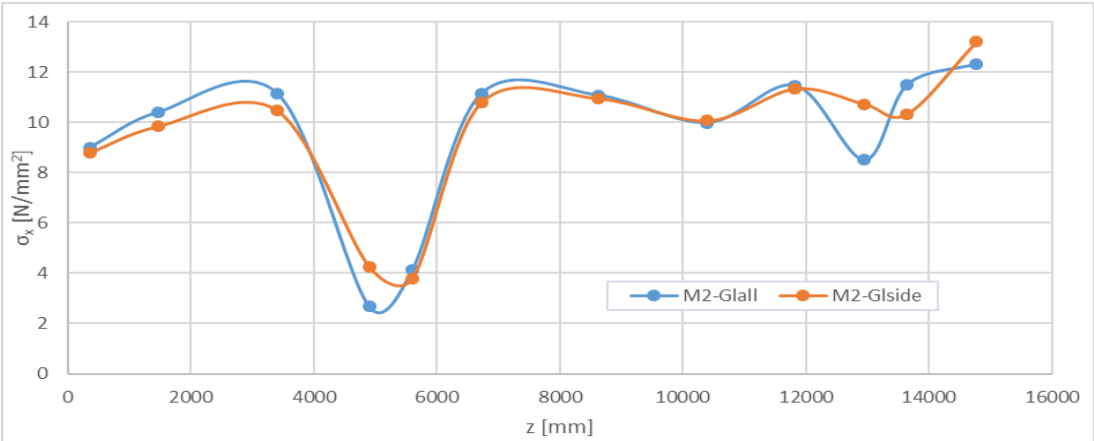
Analiza normalnih uzdužnih naprezanja provedena je i po širini modela s željom provjere utjecaja implementacija opterećenja na očekivanu distribuciju naprezanja. Naime, normalno naprezanje uobičajeno raste prema bokovima modela što je poznato pod nazivom eng. *shear lag* [6]. Uzrok tome je upliv smičnog naprezanja na normalna naprezanja. Smik povećava naprezanja σ_x postupno prema mjestu gdje je najizraženiji, odn. prema boku modela.

Ta pojava može se uočiti i na sljedećim grafikonima.

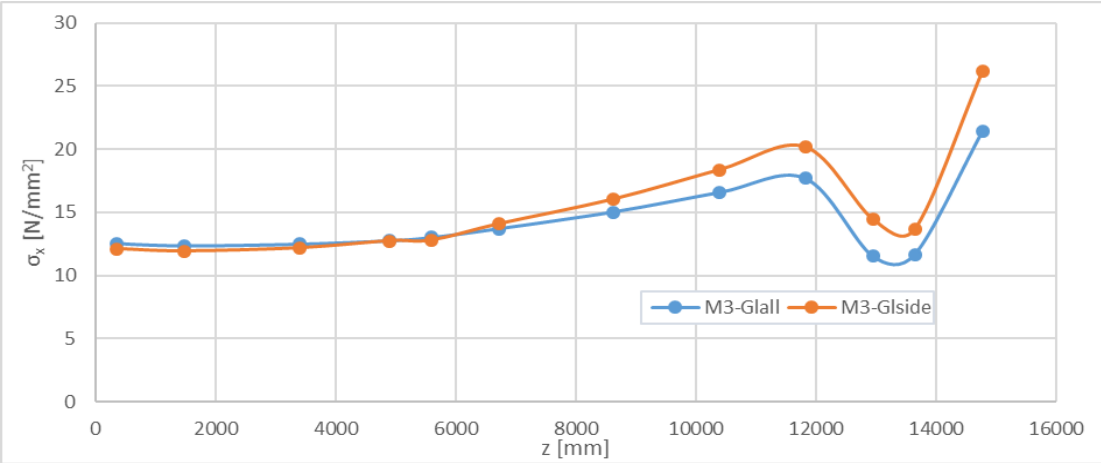
Na osi apscisa nalazi se udaljenost u poprečnom smislu, *z*, a na ordinati je smješteno normalno uzdužno, σ_x, naprezanje. Očitane su vrijednosti naprezanja na svim elementima po širini, na poziciji poprečnog presjeka palube šest koji je 0,75xL udaljen od ishodišta. Naprezanja rastu od ravnine simetrije prema boku gdje postižu najveću vrijednost. Do „skokovite“ distribucije naprezanja dolazi zbog blizine upora koje lokalno djeluju na razinu naprezanja.



Slika 33 Raspodjela σ_x naprezanja modela M1 po širini palube šest



Slika 34 Raspodjela σ_x naprezanja modela M2 po širini palube šest



Slika 35 Raspodjela σ_x naprezanja modela M3 po širini palube šest

Može se zamijetiti da su naprezanja kod sva tri modela manja na udaljenosti, neposredno uz bok, za opterećenje kod kojeg su sile zadane i po dnu elementa „Glall“. Za model M1 razlika

iznosi ispod 4%, za model M2 je 7%, dok je za model M3 najveća i iznosi 22%, vidi Tablica 17.

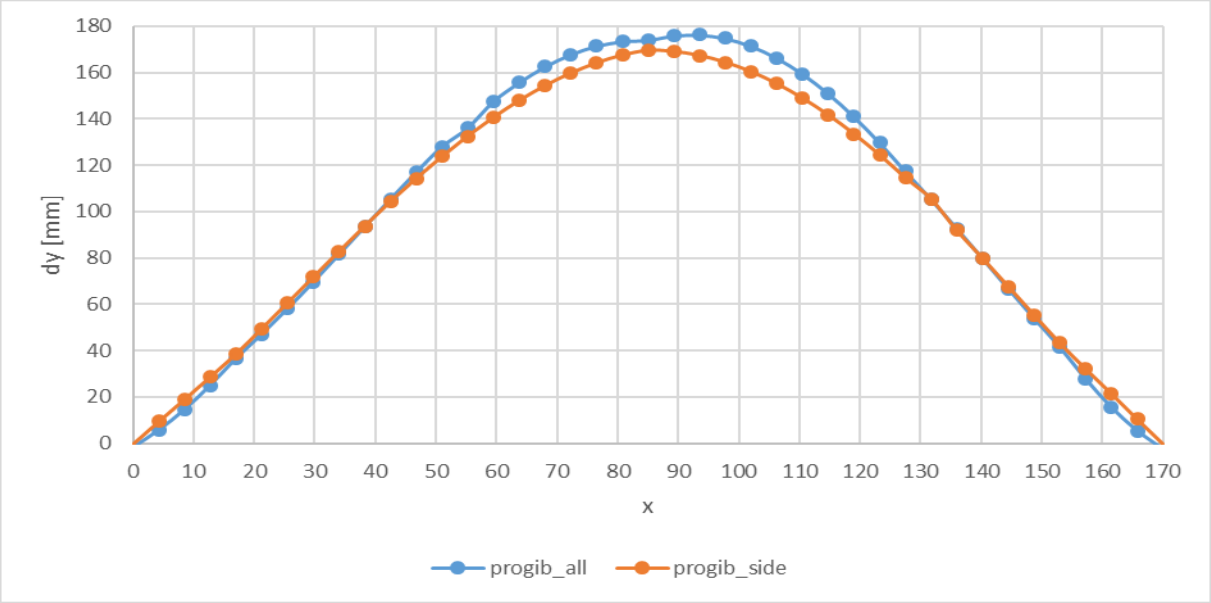
Raspodjela smičnih naprezanja se najviše razlikuju na modelu M3 zbog postojanja još jedne uzdužne strukture koja također preuzima smik, što nije slučaj u prva dva modela. To istodobno uzrokuje značajne razlike i u normalnim naprezanjima modela.

Tablica 17 Usporedba raspodjele σ_x naprezanja za sva tri modela u neposrednoj blizini boka

σ_x [N/ mm^2]	Pozicija B/2		
	GL_ALL	GL_SIDE	$\Delta\sigma_x$, %
M1	59,23	61,38	3,6
M2	12,33	13,22	7,2
M3	21,38	26,16	22,4

4.4 Analiza pomaka

Globalni odziv modela na razini vertikalnih pomaka je na sredini veći za 3% za opterećenje diskretizirano i po dnu modela „Glall“ u odnosu na odziv uslijed opterećenja implementiranog samo po boku modela „Glside“. Na Slika 36 prikazana je uzdužna raspodjela vertikalnog pomaka mjerena na poziciji hrptenice.



Slika 36 Progib modela M1 u ovisnosti o dvije implementacije opterećenja

5. ZAKLJUČAK

U okviru pravila klasifikacijskih društava za provođenje direktnog proračuna složenih brodskih konstrukcija dan je i postupak implementacije valnog opterećenja, no on je definiran na vrlo općenit način s mogućnošću različitog tumačenja smjernica.

Cilj ovog rada bilo je utvrditi utjecaj različitog zadavanja valnog opterećenja na MKE model na uzdužnu čvrstoću modela.

Provedena su detaljna očitanja različitih komponenti naprezanja po visini i širini te su njihovi iznosi uspoređivani u svrhu utvrđivanja boljeg postupka implementacije čvornih sila.

Razmatrana su dva krajnja slučaja diskretizacije čvornih sila. U prvom slučaju su proračunate relevantne čvorne sile na pojedinom presjeku jednoliko raspodijeljene na sve raspoložive čvorove oplakane površine modela, znači uključujući i dno. U drugom slučaju su čvorne sile na pojedinom presjeku, jednake po iznosu čvornih sila u prvom slučaju, raspodijeljene na grupu koja obuhvaća sve raspoložive čvorove po boku.

Međutim, na svim odabranim poprečnim presjecima i pozicijama na kojima su provedena očitanja nije bilo značajnih razlika u distribuciji i iznosima uzdužnih σ_x naprezanja, razlika je manja od 13% za relevantne iznose σ_x naprezanja. Analiza smičnih naprezanja dala je za modele M1 i M2 zanemarive razlike u iznosu manjem od 2%. Iz čega se može zaključiti da se smična naprezanja jednako prenose po visini modela koji odgovaraju topologiji broda za prijevoz stoke i topologiji broda za prijevoz automobila za obje diskretizacije opterećenja. No, uočene su značajne razlike smičnih naprezanja do čak 32%, koje treba razmotriti, za model M3 koji odgovara topologiji putničkog broda za kružna putovanja.

Treba uzeti u obzir da direktni proračun nalaže i implementaciju lokalnog opterećenja vala maksimalne amplitude po cijeloj dužini broda kako bi se dobila kombinacija opterećena relevantna za ocjenu globalne čvrstoće trupa broda. Lokalno opterećenje po definiciji se zadaje u čvorovima po dnu modela. Potrebno je zamijetiti da je i u jednoj od provedenih diskretizacija u radu već zadano opterećenje po dnu.

U tom slučaju bi kombinacija opterećenja mogla dati nerealno velike odzive i posljedično s tim dovesti do predimenzioniranja konstrukcijskih elemenata.

Na temelju navedenog, prednost se daje diskretizaciji opterećenja u vidu čvornih sila zadanih samo u čvorovima po boku modela.

LITERATURA

[1] LLoyd's Register, *Rules an Regulations for the classification of ships*, July 2018.

[2] LLoyd's Register, *SDA Primary Structures of Passenger Ships*, January 2018.

[3] *DNV GL, Class Guideline- Direct strenght analyisis of hull structures in passenger ships,* September 2018.

[4] *MEASTRO* Version 11.5, Maestro Marine, USA, 2018.

[5] 3D View, Teorijski priručnik, FSB, 2020.

[6] J. Uršić: *Čvrstoća broda I. dio, Sveučilište u Zagrebu,* 1991.

PRILOZI

I. CD-R disc