

Projektiranje konstrukcije glavnog rebra broda za prijevoz automobila i kamiona

Geljić, Robert

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:235:035443>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Robert Geljić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Robert Geljić

Zagreb, 2020

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

Zahvaljujem svojem mentoru, izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću, na dobroj volji, savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem i svojim roditeljima na potpori i povjerenju tijekom studiranja.

Robert Geljić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert Geljić**

Mat. br.: 0035212354

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJE GLAVNOG REBRA BRODA ZA PRIJEVOZ AUTOMOBILA I KAMIONA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL DESIGN OF MIDSHIP SECTION OF CAR-TRUCK CARRIER SHIP**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati konstrukciju glavnog rebra broda za prijevoz automobila i kamiona (PCTC-*pure car truck carrier*) sljedećih dimenzija: $Loa=176.8$ m, $B=31,10$ m, $T=8,75$ m; brzine $V=19,6$ čv i nosivosti 12300 t, prema pravilima DNV-a i priloženom predlošku generalnog plana broda.

Zadatak obuhvaća:

- 1) Analizu dostupne literature i upoznavanje s relevantnim Pravilima DNV-a za dimenzioniranje elemenata broskog trupa brodova za prijevoz automobila i kamiona.
- 2) Dimenzioniranje uzdužnih konstrukcijskih elemenata s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom. Kod dimenzioniranja uzdužnih konstrukcijskih elemenata posebnu pažnju posvetiti lokalnim opterećenjima paluba od vozila. Kod definicije opterećenja do vozila osovinski razmak, otisak guma, i opterećenje na osovine uzeti prema priloženom predlošku. Istražiti utjecaj razmaka okvirnih rebara i razmaka uzdužnjaka na dimenzije konstrukcijskih elemenata i njihovu masu.
- 3) Provesti dimenzioniranje upora i istražiti utjecaj broja upora na visinu palubnih sponja te njihov utjecaj na visinu broda.
- 4) Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata poprečne čvrstoće provesti koristeći metodu konačnih elemenata (MKE) na razini proračuna karakterističnog okvira glavnog rebra. Slučajeve opterećenja, kriterije dimenzioniranja i provjeru podobnosti (popuštanje i izvijanje) provesti prema zahtjevima DNV-a za direktne proračune (*Classification Notes No.31.2*). U radu koristiti računalni sustav MAESTRO dostupan na FSB-u.

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
1. UVOD.....	1
2. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PO PRAVILIMA DNV-A3	
2.1. Uvod.....	3
2.2. Definicija opterećenja	4
2.2.1. <i>Momenti savijanja</i>	4
2.2.2. <i>Opterećenje kotačima</i>	5
2.2.3. <i>Opterećenje vanjskim tlakom</i>	6
2.3. Dimenzioniranje limova i profila.....	8
2.3.1. <i>Odabrane debljine oplata</i>	8
2.3.2. <i>Odabrani profili uzdužnjaka</i>	9
2.3.3. <i>Odabrani profili okvirnih rebara</i>	9
2.3.4. <i>Odabrane debljine limova i profili teretnih paluba</i>	10
2.4. Utjecaj razmaka uzdužnjaka i okvirnih rebara na masu	12
2.5. Upore.....	13
2.5.1. <i>Dimenzioniranje upora</i>	14
2.5.2. <i>Utjecaj broja upora na visinu broda</i>	15
2.6. Zaključak.....	16
3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA METODOM KONAČNIH ELEMENATA	17
3.1. Uvod.....	17
3.2. Strukturni model	18
3.3. Model opterećenja i rubni uvjeti	21
3.3.1. <i>Slučajevi opterećenja</i>	22
3.3.2. <i>Rubni uvjeti</i>	24
3.4. Kriteriji podobnosti	25
3.5. Analiza prototipa.....	26
3.5.1. <i>Analiza pomaka</i>	26
3.5.2. <i>Analiza naprezanja</i>	28
3.5.3. <i>Analiza kriterija podobnosti</i>	30
3.6. Prijedlog podobne konstrukcije	34
3.7. Usporedba masa i težišta.....	38
3.8. Zaključak.....	38
4. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40
PRILOZI.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1.	Brod za prijevoz automobila i kamiona	1
Slika 2.	Distribucija valnog momenta savijanja [1]	5
Slika 3.	Osovinsko opterećenje vozila, otisci kotača i homogeno opterećenje po palubama [7]	6
Slika 4.	Određivanje površine opterećenja kotačima [6].....	11
Slika 5.	Polovinski model.....	19
Slika 6.	3D cijeli model	20
Slika 7.	Debljine oplata prototipa	20
Slika 8.	Opterećenje po palubama [t/mm^2].....	21
Slika 9.	Skica opterećenja za LC 1	22
Slika 10.	Tlakovi na vanjsku oplatu uslijed djelovanja od mora za LC 1	23
Slika 11.	Rubni uvjeti	24
Slika 12.	Vertikalni pomaci za LC 2	27
Slika 13.	Horizontalni pomaci za LC 4	27
Slika 14.	Uzdužna naprezanja u vanjskoj oplati i palubama za LC1	28
Slika 15.	Smična naprezanja u rebrenicama za LC1	29
Slika 16.	Ukupna (aksijalna+savojna) naprezanja u grednim elementima za LC1	29
Slika 17.	Vrijednost faktor podobnosti g za PCSF kriterij dna za LC 1.....	30
Slika 18.	Vrijednost faktor podobnosti g za PCMY kriterij rebrenica za LC 1	31
Slika 19.	Vrijednost najmanjeg faktora podobnosti g za sve kriterije za paluba za LC 2....	31
Slika 20.	Vrijednost faktor podobnosti g za BYF kriterij grednih elemenata za LC 1	32
Slika 21.	Vrijednost faktora podobnosti g za PCSF kriterij poboljšanog dna za LC 1	35
Slika 22.	Vrijednost najmanjeg faktora podobnosti g za sve kriterije poboljšane oplata za LC 2.....	35
Slika 23.	Vrijednost faktora podobnosti g za BYF kriterij poboljšanih grednih elemenata.	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne značajke broda.....	3
Tablica 2. Razmaci uzdužnjaka i okvirnih rebara	3
Tablica 3. Tlakovi na roštilj dna [1]	7
Tablica 4. Odabrane debljine oplate.....	8
Tablica 5. Odabrani profili uzdužnjaka.....	9
Tablica 6. Odabrani profili okvirnih rebara.....	10
Tablica 7. Odabrane debljine oplate i profili uzdužnjaka teretnih paluba.....	12
Tablica 8. Mase po jediničnoj površini teretnih paluba za različite projektne varijante	13
Tablica 9. Dimenzije upora	14
Tablica 10. Izabrani profili sponja.	15
Tablica 11. Promjena visine broda zbog promjene profila sponja	16
Tablica 12. Slučajevi opterećenja.....	22
Tablica 13. Kriteriji podobnosti prema programu MAESTRO [2]	25
Tablica 14. Nepodobni dijelovi prototipa.....	33
Tablica 15. Debljine oplate prototipne i predložene konstrukcije.....	36
Tablica 16. Odabrani profili prototipne i predložene konstrukcije	37
Tablica 17. Odabrani profili podveze prototipne i predložene konstrukcije	37
Tablica 18. Usporedba masa i vertikalnih težišta protipnog i predloženog modela.....	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
w	mm	razmak okvirnih rebara
s	mm	razmak uzdužnjaka
$M_{W,s}$	kNm	vertikalni valni moment savijanja u progibu
$M_{W,h}$	kNm	vertikalni valni moment savijanja u pregibu
k_{wm}	/	koeficijent razdiobe
$M_{W0,s}$	kN/m	najveći vertikalni valni moment savijanja u progibu
$M_{W0,h}$	kN/m	najveći vertikalni valni moment savijanja u pregibu
α	/	korekcijski faktor momenta
L	m	računska duljina broda
B	m	širina broda
C_b	/	koeficijent punoće
C_w	/	koeficijent ovisan o duljini broda
p_1	kN/m ²	tlak mora
h_0	m	visina do gaza na mirnoj vodi
p_{14}	kN/m ²	tlak balasta na pokrov dvodna
p_0	kN/m ²	nulti tlak
h_s	m	visina do vrha tanka
g_0	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
h_b	m	visina do pregradne palube
ρ	kg/ m ³	gustoća
a	/	korekcijski faktor tlaka
t	mm	debljina lima
σ	N/mm ²	normalno naprezanje
ka	/	koeficijent materijala
t_k	mm	dodatak za koroziju
Z	cm ³	moment otpora profila
w_k	/	sigurnosni faktor za koroziju
Q	t/m ²	maseno opterećenje kotača po jediničnoj površini
a	mm	duljina otiska gume
b	mm	širina otiska gume
n_0	/	broj kotača na osovini
a_v	m/s ²	vertikalno ubrzanje
l	mm	nepoduprti raspon
q	kg/m ²	masa palube po jediničnoj površini

m_d	kg	masa palube
F_i	kN	ukupna sila na promatranu uporu
p_i	kN/m ²	tlak na promatranu palubu
A_i	m ²	površina promatrane palube
F_j	kN	ukupna sila svih paluba iznad promatrane
h	/	faktor sigurnosti
σ_c	N/mm ²	kritično naprezanje
A_{upore}	m ²	površina upore
σ_{EL}	N/mm ²	naprezanje pri izvijanju u elastičnom području
E	N/mm ²	modul elastičnosti
I_A	cm ⁴	moment inercije poprečnog presjeka upore
σ_F	N/mm ²	granica razvlačenja
q	kg/m ²	opterećenje kotača po jediničnoj površini
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
$M_{total-hogg}$	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja u pregibu
$M_{total-sagg}$	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja u progibu
$M_{static-hogg}$	kNm	vertikalni moment savijanja u pregibu na mirnoj vodi
g	/	faktor podobnosti
g	/	faktor sigurnosti
C	N/mm ²	izdržljivost
D	N/mm ²	zahtjev

SAŽETAK

Tema ovog rada je projektiranje konstrukcije glavnog rebra broda za prijevoz automobila i kamiona (PCTC-*pure car truck carrier*).

Dimenzioniranje elemenata konstrukcije provedeno je po pravilima klasifikacijskog društva Det Norske Veritas [1]. Posebna pažnja posvećena je dimenzioniranju paluba opterećenih kotačima vozila. Za njih je provedena analiza senzitivnosti mase uzdužnih elemenata konstrukcije u ovisnosti o razmaku poprečnih okvira i uzdužnjaka. Ispitane su tri projektne varijante razmaka okvira i uzdužnjaka s ciljem dobivanja optimalne varijante po kriteriju najmanje mase. Potom je istražen utjecaj broja upora na visinu palubnih sponja te njihov utjecaj na visinu broda.

Za projektnu varijantu najmanje mase izrađen je 3D MKE parcijalni model u programu MAESTRO [2] kako bi se provela analiza metodom konačnih elemenata. Analiza je napravljena za četiri različita slučaja opterećenja prema uputama DNV-a [3], te su nepodobni elementi strukture redimenzionirani tako da zadovolje sve kriterije podobnosti.

Naposljetku, napravljena je usporedba masa između modela prije i nakon redimenzioniranja konstrukcije pri čemu su zadovoljeni svi kriteriji strukturne podobnosti.

Ključne riječi: brod za prijevoz automobila i kamiona, konstrukcija glavnog rebra, analiza senzitivnosti, MKE, kriteriji podobnosti, redimenzioniranje

SUMMARY

The objective of this study is structural design of midship section of a ship for transportation of cars and trucks (PCTC-*pure car truck carrier*).

Defining of the construction elements was done in accordance with the rules of Det Norske Veritas (DNV) classification society [1]. Particular attention was given to the defining of decks under wheel load. For them, a sensitivity analysis of mass of longitudinal construction elements in dependence of the web frame spacing and longitudinals spacing was performed. Three variants of the web frame spacing and longitudinals spacing were studied in order to obtain an optimal variant by the criterion of minimal mass. Then, the influence of the number of pillars on the height of transverse beams and their influence on the ship height was investigated.

For the project variant of a minimal mass, 3D FEM partial model was created in software MAESTRO [2] in order to conduct a finite element method analysis. The analysis was made for four different load cases in accordance with the rules of DNV [3] and inadequate structural elements were redefined in order to meet all the structural adequacy criteria.

Finally, the comparison of a structural mass was made between the prototype model and the final model after redefining the structure to satisfy all structural safety criteria.

Keywords: ship for transport of cars and trucks, midship section structure, sensitivity analysis, FEM, adequacy criteria, redefining

1. UVOD

PCTC brodovi su brodovi za prijevoz automobila i kamiona, ali i drugog tereta na kotačima. Potječu od brodova za prijevoz automobila (PCC- *Pure Car Carrier*), koji su se prvi puta počeli proizvoditi 1960-ih godina [4]. Posljednjih godina, sve se više proizvode brodovi za prijevoz automobila i kamiona nego brodovi za prijevoz automobila zbog šireg izbora tereta. Trendovi pokazuju da trgovina na svjetskoj razini raste iz godine u godinu, a shodno tome rastu i potrebe za transportom dobara, pa tako i vozila. Osim trgovine osobnih automobila, raste i trgovina rekreacijskih vozila, autobusa, kamiona i drugih radnih vozila koja zahtijevaju adekvatan prijevoz tako da su brodovi za prijevoz automobila i kamiona imaju sve zastupljeniji u svjetskoj pomorskoj floti.



Slika 1. Brod za prijevoz automobila i kamiona

Brodovi tog tipa građeni su s više paluba od kojih su neke gotovo uvijek pomične u vertikalnom smjeru. Geometrija broda nastoji se što je moguće više prilagoditi službi pa se tako uporaba pregrada i upora nastoji smanjiti zbog bržeg i jednostavnijeg ukrcanja i iskrcanja vozila. Posebna se pažnja posvećuje izvedbi orebrenja palube: nastoji se smanjiti visinu sponja i podveza zbog neometanog prijevoza vozila, stoga se orebrenje provodi manjim razmacima poprečnih okvira i uzdužnjaka. Vozila se ukrcavaju rampama koje mogu biti na doku ili na brodu. Na brodu se najčešće nalaze na krmenom piku, no koriste se i bočne ili

pramčane. Postoje i unutaršnje rampe koje se protežu duž broda povezujući palube po visini i omogućujući prijevoz vozila po palubama. Prostorni razmještaj rampi, ventilacijskih cijevi, stubišta i upora je takav da ostane što više mjesta za teret.

Osim klasične mjere za nosivost u metričkim tonama, često se kod PCCT brodova koristi i količina ekvivalentnih jedinica automobila CEU (car equivalent unit).

Na slici 1. dan je prikaz primjera PCCT tipa broda.

Kroz ovaj rad proračun konstrukcije glavnog rebra proveden je u dvije faze:

1. dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata po preskriptivnim pravilima klasifikacijskog društva DNV-a [1]
2. dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata metodom konačnih elemenata te provjera podobnosti konstrukcije koristeći program MAESTRO [2], prema pravilima DNV-a za direktne proračune [3]

2. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PO PRAVILIMA DNV-A

2.1. Uvod

Proračun dimenzija konstrukcije glavnog rebra s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom proveden je po preskriptivnim pravilima DNV-a [1] korištenjem računalnog programa MS Excel [5] za brod čije su osnovne značajke prikazane u tablici 1.:

Tablica 1. Osnovne značajke broda

Duljina preko svega	176,8 [m]
Širina	31,10 [m]
Gaz	8,75 [m]
Brzina	19,6 [čv]
Nosivost	12 300 [t]
Koeficijent punoće	0,54
Najveći moment savijanja na mirnoj vodi u pregibu	1 500 000 [kNm]
Minimalni moment savijanja na mirnoj vodi u pregibu	560 000 [kNm]

Teretni prostor broda raspoređen je na 11 paluba od kojih su palube 5 i 7 podizne palube. Palube 5 i 7 nisu uzete u obzir pri ovom proračunu jer one ne sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći broda s obzirom na to da nisu kontinuirane.

Dimenzije dobivene ovim proračunom su najmanje zahtijevane po pravilima Det Norske Veritasa [1] i poslužiti će kao ulazni podaci za direktni proračun konstrukcije korištenjem metode konačnih elemenata (MKE).

Osim proračuna dimenzija konstrukcijskih elemenata za iz predložka zadan razmak uzdužnjaka i okvirnih rebara, također je napravljen proračun za slučaj manjeg razmaka uzdužnjaka i manjeg razmaka okvirnih rebara, kao i za slučaj većeg razmaka uzdužnjaka i većeg razmaka okvirnih rebara. Sve tri projektne varijante prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Razmaci uzdužnjaka i okvirnih rebara

Projektna varijanta	Razmak okvirnih rebara w [mm]	Razmak uzdužnjaka s [mm]
P ₁	2800	650
P ₂ (predložak)	3400	750
P ₃	4000	850

Po kriteriju najmanje mase konstrukcije, izabran je projekt manjih razmaka uzdužnjaka i okvirnih rebara P_1 kao najpovoljniji te će se u nastavku poglavlja prikazati princip dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata za tu projektnu varijantu.

2.2. Definicija opterećenja

2.2.1. Momenti savijanja

Za uzdužnu čvrstoću broda neophodno je odrediti vertikalne momente savijanja. Karakteristika brodova za prijevoz automobila i kamiona je da imaju takav raspored vlastite mase i mase tereta duž broda, da se na miroj vodi uvijek nalaze u stanju pregiba. Ako se brod nađe na valovima, pregibni moment može dodatno narasti za slučaj valnoga brijega, dok će se za slučaj valnoga dola pojaviti progibni moment savijanja za čiju će najveću vrijednost onda kada progibni valni moment savijanja bude najveći, a pregibni moment savijanja na mirnoj vodi najmanji.

Sama uzdužna čvrstoća najčešće nije glavni problem brodova za prijevoz automobila i kamiona jer je riječ o višepalubnim brodovima velikog momenta inercije zbog prisutnosti velikog broja paluba.

Prema pravilima DNV-a [1], valni momenti savijanja iznose:

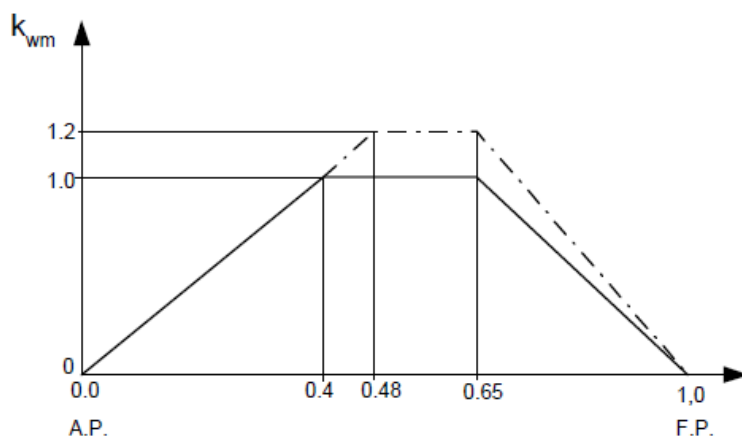
$$M_{W,s} = k_{wm} \cdot M_{WO,s} = -1111668,2 \quad [\text{kNm}] \quad (1)$$

$$M_{W,h} = k_{wm} \cdot M_{WO,h} = 886225,3 \quad [\text{kNm}] \quad (2)$$

$$M_{WO,s} = -0,11 \cdot \alpha \cdot C_w \cdot L^2 \cdot B \cdot (Cb + 0,7) \quad (3)$$

$$M_{WO,h} = 0,19 \cdot \alpha \cdot C_w \cdot L^2 \cdot B \cdot (Cb + 0,7) \quad (4)$$

$$C_w = 10,75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{1,5} \quad (5)$$

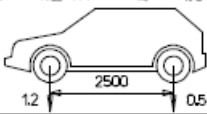
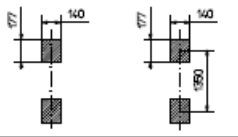
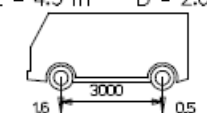
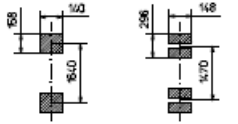

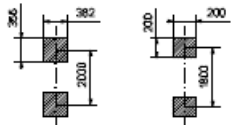
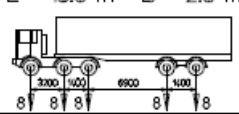
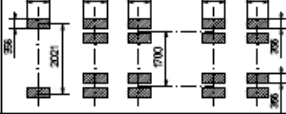
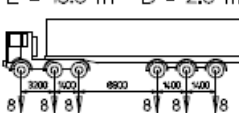
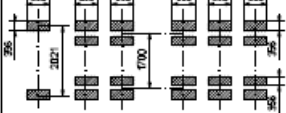
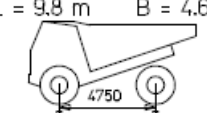
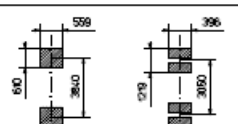
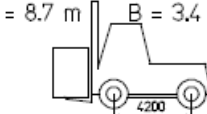

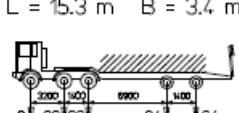
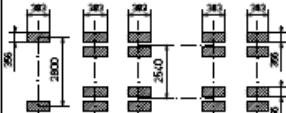


Slika 2. Distribucija valnog momenta savijanja [1]

2.2.2. Opterećenje kotačima

Teretne palube broda za prijevoz automobila i kamiona, sukladno svojoj ulozi, opterećene su kotačima vozila i to je opterećenje glavni kriterij za lokalno dimenzioniranje oplata i uzdužnjaka teretnih paluba. Svaka se paluba dimenzionira prema najvećem opterećenju na način da se pretpostavi nalijeganje kotača najvećeg opterećenja na neukrepljenu površinu palube. Primjerice, paluba 1 dimenzionirat će se prema opterećenju prednje osovine osobnog automobila, a paluba 6 prema prema opterećenju prednje osovine villičara. Na slici 3. prikazana su opterećenja kotača vozila po teretnim palubama prema zadanom predlošku, koji je korišten u ovom radu.

PERMISSIBLE LOADING OF DECKS

NAME	LOAD AT	AXLE LOAD (t) FRONT REAR	TYPE PRINT (mm) FRONT REAR	HOMOG. LOADING t/m ²	DECK No
PRIVATE CAR	SEA	L = 4.2 m B = 1.6 m 		0.25	1 2 3 9 10
				0.2	
TRANSPORTER	SEA	L = 4.9 m B = 2.0 m 		0.3	5 7 8
FORK LIFT	HARBOUR	L = 4.7 m B = 2.4 m 		1.0	4
LORY & SEMITRAILER	SEA (1) (2)	L = 15.0 m B = 2.5 m 			
LORY & SEMITRAILER	SEA (1) (2)	L = 18.0 m B = 2.5 m 			
DUMP TRUCK	SEA (1)	L = 9.8 m B = 4.6 m 		2.0	6
FORK LIFT	HARBOUR	L = 8.7 m B = 3.4 m 			
LORY & SEMITRAILER	SEA (1) (3)	L = 15.3 m B = 3.4 m 			

Slika 3. Osovinsko opterećenje vozila, otisci kotača i homogeno opterećenje po palubama [7]

2.2.3. Opterećenje vanjskim tlakom

Konstruktivske elemente roštilja dna, boka i palube brodova za prijevoz automobila i kamiona treba dimenzionirati prema najvećem vanjskom tlaku. U DNV-u [1] za svaki konstrukcijski element postoji nekoliko formula za izračun tlaka. U tablici 3. prikazani su tlakovi koji mogu djelovati na konstrukcijske elemente roštilja dna.

Tablica 3. Tlakovi na roštilj dna [1]

Table B1 Design loads		
Structure	Load type	p (kN/m ²)
Outer bottom	Sea pressure	$p_1 = 10 h_0 + p_{dp}$ (kN/m ²) ¹⁾
	Net pressure in way of cargo tank or deep tank	$p_2 = \rho (g_0 + 0.5 a_v) h_s - 10 T_M$ $p_3 = \rho g_0 h_s + p_0 - 10 T_M$
Inner bottom	Dry cargo in cargo holds	$p_4 = \rho (g_0 + 0.5 a_v) H_C$
	Ballast in cargo holds	$p_5 = (10 + 0.5 a_v) h_s$ $p_6 = 6.7(h_s + \phi b) - 1.2 \sqrt{H \phi b_t}$ ²⁾ $p_7 = 0.67(10h_p + \Delta p_{dyn})$ $p_8 = 10h_s + p_0$
	Liquid cargo in tank above	$p_9 = \rho (g_0 + 0.5 a_v) h_s$ $p_{10} = \rho g_0 [0.67(h_s + \phi b) - 0.12 \sqrt{H \phi b_t}]$ ²⁾ $p_{11} = 0.67(10h_p + \Delta p_{dyn})$ $p_{12} = \rho g_0 h_s + p_0$
Inner bottom, floors and girders	Pressure on tank boundaries in double bottom	$p_{13} = 0.67 (10 h_p + \Delta p_{dyn})$ $p_{14} = \rho g_0 h_s + p_0$
	Flooded condition	$p_{15} = 10h_b$

1) For ships with service restrictions the last term in p_1 may be reduced by the percentages given in Sec.4 B202.
2) p_6 and p_{10} to be used in tanks/holds with largest breadth $> 0.4 B$.

Konstruktivski elementi dna dimenzionirani su prema tlaku p_1 iz tablice 3.

$$p_1 = 10 \cdot h_0 + p_{dp} \quad (6)$$

Konstruktivski elementi pokrova dvodna dimenzionirani su prema tlaku p_{14} iz tablice 3.

$$p_{14} = \rho \cdot g_0 \cdot h_s + p_0 \quad (7)$$

Formula najvećeg tlaka na konstruktivske elemente boka broda između paluba 2 i 7 jest:

$$p_{14} = \rho \cdot g_0 \cdot h_s - 10 \cdot h_b + p_0 \quad (8)$$

dok je formula najvećeg tlaka na konstruktivske elemente boka broda između paluba 7 i 12:

$$p_1 = 10 \cdot h_0 + p_{dp} \quad (9)$$

Najveći tlak na gornjoj palubi određen je prema sljedećoj formuli:

$$p_1 = a \cdot ((p_{dp} - (4 + 0,2 \cdot k_s) \cdot h_0) \quad (10)$$

2.3. Dimenzioniranje limova i profila

2.3.1. Odabrane debljine oplata

Prema DNV-u [1], općenita formula za izračun debljine lima glasi:

$$t = \frac{15.8 \cdot k_a \cdot s \cdot \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma}} + t_k \quad (11)$$

pri čemu je t_k u izrazu (11) dodatak za koroziju koji je potrebno uzeti u obzir kod dimenzioniranja elemenata konstrukcije dvodna jer se tamo nalaze balastni tankovi.

Tablica 4. Odabrane debljine oplata

Pozicija	Odabrana debljina oplata [mm]
kobilica	17
Dno i uzvojn	12,5
Pokrov dvodna	12
Jaki uzdužni nosači	11
Rebrenice	11
hrptenica	14
Bok, između paluba 2 i 3	12
Bok, između paluba 3 i 4	12
Bok, između paluba 4 i 5	12
Bok, između paluba 5 i 6	12
Bok, između paluba 6 i 7	10
Bok, između paluba 7 i 8	8,5
Bok, između paluba 8 i 9	7,5
Bok, između paluba 9 i 10	7,5
Bok, između paluba 10 i 11	8
Bok, između paluba 11 i 12	8
Gornja paluba	5,5

2.3.2. Odabrani profili uzdužnjaka

Prema DNV-u [1], općenita formula za izračun najmanjeg dopuštenog momenta otpora uzdužnjaka glasi:

$$Z = \frac{83 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k}{\sigma} \quad (12)$$

Odabrani profili uzdužnjaka prikazani su u tablici 5.:

Tablica 5. Odabrani profili uzdužnjaka

Pozicija	Odabrani profil uzdužnjaka
Dno	HP280x12
Pokrov dvodna	HP260x10
Gornja paluba	HP80x5

2.3.3. Odabrani profili okvirnih rebara

Kako se brodovi za prijevoz automobila i kamiona najčešće grade u mješovitom sustavu gradnje, bok broda jest poprečno orebren. Izraz (13) za izračun najmanjeg dopuštenog momenta otpora okvirnog rebra u DNV-u [1] glasi:

$$Z = \frac{C \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k}{f_1} \quad (13)$$

Odabrani profili okvirnih rebara prikazani su u tablici 3.:

Tablica 6. Odabrani profili okvirnih rebara

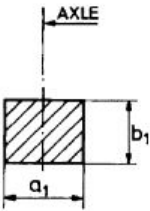
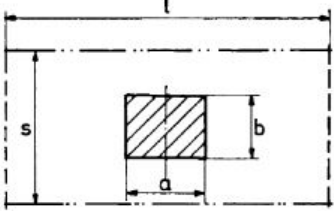
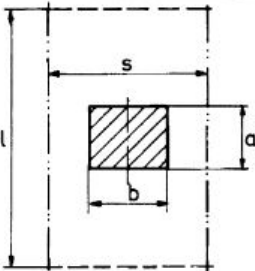
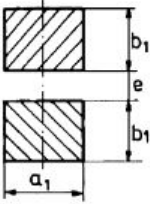
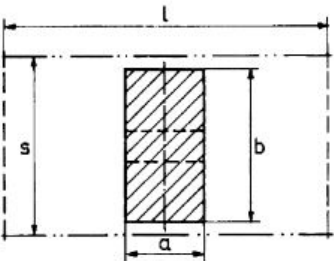
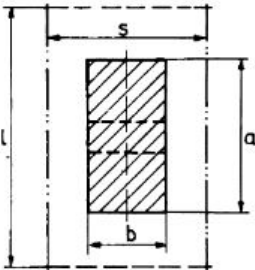
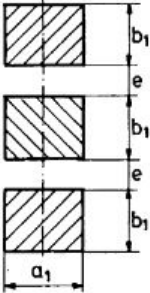
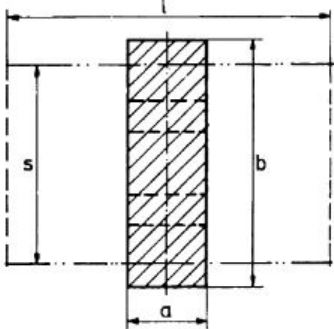
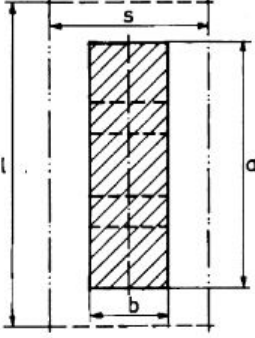
Pozicija	Odabrani profil okvirng rebra boka	Odabrani profil rebra boka
između paluba 2 i 3	T340x7/100x9	HP220x10
između paluba 3 i 4	T340x8/100x9	HP220x10
između paluba 4 i 5	T340x10/230x20	T340x8/205x10
između paluba 5 i 6	T340x10/230x20	T340x8/205x10
između paluba 6 i 7	T340x10/205x16	T340x7/160X9
između paluba 7 i 8	T340x10/205x16	T340x7/160X9
između paluba 8 i 9	HP260x11	HP180x9
između paluba 9 i 10	HP240x12	HP180x8
između paluba 10 i 11	HP240x11	HP180x8
između paluba 11 i 12	HP240x11	HP180x8

2.3.4. Odabrane debljine limova i profili teretnih paluba

Pored općih pravila za proračun konstrukcije brodova, DNV [6] sadrži posebna pravila za svaki tip broda, i to za one elemente konstrukcije koji se za taj tip broda razlikuju od ostalih tipova. Posebnost broda za prijevoz automobila i kamiona jest nejednolik način opterećenja teretnih paluba, o čemu je bilo riječi u poglavlju 2.1.2. Zbog takvog načina opterećenja propisan je poseban izraz (14) za izračun tlaka na palubama opterećenim vozilima kojima su poznati raspored i veličine otiska gume:

$$p = \frac{Q}{n_0 \cdot a \cdot b} \cdot (9,81 + 0,5 \cdot a_v) \quad (14)$$

pri čemu je Q osovinsko opterećenje vozila, a duljina otiska gume, b širina otiska gume, n_0 broj kotača na osovini, a_v vertikalno ubrzanje.

1	2	3	4
Number of wheels in group	Footprint dimensions (real contact areas between tyres and deck)	Design load area for axle perpendicular to stiffeners	Design load area for axle parallel to stiffeners
Single wheel			
Double wheels			
Triple wheels			

Slika 4. Određivanje površine opterećenja kotačima [6]

Opterećenje po osovini, duljina i širina otiska gume te broj kotača na osovini dani su u predlošku za svaku teretnu palubu i prikazani su na slici (3).

Debljine limova teretnih paluba određuju se prema formuli (15), a najmanji momenti otpora uzdužnjaka teretnih paluba po formuli (16).

$$t = \frac{77,4 \cdot k_a \cdot \sqrt{k_w \cdot c \cdot s \cdot p}}{\sqrt{m \cdot \sigma}} + t_k \quad (15)$$

$$Z = \frac{1000 \cdot k_z \cdot l \cdot c \cdot d \cdot p \cdot w_k}{m \cdot \sigma} \quad (16)$$

Odabrane debljine oplata i profili uzdužnjaka teretnih paluba prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Odabrane debljine oplata i profili uzdužnjaka teretnih paluba

Pozicija	Odabrana debljina oplata [mm]	Odabrani profil uzdužnjaka
Paluba 2	5	HP80x6
Paluba 3	5	HP80x6
Paluba 4	10,5	HP180x8
Paluba 6	14	HP240x12
Paluba 8	6	HP100x6
Paluba 9	5	HP80x6
Paluba 10	5	HP80x6
Paluba 11	5	HP80x6

2.4. Utjecaj razmaka uzdužnjaka i okvirnih rebara na masu

Za sva tri slučaja razmaka uzdužnjaka i poprečnih okvira, definiranih kao projektne varijante P_1 , P_2 i P_3 , vidi tablicu 2., napravljen je proračun dimenzija konstrukcijskih elemenata i mase konstrukcije kako bi se pronašla najpovoljnija varijanta. Proračun je proveden za teretne palube koje najviše doprinose masi konstrukcije.

Sukladno predviđanjima, povećanjem razmaka uzdužnjaka i okvirnih rebara, povećale su se i dimenzije konstrukcijskih elemenata, ali se smanjio broj uzdužnjaka i rebara. Smanjenjem razmaka smanjile su se dimenzije konstrukcijskih elemenata, ali se povećao njihov broj.

Izravna posljedica promjene dimenzija konstrukcijskih elemenata jest promjena mase konstrukcije. Kao primjer promjene mase konstrukcije, u tablici 8. uspoređene su mase palube po jediničnoj površini palube. Masa palube duljine 100m i pune širine broda dobije se zbrojem:

- 1) Mase oplata palube
- 2) Mase svih uzdužnjaka na palubi
- 3) Mase svih sponja na palubi
- 4) Mase svih podveza na palubi

Masa po jediničnoj površini palube dobije se izrazom (17):

$$q = \frac{m_d}{B \cdot l} \quad (17)$$

pri čemu je m_d ukupna masa svih elemenata palube na palubi promatrane duljine, B širina broda, a l duljina promatranog dijela palube.

Tablica 8. Mase po jediničnoj površini teretnih paluba za različite projektne varijante

Pozicija	q [kg/m ²]		
	P ₁	P ₂	P ₃
Paluba 1	135,2	151,9	177,5
Paluba 2	116,9	128,3	130,9
Paluba 3	116,7	128,1	131,1
Paluba 4	250,2	266,3	280,0
Paluba 6	349,1	379,9	401,7
Paluba 8	137,1	139,3	152,6
Paluba 9	116,9	128,4	133,4
Paluba 10	116,7	128,2	133,4
Paluba 11	114,1	124,9	127,5

Iz tablice 8. vidimo da će masa konstrukcije biti najmanja za slučaj razmaka uzdužnjaka od 650 mm i razmaka okvirnih rebara od 2800 mm. Sa strane brodovlasnika, manja masa poželjna je karakteristika broda zbog manjih troškova plovidbe i veće financijske koristi pa su daljnji proračun i dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata korištenjem metode konačnih elemenata provedeni za slučaj najmanje mase.

2.5. Upore

Uloga upora kod brodova za prijevoz automobila i kamiona posebno je bitna s obzirom na to da ima velik broj paluba koje su opterećene vozilima pa se oslanjaju na upore. Ipak, upore mogu smetati u teretnom prostoru i zahtijevaju posebnu pažnju pri ukrcanju i iskrcanju automobila i kamiona. S projektantske strane, važno je pronaći najbolje rješenje po pitanju broja, rasporeda i dimenzija upora na konstrukcijske zahtjeve broda te na zahtjev za što bržim i efikasnijim ukrcanjem i iskrcanjem tereta koji dovode do manjih troškova i veće zarade.

Upore se oštećuju izvijanjem uslijed tlačne sile koju moraju podnijeti. Tlačna sila na upore raste idući od gornje palube prema dnu i određuje se prema izrazu (18):

$$F_i = p_i \cdot A_i + \sum_{j=1}^n F_j \quad (18)$$

pri čemu je p_i tlak palube i uslijed težine same palube i tereta na njoj, A_i površina dijela palube koju upora mora poduprijeti, F_j tlačne sile u uporama koje se nalaze iznad palube i .

2.5.1. Dimenzioniranje upora

Upore se, prema DNV-u [1], dimenzioniraju tako da se odredi poprečni presjek za koji stvarno naprezanje σ uzrokovano tlačnom silom F koje se računa prema izrazu (18) ne smije biti veće od kritičnog naprezanje u trenutku izvijanja σ_C prema izrazu (20).

$$\sigma = \frac{10 \cdot F}{\eta \cdot A_{\text{upore}}} \quad (19)$$

$$\sigma_{\text{EL}} = 0,001 \cdot E \cdot \frac{I_A}{l^2 \cdot A_{\text{upore}}} \quad (20)$$

$$\sigma_{\text{EL}} > \frac{\sigma_F}{2}, \quad \sigma_c = \sigma_F \cdot \left(1 - \frac{\sigma_F}{4 \cdot \sigma_{\text{EL}}}\right)$$

$$\sigma_c > \sigma$$

$$\sigma_F \cdot \left(1 - \frac{\sigma_F}{4 \cdot \sigma_{\text{EL}}}\right) > \frac{10 \cdot F}{\eta \cdot A_{\text{upore}}}$$

pri čemu je F ukupna tlačna sila na uporu, A_{upore} površina poprečnog presjeka upore, η faktor sigurnosti, $\sigma_{\text{EL}} > \frac{\sigma_F}{2}$, σ_F granica razvlačenja, a σ_{EL} naprezanje pri izvijanju u elastičnom području određeno prema izrazu 21.

$$\sigma_{\text{EL}} = 0,001 \cdot E \cdot \frac{I_A}{l^2 \cdot A_{\text{upore}}} \quad (21)$$

Izabrane dimenzije upora pravokutnog tipa prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Dimenzije upora

Pozicija	Dimenzije upore
Između paluba 1 i 2	□750x400x30
Između paluba 2 i 3	□750x400x30
Između paluba 3 i 4	□650x400x30
Između paluba 4 i 6	□550x400x30
Između paluba 6 i 8	□400x400x16
Između paluba 8 i 9	□400x400x11
Između paluba 9 i 10	□400x400x10
Između paluba 10 i 11	□300x200x10
Između paluba 11 i 12	□150x150x10

2.5.2. Utjecaj broja upora na visinu broda

Smanjenjem broja upora pojednostavljuju se ukrcaj i iskrcaj vozila, no povećava se nepoduprti raspon sponja što dovodi po povećanja najmanjeg dopuštenog momenta otpora sponja koji se računa prema izrazu (22):

$$Z = \frac{100 \cdot s^2 \cdot b \cdot p \cdot w_k}{\sigma} \quad (22)$$

Kako bi se zadovoljio veći moment otpora sponje, potrebno je povećati dimenzije sponje. Povećanjem visine struka sponje, potrebno je povećati i visinu broda da bi se sačuvala ista svjetla visina između paluba kako bi bio moguć neometan prijevoz vozila. Veća visina broda nije poželjna zbog:

- povećanja otpora nadvođa, a time i većih troškova prijevoza
- problema sa stabilitetom broda
- porasta opremnog broja
- povećanja lučkih naknada

Za prikaz utjecaja broja upora na visinu struka sponja, osim za slučaj s dvije upore koji je zadan u predlošku, izabrani su profili sponja za slučajeve s tri upore, s jednom uporabom i bez upore po širini broda. Omjeri svih dimenzija su jednaki za sva četiri slučaja. Izabrani profili prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Izabrani profili sponja.

Pozicija	Izabrani profil sponje			
	Bez upora	1 upora	2 upore	3 upore
Paluba 2	T560x21/294x42	T344x14/183x26	T264x10/140x20	T215x8/114x17
Paluba 3	T560x21/294x42	T344x14/183x26	T264x10/140x20	T215x8/114x17
Paluba 4	T946x28/420x53	T590x17/262x33	T450x13/200x25	T367x11/163x21
Paluba 6	T1637x30/510x39	T1009x19/315x24	T770x14/240x18	T627x12/196x15
Paluba 8	T617x21/294x42	T385x13/183x26	T294x10/140x20	T239x8/114x17
Paluba 9	T556x21/295x42	T347x13/184x26	T264x10/140x20	T215x8/114x17
Paluba 10	T556x21/295x42	T347x13/184x26	T264x10/140x20	T215x8/114x17
Paluba 11	T556x21/316x312	T347x13/198x20	T264x10/150x15	T214x9/122x13
Paluba 12	T506x21/421x42	T316x13/263x26	T240x10/200x20	T195x9/162x17

Utjecaj promjene profila sponje na promjenu visine broda sa svrhom zadržavanja iste svjetle visine prikazan je u tablici 11. kao razlika visine broda s dvije upore i visine broda drugačijeg broja upora.

Tablica 11. Promjena visine broda zbog promjene profila sponja

Broj upora	Promjena visine broda [mm]
0	+3618
1	+1010
2	0 (referentni nivo)
3	-599

2.6. Zaključak

Nakon provedbe prve faze proračuna po preskriptivnim pravilima i dobivenih rezultata, odabrana je varijanta P₁ kao varijanta najmanje mase te je samo za nju provedena druga faza proračuna konstrukcije metodom konačnih elemenata.

3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

3.1. Uvod

Izrađen je 3D parcijalni model glavnog rebra za P₁ opciju razmaka uzdužnjaka i okvirnih rebara u programu Maestro [2] te je provedena analiza strukture korištenjem metode konačnih elemenata u svrhu dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata poprečne čvrstoće i provjere podobnosti konstrukcijskih elemenata, prema pravilima DNV-a za direktne proračune brodova za prijevoz automobila i kamiona [3].

Današnji standardi, zahvaljujući napredku računalne tehnologije, nalažu uzimanje u obzir međudjelovanja uzdužnih i poprečnih elemenata konstrukcije. Primjerice, poprečna konstrukcija ne utječe samo na poprečnu čvrstoću, već i na uzdužnu pa uzdužna konstrukcija može preuzeti tlačne sile bez da dođe do izvijanja. Isto tako, na oplatu istovremeno djeluje tlačno opterećenje i u poprečnom i u uzdužnom smjeru pa može doći do biaksijalnog izvijanja oplate dna.

Inicijalne dimenzije konstrukcijskih elemenata uzete su iz prve faze proračuna u poglavlju 2.

3.2. Strukturni model

Parcijalni 3D MKE model izrađen je u programu MAESTRO [2], a modeliranje je provedeno korištenjem pločastih i grednih konačnih elemenata.

Veličina parcijalnog MKE modela uzeta je prema pravilima DNV-a [3]:

- širina modela odgovara punoj širini broda
- visina modela odgovara punoj visini broda
- duljina modela odgovara duljini razmaka između dvije upore, što na ovom modelu znači osam razmaka okvirnih rebara, na način da su prva dva ispred upore, a posljednja dva iza druge upore. Dijelovi ispred i iza upora su dijelovi koji osiguravaju rubne uvjete, dok je samo dio između upora evaluacijski dio koji ne razmatramo prilikom redimenzioniranja.

Gustoća mreže je takva da su u uzdužnom smjeru dva elementa između okvirnog rebra, dok je u poprečnom smjeru jedan element između dva uzdužnjaka te je u vertikalnom jedan element između dvije palube.

Oplata dna i paluba modelirana je standardnim četverokutnim konačnim elementima, a oplata boka modelirana je četverokutnim makroelementima orebrenim jednom poprečnom ukrepom. Uzdužnjaci, jaki uzdužni nosači i svaki drugi poprečni nosač modelirani su grednim konačnim elementima.

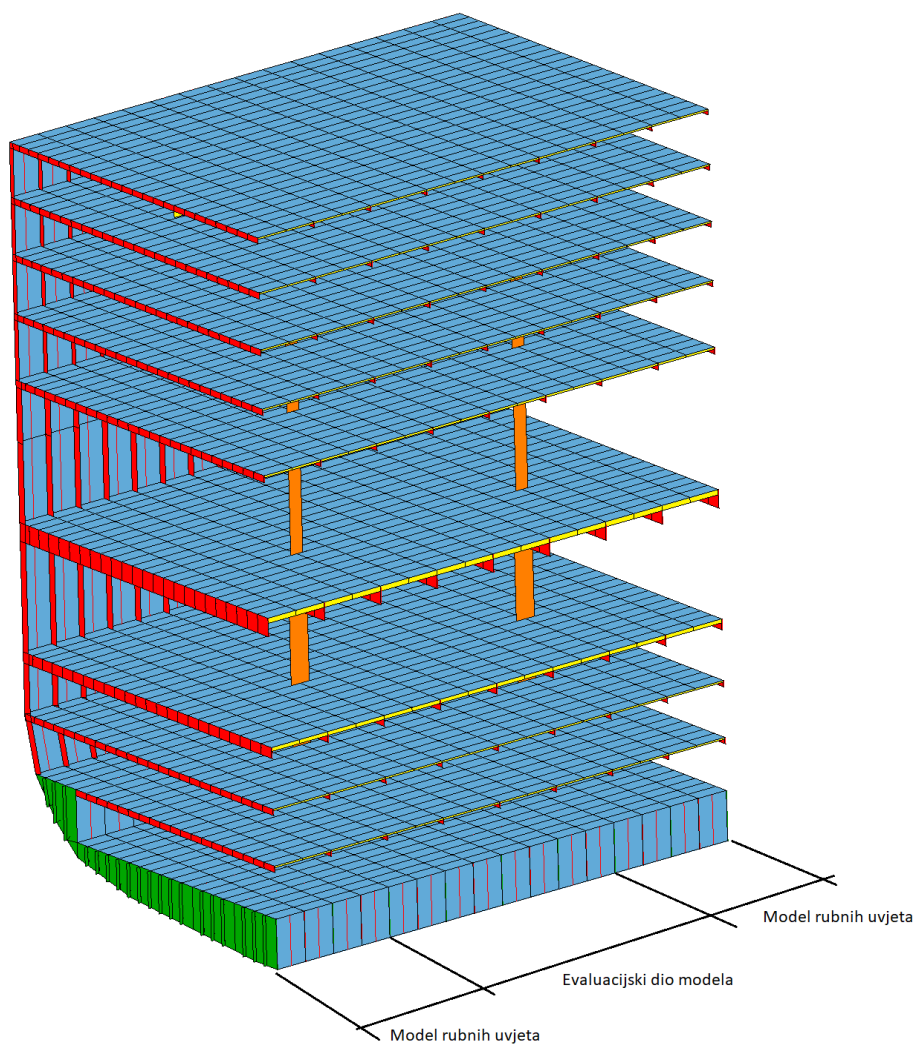
Koordinatni sustav definiran je na sljedeći način:

- ishodište koordinatnog sustava nalazi se u sjecištu središnje ravnine i osnove
- globalna os X definirana je u smjeru uzdužne ravnine broda, pozitivna prema naprijed
- globalna os Z definirana je kao poprečna os, pozitivna prema desnoj strani
- globalna os Y definirana je kao vertikalna os, pozitivna prema gore

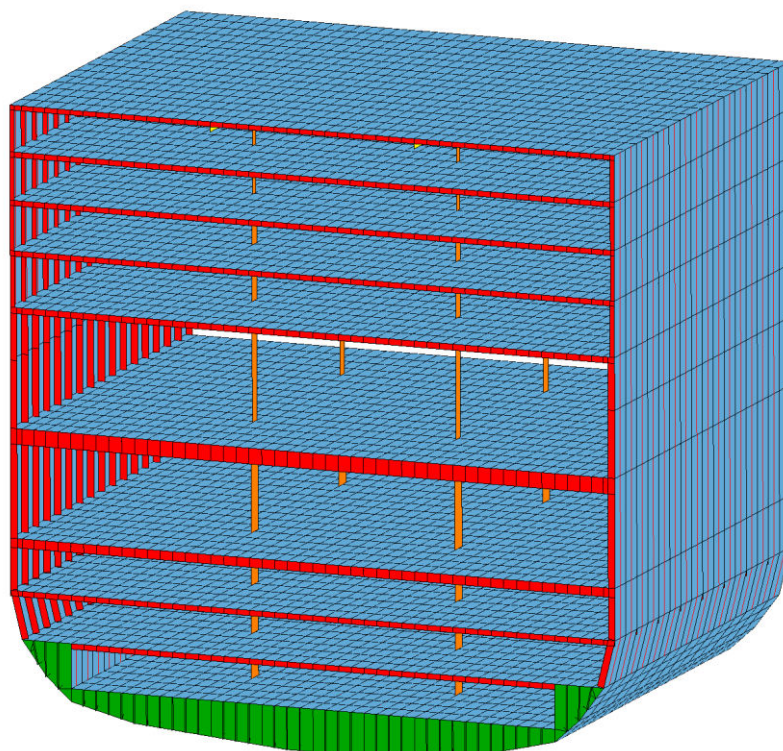
Izrada modela može se opisati sljedećim koracima:

1. određivanje i zadavanje čvorova na pozicijama spojeva uzdužnih nosača s vojevima oplata na način da se upišu njihove koordinate u odnosu na ishodište
2. unošenje debljina svake oplata i poprečnih dimenzija svakog nosača u bazu podataka
3. postavljanje vojeva oplata između čvorova s pridruženim karakteristikama iz baze podataka vezanih za debljinu, vrstu materijala i pripadno orebrenje

Prvo je izrađen polovinski model prikazan na slici 5., a nakon zadavanja opterećenja i rubnih uvjeta, opcijom zrcaljenja dobiven je cijeli model prikazan na slici 6.

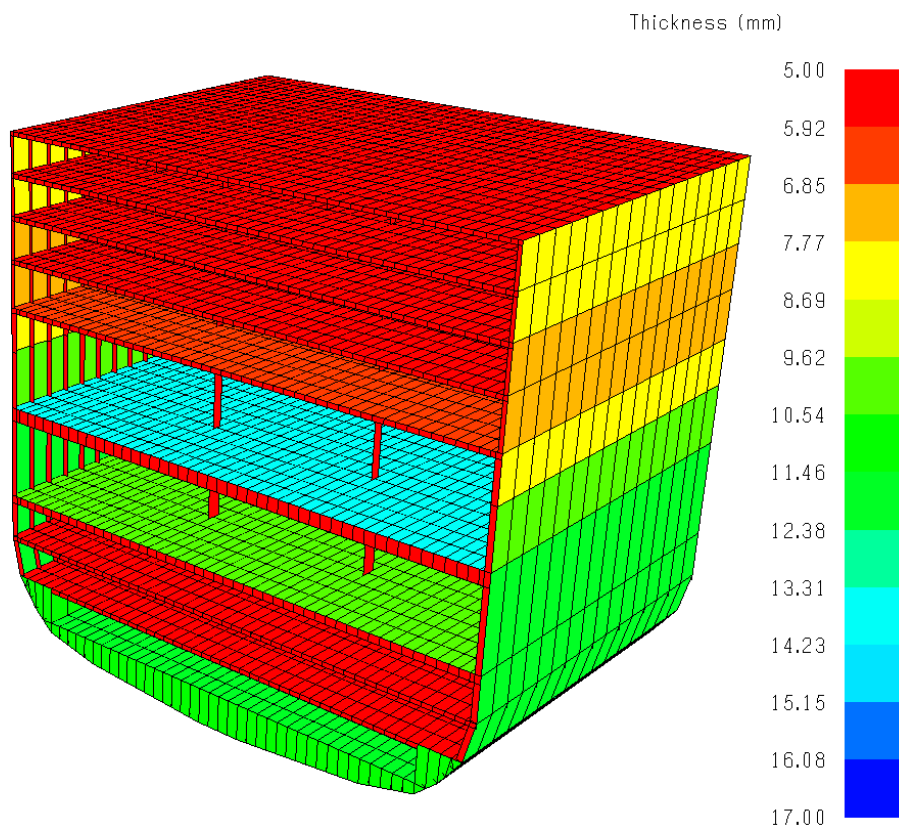


Slika 5. Polovinski model



Slika 6. 3D cijeli model

Na slici 7. prikazan je cijeli prototipni model s označenim debljinama oplata.



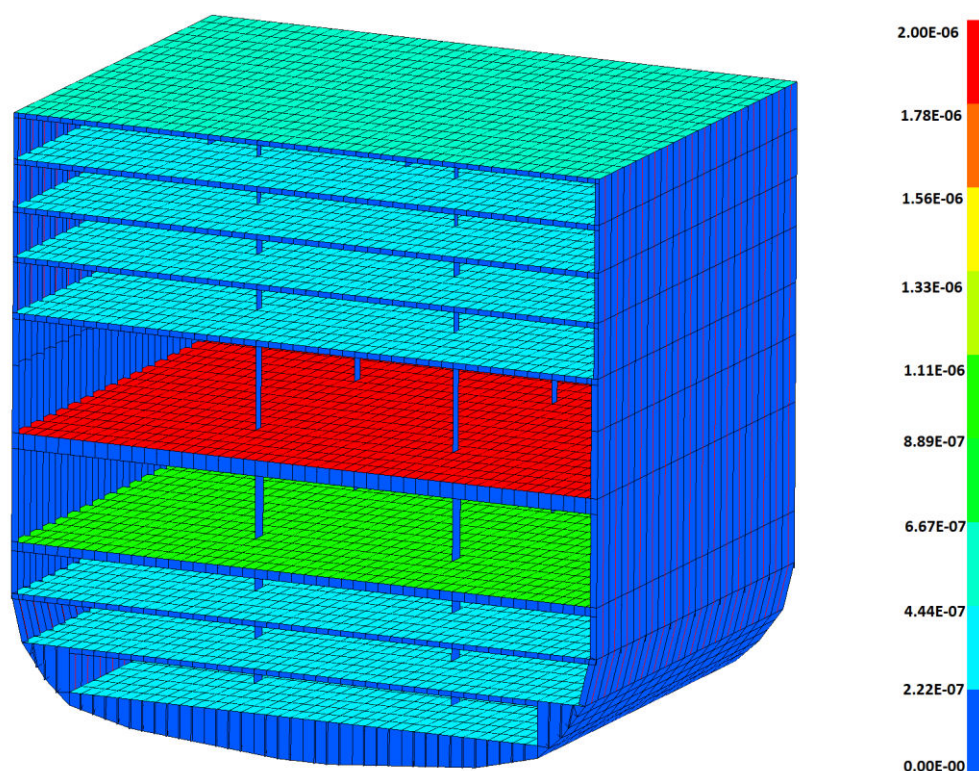
Slika 7. Debljine oplata prototipa

3.3. Model opterećenja i rubni uvjeti

Proračun opterećenja vertikalnim momentima savijanja, ubrzanjem i tlakovima proveden je prema pravilima klasifikacijskog društva DNV.

Opterećenje od vozila modelirano je kao ravnomjerno raspoređena masa tereta u tonama po nekoj površini. Ono odgovara opterećenju kotača vozila q zapisanog u t/m^2 sa slike 3. zadanog za svaku teretnu palubu. Opterećenje na gornjoj palubi dobiveno je preko najvećeg predviđenog tlaka na palubi podijeljenog ubrzanjem zemljine sile teže g .

Na slici 8. prikazano je opterećenje po palubama.



Slika 8. Opterećenje po palubama [t/mm^2]

Vlastitu težinu strukturnog modela program računa automatski i implementira kao čvorne sile.

3.3.1. Slučajevi opterećenja

Analizirana su četiri različita slučaja opterećenja prema pravilima DNV-a [3].

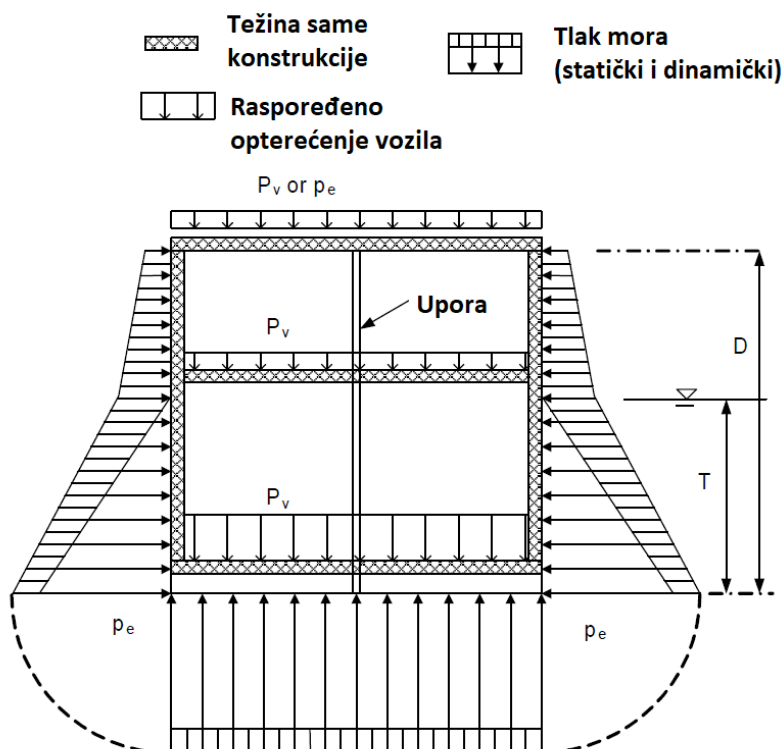
Tablica 12. Slučajevi opterećenja

Slučaj opterećenja	Opis opterećenja
LC 1	Puno opterećenje po palubama + ubrzanje/projektni gaz / Pregib
LC 2	Puno opterećenje po palubama + ubrzanje / projektni gaz / Progib
LC 3	Puno opterećenje po palubama + nagnuti brod na desnu stranu
LC 4	Puno opterećenje po palubama + nagnuti brod na lijevu stranu

Vertikalni ukupni momenti savijanja trupa za pojedini slučaj opterećenja su sljedeći:

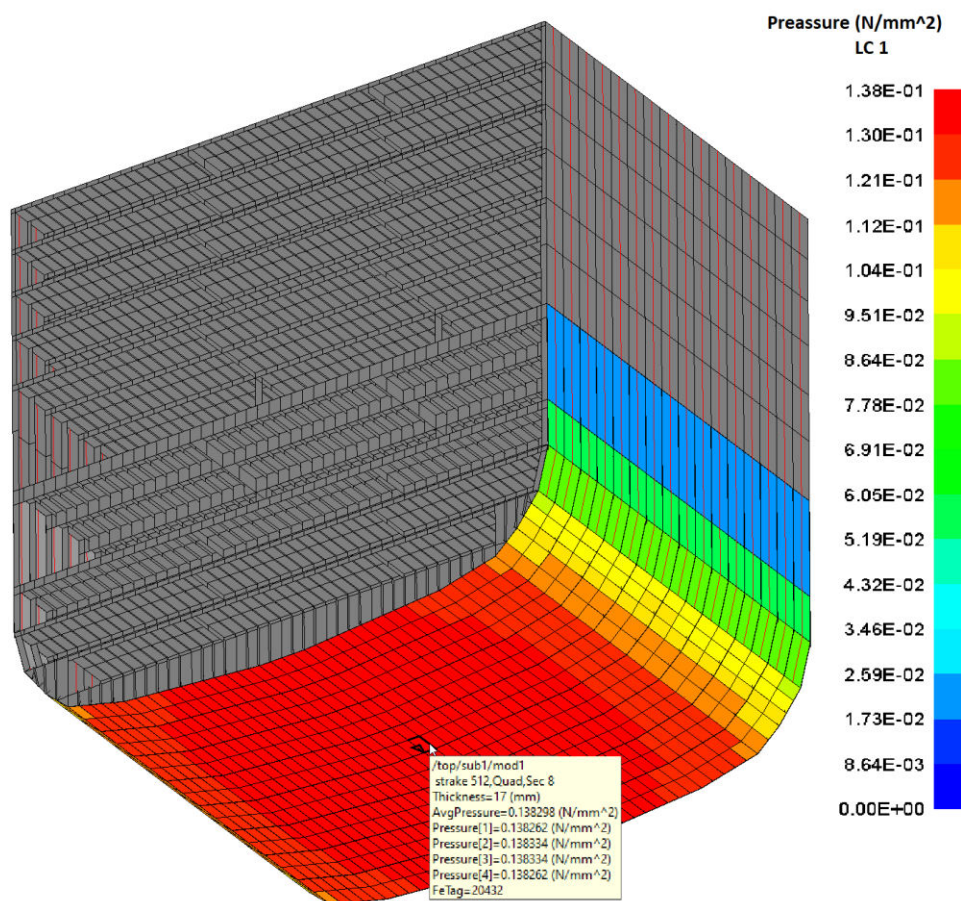
- LC 1 $M_{\text{total-hogg}} = 2,02 \cdot 10^6$ kNm
- LC 2 $M_{\text{total-sagg}} = -5,52 \cdot 10^5$ kNm
- LC 3 $M_{\text{static-hogg}} = 1,5 \cdot 10^6$ kNm
- LC 4 $M_{\text{static-hogg}} = 1,5 \cdot 10^6$ kNm

Kut poprečnog nagiba za LC 3 i LC 4 iznosi 11 stupnjeva i dobiven je prema pravilima DNV-a [1]. Shematski prikaz slučaja opterećenja LC 1 dan je na slici 9.



Slika 9. Skica opterećenja za LC 1

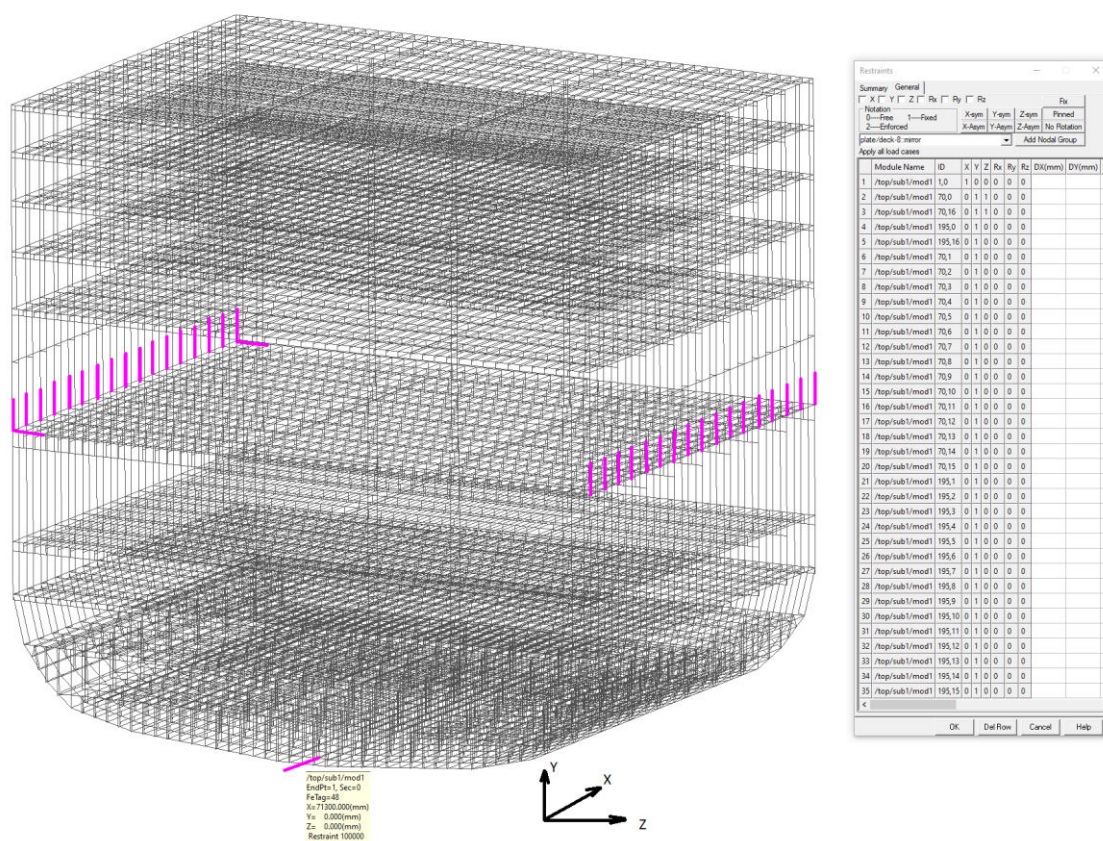
Na slici 10. prikazani su rezultirajući tlakovi od mora (statički +valni) na podvodni dio trupa za LC 1.



Slika 10. Tlakovi na vanjsku oplatu uslijed djelovanja od mora za LC 1

3.3.2. Rubni uvjeti

U čvorovima koje određuje DNV [3] postavljaju se rubni uvjeti pomaka s ulogom sprječavanja translacijskih i rotacijskih pomaka modela kao krutog tijela. Odabrani karakteristični čvorovi djeluju kao fizikalni oslonci koji se postavljaju na jaku strukturu radi preuzimanja mogućih sila reakcija. Na slici 11. prikazani su rubni uvjeti strelicom koja pokazuje smjer spriječenog pomaka.



Slika 11. Rubni uvjeti

3.4. Kriteriji podobnosti

Elementi koji ne mogu izdržati njima nametnuta opterećenja smatraju se nepodobnima i moraju se redimenzionirati da bi zadovoljili kriterije podobnosti. Dobivanjem odziva deformacija i naprezanja uslijed opterećenja konstrukcije, može se provjeriti koji su elementi nepodobni.

Kod kompleksne strukture poput brodske, postoji više načina oštećenja. Informacija samo o naprezanju u nekom elementu konstrukcije nije dovoljna jer je potrebno znati hoće li doći do popuštanja, izvijanja ili nekog drugog načina oštećenja. Model podobnosti pruža informaciju o prekoračenju dozvoljenog odziva konstrukcije te je određen bibliotekom analitički zadanih projektnih kriterija. U najopćenitijem obliku izražava se na sljedeći način:

$$g = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D} \quad (23)$$

pri čemu su g faktor podobnosti, C izdržljivost (*Capability*), D zahtjev (*Demand*) i γ faktor sigurnosti.

Faktor podobnosti može postići vrijednosti u rasponu od -1 do +1. Granična vrijednost $g = -1$ znači da je izdržljivost jednaka nuli, a granična vrijednost $g = +1$ da je zahtjev jednak nuli. Podobnost elementa konstrukcije osigurana je za faktor podobnosti veći ili jednak nuli [2]. Popis razmatranih kriterija pri evaluaciji podobnosti dan je u tablici 13., uz pripadne faktore sigurnosti (γ) usklađene s pravilima DNV-a za pojedini kriterij.

Tablica 13. Kriteriji podobnosti prema programu MAESTRO [2]

Kriterij	Opis kriterija	γ
PCSF	<i>Panel Collapse, Stiffener Flexure</i>	1,00
PCCB	<i>Panel Collapse, Combined Buckling</i>	1,00
PCMY	<i>Panel Collapse, Membrane Yield</i>	1,05
PFLB	<i>Panel Failure, Local Buckling</i>	1,00
BCCF	<i>Beam Collapse, Compression in Flange</i>	1,00
BCCP	<i>Beam Collapse, Compression in Plate</i>	1,00
BYF	<i>Beam Yield, Flange</i>	1,05
BYP	<i>Beam Yield, Plate</i>	1,05

Kriteriji PCSF, PCCB i PFLB evaluiraju različite načine izvijanja oplate između orebrenja, a to je posebno važno razmotriti kod brodova za prijevoz automobila i kamiona jer palube koje su namijenjene prijevozu automobila udovoljavaju zahtjevima opterećenja od vozila pri relativno tankim debljinama limova. Detaljan opis svih kriterija dan je u [3].

3.5. Analiza prototipa

Na temelju dimenzija konstrukcijskih elemenata dobivenih u prvoj fazi proračuna po pravilima DNV-a [1] prema kojima je napravljen prototip, potrebno je analizirati:

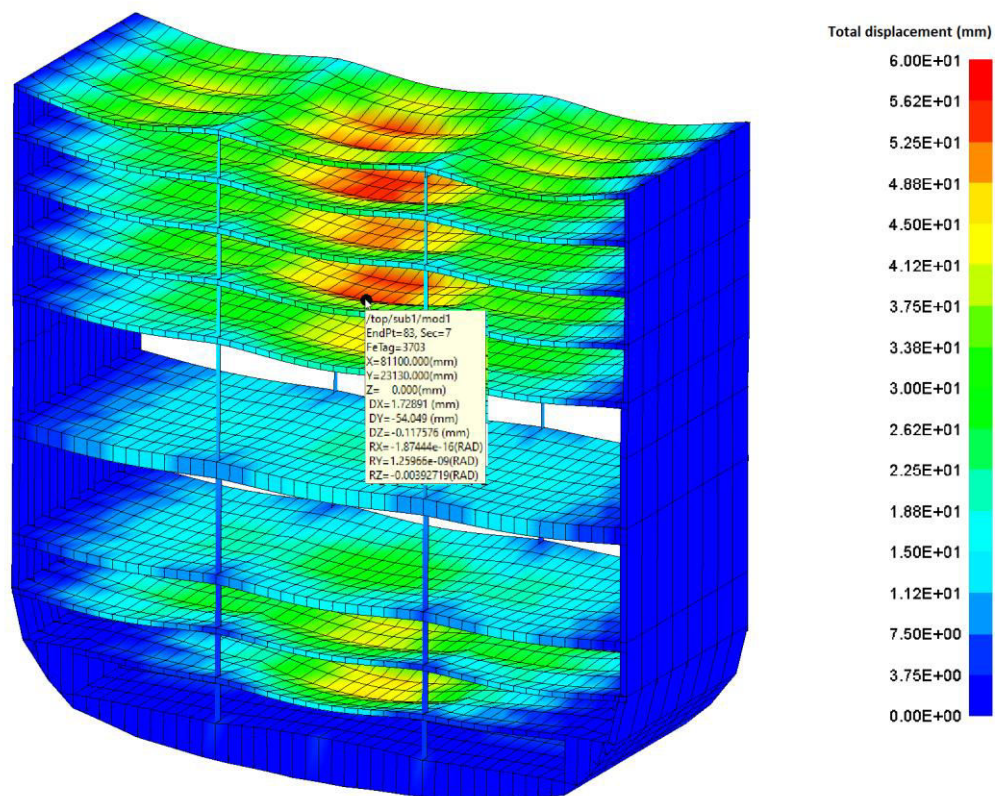
- pomake
- naprezanja
- faktore podobnosti.

3.5.1. Analiza pomaka

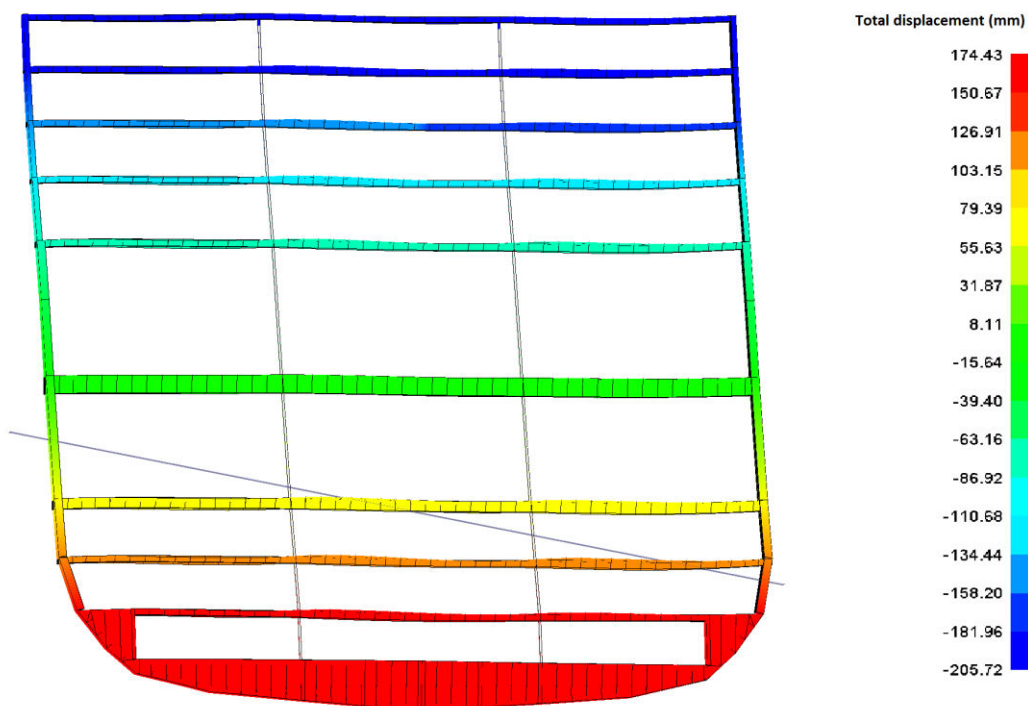
Najveći vertikalni progibi pojavljuju se na sredini parcijalnog modela, dakle na sredini nepoduprtog raspona između četiri upore, kao što se moglo i očekivati. Za palube 9, 10, 11 i 12 progibi poprimaju najveće vrijednosti od oko 60 mm, i to za LC 2. Za palubu 1 najveći pomak je pregib dvodna u LC 1 kada na brod djeluje maksimalni pregibni moment savijanja i maksimalni tlak na dno kada je brod na valnom brijegu. Kao maksimalni iznos dopušteni vertikalni progiba uzima se iznos od $l/200$, pri čemu je l nepoduprti raspon. U ovome primjeru l bi bio širina broda od 31,1 m te bi time maksimalni dopušteni vertikalni progib iznosio 155,5 mm. Jasno je da su vertikalni progibi od 60 mm koji su dobiveni za LC 2 daleko ispod toga.

Pomaci u smjeru osi Z poprimaju najveće vrijednosti za LC 3 i 4. Za LC 3, kada je kut nagiba pozitivan, najviše se pomaknu gornja paluba u pozitivnom smjeru, a dno u negativnom smjeru osi Z. Najveće vrijednosti pomaka iznose preko dvjesto milimetara, a toliki pomaci nisu dopustivi. Ipak, takav rezultat nije realan jer se evaluira parcijalni model bez pregrada i okvira koji bi dali poprečnu krutost. Kada bi se, kao u stvarnom projektantskom procesu, evaluirao model cijeloga broda, koji ima pregrade i okvire, rezultati bi za iste elemente konstrukcije glavnog rebra bili mnogo povoljniji.

Na slici 12. prikazani su progibi za LC 2, a na slici 13. prikazani su pomaci u smjeru osi Z za LC 4.



Slika 12. Vertikalni pomaci za LC 2



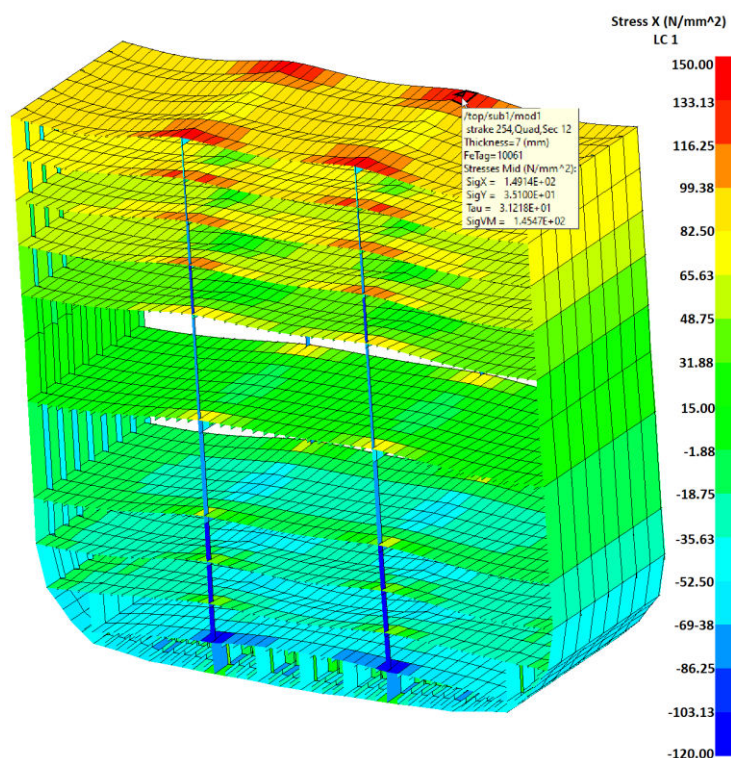
Slika 13. Horizontalni pomaci za LC 4

3.5.2. Analiza naprezanja

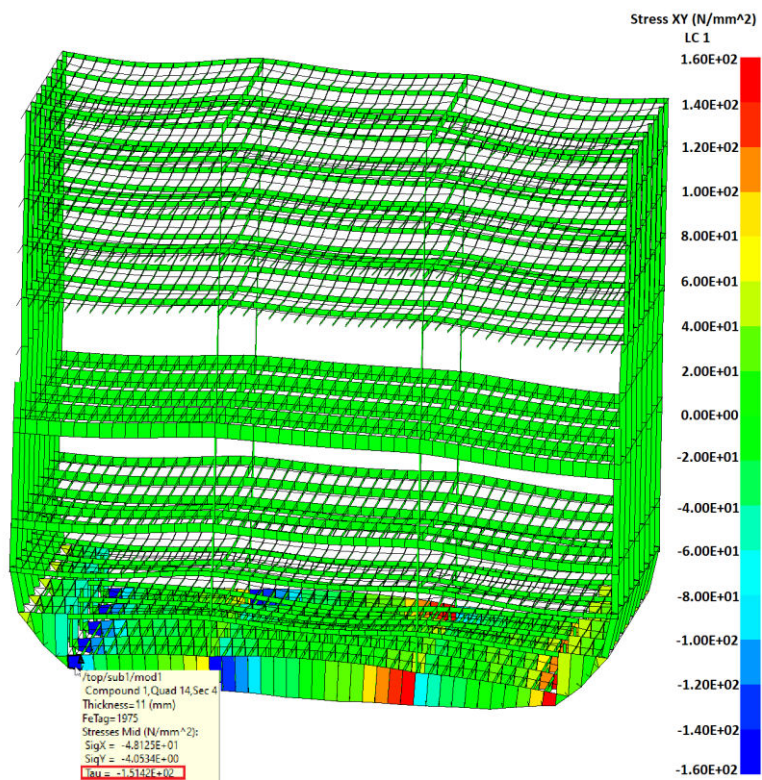
Naprezanja na prototipu za LC 1 i LC 2 koja prelaze dopuštenu granicu su:

- smična naprezanja na rebrenici
- naprezanja na uzdužnjacima gornje palube
- naprezanja na podvezama i sponjama na mjestima gdje se ti elementi križaju na poziciji upora

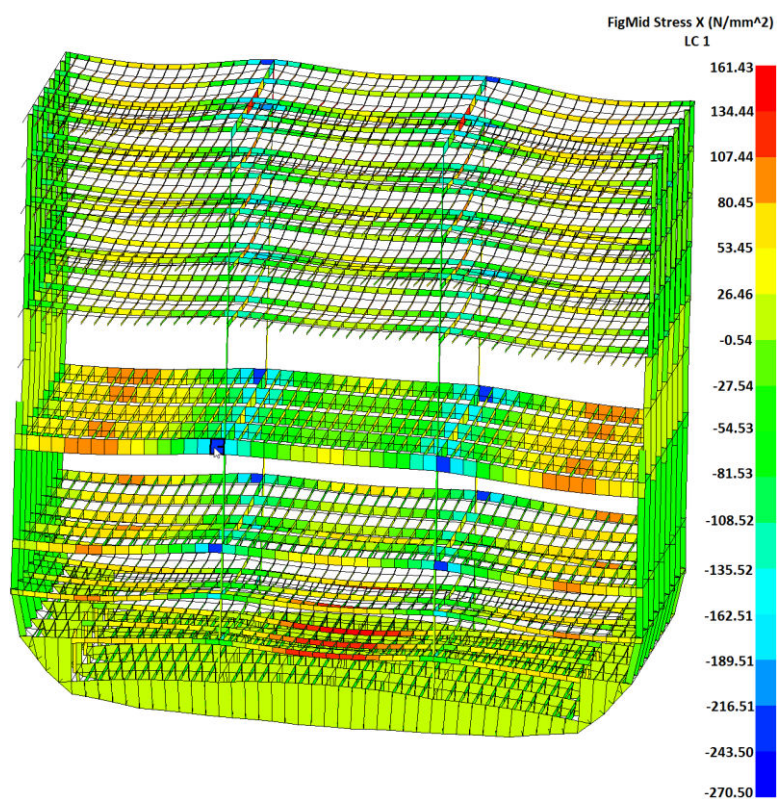
Naprezanja za LC 3 i LC 4 nisu relevantna jer parcijalni model, za razliku od modela cijelog broda, nema pregrade i okvire pa je poprečna krutost puno manja nego u stvarnosti a naprezanja puno veća. Na slikama 14.-16. prikazana su najveća naprezanja na prototipnome modelu za LC 1.



Slika 14. Uzdužna naprezanja u vanjskoj oplati i palubama za LC1



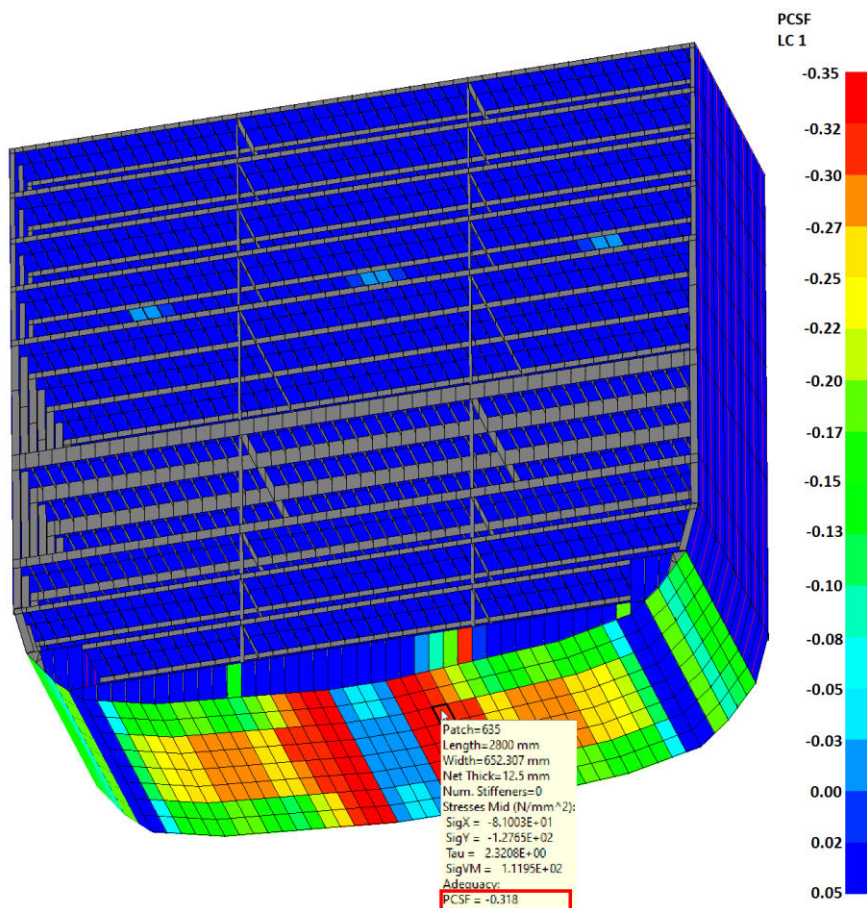
Slika 15. Smična naprezanja u rebrenicama za LC1



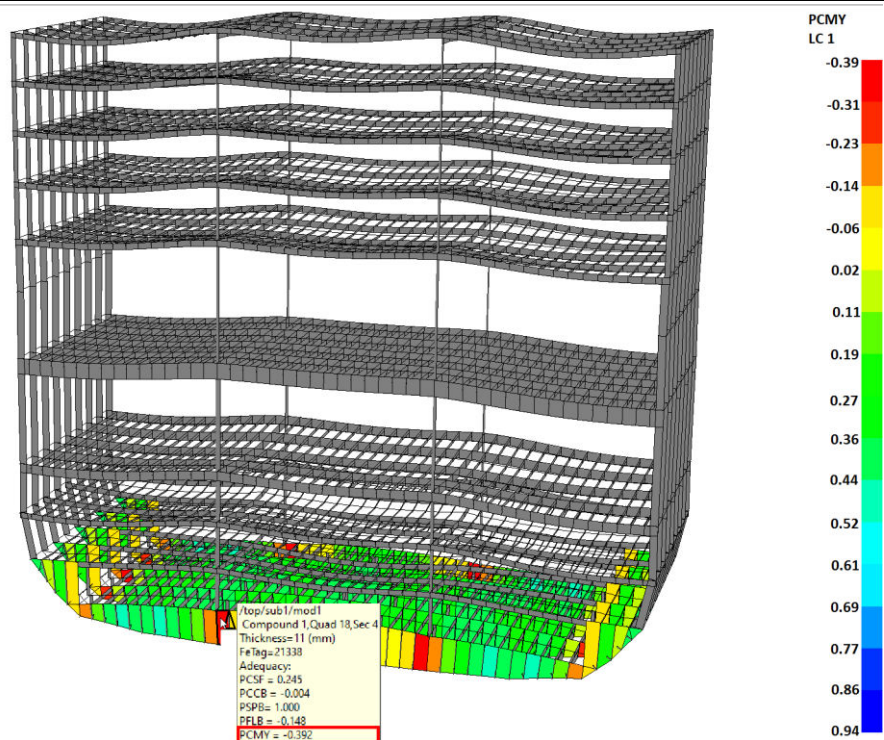
Slika 16. Ukupna (aksijalna+savojna) naprezanja u grednim elementima za LC1

3.5.3. Analiza kriterija podobnosti

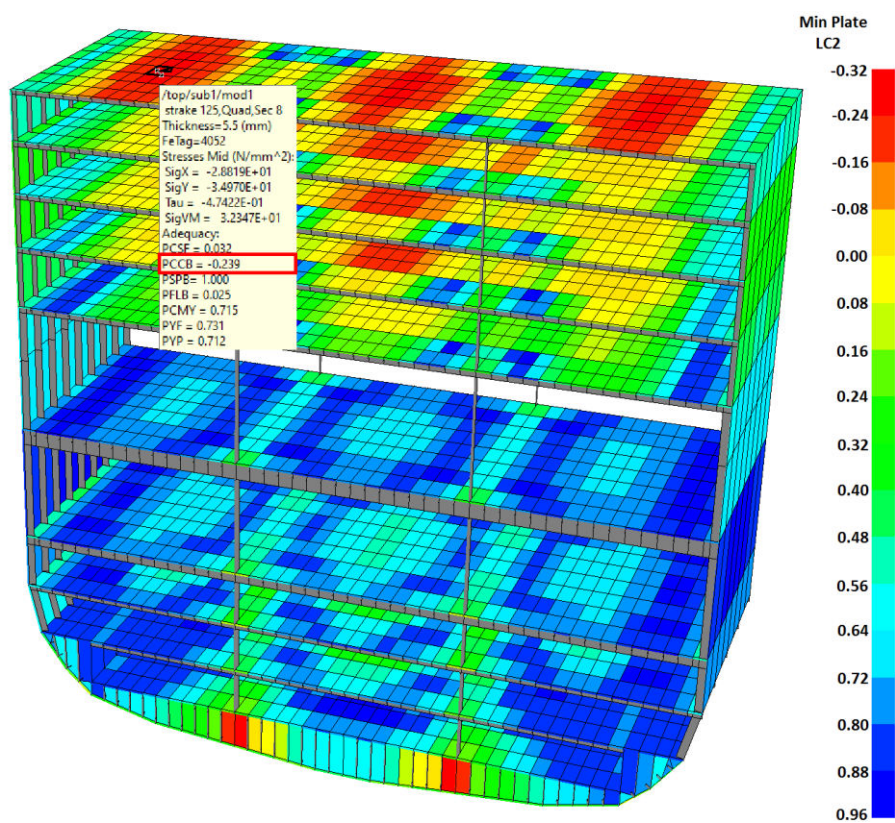
Provedena je evaluacija podobnosti za sve slučajeve opterećenja. Na slikama 17.-20. prikazani su neki od nepodobnih elemenata po raznim kriterijima za LC 1 i LC 2.



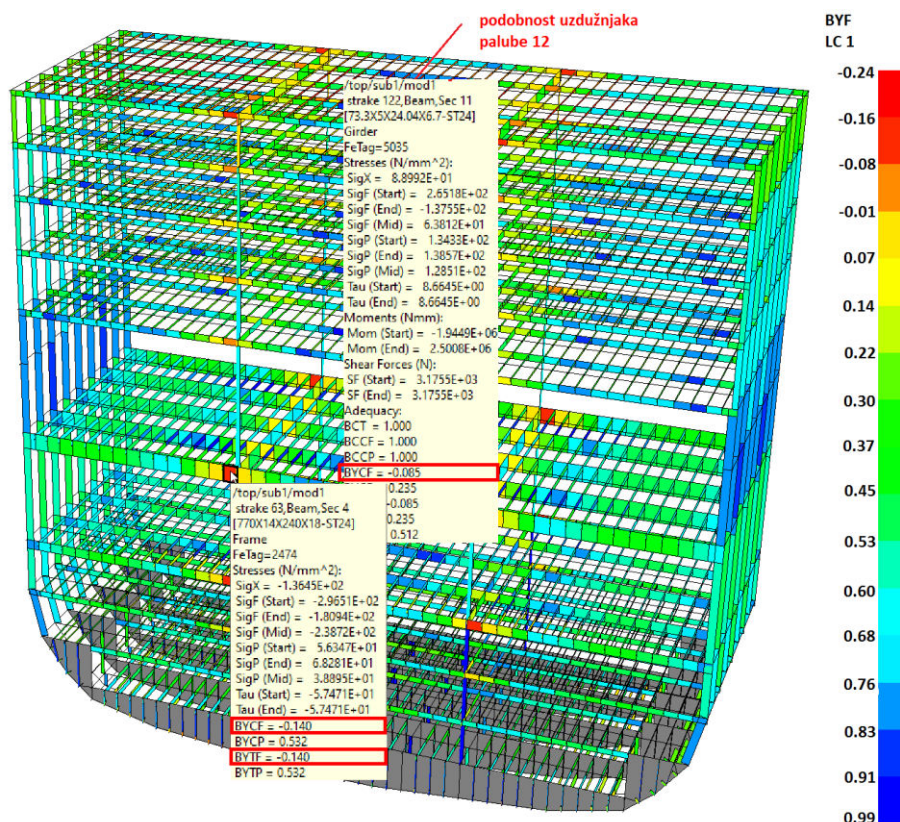
Slika 17. Vrijednost faktor podobnosti g za PCSF kriterij dna za LC 1



Slika 18. Vrijednost faktor podobnosti g za PCMY kriterij rebrenica za LC 1



Slika 19. Vrijednost najmanjeg faktora podobnosti g za sve kriterije za paluba za LC 2



Slika 20. Vrijednost faktor podobnosti g za BYF kriterij grednih elemenata za LC 1

Za većinu nepodobnih elemenata oplata najgori je kriterij PCCB odnosno kombinirano izvijanje panela uslijed uzdužnih, poprečnih i smičnih naprezanja [2]. Kriterij popuštanja pojasa BYF bio je najnezadovoljniji kriterij kod većine nepodobnih grednih nosača, dok je kod nepodobnih dijelova rebrenice to bio kriterij popuštanja panela PCMY.

Svi nepodobni elementi navedeni su u tablici 14. uz vrijednost najmanje zadovoljenog kriterija podobnosti.

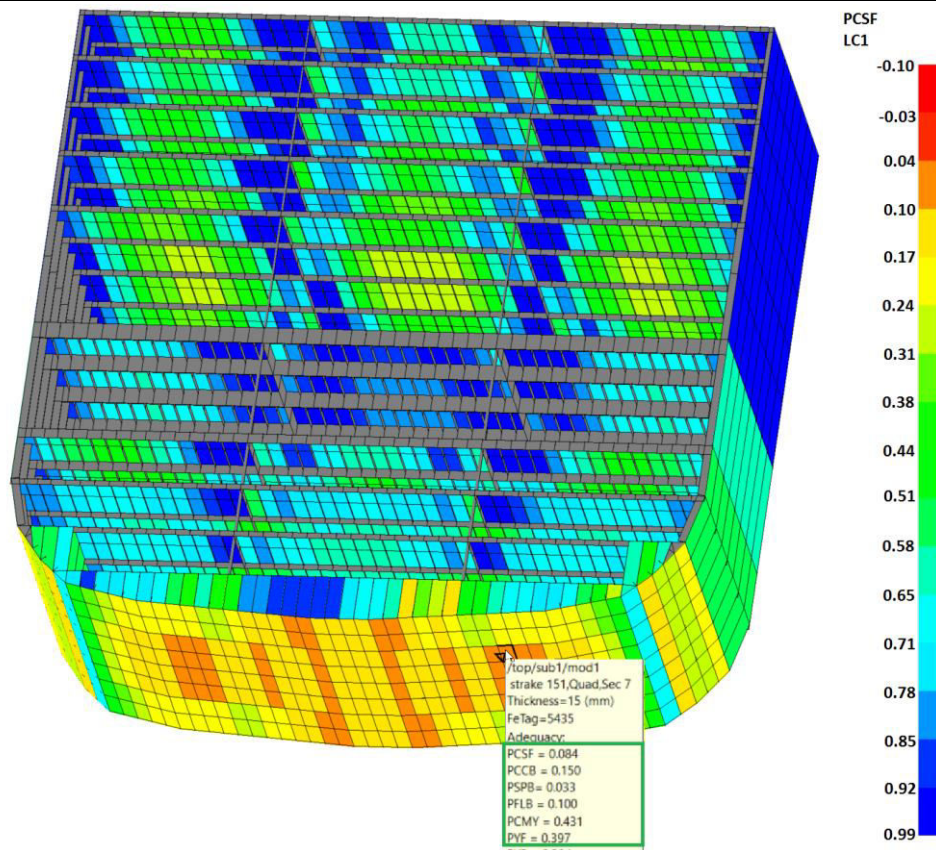
Tablica 14. Nepodobni dijelovi prototipa

Pozicija	Način oštećenja
Oplata dna	PFLB = -0,133
Oplata dna- dokobilični voj	PFLB = -0,160
Paluba 2- oplata	PCCB = -0,160
Paluba 3- oplata	PCCB = -0,167
Paluba 9- oplata	PCCB = -0,188
Paluba 10- oplata	PCCB = -0,172
Paluba 11- oplata	PCCB = -0,172
Paluba 12- oplata	PCCB = -0,250
Rebrenica uz uporu	PCMY = -0,390
Rebra u uzvoju	PCMY = -0,100
Paluba 12- uzdužnjaci	BYF= -0,127
Paluba 4- sponja na sjecištu s uporom	BYF = -0,130
Paluba 6- sponja na sjecištu s uporom	BYF = -0,140
Paluba 8- sponja na sjecištu s uporom	BYF = -0,023
Paluba 9- sponja na sjecištu s uporom	BYF = -0,025
Paluba 11- sponja na sjecištu s uporom	BYF = -0,030
Paluba 12- sponja na sjecištu s uporom	BYF = -0,110

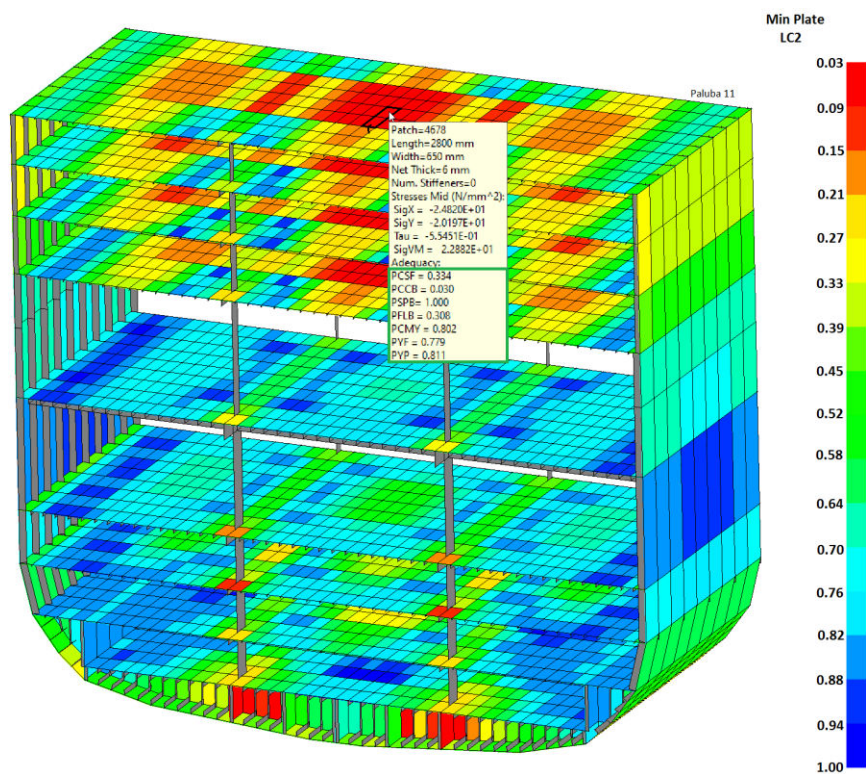
3.6. Prijedlog podobne konstrukcije

Nakon provedbe redimenzioniranja, dan je prijedlog podobne konstrukcije. Elementi konstrukcije koji su bili nepodobni, iterativnim postupkom povećane su im dimenzije pazeći da postanu podobni, ali ne i predimenzionirani. Nepodobnim dijelovima oplata i rebrenice povećane su debljine lima. Nepodobnim dijelovima grednih elemenata profili su zamijenjeni onima većeg poprečnog presjeka. Za sponje, ta je promjena značila povećanje debljine struka na mjestima sjecišta sponje s podvezom i uporom tako da se sponjama i podvezama debljina struka poveća na debljinu kutijastog profila upore. Na brodskim konstrukcijama, povećavanje debljina strukova na sjecištima sponja i podveza s uporom uobičajena je pojava te su i sjecišta na predlošku tako izvedena. Osim čvrstoće broda, takva je izvedba i tehnološki prihvatljivija. Zbog krutih pravila DNV-a [1], podveze su ispale predimenzionirane. Naime, po pravilima je njihov nepoduprti raspon jednak onome između upora, a širina opterećenja poprečnom razmaku između upora, dok u stvarnosti sponje na tom rasponu ipak pridonose krutosti podveze pa je zahtijevani moment otpora prevelik. Profili podveza su smanjeni, ali unutar granica podobnosti, zbog uštede na masi.

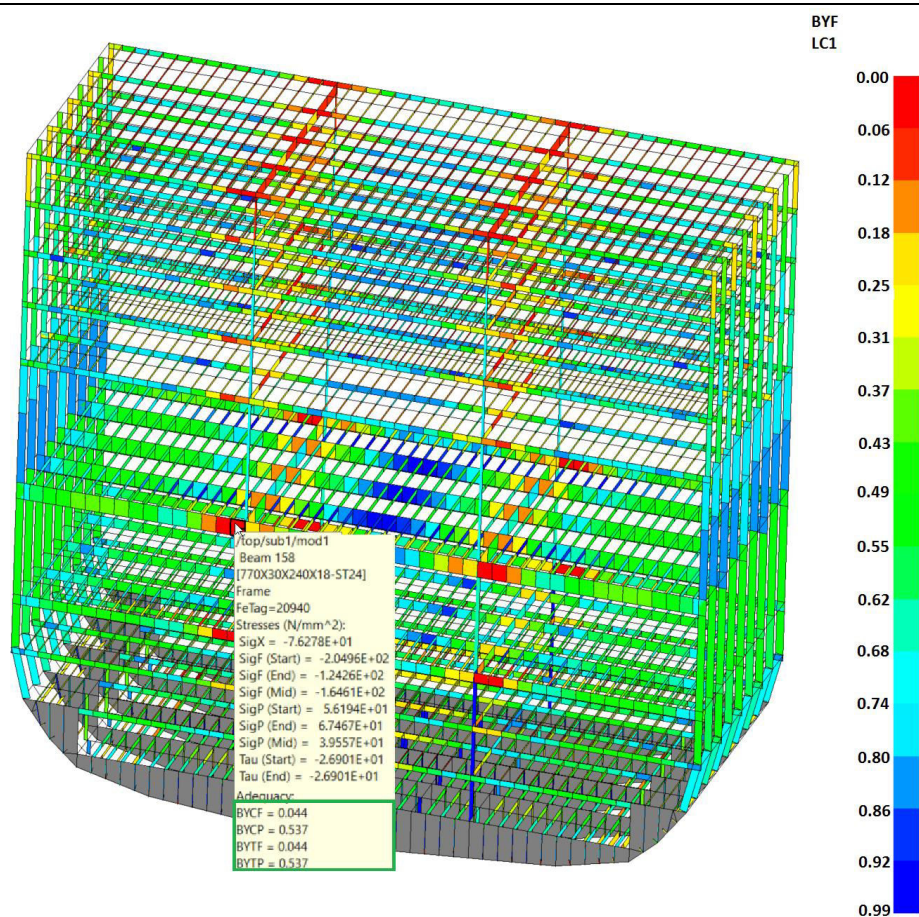
Na slikama 21.-23. prikazani su postignuti faktori podobnosti za poboljšani model



Slika 21. Vrijednost faktora podobnosti g za PCSF kriterij poboljšanog dna za LC 1



Slika 22. Vrijednost najmanjeg faktora podobnosti g za sve kriterije poboljšane oplate za LC 2



Slika 23. Vrijednost faktora podobnosti g za BYF kriterij poboljšanih grednih elemenata

U tablici 15. dan je prikaz debljina oplata i rebrenice prije i nakon redimenzioniranja uslijed nepodobnosti.

Tablica 15. Debljine oplata prototipne i predložene konstrukcije

Pozicija	Debljina [mm]	
	Prototipna konstrukcija	Predložena konstrukcija
Oplata dna	12,5	15
Oplata dna- dokobilični voj	12,5	15,5
Paluba 2- oplata	5	6
Paluba 3- oplata	5	6
Paluba 9- oplata	5	6
Paluba 10- oplata	5	6
Paluba 11- oplata	5	6
Paluba 12- oplata	5,5	7
Rebrenica uz uporu	11	18
Rebra u uzvoju	11	18

U tablici 16. prikazani su odabrani profili grednih elemenata uzdužnjaka, sponje na sjecištu s podvezom i uporom prije i nakon redimenzioniranja uslijed nepodobnosti.

Tablica 16. Odabrani profili prototipne i predložene konstrukcije

Pozicija	Odabrani profil	
	Prototipna konstrukcija	Predložena konstrukcija
Paluba 12- uzdužnjaci	HP80x5	HP100x6
Paluba 2- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T264x10/140x20	T264x30/140x20
Paluba 3- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T264x10/140x20	T264x30/140x20
Paluba 4- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T450x13/200x25	T450x30/200x25
Paluba 6- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T770x14/240x18	T770x30/240x18
Paluba 8- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T294x10/140x20	T294x30/140x20
Paluba 9- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T264x10/140x20	T264x30/150x20
Paluba 10- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T264x10/140x20	T264x30/150x20
Paluba 11- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T264x10/150x15	T264x30/150x20
Paluba 12- sponja na sjecištu s podvezom i uporom	T240x10/200x20	T240x30/200x20

U tablici 17. prikazani su odabrani profili grednih elemenata podveze prije i nakon redimenzioniranja uslijed predimenzioniranosti.

Tablica 17. Odabrani profili podveze prototipne i predložene konstrukcije

Pozicija	Odabrani profil	
	Prototipna konstrukcija	Predložena konstrukcija
Paluba 2- podveza	T260x15/490x30	T260x12/250x20
Paluba 3- podveza	T265x15/480x30	T265x12/250x20
Paluba 4- podveza	T440x25/550x50	T440x20/300x20
Paluba 6- podveza	T770x30/480x60	T770x20/400x20
Paluba 8- podveza	T280x15/520x30	T280x15/225x20
Paluba 9- podveza	T265x15/325x45	T265x12/250x20
Paluba 10- podveza	T265x15/480x30	T265x12/225x20
Paluba 11- podveza	T265x15/450x30	T265x12/225x20
Paluba 12- podveza	T500x12/290x20	T500x12/220x20

3.7. Usporedba masa i težišta

Mase i vertikalna težišta masa dobiveni su iz strukturnih modela izrađenih u programu MAESTRO [3]. U tablici 18. dana je usporedba masa i vertikalnih težišta prototipnih i poboljšanih konstrukcija:

Tablica 18. Usporedba masa i vertikalnih težišta protipnog i predloženog modela

Model	Ukupna masa modela [t]	Vertikalno težište [mm]
Prototipni	1 089,4	14 914,7
Predloženi	1 117,6	14 905,7

Iz tablice 18. može se zaključiti kako se ukupna masa modela povećala za 28,2 t, odnosno 2,3%. Sa stajališta čvrstoće broda, ovako malo povećanje mase nakon redimenzioniranja, s obzirom na to da su brojni elementi prototipa prije redimenzioniranja bili nepodobni, povoljan je ishod. Razlog tako malom porastu mase je smanjivanje elemenata koji su se pokazali predimenzioniranima.

Osim na čvrstoću broda, redimenzioniranje je imalo i povoljan ishod na stabilitet broda zbog smanjenja vertikalnog težišta broda.

3.8. Zaključak

Nakon provedbe druge faze proračuna konstrukcije metodom konačnih elemenata, dobiven je prijedlog rješenja poboljšanog modela. Nepodobni elementi, kao i oni predimenzionirani, redimenzionirani su tako da cijela konstrukcija bude podobna. Rezultat redimenzioniranja je porast mase konstrukcije od 2,3%.

4. ZAKLJUČAK

Projektiranje brodske konstrukcije uvijek je vođeno raznim kriterijima poput razine naprezanja, strukturnog integriteta, podobnosti, ali i najmanje mase. Udovoljavanje svim kriterijima zahtijeva iscrpne proračune s ciljem što jeftinije izgradnje sigurnijeg broda manje mase i potrošnje pri istoj brzini koji će imati veću nosivost za istu formu broda.

Kroz ovaj rad projektirana je konstrukcija glavnog rebra broda za prijevoz automobila i kamiona kroz dvije faze:

1. dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata po pravilima DNV-a [1]
2. provjera podobnosti konstrukcije metodom konačnih elemenata

U prvoj fazi dimenzionirani konstrukcijski elementi po preskriptivnim pravilima DNV-a [1]. Proračun je proveden u računalnom programu MS Excel [5]. Provjeren je utjecaj broja upora na visinu sponja i, kao posljedicu toga, na ukupnu visinu broda. Također, provedena je analiza senzitivnosti mase konstrukcije za tri projektne varijante razmaka uzdužnjaka i poprečnih okvira. Po kriteriju najmanje mase, odabrana je varijanta za nastavak proračuna i ulazak u drugu fazu.

U drugoj fazi proračuna izrađeni su 3D parcijalni modeli u programu MAESTRO [2] prethodno odabrane varijante i provedena je analiza metodom konačnih elemenata za zadane slučajeve opterećenja. Provedena je provjera podobnosti za sve elemente konstrukcije nakon koje se pokazalo da su neki elementi, iako su uni-aksijalna naprezanja bila prihvatljiva, zbog izvijanja uzrokovanih bi-aksijalnim tlačnim napreznjima bili nepodobni. Nepodobni elementi redimenzionirani su tako da im je povećana debljina, ako se radilo o elementima oplata i rebrenica, ili poprečni presjek profila, ako se radilo o grednim elementima.

Ova analiza potvrdila je važnost razmatranja interakcije uzdužne i poprečne čvrstoće brodske konstrukcije i podsjetila zašto današnji standardi, osim proračuna konstrukcijskih elemenata po pravilima klasifikacijskog društva, koje pokriva samo proračun uzdužne i lokalne čvrstoće, sve više nalažu, zahvaljujući napredku računalne tehnologije, i provodbu proračuna uzdužne i poprečne čvrstoće konstrukcije koristeći MKE.

Tim načinom postiglo se racionalnije projektiranje elemenata konstrukcije izloženih realističnijim slučajevima opterećenja.

LITERATURA

- [1] Det Norske Veritas, Rules for Classification of Ships, Part 3 Ch1 Hull structural design- Ships with length 100 metres and above, January 2016.
- [2] MAESTRO Version 11.5.0., Software Documentation. DRS-C3 Advanced Technology Center, Stevensville, USA, 2017.
- [3] Det Norske Veritas, Classification notes No. 31.2., Strength analysis of hull structure in roll on/roll off ships and car carriers, April 2011.
- [4] Hohga H., Nishimura K., Torii Y., Uetani H., Ship Design and Construction, Vol II. CH.34, Car carriers SNAME, 2004.
- [5] Microsoft Excel 2016, Microsoft office 365, USA 2016.
- [6] Det Norske Veritas, Rules for Classification of Ships, Part 5 Ch2 Newbuildings Special service and type- Additional class Passenger and Dry Cargo Ships, July 2011.
- [7] Glavno rebro nov. 463, predložak, dokumentacija brodogradilišta Uljanik, 2007.

PRILOZI

I. CD-R disc