Projektiranje konstrukcije malog aluminijskog broda za operacije traganja i spašavanja

Buconić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:650534

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-12**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Buconić

Zagreb, 2021.godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori: Student:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing. Marko Buconić

Zagreb, 2021.godina.

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

Zahvaljujem se mentoru, Prof. dr. sc. Jerolimu Andriću, na nesebičnoj pomoći, savjetima i konstruktivnim kritikama tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem svojoj djevojci, obitelji i prijateljima na potpori i povjerenju tijekom studiranja.

Marko Buconić

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Buconić** JMBAG: 0035204296

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje konstrukcije malog aluminijskog broda za operacije traganja i spašavanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of small aluminium vessel for search and rescue operation**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati konstrukciju malog broda, duljine oko 20 m, za operacije traganja i spašavanja na moru. Razmotriti uporabu aluminijskih legura kao prikladnog materijala za konstrukciju zbog odličnog odnosa čvrstoće i specifične težine.

U zadatku je potrebno:

- Na osnovu preliminarnog predloška brodskih linija napraviti geometrijski model broda u programu *Rhinoceros*.
- Upoznati se s Pravilima za dimenzioniranje elemenata brodske konstrukcije od aluminijskih legura nekog od relevantnih klasifikacijskih društava (BV, DNV, LR, itd.).
- Topološki osmisliti raspored konstrukcijskih elemenata (poziciju pregrada, razmak rebara/uzdužnjaka) te prikladan sustav orebrenja.
- Sukladno Pravilima provesti proračun opterećenja i lokalno dimenzioniranje svih konstrukcijskih elemenata (oplata dna, boka, palube te pripadajućeg orebrenja).
- Provesti studiju senzitivnosti vezano za različit sustav orebrenja (poprečni, uzdužni, kombinirani sustav gradnje i sl.), te za svaku varijantu napraviti procjenu mase konstrukcije.
- Za odabrane varijante provesti direktnu analizu čvrstoće korištenjem metode konačnih elemenata (MKE), te provesti analizu podobnosti na razini dozvoljenih naprezanja te kriterija izvijanja.
- Za identificirane nepodobne konstrukcijske elemente dati prijedlog novih konstrukcijskih dimenzija koji zadovoljavaju sve uvjete strukturne podobnosti.
- Nadopuniti geometrijski model broda u programu *Rhinoceros* sa svim bitnim konstrukcijskim elementima te napraviti osnovne konstrukcijske nacrte.

Prilikom provođenja MKE proračuna koristiti neke od dostupnih računalnih programa na FSB-u (*FEMAP*, *MAESTRO*, itd.). U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
6. svibnja 2021.	8. srpnja 2021.	12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Ćatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
1.1. Materijali izrade 1
1.2. Brodovi za traganje i spašavanje 2
2. GEOMETRIJSKI MODEL BRODA U PROGRAMU RHINOCEROS 5
2.1. Program Rhinoceros [1] 5
2.2. Izrada geometrije modela 5
3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA BRODA U PROGRAMU MARSPEED I POMOĆU PRAVILA BV-A 7
3.1. Uvod 7
3.2. Definicija opterećenja 9
3.2.1. Momenti savijanja 9
3.2.2. Opterećenje vanjskim tlakom 10
3.3. Dimenzioniranje limova i profila 11
3.3.1. Odabrane debljine limova 11
3.3.2. Profili uzdužnjaka 14
3.3.3. Odabrani profili rebara 16
3.3.4. Odabrani profili jakih uzdužnih nosača 17
3.3.5. Odabrane debljine limova i profili poprečnih pregrada 17
3.3.6. Zaključak 18
4. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA BRODA METODOM KONAČNIH ELEMENATA U FEMAP-U 20
4.1. Uvod 20
4.2. Priprema modela za izradu konačnih elemenata u programu Rhinoceros 20
4.3. Izrada mreže konačnih elemenata u programu FEMAP 22
4.3.1. Uzdužni sustav gradnje 22
4.3.2. Poprečni sustav gradnje 25
4.3.3. Dijagonalni sustav gradnje 27
4.4. Rezultati analize 29
4.4.1. Masa modela 29
4.4.2. Ukupne deformacije 30
4.4.3. Maksimalna Von Mises naprezanja 31
4.5. Zaključak 33
5. NADOPUNA KONSTRUKCIJE UZDUŽNOG SUSTAVA GRADNJE U PROGRAMU FEMAP I PROVEDBA DIREKTNE ANALIZE ČVRSTOĆE 34

5.1. Uvod ... 34
5.2. Izrada mreže konačnih elemenata bokova i palube ... 34
5.3. Kriterij evaluacije ... 37
5.4. Rezultati analize ... 38
6. FINALNI MODEL ... 40
6.1. Prijedlog podobne konstrukcije ... 40
6.2. Konačni model u programu Rhinoceros ... 43
7. ZAKLJUČAK ... 47
LITERATURA ... 48
PRILOZI ... 49

POPIS SLIKA

Slika 1. Plovilo izrađeno od aluminijske legure ... 1
Slika 2. Brod za traganje i spašavanje ... 3
Slika 3. Različiti sustavi orebrenja; a)poprečni [9], b)uzdužni [9], c)dijagonalni [5] ... 4
Slika 4. Korisničko sučelje programa Rhinoceros ... 5
Slika 5. Geometrijski model broda ... 6
Slika 6. Prikaz uzdužnjaka i rebra ... 6
Slika 7. Podjela broda na segmente ... 8
Slika 8. Debljine limova za uzdužno orebrenje ... 12
Slika 9. Debljine limova za dijagonalno orebrenje ... 12
Slika 10. Raspored profila uzdužnjaka uzdužnog orebrenja ... 14
Slika 11. Raspored uzdužnjaka dijagonalnog orebrenja ... 15
Slika 12. Model uzdužnog orebrenja ... 21
Slika 13. Model dijagonalnog orebrenja ... 21
Slika 14. Model poprečnog orebrenja ... 21
Slika 15. Prikaz mreže konačnih elemenata s gornje strane ... 22
Slika 16. Prikaz mreže konačnih elemenata s donje strane ... 23
Slika 17. Rubni uvjeti na uzdužnom modelu ... 24
Slika 18. Udarno opterećenje na dno ... 24
Slika 19. Udarno opterećenje na dno modela ... 25
Slika 20. Prikaz mreže konačnih elemenata s gornje strane ... 26
Slika 21. Prikaz mreže konačnih elemenata s donje strane ... 26
Slika 22. Rubni uvjeti poprečnog modela ... 27
Slika 23. Prikaz mreže konačnih elemenata s gornje strane dijagonalnog modela ... 28
Slika 24. Prikaz mreže konačnih elemenata s donje strane dijagonalnog modela ... 28
Slika 25. Rubni uvjeti s opterećenjem ... 29
Slika 26. Ukupne deformacije modela s dijagonalnim orebrenjem ... 30
Slika 27. Ukupne deformacije modela s poprečnim orebrenjem ... 31
Slika 28. Ukupne deformacije model s uzdužnim orebrenjem ... 31
Slika 29. Top Von Mises naprezanja dijagonalnog modela ... 32
Slika 30. Top Von Mises naprezanja poprečnog modela ... 32
Slika 31. Top Von Mises naprezanja uzdužnog modela ... 33
Slika 32. Kompletni MKE model uzdužnog orebrenja ... 35
Slika 33. Rubni uvjeti konačnog modela ... 36
Slika 34. Podjela naprezanja na modelu ... 37
Slika 35. Analiza podobnosti segmenta ... 38
Slika 36. Naprezanja na rebru boka ... 39
Slika 37. Ukupni pomaci na modelu ... 39
Slika 38. Von Mises naprezanja podobnog modela ... 41
Slika 39. Von Mises naprezanja na sponjama i rebrima boka ... 41
Slika 40. Maksimalni progib na segmentu ... 42
Slika 41. Maksimalno smično naprezanje na segmentu ... 42
Slika 42. Konačni model broda ... 43
Slika 43. Debljine limova na boku modela ... 44
Slika 44. Debljina limova na palubi modela ... 44
Slika 45. Debljine limova na dnu modela ... 45
Slika 46. Poprečni elementi modela ... 45
Slika 47. Prikaz kompletnog modela broda ... 46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva stakloplastike i aluminijske legure [5] 2
Tablica 2. Osnovne značajke broda 7
Tablica 3. Usporedba projektnih varijanti uzdužnog orebrenja za glavno rebro 9
Tablica 4. Usporedba projektnih varijanti dijagonalnog orebrenja za x = 6 m 9
Tablica 5. Vrijednost duljine S i minimalnog tlaka p_{smin} 11
Tablica 6. Minimalne debljine limova 13
Tablica 7. Odabrane debljine limova 13
Tablica 8. Odabrani profil uzdužnjaka uzdužnog orebrenja 14
Tablica 9. Odabrani profil uzdužnjaka dijagonalnog orebrenja 15
Tablica 10. Odabrani profili rebara poprečnog orebrenja 16
Tablica 11. Odabrani profili okvirnih rebara uzdužnog i dijagonalnog orebrenja 17
Tablica 12. Odabrani profili jakih uzdužnih nosača 17
Tablica 13. Usporedba ukupne mase segmenta 18
Tablica 14. Karakteristike aluminija 29
Tablica 15. Usporedba masa 30
Tablica 16. Ukupne deformacije modela 30
Tablica 17. Dimenzije strukturnih elemenata 35
Tablica 18. Analiza rezultata konačnog modela 38
Tablica 19. Usporedba dimenzija strukturnih elemenata 40

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1 Glavno rebro

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_{CG}	m/s^2	Vertikalna akceleracija u LCG
a_v	m/s^2	Vertikalna akceleracija
b	m	Razmak rebara
B	m	Širina broda
B_{wl}	m	Širina broda na vodnoj liniji
C_b	/	Koeficijent punoće
D	m	Visina broda
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
f_m	/	Koeficijent ovisan o materijalu
f'_m	/	Koeficijent ovisan o materijalu
f_s	/	Koeficijent sigurnosti
h_1	m	Udaljenost od točke opterećenja do vrha palube
K	/	Faktor za materijal
K_1	/	Faktor distribucije uzdužnog udarnog opterećenja
K_2	/	Faktor utjecaja područja
K_3	/	Faktor utjecaja oblika i uzvoja trupa
L_{oa}	m	Duljina preko svega
L	m	Duljina na vodnoj liniji
l	m	Nepoduprti raspon uzdužnjaka
$M_{w,s}$	kNm	Vertikalni valni moment savijanja u progibu
$M_{w,h}$	kNm	Vertikalni valni moment savijanja u pregibu
m	/	Koeficijent ovisan o vrsti ukrepljenja
p_s	kN/m^2	Tlak mora
p_d	kN/m^2	Tlak na palubi
p_{sl}	kN/m^2	Tlak uslijed udaranja valova
p_t	kN/m2	Projektni tlak
R_{lim}	N/mm^2	Minimalna granica tečenja materijala

s	m	Razmak uzdužnjaka
S	m	Nepoduprti raspon rebara
S_r	m^2	Referentna površina
T	m	Gaz broda
t	mm	Debljina lima
V	čv	Brzina broda
z	m	Udaljenost od dna broda
Z	cm^3	Moment otpora
Δ	t	Istisnina broda
ρ	kg/m^3	Gustoća
τ_{am}	N/mm^2	Smična naprezanja
σ_{am}	N/mm^2	Normalna naprezanja
$\sigma_{eq.am}$	N/mm^2	Maksimalna dozvoljena Von Mises naprezanja
μ	/	Koeficijent materijala

SAŽETAK

Tema je ovog diplomskog rada projektiranje konstrukcije malog aluminijskog broda, duljine oko 20 m, za operacije traganja i spašavanja na moru.

Kroz diplomski rad razmatra se uporaba aluminijskih legura kao prikladnog materijala za konstrukciju malog broda zbog odličnog odnosa čvrstoće i specifične težine.

Na osnovu preliminarnog predloška brodskih linija napravljen je geometrijski model u programu Rhinoceros [1]. Dimenzioniranje elemenata brodske konstrukcije provedeno je pomoću programa Marspeed [2], koji radi po pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas [3], te ručno pomoću samih pravila Bureau Veritas. Studija senzitivnosti provedena je za različiti sustav orebrenja (poprečni, uzdužni i dijagonalni sustav), te je za svaku napravljena procjena mase konstrukcije. Za odabrane varijante orebrenja provedena je direktna analiza čvrstoće korištenjem metode konačnih elemenata pomoću programa FEMAP [4] te je provedena analiza podobnosti na razini dozvoljenih naprezanja i kriterija izvijanja. Za nepodobne konstrukcijske elemente dan je prijedlog novih konstrukcijskih dimenzija koji zadovoljavaju sve uvjete strukturne podobnosti.

Naposljetku, nadopunjen je model broda u programu Rhinoceros sa svim bitnim konstrukcijskim elementima te su napravljeni osnovni konstrukcijski nacrti.

Ključne riječi: aluminijski brod za traganje i spašavanje, studija senzitivnosti, analiza čvrstoće, MKE, analiza podobnosti, konstrukcijski nacrti

SUMMARY

The topic of this master's thesis is the design of a construction of a small aluminium ship, about 20 m in length, intended for search and rescue operations at sea.

The thesis considers the use of aluminium alloys as a suitable material for the small ship construction due to the excellent ratio of strength and specific weight.

Based on the preliminary template of the ship lines, a geometric model was made in the Rhinoceros software [1]. The dimensioning of the ship construction elements was performed using the Marspeed software [2], which abides by the rules of the Bureau Veritas classification society [3]. The dimensioning was performed manually as well, following the very rules of the Bureau Veritas society. A sensitivity analysis was conducted for different framing systems (lateral, longitudinal, and diagonal systems), and a construction weight estimate was provided for each. For the selected framing variations, a direct strength analysis was carried out applying the finite element method using the FEMAP software [4], and an adequacy analysis was performed at the level of allowable stresses and buckling criteria. A proposal of new dimensions that meet all the conditions of structural adequacy is given for inadequate construction elements.

Finally, the model of the ship was complemented by all the essential construction elements in the Rhinoceros software and the basic construction drawings were made.

Key words: aluminium search and rescue ship, sensitivity analysis, strength analysis, FEM, adequacy analysis, construction drawings

1. UVOD

1.1. Materijali izrade

U maloj brodogradnji tehnologija prati korak s tehnološkim napretkom ostalih industrija. Kroz povijest su se primjenjivali različiti materijali za izradu brodova te se tako u prošlosti primjenjivalo drvo kao materijal za gradnju. No s razvojem civilizacije i tehnologije te potrebama za novim i izdržljivijim materijalima za gradnju krenuo je razvoj novih materijala. Materijal koji se počeo koristiti nakon drva je čelik koji je pogodniji kod izgradnje većih i izdržljivijih brodova, no drvo se i dalje koristi za izradu manjih i specijalnih brodova. Danas se razvojem tehnologije i novih materijala u maloj brodogradnji, posebno kod brzih brodova, najčešće koriste kompozitni materijali i aluminijske legure zbog odličnog odnosa čvrstoće i specifične težine.

Slika 1. Plovilo izrađeno od aluminijske legure

Kod gradnje brodova u maloj seriji najčešće se koristi aluminijska legura. Ključne karakteristike aluminijskih legura (vidi tablicu 1) su manja masa u usporedbi s čelikom (oko 1/3 mase), visoka korozijska otpornost na zrak i vodu, uključujući i morsku vodu, dobra toplinska i električna vodljivost, te veoma visoka obradivost u bilo koji strukturni oblik. Zbog

svoje otpornosti na koroziju, aluminijska legura je idealno rješenje za mnoge primjene posebice u maloj brodogradnji.

Tablica 1. Mehanička svojstva stakloplastike i aluminijske legure [5]

	Stakloplastika (E-fiberglass)	**Aluminijska legura (AlMg4.5Mn)**
Gustoća, g/cm^3	2,58	2,7
Vlačna čvrstoća, N/mm^2	1950	350
Youngov modul elastičnosti, GPa	72	70,3
Elongacija, %	4,8	12

Iako se i stakloplastika koristi u maloj brodogradnji, kod gradnje brodova u maloj seriji aluminij je ipak isplativiji od stakloplastike zbog neisplativosti izrade kalupa za izradu brodova u maloj seriji. Izrada aluminijskih brodova je puno jednostavnija i jeftinija kod gradnje brodova male serije jer se gotovo sav materijal koristi i u konačnom proizvodu.

1.2. Brodovi za traganje i spašavanje

Republika Hrvatska za regulaciju prometa i sigurnosti na moru primjenjuje više državnih tijela poput lučke kapetanije, Nacionalne središnjice za traganje i spašavanje, pomorske policije, Državni inspektorat i druge službe. Zadaće pojedinih služba se razlikuju, od akcija traganja i spašavanja, kontrole i nadzora u unutarnjim morskim vodama i u teritorijalnom moru. Osnovne zadaće Nacionalne središnjice za traganje i spašavanje na moru su usklađivanje akcija traganja i spašavanja na moru, obavljanje nadzora pomorskog prometa te kontrola sigurnosti plovidbe i koordiniranje djelovanja u slučaju iznenadnog onečišćenja mora. [6]

Područje nadležnosti prostire se od unutrašnjih morskih voda i teritorijalnog mora Republike Hrvatske do zone između teritorijalnog mora i područja otvorenog mora do linije razgraničenja sa susjednim državama u Jadranskom moru, a kako je utvrđeno njihovim međusobnim sporazumom i kao takvo prijavljeno Međunarodnoj pomorskoj organizaciji (IMO). [7]

Osnovno sredstvo kojim se obavljaju akcije traganja i spašavanja na moru su brodovi za traganje i spašavanje (vidi sliku 2). Svaki brod za traganje i spašavanje mora udovoljiti brojnim

zahtjevima poput zahtjeva za velikom brzinom, dobrom upravljivošću te dobrim svojstvima pomorstvenosti kako bi mogao promptno i adekvatno reagirati u različitim situacijama koje se nameću u službi broda. Najpogodniji brodovi koji udovoljavaju uvjetima za velikom brzinom i dobrom upravljivošću su mali brodovi, obično duljine oko 30 m. Brzina kojom se kreću brodovi je između 15 čv do 35 čv, što ovisi o instaliranoj snazi i broju motora te veličini broda.

Slika 2. Brod za traganje i spašavanje

Brodove za spašavanje možemo podijeliti ovisno o duljini i brzini na:

- Brodovi za spašavanje (eng. *Rescue Vessel*-RV)

  Sudjeluju u traganju i spašavanju na otvorenom moru. Brzine koje postižu se kreću između 25 i 30 čv, duljine od 17 do 35 m.

- Pomorske spasilačke brodice (eng. *Rescue Boat*-RB)

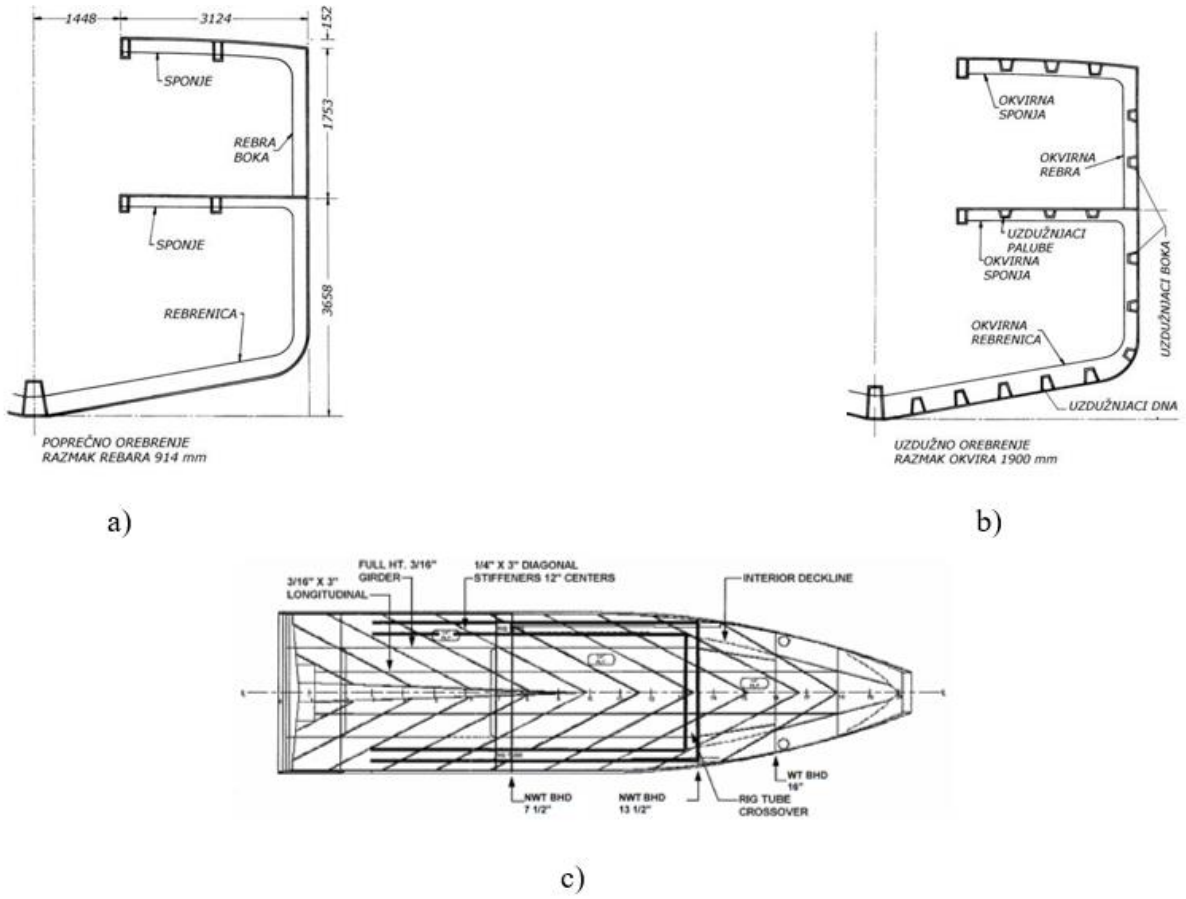
  Sudjeluju u traganju i spašavanja na području priobalja, te su prilagođene težem moru. Duljine su oko 15 m i postižu brzine do 25 čv.

- Vrlo brzi spasilački brodovi (eng. *Fast Rescue Boat*-FRB)

  Najčešće su pneumatske brodice s krutim dnom koje sudjeluju u traganju i spašavanju na uskom obalnom području. Duljine su od 8 do 15 m i postižu brzine do 30 čv.

Za izradu trupa kao materijal se najčešće koristi čelik, no postoje i izvedbe od aluminijskih legura ili kompozita ako se radi o manjim brodovima zbog boljih karakteristika od čelika.

Geometrija broda se, što je više moguće, prilagođava službi te se posebna pažnja posvećuje izvedbi orebrenja konstrukcije. Osim standardnih izvedbi orebrenja poput uzdužnog i poprečnog, brodovi za traganje i spašavanje mogu biti izvedeni i u dijagonalnoj izvedbi, takozvanoj izvedbi „riblja kost“ (eng. *Herringbone stiffening*).



Slika 3. Različiti sustavi orebrenja; a)poprečni [8], b)uzdužni [8], c)dijagonalni [9]

Kroz ovaj rad proveden je proračun konstrukcije rebra broda za sve tri vrste orebrenja u dvije faze:

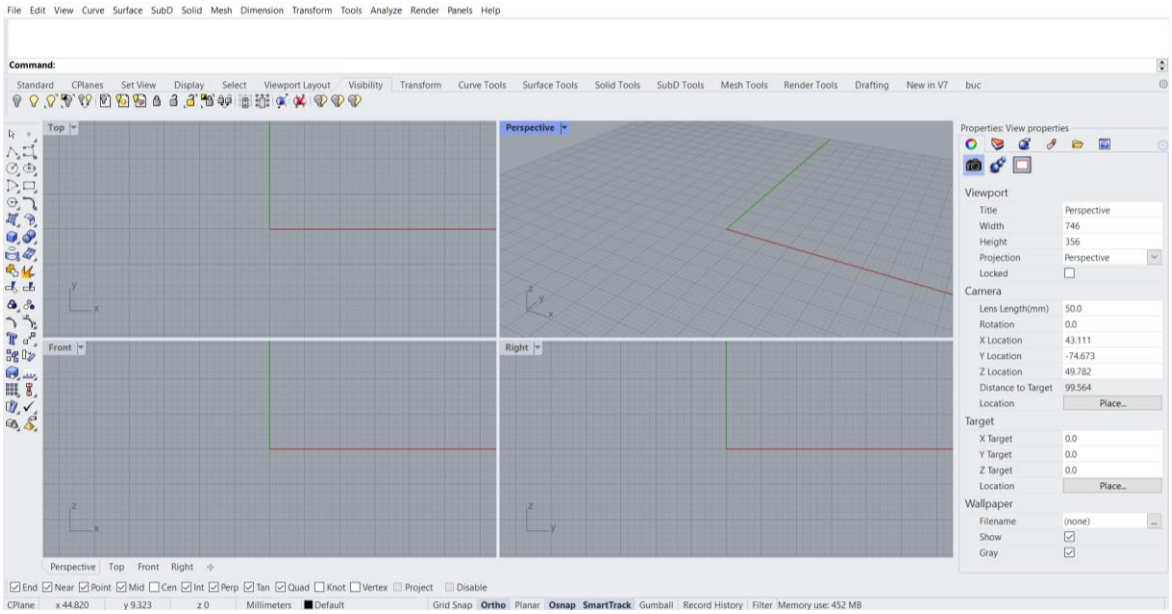
- dimenzioniranjem konstrukcijskih elemenata po pravilima klasifikacijskog društva B.V.-a za brze brodove [3], te programom Marspeed [2]
- dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata metodom konačnih elemenata u programu FEMAP [4] , te provjera podobnosti konstrukcije koristeći se istim programom.

2. GEOMETRIJSKI MODEL BRODA U PROGRAMU RHINOCEROS

2.1. Program Rhinoceros [1]

Rhinoceros ili skraćeno Rhino, odnosno Rhino3D, je komercijalni 3D softver razvijen od strane privatne američke tvrtke Robert McNeel & Associates osnovane 1980. godine.

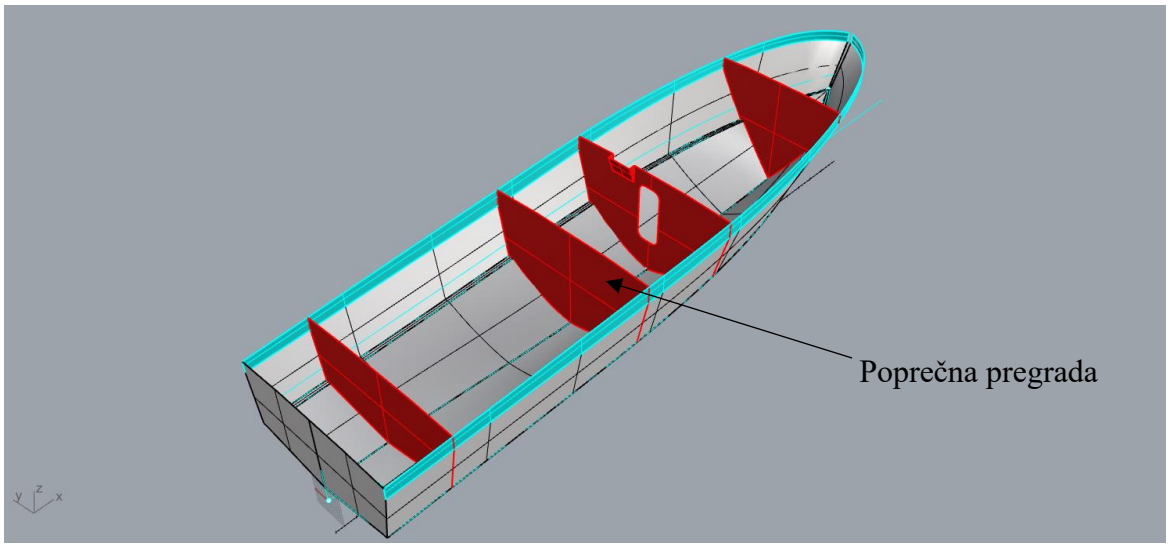
Rhinoceros se koristi u raznim granama industrije poput arhitekture, industrijskog dizajna, te dizajna nakita. Glavne značajke Rhino aplikacije je veoma brz 3D prikaz bez ograničenja veličine, te mogućnost pogleda iz svih kutova. Također nema ograničenje ni na kompleksnost rada ili stupanj složenosti, već samo na hardverske mogućnosti računala na kojem se radi. Samo korisničko sučelje (vidi sliku 4) je dosta jednostavno, pregledno i vrlo slično sučeljima ostalih 3D programa.



Slika 4. Korisničko sučelje programa Rhinoceros

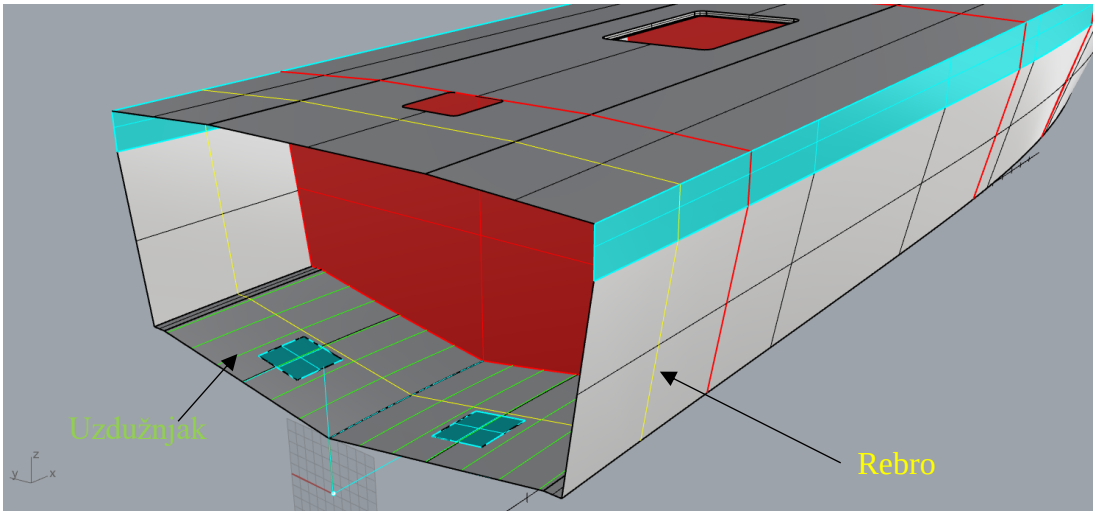
2.2. Izrada geometrije modela

Na osnovu preliminarnog predloška brodskih linija napravljen je geometrijski model broda. Globalni koordinatni sustav postavljen je tako da se os X nalazi u horizontalnoj ravnini s pozitivnim smjerom osi prema pramcu broda, pozitivni smjer osi Y se nalazi prema lijevoj strani broda gledajući od krme prema pramcu, a pozitivni smjer osi Z gleda prema palubi broda. U nastavku je model broda podijeljen po duljini pomoću poprečnih pregrada, s ukupno njih 4. Na taj način je podijeljen brod na ukupno 5 segmenata (vidi sliku 5).



Slika 5. Geometrijski model broda

Ostali konstrukcijski elementi broda poput uzdužnjaka, rebara i jakih uzdužnih nosača će se prikazati pomoću krivulja. Točan raspored, odnosno razmak uzdužnjaka, rebara i jakih uzdužnjaka će se naknadno odrediti u sljedećem poglavlju. Da bih se krivulje koje predstavljaju uzdužnjake mogli prikazati na određenim udaljenostima potrebna je jedna krivulja koja će se kopirati više puta po opločenju dna. Ta krivulja se dobije presjekom lijeve i desne strane opločenja dna, te za kopiranje te krivulje koristi se naredba *OffsetCrvOnSrf* koja tu krivulju kopira za željeni razmak i za željeni broj kopija. Krivulje koje predstavljaju rebra se dobivaju tako da se željeni dio broda presiječe s plohom. Na taj način se dobije krivulja koja će predstavljati rebro. Na slici 6 je prikazan primjer uzdužnjaka i rebra za uzdužno orebrenje.



Slika 6. Prikaz uzdužnjaka i rebra

3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA BRODA U PROGRAMU MARSPEED I POMOĆU PRAVILA BV-A

3.1. Uvod

Dimenzioniranje konstrukcije rebra broda s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom provedeno je pomoću preskriptivnih pravila klasifikacijskog društva B.V.-a za brze brodove [3] na dva načina; za uzdužno i dijagonalno orebrenje je korišten program Marspeed [2], dok su za poprečno orebrenje korištena pravila B.V.-a za brze brodove korištenjem programa MS Excel [10] za brod čije su značajke prikazane u tablici 2:

Tablica 2. Osnovne značajke broda

Duljina preko svega	19,6 [m]
Duljina na vodnoj liniji	18,6 [m]
Širina	5,8 [m]
Širina na vodnoj liniji	4,65 [m]
Visina	3,34 [m]
Gaz	1,1 [m]
Brzina	21 [čv]
Istisnina	39,19 [t]
Koeficijent punoće	0,4

Osnovne geometrijske značajke broda su izmjerene s modela broda iz programa Rhinoceros, dok je koeficijent punoće izračunat pomoću formule (1):

$$Cb = \frac{\Delta}{(1{,}025 * L * Bwl * T)} \tag{1}$$

Gdje je :

Δ = 39,19 [t] - istisnina broda

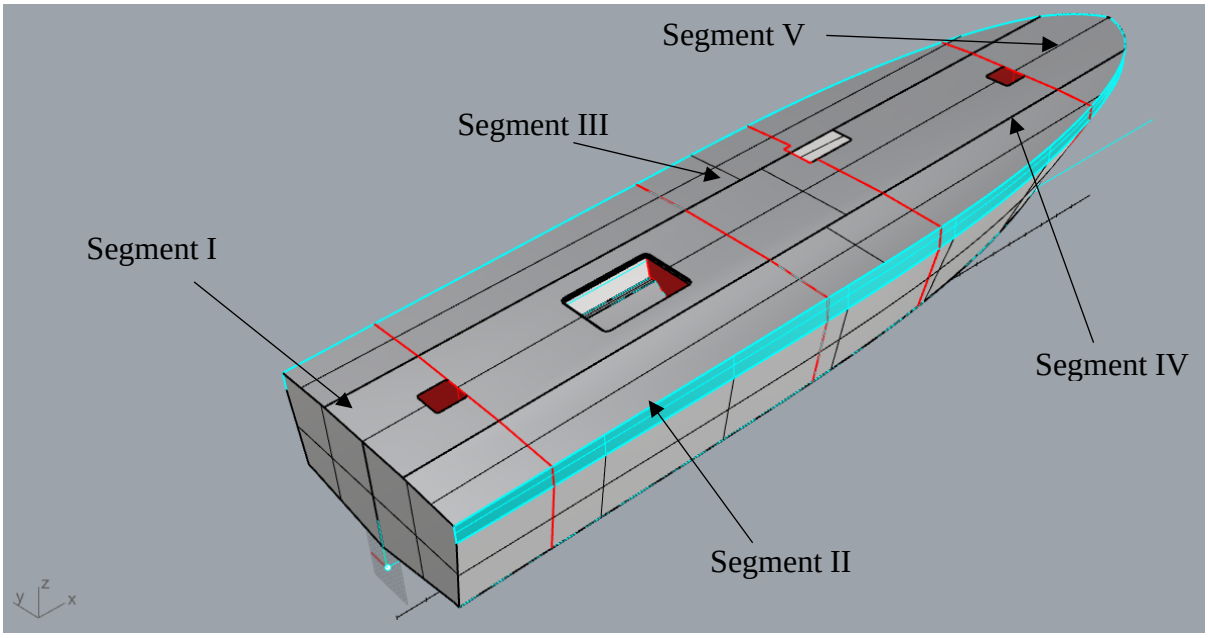
L = 18,6 [m] - duljina broda na vodnoj liniji

B_{wl} = 4,65 [m] - širina broda na vodnoj liniji

T = 1,1 [m] - gaz broda

Brod je po duljini podijeljen na 5 segmenata (vidi sliku 7), svaki segment je odvojen od sljedećeg pomoću poprečne pregrade. U proračunu je u obzir uzet segment II duljine 6 m, koji se nalazi između prve i druge poprečne pregrade na području od 1,8 m do 7,8 m.

Dimenzije koje su dobivene ovim proračunom su najmanje zahtijevane dimenzije po pravilima Bureau Veritas-a za brze brodove [3], te će poslužiti kao ulazni podaci za direktni proračun konstrukcije korištenjem metode konačnih elemenata.



Slika 7. Podjela broda na segmente

Proračun je napravljen za sva 3 tipa orebrenja broda. Za uzdužni i dijagonalni tip orebrenja proračun vezan za raskroj limova, debljinu limova te dimenzije i razmak uzdužnjaka je napravljen pomoću programa Marspeed [2], a dio vezan za poprečnu strukturu te poprečno orebrenje, zbog nemogućnosti proračuna u programu Marspeed, napravljen je ručno korištenjem preskriptivnih pravila B.V.-a za brze brodove. Također, za uzdužni i dijagonalni tip orebrenja je napravljen proračun za više slučajeva razmaka uzdužnjaka i jakih uzdužnih nosača te je odabran najpovoljniji od njih. Kao razmak uzdužnjaka su uzete 3 vrijednosti; 300 mm, 350 mm te 400 mm. Sve tri projektne varijante za uzdužno orebrenje prikazane su u tablici 3, a sve tri varijante za dijagonalno orebrenje u tablici 4.

Tablica 3. Usporedba projektnih varijanti uzdužnog orebrenja za glavno rebro

Projektna varijanta	Razmak uzdužnjaka s [mm]	Masa segmenta [t/m]
P_1	300	0,331
P_2	350	0,308
P_3	400	0,331

Tablica 4. Usporedba projektnih varijanti dijagonalnog orebrenja za x = 6 m

Projektna varijanta	Razmak uzdužnjaka s [mm]	Masa segmenta [t/m]
P_1	300	0,329
P_2	350	0,324
P_3	400	0,330

Iz prethodnih tablica je vidljivo da je po kriteriju najmanje mase za uzdužni i dijagonalni sustav orebrenja najpovoljniji razmak uzdužnjaka od 350 mm, te su se za taj razmak uzdužnjaka dimenzionirali poprečni elementi korištenjem preskriptivnih pravila klasifikacijskog društva B.V-a. Kao razmak poprečne strukture, odnosno rebara dna, boka i sponji odabrano je 1 m.

Za slučaj poprečnog sustava orebrenja napravljena je jedna projektna varijanta s razmakom rebara od 600 mm, te će se u nastavku poglavlja prikazati princip dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata za sve 3 projektne varijante.

3.2. Definicija opterećenja

3.2.1. Momenti savijanja

Za uzdužnu čvrstoću broda iznimno bitno je odrediti vertikalne momente savijanja. Kod brodova manjih od 100 m, momenti savijanja se određuju iz poglavlja C3.4.1 klasifikacijskih pravila B.V.-a za brze brodove za jednotrupce prema formulama C3.4.1.2.2 ili C3.4.1.2.3, ovisno koji je od njih veći. Međutim, u programu Marspeed je izračunata vrijednost vertikalnih momenata savijanja te će se ta vrijednost iskoristiti za daljnje dimenzioniranje konstrukcije.

Prema programu Marspeed [2], vrijednosti valnih momenata su sljedeće:

$Mw, s = 1\,534{,}0\ \ [kNm]$

$Mw, h = 1\,213{,}0\ \ [kNm]$

3.2.2. Opterećenje vanjskim tlakom

Konstrukcijske elemente roštilja dna i boka prema pramcu broda za traganje i spašavanje treba dimenzionirati prema tlaku uslijed udarnog opterećenja s obzirom na to da se brod dimenzionira za područje plovidbe gdje se očekuju valovi visine do Hs = 4 m i za različita stanja mora. Kod konstrukcijskih elemenata boka prema krmi i palube broda za traganje i spašavanje treba dimenzionirati prema tlaku uslijed opterećenja mora i palube. U programu Marspeed dane su vrijednosti udarnog opterećenja, opterećenja uslijed mora i palube za uzdužni i dijagonalni sustav orebrenja, dok su za poprečni sustav orebrenja vrijednosti opterećenja izračunate koristeći pravila klasifikacijskog društva. Za udarno opterećenje tlak se računa prema formuli (2):

$$p_{sl} = 70 * \frac{\Delta}{S_r} * K_1 * K_2 * K_3 * a_{CG} \ \ \left[\frac{kN}{m^2}\right] \tag{2}$$

Gdje je:

Δ – istisnina broda [t]

S_r – referentna površina [m^2]

K_1 – faktor distribucije uzdužnog udarnog opterećenja

K_2 – faktor utjecaja područja

K_3 – faktor utjecaja oblika i uzvoja trupa

a_{CG} – vertikalna akceleracija u LCG [m/s^2]

Za slučaj boka na krmi broda tlak uslijed mora se računa prema jednadžbi (3) iz poglavlja C3.5.5:

$$p_s = 10 * \left(T + 0{,}75 * S - \left(1 - 0{,}25 * \frac{S}{T}\right) * z\right) \ \ \left[\frac{kN}{m^2}\right] \tag{3}$$

Gdje su:

T – gaz broda [m]

S – duljina iz tablice 5, ne veća od 0,5 [m]

z – visina na kojoj se računa tlak [m]

Tablica 5. Vrijednost duljine S i minimalnog tlaka p_{smin}

	S [m]	**p_{smin} [kN/m^2]**
x/L ≥ 0,9	$T \leq 0{,}36 * a_{CG} * \frac{\sqrt{L}}{C_B} \leq \leq 3,5 * T$	$20 \leq \frac{L+75}{5} \leq 35$
x/L ≤ 0,5	$T \leq 0{,}60 * a_{CG} * \sqrt{L} \leq \leq 2,5 * T$	$10 \leq \frac{L+75}{10} \leq 20$

Opterećenja na krmi broda se računaju pomoću poglavlja C3.5.8 klasifikacijskih pravila B.V.-a za brze brodove [3] pomoću jednadžbe (4):

$$p_d = p * (1 + 0{,}4 * a_v) \left[\frac{kN}{m^2}\right] \tag{4}$$

Gdje su:

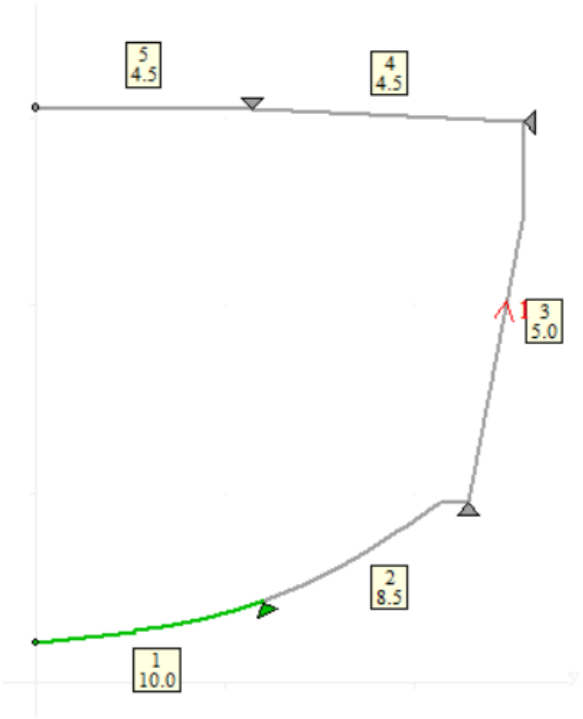
p – jednoliki tlak uslijed tereta, za slučaj otvorenih paluba iznosi 3 kN/m^2 [kN/m^2]

a_v – vertikalna akceleracija, jednaka je a_{CG} [m/s^2]

3.3. Dimenzioniranje limova i profila

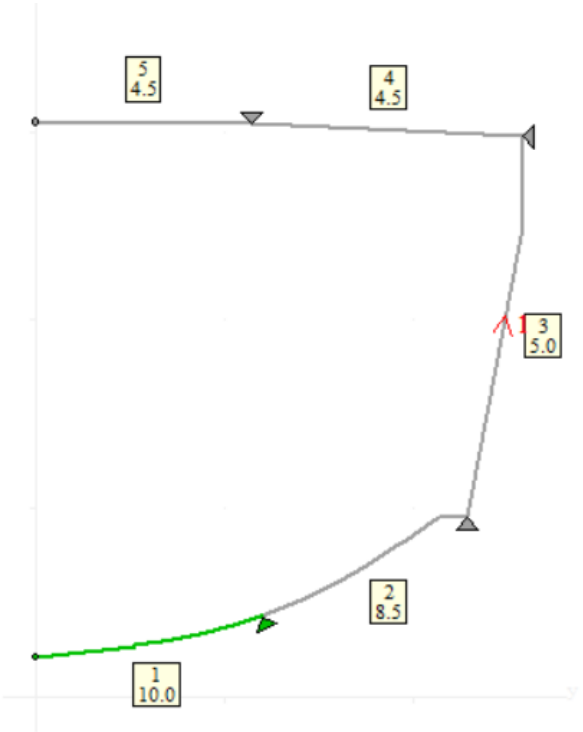
3.3.1. Odabrane debljine limova

Kod dimenzioniranja limova u programu Marspeed za uzdužni i dijagonalni sustav orebrenja debljine limova su prikazane na slici 8. Debljina limova na dnu se mijenja prema uzvoju od 10 mm do 8,5 mm, na boku je debljina 5 mm, dok je na palubi debljina limova 4,5 mm.



Slika 8. Debljine limova za uzdužno orebrenje

Debljina limova kod dijagonalnog orebrenja se također mijenja na dnu od 10 mm do 8,5 mm. Na boku je debljina također 5 mm, dok je na palubi debljina limova 4,5 mm kako je prikazano na slici 9.



Slika 9. Debljine limova za dijagonalno orebrenje

Kod poprečnog sustava orebrenja, debljine limova su se proračunale prema pravilima klasifikacijskog društva prema poglavlju C3.7.7 po jednadžbi (5):

$$t = 22{,}4 * \mu * s * \sqrt{\frac{p}{\sigma_{am}}} \ [mm] \tag{5}$$

Gdje su:

μ – koeficijent prema jednadžbi $\mu = \sqrt{1{,}1 - 0{,}5 * (\frac{s}{l})^2}$, ne veći od 1,0

s – razmak orebrenja [mm]

p – tlak [kN/m^2]

σ_{am} – normalno naprezanje koje za aluminijske legure iznosi $\sigma_{am} = \frac{95}{K} \left[\frac{N}{mm^2}\right]$

K – faktor za materijal prema jednadžbi $K = \frac{100}{R_{lim}}$

R_{lim} – minimalna granica tečenja materijala, ne veća od 70% minimalne vlačne čvrstoće

Debljina limova ne smije biti manja od debljine prema tablici 6.

Tablica 6. Minimalne debljine limova

Pozicija elementa	Minimalna debljina [mm]
Dno	2,5
Bok	2,5
Paluba	2,5

U tablici 7 su prikazane odabrane debljine limova izračunate pomoću pravila klasifikacijskog društva.

Tablica 7. Odabrane debljine limova

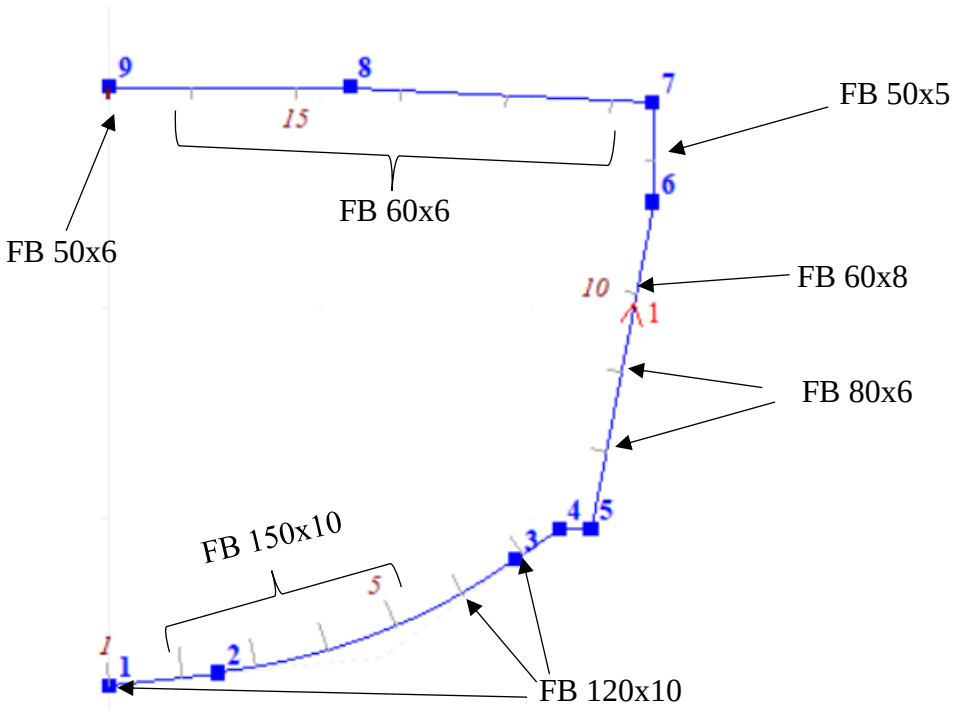
Pozicija	Odabrana debljina oplate [mm]
Dno	11,5
Bok	9
Paluba	3

3.3.2. Profili uzdužnjaka

Profili uzdužnjaka za uzdužno orebrenje se odabiru iz kataloga profila [11] uz minimalni zahtijevani moment otpora iz programa Marspeed [2]. Odabrani profili uzdužnjaka prikazani su u tablici 8, a njihov raspored prikazan je na slici 10.

Tablica 8. Odabrani profil uzdužnjaka uzdužnog orebrenja

Pozicija	Odabrani profil uzdužnjaka
Dno	FB 120x10 FB 150x10
Bok	FB 80x6 FB 60x8 FB 50x5
Paluba	FB 60x6 FB 50x6

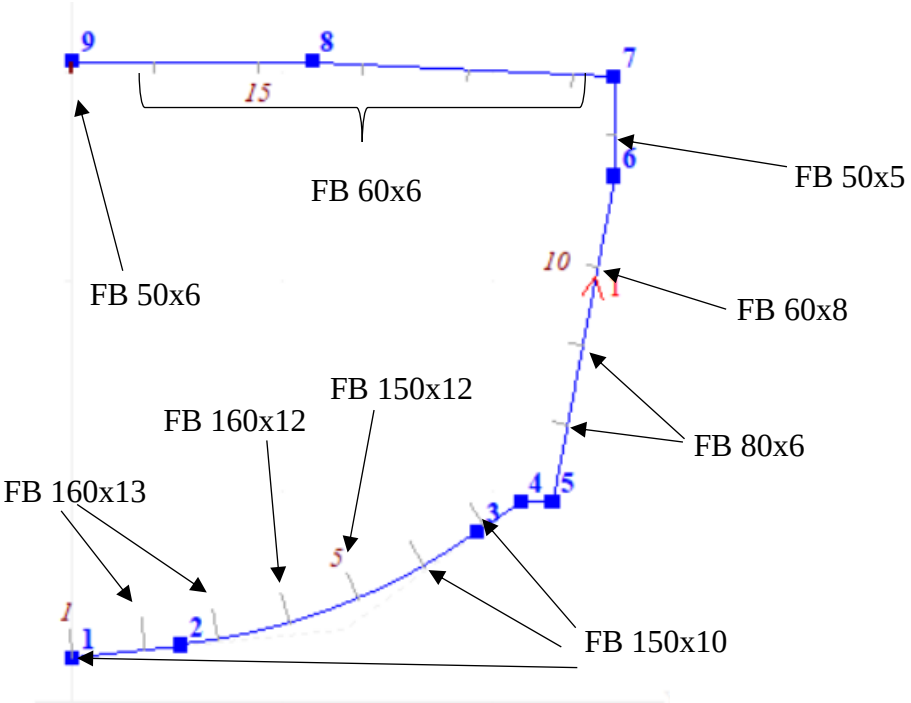


Slika 10. Raspored profila uzdužnjaka uzdužnog orebrenja

Profili uzdužnjaka za dijagonalno orebrenje su također odabrani iz kataloga profila [11] uz minimalni zahtijevani moment otpora uzdužnjaka iz programa Marspeed. Odabrani profili uzdužnjaka prikazani su u tablici 9, a njihov raspored je prikazan na slici 11.

Tablica 9. Odabrani profil uzdužnjaka dijagonalnog orebrenja

Pozicija	Odabrani profil uzdužnjaka
Dno	FB 150x10 FB 160x13 FB 160x12 FB 150x12 FB 150x10
Bok	FB 80x6 FB 600x8 FB 50x5
Paluba	FB 60x6 FB 50x6



Slika 11. Raspored uzdužnjaka dijagonalnog orebrenja

3.3.3. Odabrani profili rebara

Kod poprečnog sustava orebrenja za izračun najmanjeg dopuštenog momenta otpora rebara koristi se formula (6) prema pravilima klasifikacijskog društva B.V.-a koja glasi:

$$Z = 1000 * \frac{l^2 * s * p}{m * \sigma_{am}} \ [cm^3] \tag{6}$$

Gdje su:

l – nepoduprti raspon rebra [m]

s – razmak rebara [m]

p – tlak [kN/mm^2]

m – koeficijent ovisan o vrsti ukrepljenja

σ_{am} – normalno naprezanje [N/mm^2]

Odabrani profili rebara poprečnog orebrenja prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Odabrani profili rebara poprečnog orebrenja

Pozicija	Odabrani profil rebara
Dno	T 200x10/100x10
Bok	T 130x9/100x9
Paluba	T 90x3/60x3

Kako bok broda kod uzdužnog i dijagonalnog orebrenja osim uzdužnjaka posjeduje i okvirna rebra, i njih je bilo potrebno dimenzionirati koristeći se pravila klasifikacijskog društva. Prema tome izraz za izračun najmanjeg dopuštenog momenta otpora okvirnog rebra glasi:

$$Z = 1000 * \frac{S^2 * b * p}{m * \sigma_{am}} \ [cm^3] \tag{7}$$

Gdje su:

S – nepoduprti raspon rebara [m]

b – razmak rebara [m]

p – tlak [kN/mm^2]

m – koeficijent ovisan o vrsti ukrepljenja

σ_{am} – dopušteno naprezanje [N/mm^2]

Odabrane dimenzije okvirnih rebara uzdužnog i dijagonalnog orebrenja prikazane su u tablici 11.

Tablica 11. Odabrani profili okvirnih rebara uzdužnog i dijagonalnog orebrenja

Pozicija	Odabrani profil okvirnog rebra
Dno	FB 360x10
Bok	FB 170x5
Paluba	FB 170x5

3.3.4. Odabrani profili jakih uzdužnih nosača

Prema pravilima B.V.-a [3], općenita formula (8) za izračun najmanjeg dopuštenog momenta otpora jakog uzdužnog nosača glasi:

$$Z = 1000 * \frac{S^2 * b * p}{m * \sigma_{am}} \ [cm^3] \tag{8}$$

U poprečnom sustavu gradnje odabran je jedan jaki uzdužni nosač koji se nalazi u CL-u, dok se kod dijagonalnog orebrenja nalaze dva jaka uzdužna nosača jer se pokazalo da su povoljniji nego jedan jaki uzdužni nosač. Kod uzdužnog orebrenja nije postavljen niti jedan jaki uzdužni nosač. Odabrani profili jakih uzdužnih nosača za poprečni i dijagonalni sustav gradnje prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Odabrani profili jakih uzdužnih nosača

Pozicija	Odabrani profil jakog uzdužnog nosača za poprečno orebrenje	Odabrani profil jakog uzdužnog nosača za dijagonalno orebrenje
Dno	T 680x14/370x14	T 450x11/200x11
Paluba	T 350x6/120x6	/

3.3.5. Odabrane debljine limova i profili poprečnih pregrada

Pored proračuna debljina limova oplate broda, te profila uzdužnjaka, rebara i jakih uzdužnih nosača, potrebno je dimenzionirati i debljine limova i profila poprečnih pregrada. Formula za debljinu limova poprečnih pregrada se nalazi u poglavlju C3.7.11.2 pravila klasifikacijskog društva i glasi:

$$t = 22{,}4 * f_m * \mu * s * \sqrt{\frac{p_t}{\sigma_{am}}} \ [mm] \tag{9}$$

Gdje su:

f_m – koeficijent ovisan o materijalu, f_m za aluminij iznosi 0,75

p_t – projektni tlak po formuli $p_t = 9{,}81 * h_1 * \rho * (1 + 0{,}4 * a_v) + 100 * p_v$ [kN/m^2]

h_1 – udaljenost od točke opterećenja do vrha palube [m]

ρ – gustoća tekućine [t/m^3]

p_v – tlak podešavanja [bar]

Debljina poprečnih pregrada izračunata je u programu MS Excel i ona iznosi 13,5 mm za sva tri slučaja orebrenja. Profili ukrepljenja poprečnih pregrada se računaju na isti način kao i profili orebrenja ostalih dijelova broda koristeći se formulom (10) koja glasi:

$$Z = 1000 * \frac{l^2 * s * p}{m * \sigma_{am}} \ [cm^3] \tag{10}$$

Za profile ukrepljenja za sva tri slučaja orebrenja nakon proračuna po formuli (10) odabrani su profili FB 350x22 implementirani vertikalno na poprečnim pregradama s međusobnim razmakom od 350 mm.

3.3.6. Zaključak

Ukupna masa odabranog segmenta izračunata je pomoću programa MS Excel [10] na način da su zbrojene mase svih dijelova segmenta, a njihov zbroj prikazan je u tablici 13.

Tablica 13. Usporedba ukupne mase segmenta

Sustav orebrenja	**Masa uzdužnih elemenata [t]**	**Masa limova [t]**	**Masa rebara [t]**	**Masa jakih uzdužnih nosača [t]**	**Ukupna masa [t]**
Uzdužni sustav	1,854	/	0,610	/	2,464
Poprečni sustav	/	1,646	0,576	0,284	2,506
Dijagonalni sustav	1,944	/	0,199	0,463	2,606

Kao rezultat prve faze proračuna po preskriptivnim pravilima klasifikacijskog društva Burea Veritas i programa Marspeed vidljivo je da je uzdužni sustav gradnje ovakvog tipa broda povoljniji po masi od ostalih sustava gradnje. U nastavku rada je za sva tri oblika gradnje provedena druga faza proračuna konstrukcije metodom konačnih elemenata kako bi se dodatno usporedila njihova gradnja.

4. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA BRODA METODOM KONAČNIH ELEMENATA U FEMAP-U

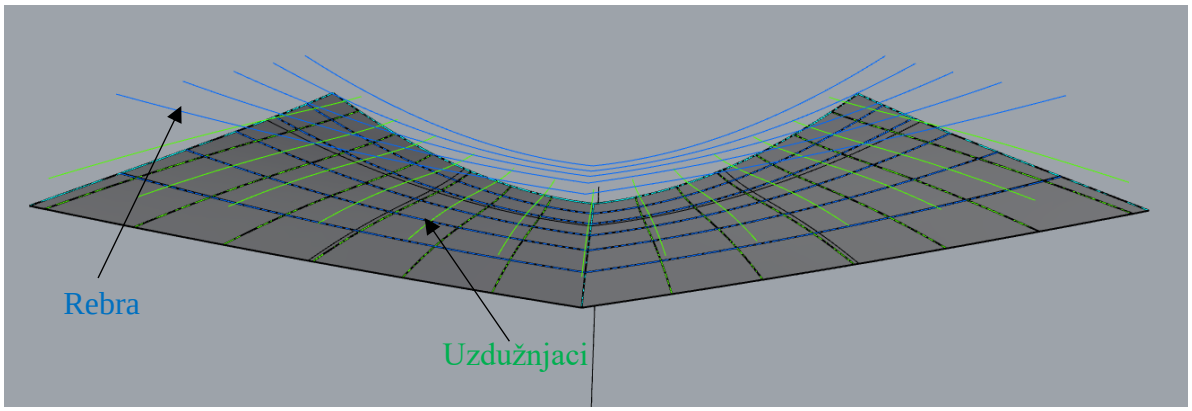
4.1. Uvod

Konstrukcijske elemente proračunate pomoću preskriptivnih pravila klasifikacijskog društva B.V.-a za brze brodove [3], te dimenzije elemenata preuzetih iz kataloga profila [11] poput jakih uzdužnih nosača potrebno je provjeriti metodom konačnih elemenata. Izrada MKE modela se sastoji od dvije faze. U prvoj fazi napravljen je 3D CAD model dna segmenta u programu Rhinoceros [1] koji će poslužiti kao geometrija za izradu MKE modela u programu FEMAP [4]. U drugoj fazi se korištenjem programa FEMAP, na temelju geometrije iz programa Rhinoceros, generiraju konačni elementi i provede analiza konačnih elemenata.

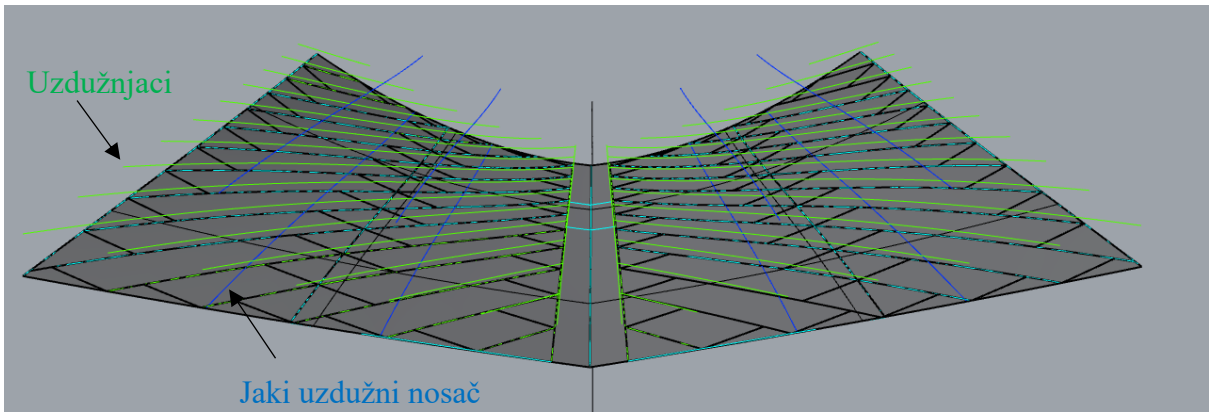
U programu FEMAP [4] izrađeni su parcijalni modeli dna segmenta II za sva tri sustava orebrenja, i to za P_2 opciju uzdužnog i dijagonalnog orebrenja, te jedinu opciju za poprečno orebrenje. U nastavku je provedena direktna analiza čvrstoće strukture korištenjem metode konačnih elemenata u svrhu provjere podobnosti konstrukcijskih elemenata na razini dozvoljenih naprezanja te kriterija izvijanja.

4.2. Priprema modela za izradu konačnih elemenata u programu Rhinoceros

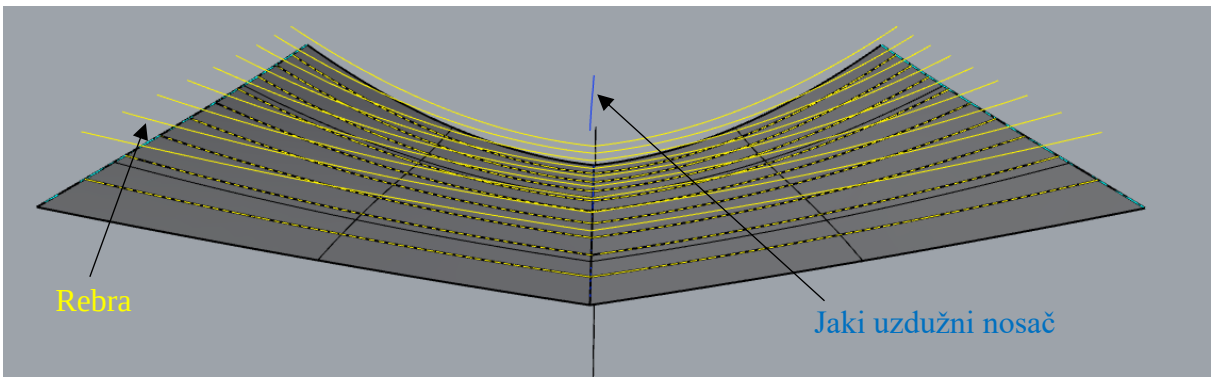
Parcijalni 3D CAD model izrađen je u programu Rhinoceros [1] korištenjem pločastih elemenata za limove, dok su se za prikaz uzdužnjaka koristile krivulje. Za sva tri sustava orebrenja su napravljeni modeli u programu Rhinoceros sa svim konstrukcijskim elementima dimenzioniranim pomoću preskriptivnih pravila klasifikacijskog društva B.V.-a za brze brodove, te pomoću programa Marspeed. Za uzdužnjake, rebra i jake uzdužne nosače, osim njihove pozicije na oplati broda, prikazane su i pozicije na njihovoj visini struka radi lakše izrade MKE modela kako je prikazano na slikama koje slijede.



Slika 12. Model uzdužnog orebrenja



Slika 13. Model dijagonalnog orebrenja



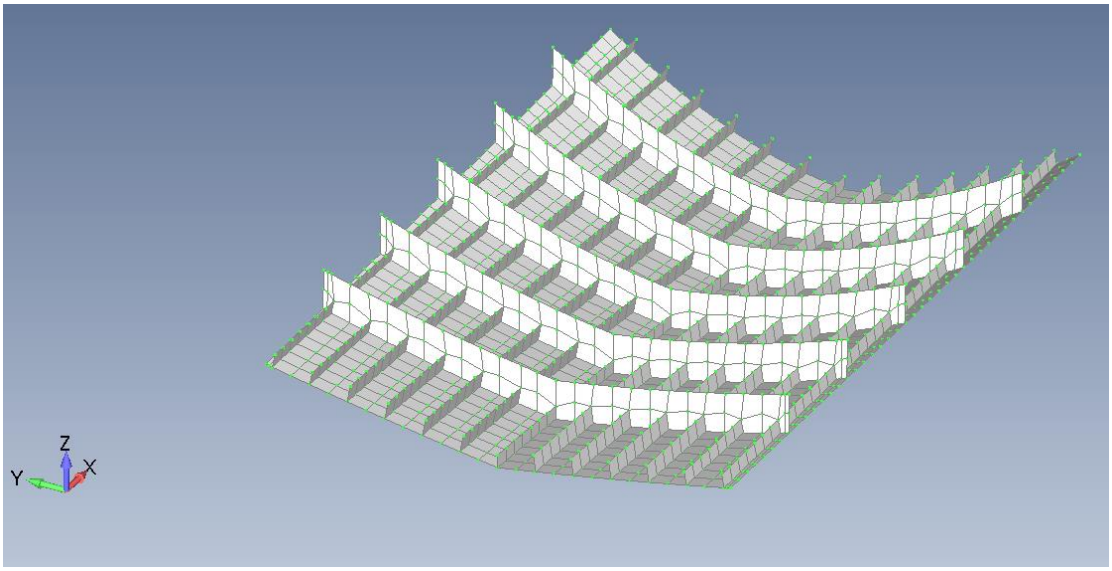
Slika 14. Model poprečnog orebrenja

4.3. Izrada mreže konačnih elemenata u programu FEMAP

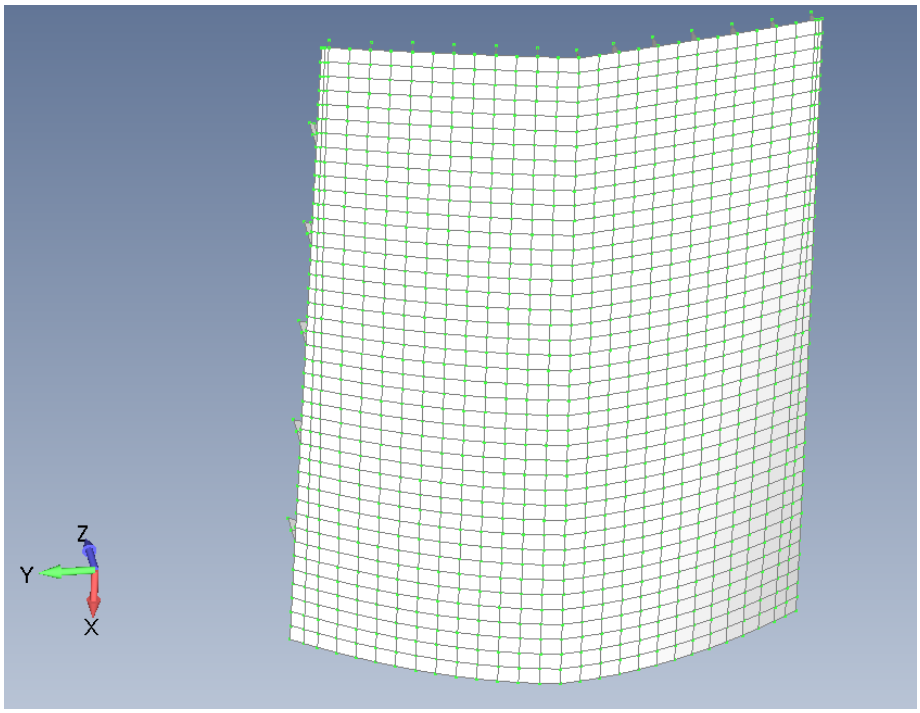
Unesena geometrija iz programa Rhinoceros ima mogućnost automatskog generiranja konačnih elemenata za opločenje dna za slučaj poprečnog i uzdužnog orebrenja, dok se za dijagonalni sustav ne može iskoristiti ta mogućnost jer se elementi, odnosno limovi dna, ne sijeku pod pravim kutom već pod različitim kutovima. Također, za elemente uzdužnjaka, rebara te jakih uzdužnih nosača se može automatski generirati mreža konačnih elemenata uz modificiranje. Za generiranje mreže konačnih elemenata uzdužnog i poprečnog orebrenja korišteni su četverokutni pločasti elementi (eng. *Quad*), dok su za dijagonalno orebrenje korišteni i četverokutni i trokutasti pločasti elementi (eng. *Triangle*) zbog različitosti presijecanja osnovne geometrije.

4.3.1. Uzdužni sustav gradnje

Prilikom izrade mreže konačnih elemenata u uzdužnom sustavu gradnje nastojalo se ostvariti po dva konačna elementa između uzdužnjaka, 7 konačnih elemenata između rebara, jedan element po visini uzdužnjaka, te dva elementa po visini rebara. Rezultirajuća mreža konačnih elemenata se sastoji od 2 096 čvorova i 2 002 konačna elementa. Na slici 15 i slici 16 prikazan je uzdužni model konačnih elemenata s gornje i donje strane.



Slika 15. Prikaz mreže konačnih elemenata s gornje strane

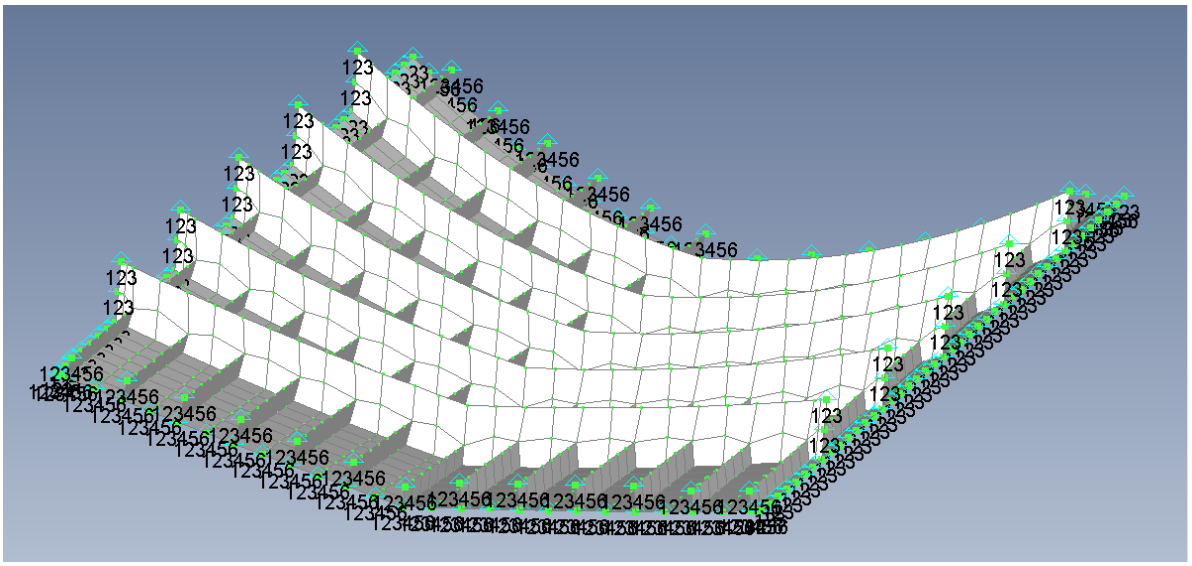


Slika 16. Prikaz mreže konačnih elemenata s donje strane

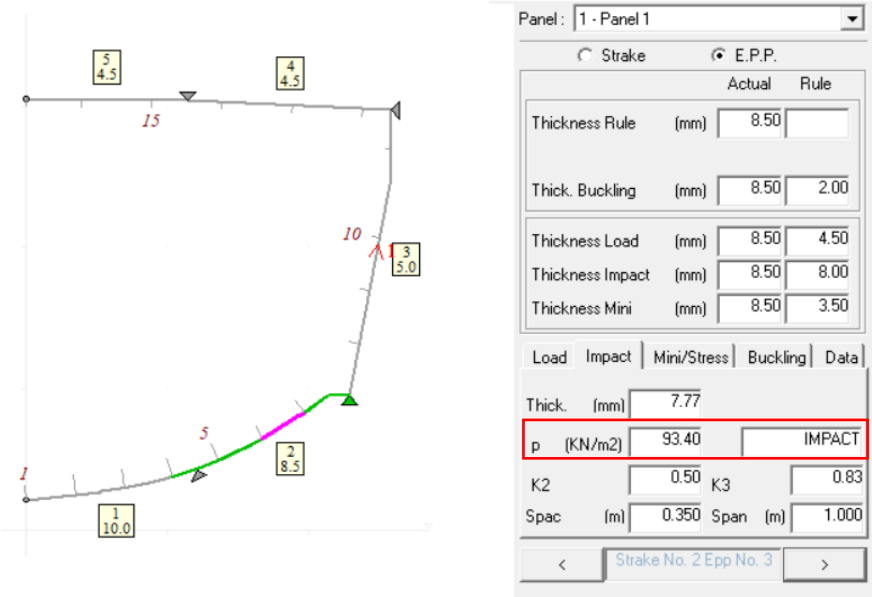
Globalni koordinatni sustav je smješten tako da se os X s pozitivnim smjerom proteže u smjeru uzdužnjaka, os Y s pozitivnim smjerom na lijevu stranu broda, a os Y s pozitivnim smjerom djeluje prema gore, odnosno palubi broda (vidi sliku 15).

Na dijelovima modela gdje se spaja s poprečnim pregradama konstrukcija je ukliještena, odnosno spriječeni su pomaci u smjeru X, Y i Z osi, te rotacije oko X, Y i Z osi. Osim uklještenja na mjestima poprečnih pregrada postoji još jedan rubni uvjet, a to je na bočnim rubovima konstrukcije gdje je konstrukcija zglobno oslonjena na bokove, odnosno spriječeni su pomaci u smjeru X, Y i Z osi (vidi sliku 17).

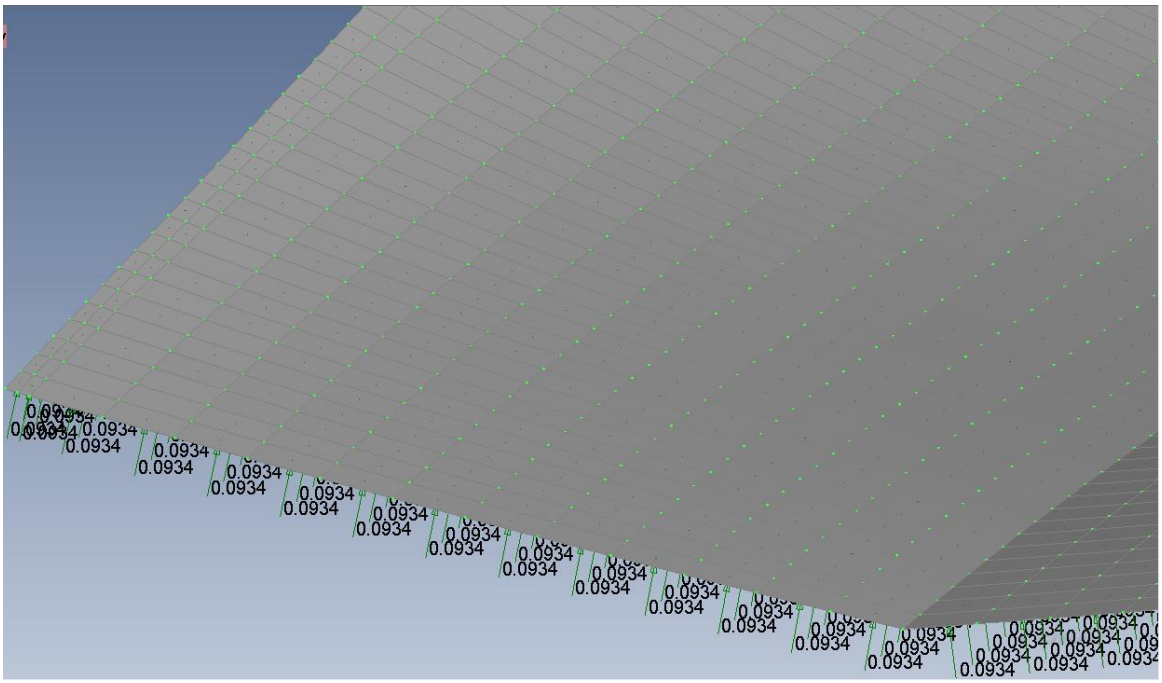
Kao opterećenje koje djeluje na oplatu dna modela odabrano je minimalno udarno opterećenje koje nastaje uslijed udaranja valova na dno broda. Iznos udarnog opterećenja izvučen je iz programa Marspeed i ono iznosi 93,4 kN/m^2 (vidi sliku 18 i sliku 19).



Slika 17. Rubni uvjeti na uzdužnom modelu



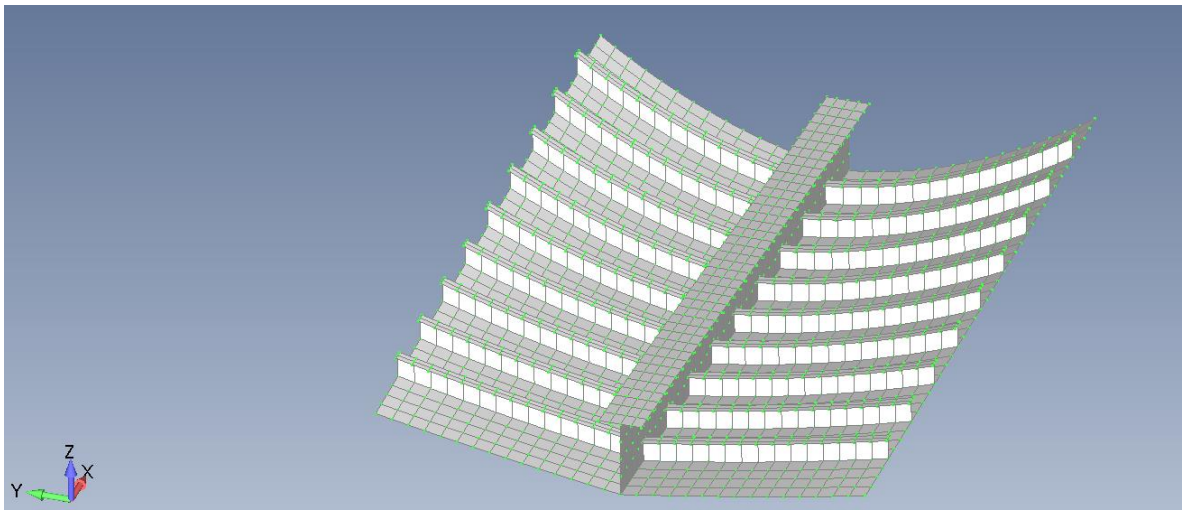
Slika 18. Udarno opterećenje na dno



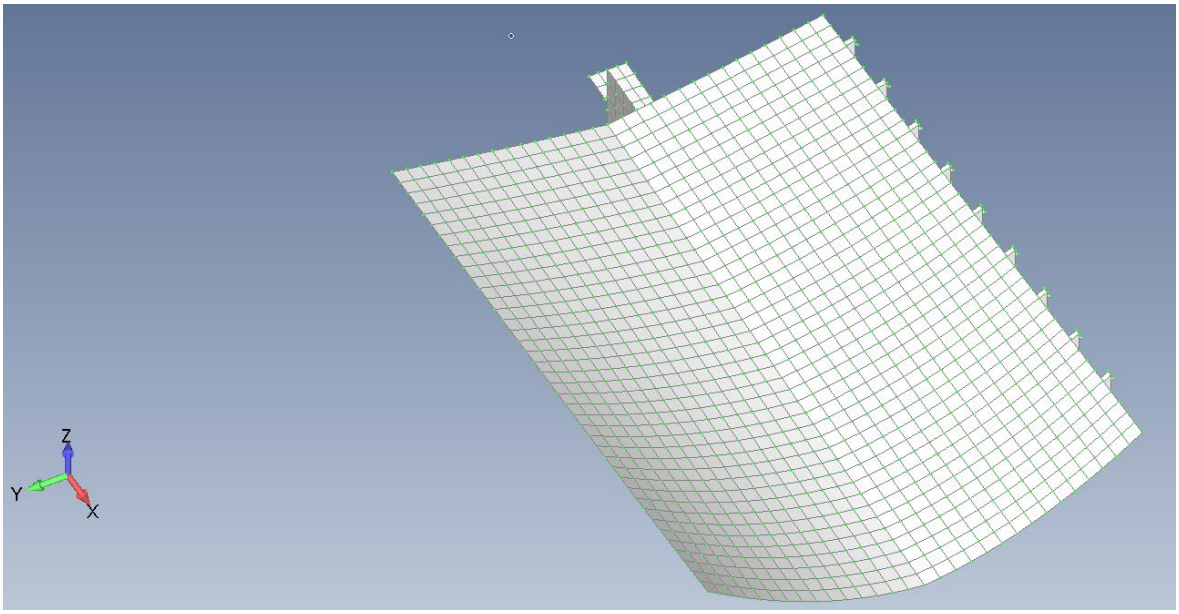
Slika 19. Udarno opterećenje na dno modela

4.3.2. Poprečni sustav gradnje

Kod poprečnog sustava gradnje mreža konačnih elemenata se sastoji od 2 427 čvorova i 2 330 konačnih elemenata. Prilikom izrade mreže nastojalo se ostvariti 3 konačna elementa između rebara, jedan konačni element po visini rebara, te 4 konačna elementa po visini jakog uzdužnog nosača. Na slici 20 i slici 21 prikazan je model poprečnog sustava gradnje s donje i gornje strane.



Slika 20. Prikaz mreže konačnih elemenata s gornje strane



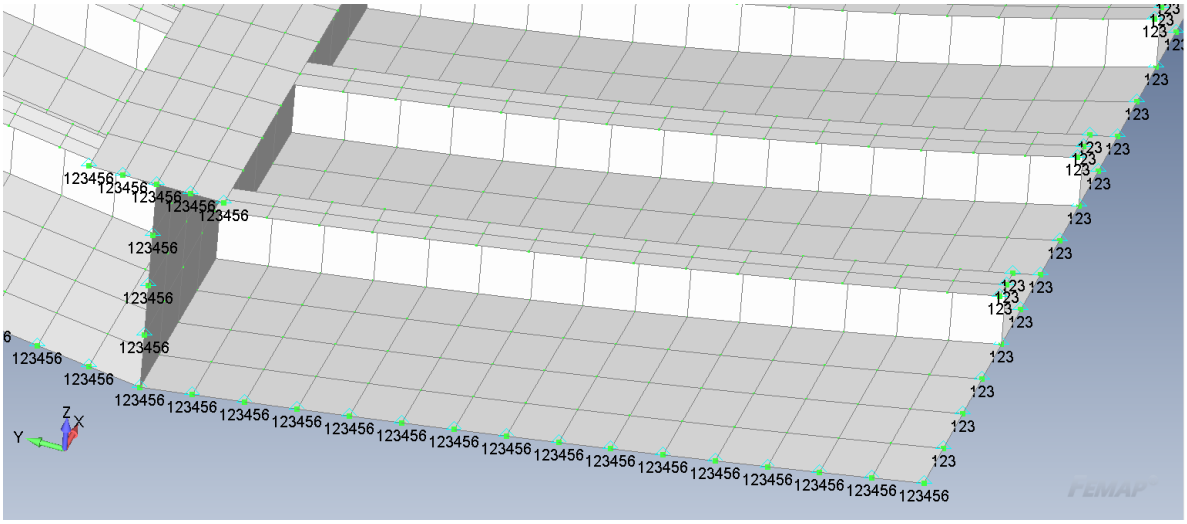
Slika 21. Prikaz mreže konačnih elemenata s donje strane

Globalni koordinatni sustav postavljen je kao i kod uzdužnog sustava gradnje, Pozitivni smjer osi X se proteže u smjeru jakog uzdužnog nosača prema pramcu, pozitivni smjer osi Y u poprečnom smjeru prema lijevom boku broda, te pozitivni smjer osi Z gleda prema gore u smjeru palube (vidi sliku 20).

Isto tako, i rubni uvjeti su postavljeni kao kod uzdužnog sustava gradnje. Na mjestima gdje se dno broda spaja s bokom broda čvorovi su zglobno oslonjeni, odnosno spriječena im je translacija u smjeru osi X, Y i Z, a dopuštena je rotacija oko osi X, Y i Z. Na mjestima gdje se

model spaja s poprečnom pregradom čvorovi su ukliješteni, odnosno spriječeni su im i pomaci i rotacije oko osi X, Y i Z (vidi sliku 22).

Udarno opterećenje koje djeluje na dno modela uzeto je iz programa Marspeed, a ono iznosi p_{sl} = 93,4 kN/m^2.



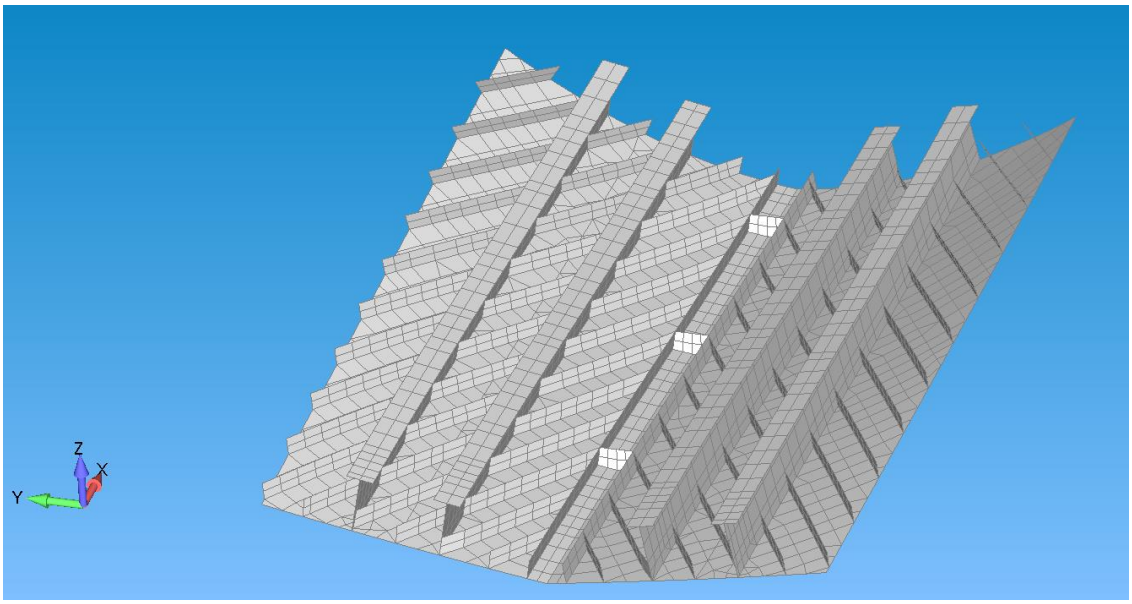
Slika 22. Rubni uvjeti poprečnog modela

4.3.3. Dijagonalni sustav gradnje

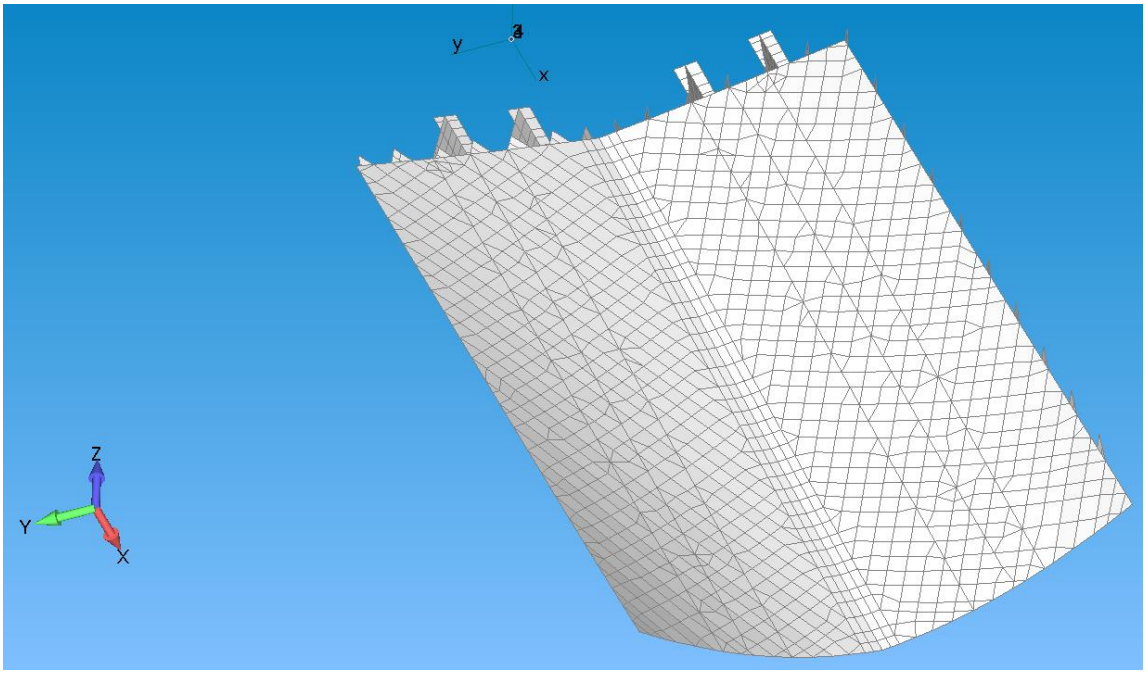
Model konačnih elemenata dijagonalnog sustava gradnje se sastoji od limova dna, uzdužnjaka dna, te jakih uzdužnih nosača. Mreža konačnih elemenata se razlikuje od mreže konačnih elemenata ostalih sustava gradnje zbog nemogućnosti korištenja u potpunosti kvadratnih elemenata za generiranje mreže. Uzdužnjaci sijeku limove dna pod kutom od 30°, dok se jaki uzdužni nosači prostiru u smjeru osi X. Između uzdužnjaka su generirana dva konačna elementa, a za njihovu visinu su korištena također dva elementa. Kod jakih uzdužnih nosača se nije koristio uniformni broj konačnih elemenata, te oni variraju između 8 i 10 konačnih elemenata, dok se za njihovu visinu koristilo dva konačna elementa. Na slici 23 i slici 24 prikazana je mreža konačnih elemenata s gornje i donje strane.

Globalni koordinatni sustav postavljen je kao i za slučaj uzdužnog i poprečnog orebrenja, te je prikazan na slici 23.

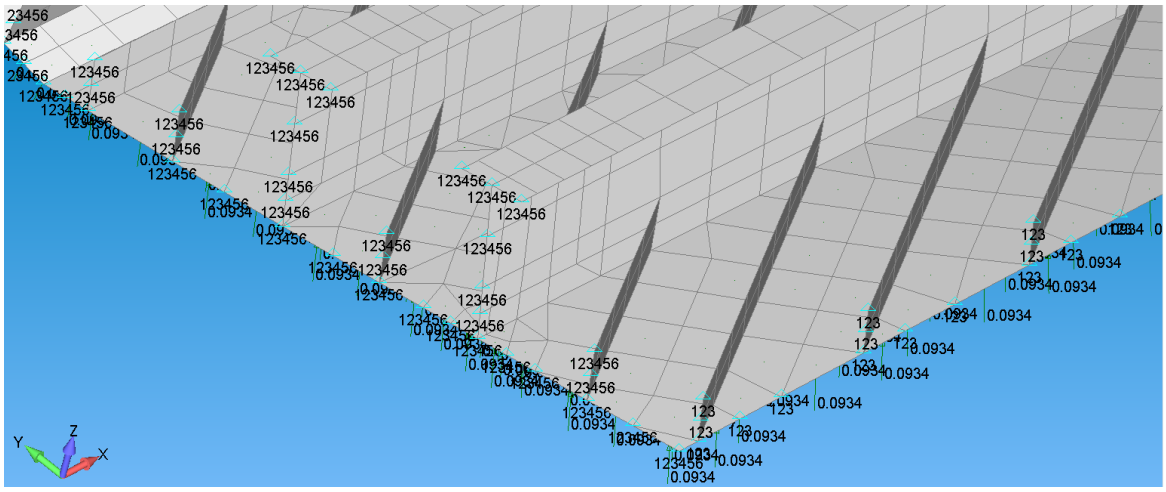
Također, rubni uvjeti kao i opterećenje, identični su kao i za ostale sustave gradnje kako bi se mogli međusobno uspoređivati (vidi sliku 25).



Slika 23. Prikaz mreže konačnih elemenata s gornje strane dijagonalnog modela



Slika 24. Prikaz mreže konačnih elemenata s donje strane dijagonalnog modela



Slika 25. Rubni uvjeti s opterećenjem

4.4. Rezultati analize

4.4.1. Masa modela

Masa modela konačnih elemenata se može očitati iz programa FEMAP. Da bi se mogla očitati masa potrebno je za materijal zadati karakteristike materijala. U ovom slučaju cijeli model je napravljen od aluminija koji ima sljedeće karakteristike:

Tablica 14. Karakteristike aluminija

Young-ov modul elastičnosti	70 000 [N/mm^2]
Poisson-ov koeficijent	0,33
Gustoća	2,7 E-6 [kg/mm^3]

Ukupna masa uzdužnog modela se sastoji od mase limova dna, uzdužnjaka i okvirnih rebara dna. Masa poprečnog modela se sastoji od mase limova dna, poprečnih rebara i jakog uzdužnog nosača, dok se masa dijagonalnog modela sastoji od mase limova dna, uzdužnjaka i jakih uzdužnih nosača. Usporedba ukupnih masa modela prikazana je u tablici 15. Kao što je vidljivo iz tablice 15, najpovoljniji model gradnje po masi je uzdužni model, dok je najnepovoljniji dijagonalni model gradnje.

Tablica 15. Usporedba masa

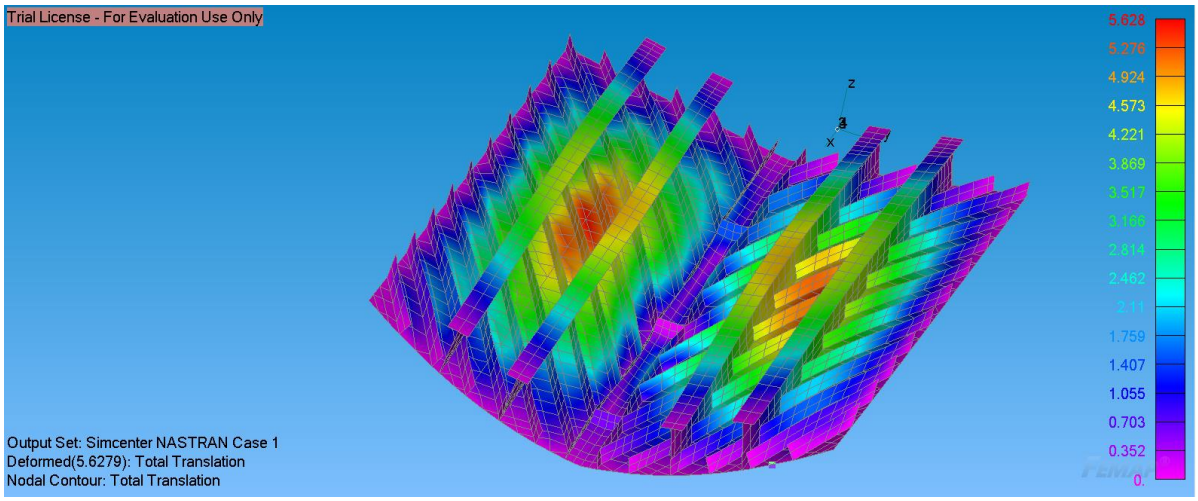
Sustav gradnje	Ukupna masa [kg]
Model s uzdužnim orebrenjem	1 169,63
Model s poprečnim orebrenjem	1 392,30
Model s dijagonalnim orebrenjem	1 588,05

4.4.2. Ukupne deformacije

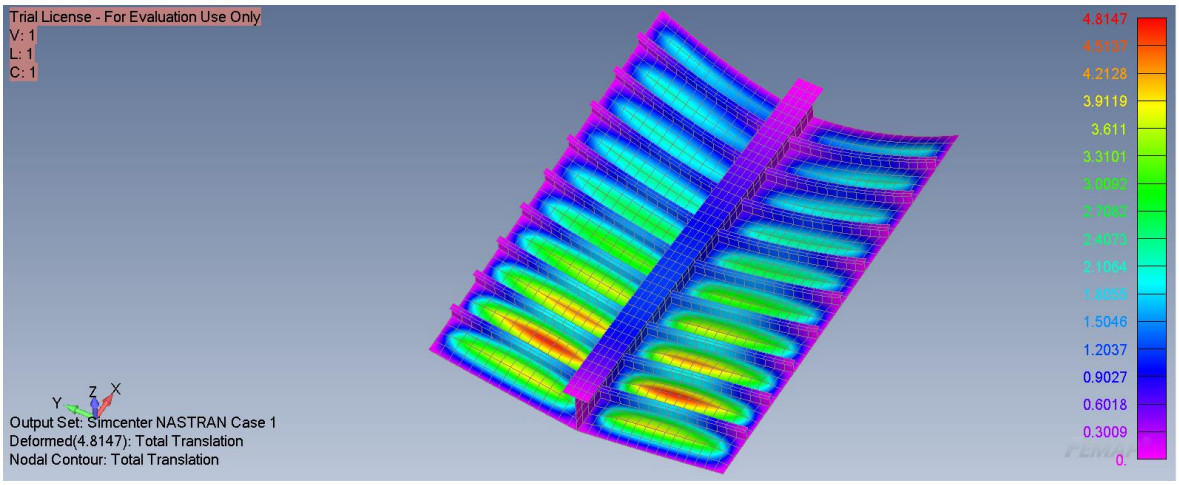
Ukupne deformacije na modelu se iščitavaju iz programa odabirom prikaza ukupnih pomaka. Na slikama koje slijede su prikazane ukupne deformacije sva tri model. Kao što se vidi sa slika, najveće deformacije su na dijagonalnom modelu, zatim slijedi poprečni model, dok model s uzdužnim orebrenjem ima najmanje deformacije. Ukupne deformacije su ispisane u tablici 16 koja slijedi:

Tablica 16. Ukupne deformacije modela

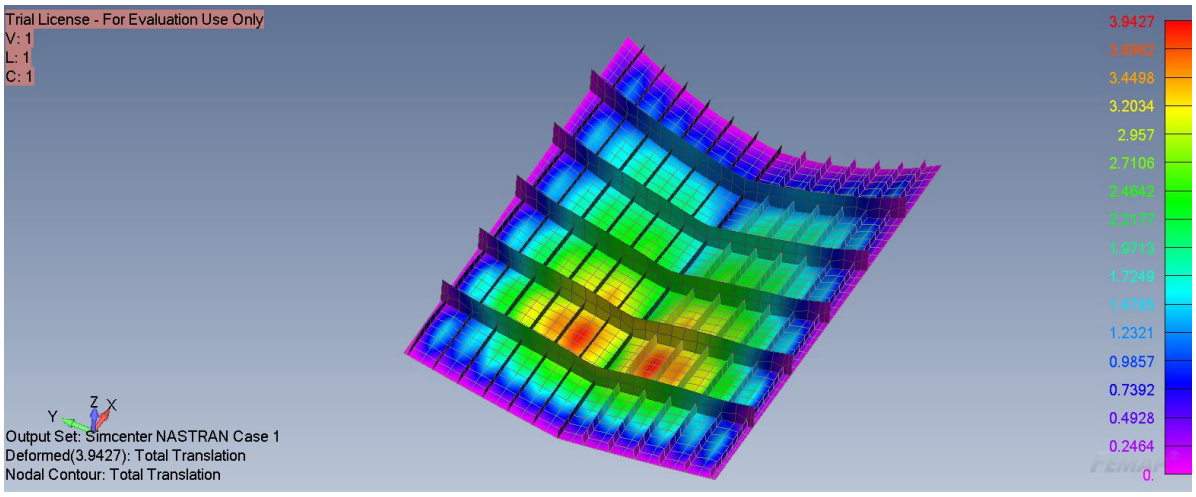
Sustav gradnje	Ukupna deformacija [mm]
Uzdužni sustav gradnje	3,943
Poprečni sustav gradnje	4,815
Dijagonalni sustav gradnje	5,628



Slika 26. Ukupne deformacije modela s dijagonalnim orebrenjem



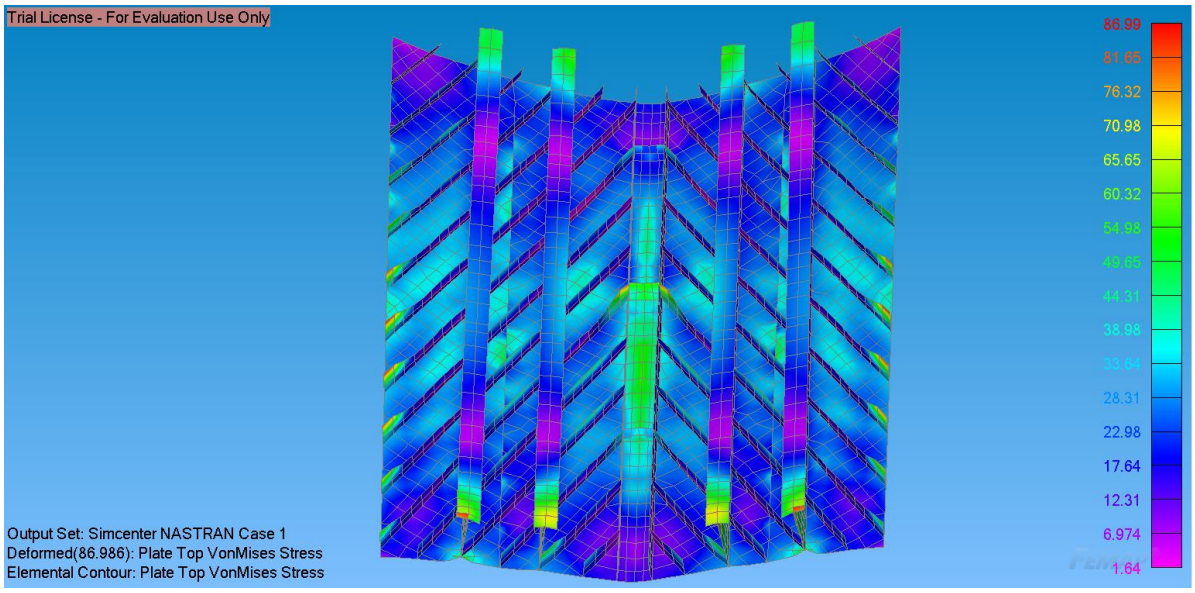
Slika 27. Ukupne deformacije modela s poprečnim orebrenjem



Slika 28. Ukupne deformacije model s uzdužnim orebrenjem

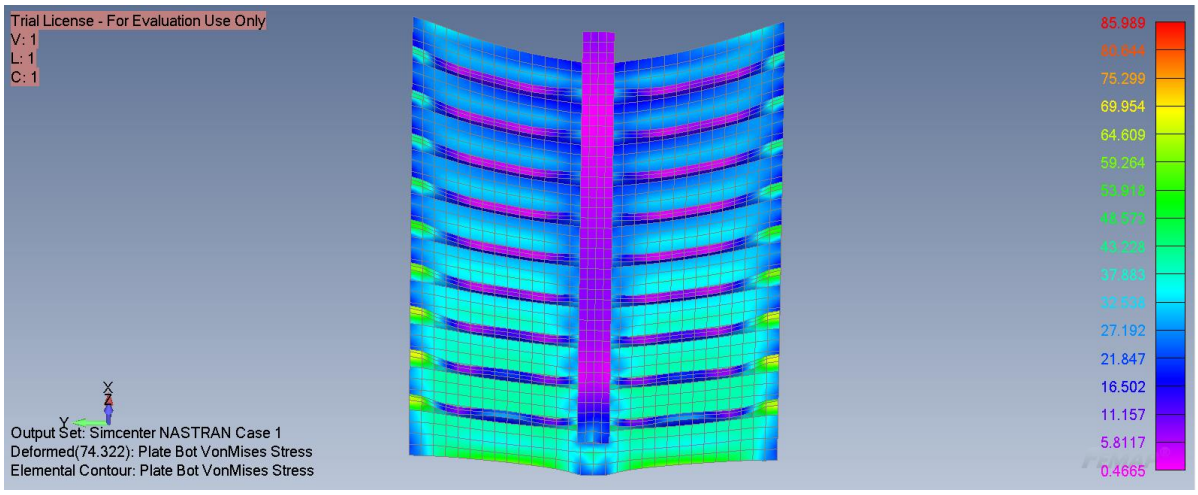
4.4.3. Maksimalna Von Mises naprezanja

Maksimalna Von Mises naprezanja na modelu dijagonalnog orebrenja, kao što je vidljivo sa slike 29, iznose 87 N/mm^2. Međutim, ta naprezanja nam nisu relevantna za usporedbu s ostalim sustavima gradnje jer su to naprezanja na rubnim uvjetima. Za usporedbu s drugim sustavima orebrenja potrebno je usporediti naprezanja na limovima dna i uzdužnjacima, tj. jakim uzdužnim nosačima. Sa slike 29 vidljivo je da se Top Von Mises naprezanja na limovima dna kreću od 18 N/mm^2 pa sve do 55 N/mm^2.



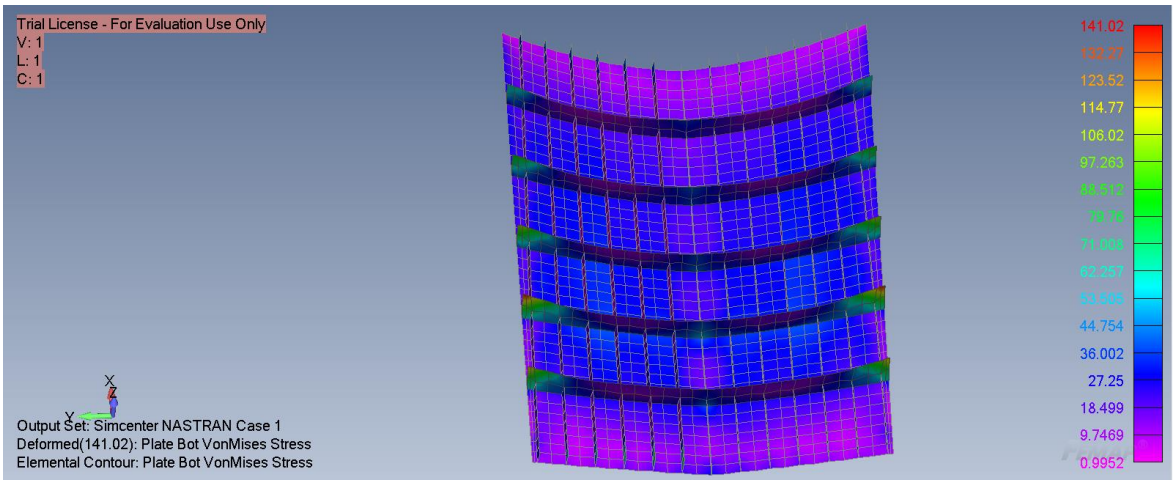
Slika 29. Top Von Mises naprezanja dijagonalnog modela

Maksimalna Von Mises naprezanja na modelu s poprečnim sustavom gradnje na limovima dna se kreću od 20 N/mm^2 do 45 N/mm^2 (vidi sliku 30).



Slika 30. Top Von Mises naprezanja poprečnog modela

Kao što se i do sada pokazalo, najpovoljniji model po Top Von Mises naprezanju je model s uzdužnim sustavom gradnje. Na limovima dna Top Von Mises naprezanja se kreću između 13 i 30 N/mm^2 (vidi sliku 31). Maksimalna naprezanja se pojavljuju na dijelovima gdje se nalaze rubni uvjeti konstrukcije i nisu nam relevantna za usporedbu.



Slika 31. Top Von Mises naprezanja uzdužnog modela

4.5. Zaključak

Nakon provedbe proračuna konstrukcije metodom konačnih elemenata za sva tri sustava orebrenja, dobiveni su rezultati ukupne mase, ukupnih pomaka i Top Von Mises naprezanja. Najpovoljniji model po svim kriterijima se pokazao model s uzdužnim orebrenjem. U nastavku rada mreža konačnih elemenata modela s uzdužnim orebrenjem će se dodatno profiniti. Zatim će se generirati mreža konačnih elemenata bokova i palube broda, te provesti proračun konstrukcije u programu FEMAP.

5. NADOPUNA KONSTRUKCIJE UZDUŽNOG SUSTAVA GRADNJE U PROGRAMU FEMAP I PROVEDBA DIREKTNE ANALIZE ČVRSTOĆE

5.1. Uvod

Uzdužni sustav gradnje broda se pokazao najpovoljniji za ovu vrstu broda. U prethodnom poglavlju se razmatralo samo dno broda bez bokova i palube s minimalnim udarnim opterećenjem koje djeluje na dno čiji iznos je dobiven u programu Marspeed. U ovom poglavlju će se na model uzdužnog orebrenja dodatno generirati mreža konačnih elemenata bokova i palube, a postojeća mreža dna će se dodatno profiniti. Kao opterećenje dna će se koristiti udarna opterećenja mora za dno broda, i to za iznose koji su dobiveni u programu Marspeed za svako opločenje između uzdužnjaka zasebno. Za opterećenje bokova broda i palube se koristilo opterećenje uslijed mora, te opterećenje vanjske palube čiji su iznosi također dobiveni iz programa Marspeed.

5.2. Izrada mreže konačnih elemenata bokova i palube

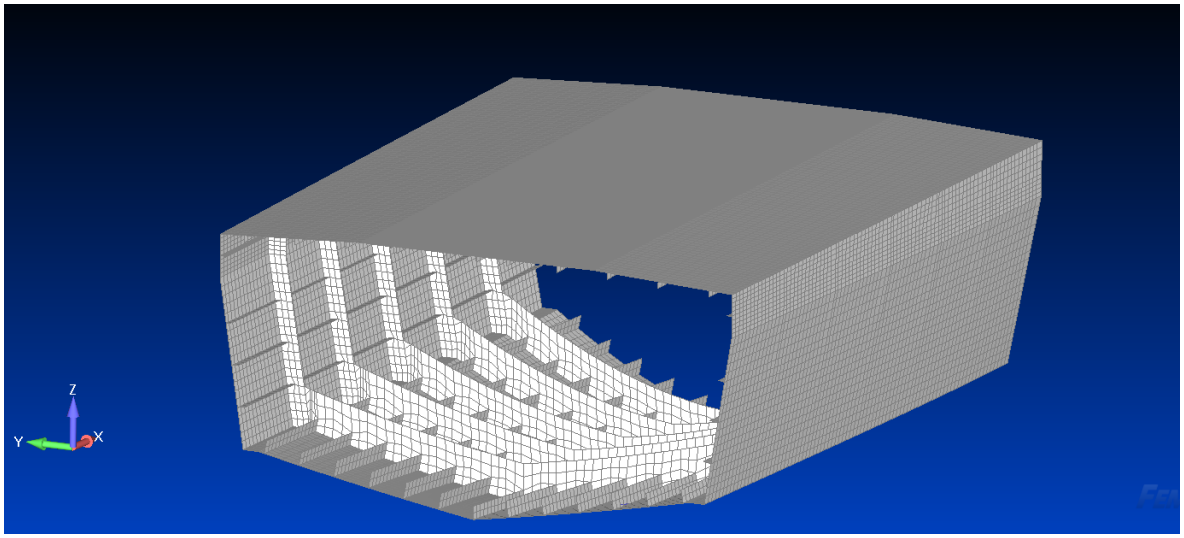
Za izradu MKE modela poslužila je prethodno napravljena geometrija u programu Rhinoceros. Nakon unosa geometrije u program FEMAP, iskorištena je mogućnost automatskog generiranja mreže konačnih elemenata. Na geometriji su već označene krivulje koje predstavljaju uzdužnjake i rebra, te njihove visine. Uzdužnjaci, kao i rebra, napravljeni su od pločastih elemenata ekstrudiranjem krivulje koja predstavlja uzdužnjake za iznos njihovih visina. Osim generiranja dodatne geometrije, prethodna geometrija se dodatno podijelila na manje elemente, pa se tako sad između uzdužnjaka nalaze 4 konačna elementa, a između rebara 14 konačnih elemenata. Uzdužnjaci dna se po visini sastoje od dva konačna elementa, dok se uzdužnjaci boka i palube sastoje od jednog konačnog elementa. Rebra dna se sastoje od 4 konačna elemenata, a rebra boka i palube od 3 konačna elementa po visini. Konačni MKE model prikazan je na slici 32. Mreža konačnih elemenata se tako sada sastoji od 21 025 čvorova i 21 022 konačna elementa. Dimenzije strukturnih elemenata konstrukcije su prikazani u tablici 17.

Tablica 17. Dimenzije strukturnih elemenata

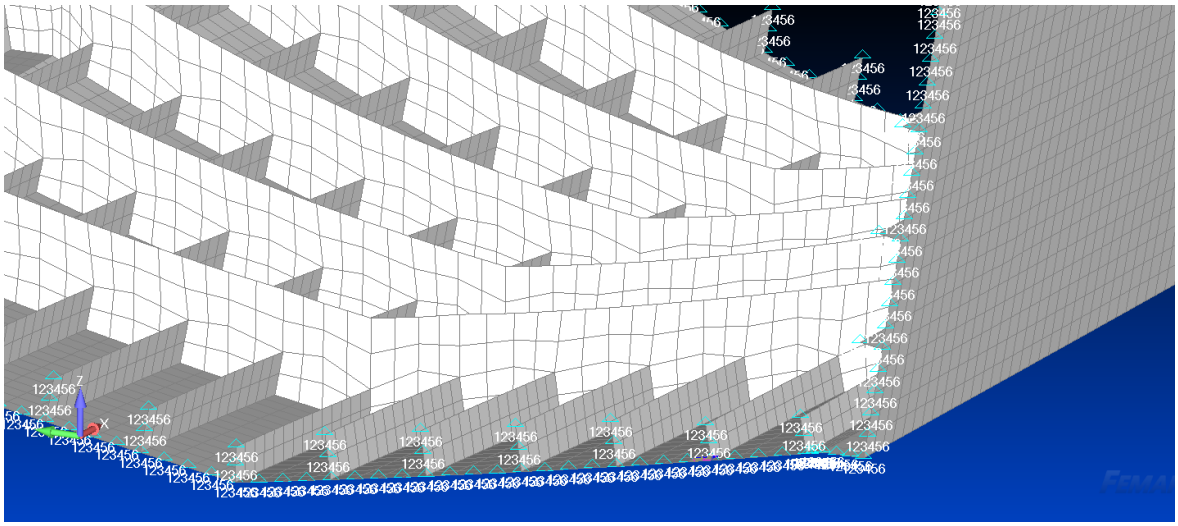
Strukturni element	Odabrani profil
Uzdužnjaci dna	FB120x10 FB150x10
Uzdužnjaci boka	FB80x6 FB60x8 FB50x5
Uzdužnjaci palube	FB60x6 FB50x6
Rebra dna	FB360x10
Rebra boka	FB170x5
Sponje	FB170x5

Globalni koordinatni sustav postavljen je kao i u prethodnim modelima, pozitivna smjer osi X je u smjeru uzdužnjaka od krme prema pramcu broda, pozitivna smjer osi Y prema lijevoj strani broda, a pozitivna smjer osi Z gleda prema palubi broda (vidi sliku 32).

Rubni uvjeti su postavljeni na dijelu konstrukcije gdje se ona spaja s poprečnim pregradama. U tim čvorovima postavljen je uvjet uklještenja, odnosno spriječena im je i translacija i rotacija oko svih triju osi (vidi sliku 33).



Slika 32. Kompletni MKE model uzdužnog orebrenja

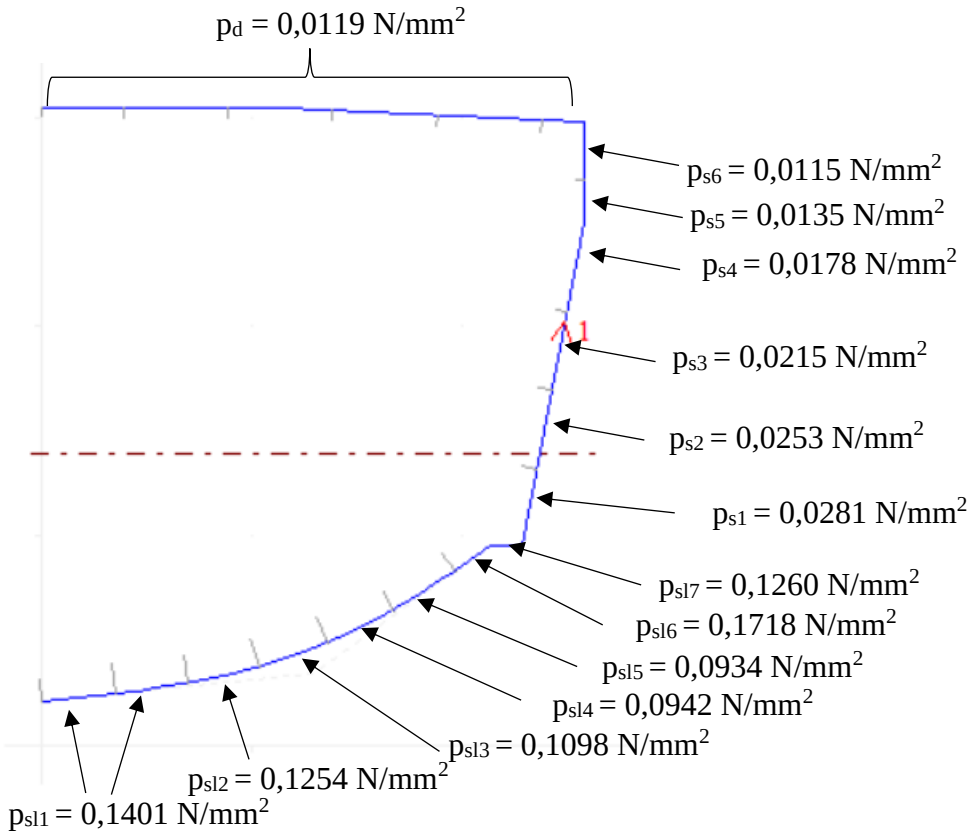


Slika 33. Rubni uvjeti konačnog modela

Opterećenja na modelu su podijeljena u tri grupe:

- Udarna opterećenja na dnu broda koja se međusobno razlikuju između uzdužnjaka
- Opterećenja uslijed djelovanja mora koja su različita ovisno o visini
- Opterećenje na palubi koje je uniformno po cijeloj palubi,

a njihova podjela po iznosu i poziciji prikazana je na slici 34.



Slika 34. Podjela naprezanja na modelu

5.3. Kriterij evaluacije

Prema poglavlju C3.6.1.5 pravila klasifikacijskog društva B.V.-a [3] po jednadžbi (11) izračunata su maksimalna savojna naprezanja, a prema jednadžbi (12) su određena maksimalna smična naprezanja.

$$\sigma_{am} = \frac{150}{K * f'_m * f_s} = 117 \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{11}$$

$$\tau_{am} = \frac{90}{K * f'_m * f_s} = 70 \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{12}$$

Gdje su:

K – faktor za materijal, za aluminij iznosi 0,595

f'_m – koeficijent ovisan o materijalu, za aluminij iznosi 2,15

f_s – koeficijent sigurnosti, za kombinirano opterećenje iznosi 1,25

Maksimalna dozvoljena Von Mises (ekvivalentna) naprezanja se mogu odrediti iz poglavlja C3.6.1.5 prema jednadžbi (13), a izračunata naprezanja će biti kriterij za provjeru elemenata konstrukcije.

$$\sigma_{eq,am} = \frac{190}{K * f'_m * f_s} = 149 \ \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{13}$$

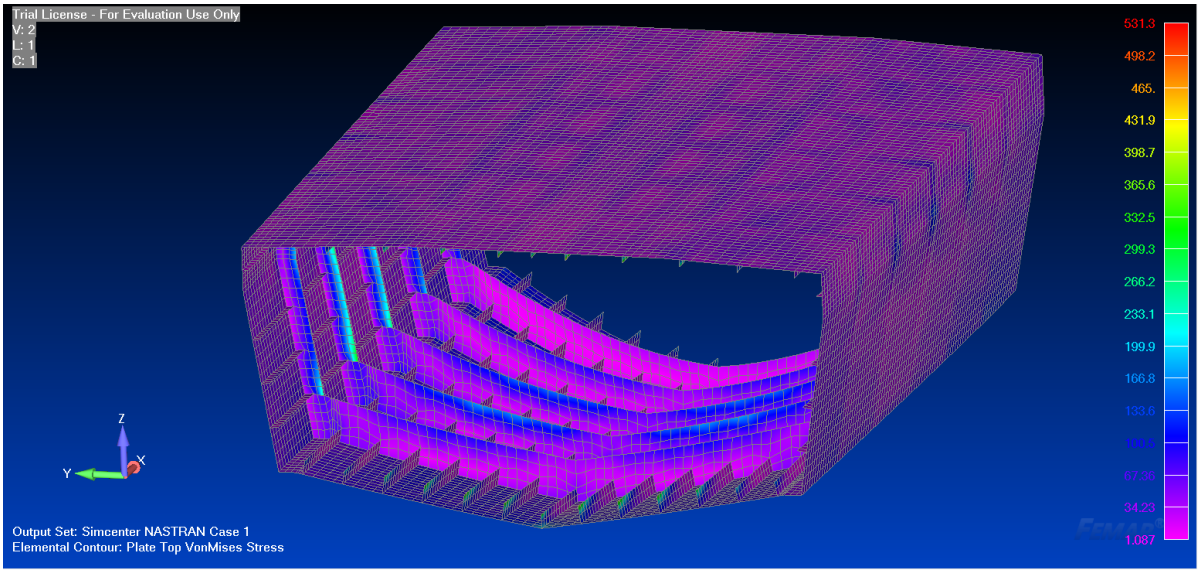
5.4. Rezultati analize

Rezultati dobiveni analizom konačnih elemenata prikazani su u tablici 18.

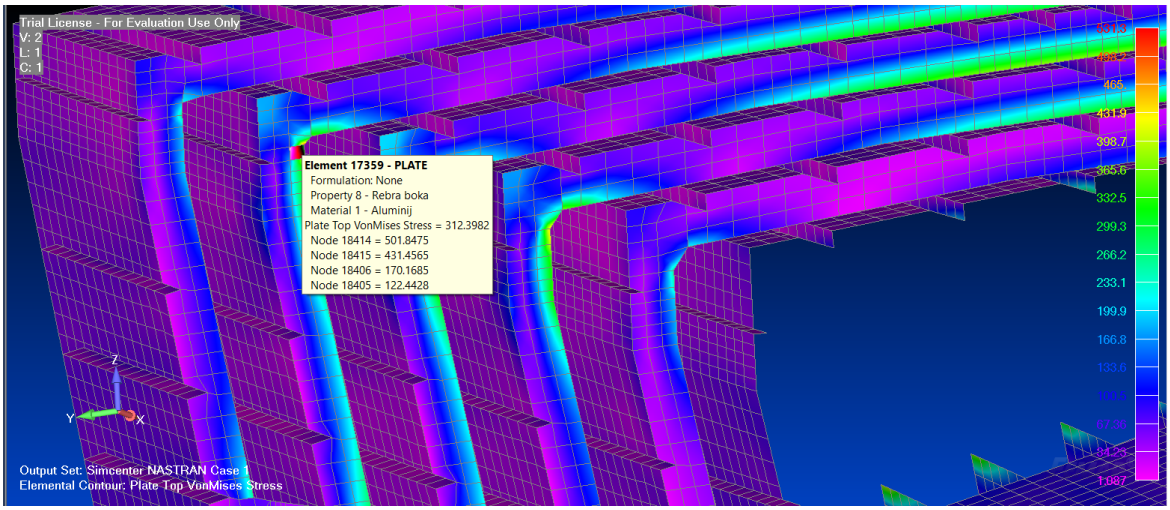
Tablica 18. Analiza rezultata konačnog modela

Ukupna masa [kg]	2 138,74
Ukupna deformacija [mm]	75,14
Smična naprezanja [N/mm^2]	114,6
Top Von Mises naprezanje [N/mm^2]	531,3

Kao što se vidi iz tablice 18 i prema slici 35, maksimalna Von Mises naprezanja iznose 531,3 N/mm^2. Međutim, maksimum se očekivano pojavljuje na mjestima gdje je segment spojen s poprečnim pregradama, odnosno gdje su rubni uvjeti uklještenja. Bitna naprezanja su naprezanja van rubova segmenta, pa je tako vidljivo sa slike 36 da se na elementu rebra boka javlja naprezanje 312,4 N/mm^2 što je iznad dopuštenog te će se morati redimenzionirati pojedini elementi.

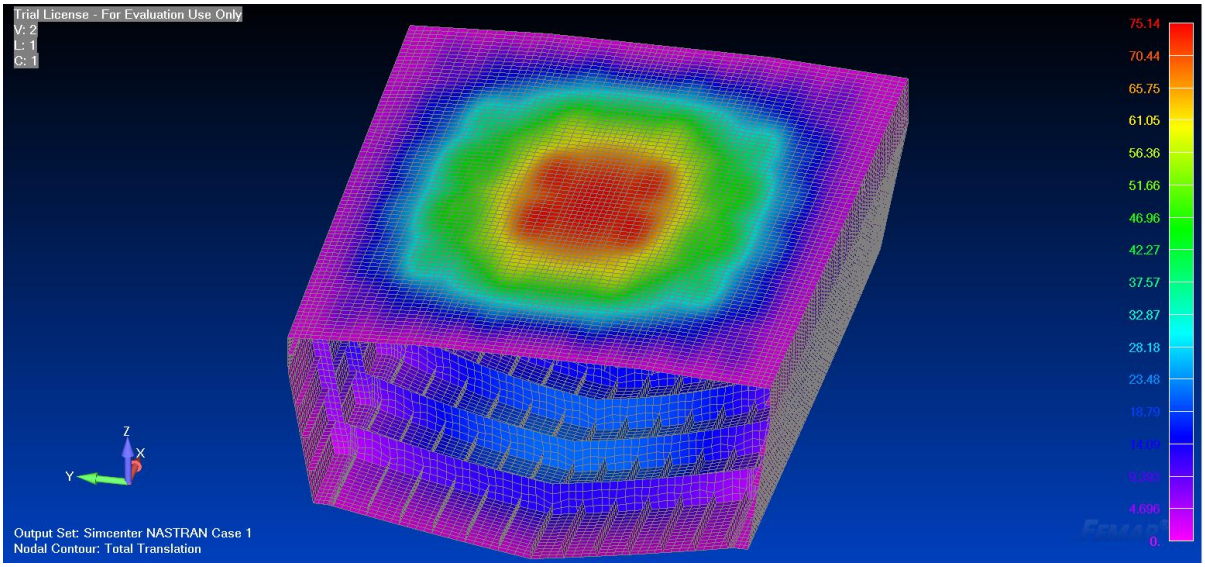


Slika 35. Analiza podobnosti segmenta



Slika 36. Naprezanja na rebru boka

Maksimalni dopušteni vertikalni progib segmenta uzima se vrijednost od $\frac{l}{200}$, gdje je l nepoduprti raspon. Kao nepoduprti raspon uzima se ukupna širina broda od 5,8 m, te se na taj način dobiva da maksimalni dopušteni vertikalni progib iznosi 29 mm. Sa slike 37 je vidljivo da su najveće vrijednosti pomaka u modelu preko 70 mm, točnije 75.14 mm, a toliki pomaci nisu dopušteni. Prijedlog podobnijeg modela će se razglabati u sljedećem poglavlju.



Slika 37. Ukupni pomaci na modelu

6. FINALNI MODEL

6.1. Prijedlog podobne konstrukcije

Na prethodnom modelu tijekom analize utvrđeno je da model nije podoban. Elementi konstrukcije koji nisu zadovoljavali uvjetima izmijenjeni su, te se nakon izmjene iznova provela analiza podobnosti na razini dozvoljenih naprezanja i kriterija čvrstoće. Usporedba elemenata nepodobne konstrukcije i konstrukcije koja je podobna prikazana je u tablici 19.

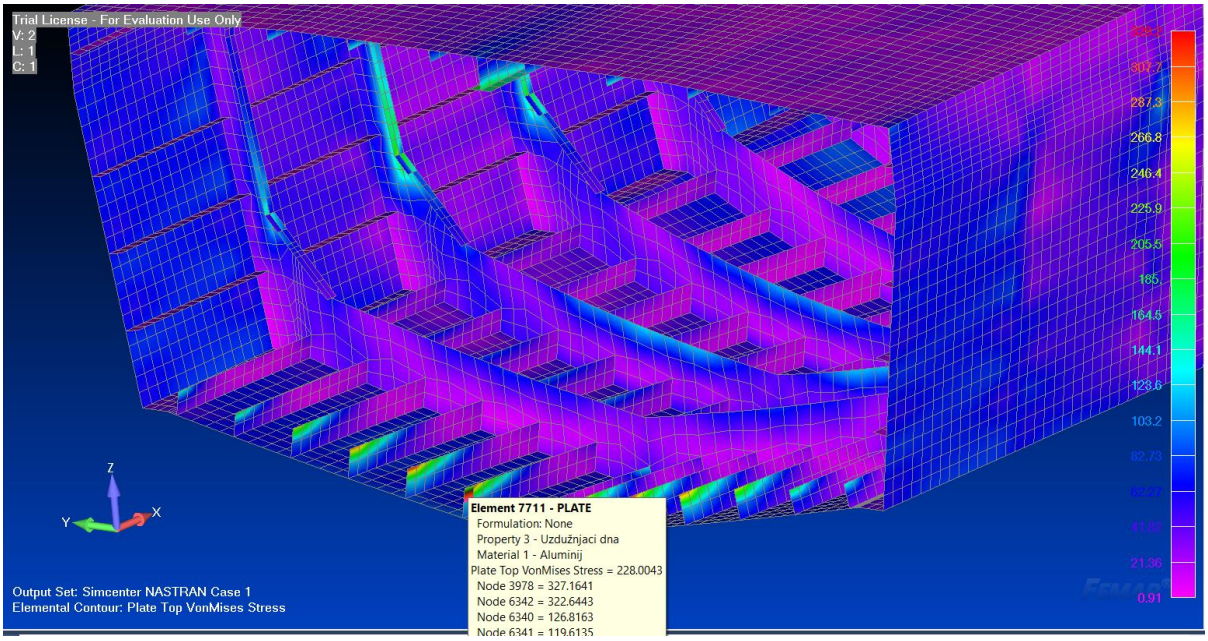
Tablica 19. Usporedba dimenzija strukturnih elemenata

Strukturni element	Nepodobna konstrukcija	Podobna konstrukcija
Uzdužnjaci dna	FB120x10 FB150x10	FB120x10 FB150x10
Uzdužnjaci boka	FB80x6 FB60x8 FB50x5	FB80x6 FB60x8 FB50x5
Uzdužnjaci palube	FB60x6 FB50x6	FB60x6 FB50x6
Rebra dna	FB360x10	FB360x10
Rebra boka	FB170x5	T170x5/70x14
Sponje	FB170x5	T170x5/70x8
Jaki uzdužni nosač palube	/	T170x10/120x10
Koljena	/	300x300

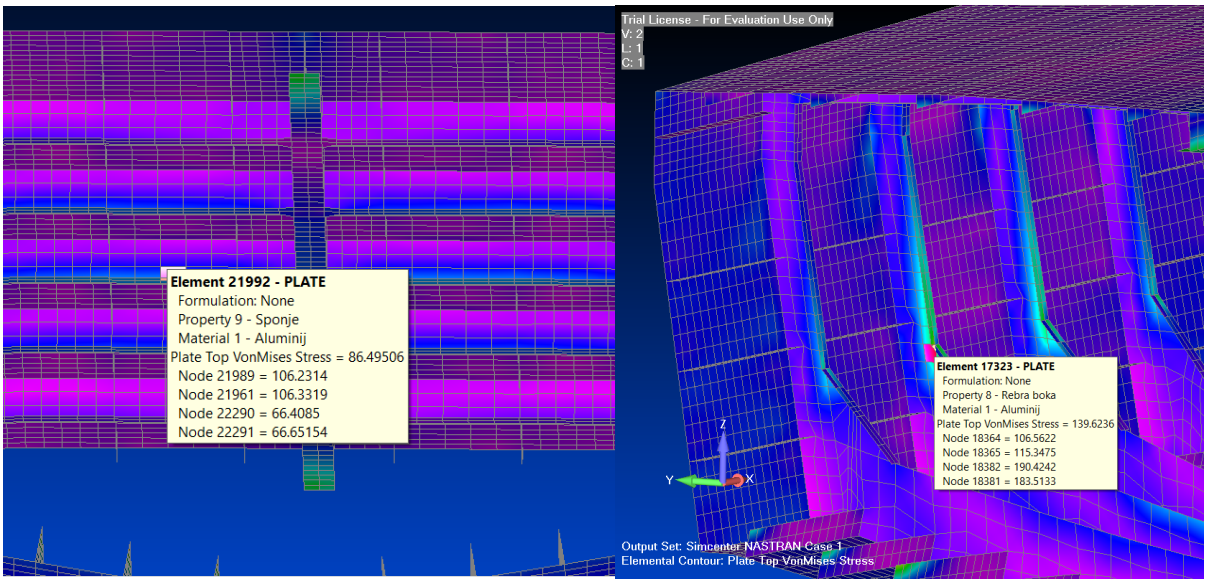
Iz tablice 19 je vidljivo da se podobna konstrukcija razlikuje od nepodobne u rebrima boka i sponjama, te je uz to dodan jaki uzdužni nosač i koljena na spoju rebara boka i dna. Jaki uzdužni nosač palube je dodan kako bi se smanjila ukupna deformacija palube ispod dozvoljene. Uz to, sponje su izmijenjene te tako sada više nisu „flat bar“ profili već su ima dodane prirubnice kako bi se smanjila naprezanja na sponjama. Također, isto je napravljeno i za profile rebara boka kojima su dodane prirubnice s ciljem smanjenja naprezanja. Ukupna masa segmenta se povećala za 197 kg te sada iznosi 2 335,72 kg.

Maksimalna Von Mises naprezanja na segmentu iznose 328,2 N/mm^2 koja se pojavljuju u čvorovima gdje je segment uklješten te ona nisu relevantna (vidi sliku 38). Von Mises

naprezanja na sponjama su unutar dopuštenih i iznose oko 86 N/mm^2, dok su na spoju rebra boka s koljenom oko 140 N/mm^2 (vidi sliku 39). U pojedinim čvorovima spoja rebra boka s koljenom pojavljuju se naprezanja iznad dopuštenih, međutim tu dolazi do koncentracije naprezanja zbog spoja elemenata te ih je potrebno dodatno i detaljnije obraditi što se u ovom radu neće obrađivati.

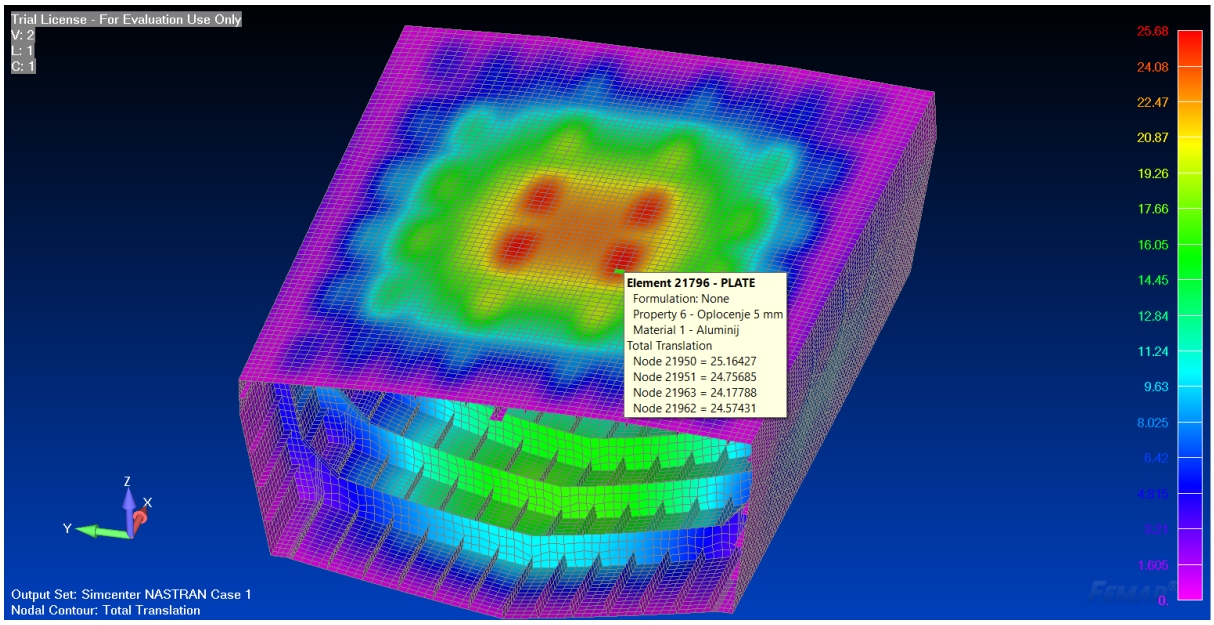


Slika 38. Von Mises naprezanja podobnog modela

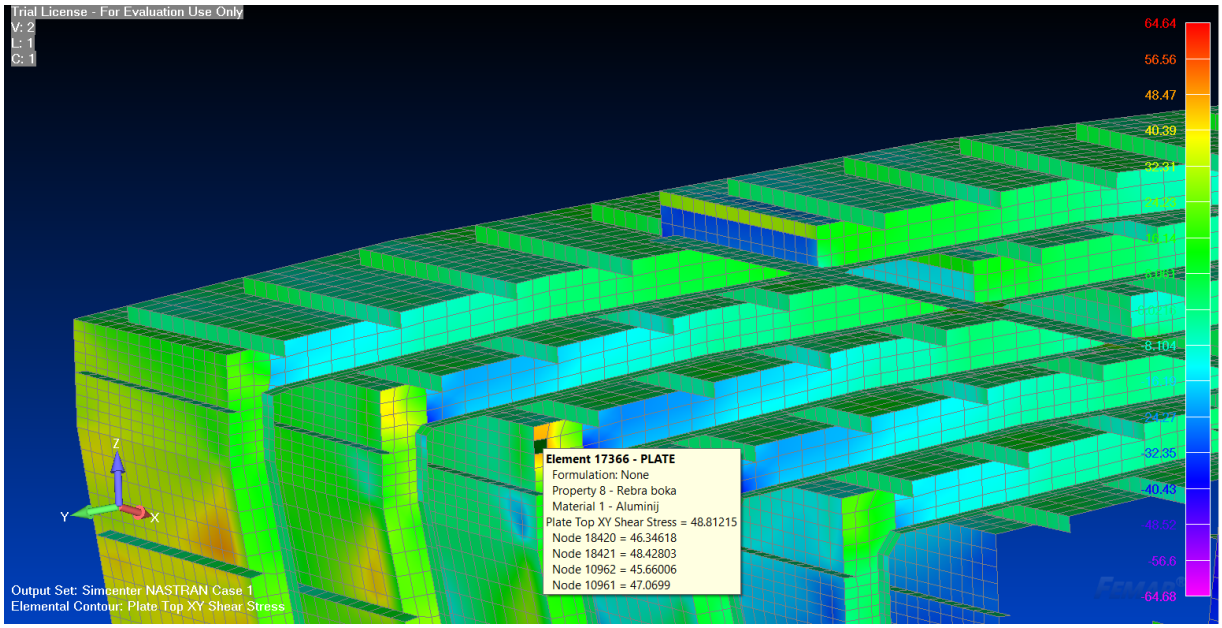


Slika 39. Von Mises naprezanja na sponjama i rebrima boka

S obzirom na to da maksimalni pomaci na modelu iznose 25,68 mm oni zadovoljavaju kriterij maksimalnog dopuštenog progiba od 29 mm. Maksimalna smična naprezanja iznose 64,64 N/mm^2, te su i ona unutar dopuštenih smičnih naprezanja iz jednadžbe (12) koja iznose 70 N/mm^2 (vidi sliku 41). Na spoju rebra i sponje se najčešće pojavljuju velika smična naprezanja. Kod ovog model na tom spoju smična naprezanja iznose 48,81 N/mm^2 , što znači da zadovoljavaju kriterij maksimalnih smičnih naprezanja (vidi sliku 41).



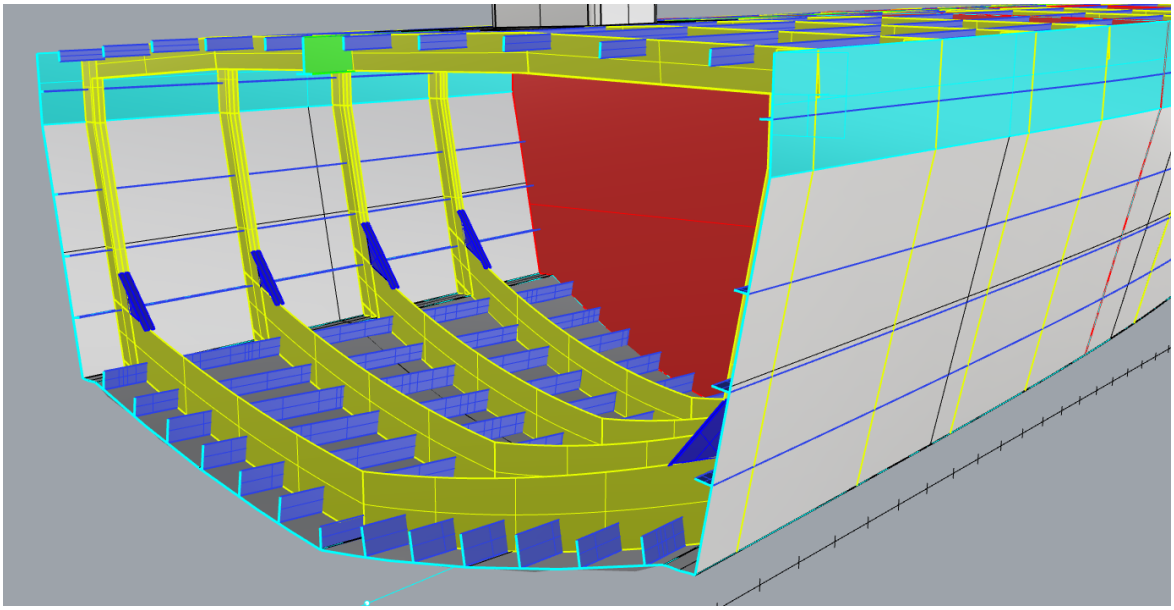
Slika 40. Maksimalni progib na segmentu



Slika 41. Maksimalno smično naprezanje na segmentu

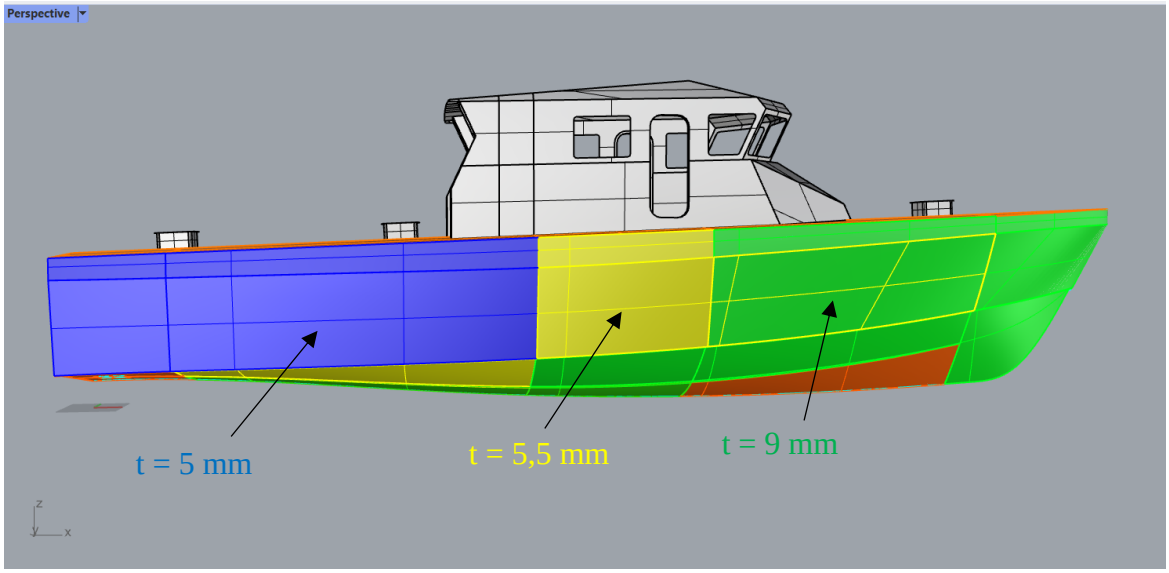
6.2. Konačni model u programu Rhinoceros

Nakon što se provela analiza čvrstoće korištenjem metode konačnih elemenata u programu FEMAP, te provela analiza podobnosti na razini dozvoljenih naprezanja i kriterija čvrstoće, dan je prijedlog podobne konstrukcije koja zadovoljava sve uvjete strukturne podobnosti. Za podobnu konstrukciju, u programu Rhinoceros, napravljen je geometrijski model sa svim bitnim konstrukcijskim elementima i njihovim dimenzijama. Model broda prikazan na slici 42 presječen je plohom s ciljem prikaza strukturnih elemenata konstrukcije. Na modelu su plavom bojom označeni uzdužnjaci i koljena, crvenom bojom poprečne pregrade, žutom bojom rebra broda, a zelenom bojom jaki uzdužni nosač palube. Elementi su izrađeni ekstrudiranjem krivulja ucrtanih u početnom modelu. Umjesto centralnog uzdužnjaka na palubi stavljen je jaki uzdužni nosač, a na mjestima rebara stavljeni su T-profili umjesto „flat bar“ profila.

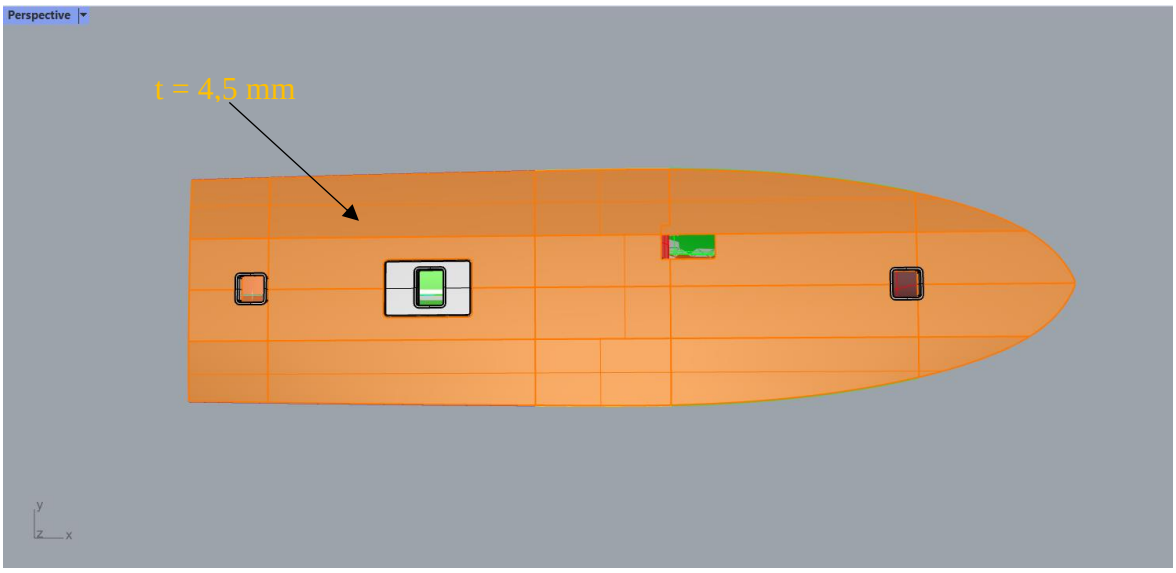


Slika 42. Konačni model broda

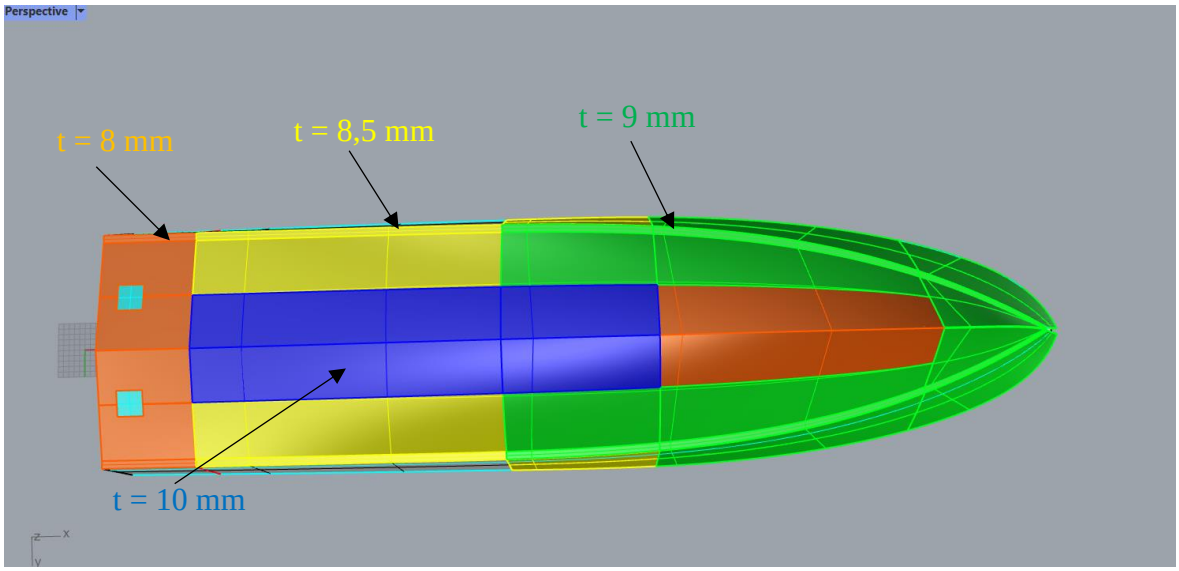
Debljine limova se razlikuju po duljini broda ovisno o poziciji na kojoj se nalaze. Tako se debljine limova na boku mijenjaju od 5 mm pa sve do 9 mm (vidi sliku 43). Limovi na palubi se ne mijenjaju po duljini broda pa je tako njihova debljina 4,5 mm (vidi sliku 44). Na dnu, limovi također mijenjaju debljinu po duljini, pa se tako njihove debljine kreću od 8 mm do 10 mm (vidi sliku 45).



Slika 43. Debljine limova na boku modela

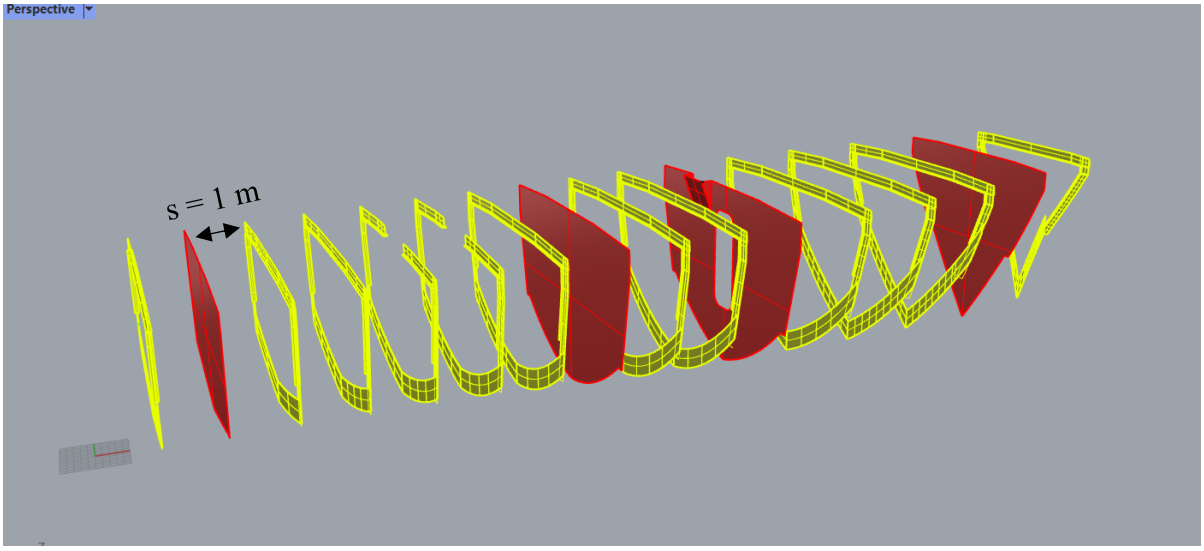


Slika 44. Debljina limova na palubi modela

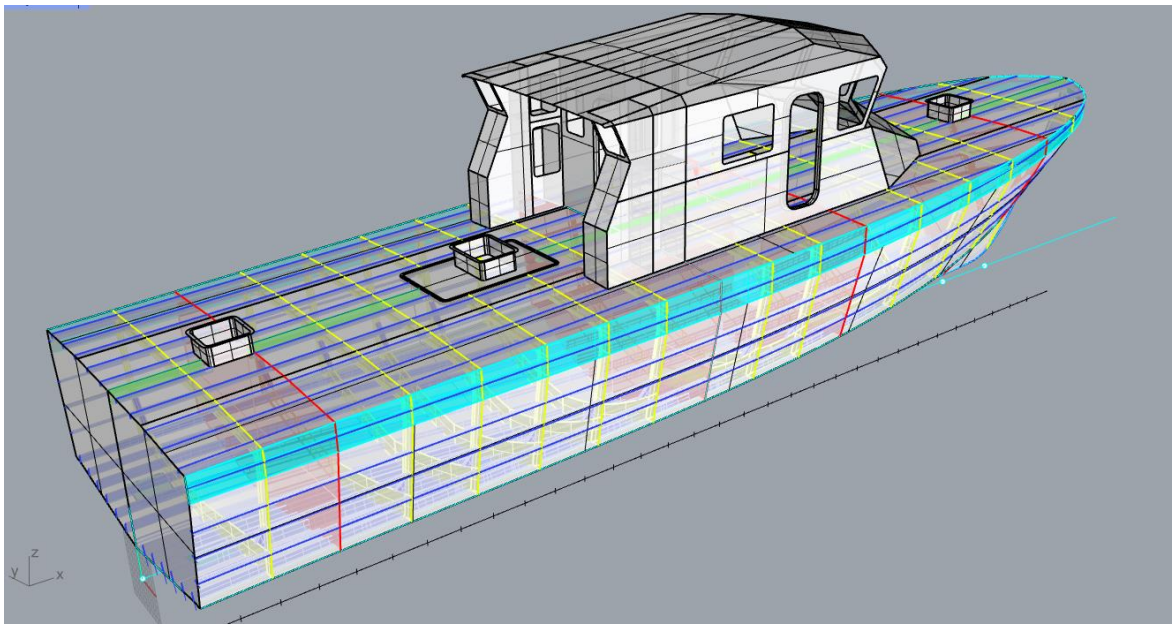


Slika 45. Debljine limova na dnu modela

Rebra dna, boka, te sponje s poprečnim pregradama prikazani su na slici 46. Razmak poprečnih elemenata u modelu iznosi 1 m i on je uniforman po cijelom modelu. Sponje su izrađene od T profila dimenzija T 170x5/70x8, rebra boka od profila T 170x5/70x14, a rebra dna su od „flat bar“ profila dimenzija FB 360x10. Cijeli model prikazan je na slici 47.



Slika 46. Poprečni elementi modela



Slika 47. Prikaz kompletnog modela broda

7. ZAKLJUČAK

Brodovi za traganje i spašavanje su osnovno sredstvo za akcije traganja i spašavanja na moru. Prilikom izrade malih brodova, osim čelika, za izgradnju trupa se može koristiti i aluminij. Aluminij kao materijal pogodniji je za gradnju manjih brodova zbog manje mase u odnosu na čelik, te brojne druge pogodnosti kao što je veća otpornost na koroziju i veoma lagana obradivost u željeni oblik. Cilj ovog rada bila je usporedba različitih sustava gradnja manjeg aluminijskog broda za traganje i spašavanje.

U prvoj fazi projektiranja dimenzionirani su konstrukcijski elementi koristeći se pravilima klasifikacijskog društva BV-a za brze brodove, te programa Marspeed.

U drugoj fazi projektiranja napravljen je model broda u programu Rhinoceros za sva tri sustava orebrenja čija se geometrija iskoristila za izradu mreže konačnih elemenata u programu FEMAP. Zatim je provedena MKE analiza za sva tri slučaja orebrenja s ciljem dobivanja najpogodnijeg za daljnju analizu. Kao rezultat najpogodnijeg se pokazao uzdužni sustav gradnje, te se model nadopunio elementima boka, palube i ostalih pratećih konstrukcijskih elemenata. Za nadopunjeni model uzdužnog orebrenja provedena je MKE analiza čvrstoće , te je provedena analiza podobnosti na razini dozvoljenih naprezanja te kriterija izvijanja.

Za pojedine identificirane nepodobne konstrukcijske elemente dan je prijedlog novih konstrukcijskih elemenata koji zadovoljavaju strukturne podobnosti poput rebara boka i sponja kojima su dodane prirubnice. Uz to na spojevima rebara postavljena su koljena te je dodan jaki uzdužni nosač. Također, konačni model je podvrgnut MKE analizi s ciljem provjere podobnosti.

Naposljetku, model broda u programu Rhinoceros nadopunjen je sa svim bitnim konstrukcijskim elementima, te su napravljeni osnovni nacrti broda koji su priloženi uz rad.

LITERATURA

[1] *Rhinoceros 7 Evaluation,* Barcelona: Robert McNeel & Associates, 2021.

[2] *Marspeed32, v3.0f,* Bureau Veritas, 2002..

[3] B. Veritas, »Rules for the Classification of High Speed Craft-396-NR_2002-02,« February 2002., p. 290.

[4] S. P. Software, *FEMAP 2020.2,* 2020..

[5] A. Mihanović, »IZRADA RADIONIČKE DOKUMENTACIJE ZA ALUMENJAK,« 2020.. [Mrežno]. Available: https://repozitorij.oss.unist.hr/islandora/object/ossst:818. [Pokušaj pristupa 24. 6. 2021.].

[6] N. Kuzmanić, »Pravni aspekti traganja i spašavanja na moru,« 2019.. [Mrežno]. Available: https://core.ac.uk/download/pdf/232989643.pdf. [Pokušaj pristupa 25. 6. 2021.].

[7] »Ministarstvo mora,prometa i infrastrukture,« 2021.. [Mrežno]. Available: https://mmpi.gov.hr/more-86/sigurnost-plovidbe-104/traganje-i-spasavanje-na-moru-195-ustrojstvo-nis/19612. [Pokušaj pristupa 24. 6. 2021.].

[8] I. Grubišić, »Konstrukcija malih brodova,« 2005.. [Mrežno]. Available: https://www.fsb.unizg.hr/kmb/600/640/kmb641.htm. [Pokušaj pristupa 25. 6. 2021.].

[9] U. D. o. H. Security, »DEFENDER CLASS OPERATOR'S HANDBOOK,« United States Coast Guard, Washington, 2006..

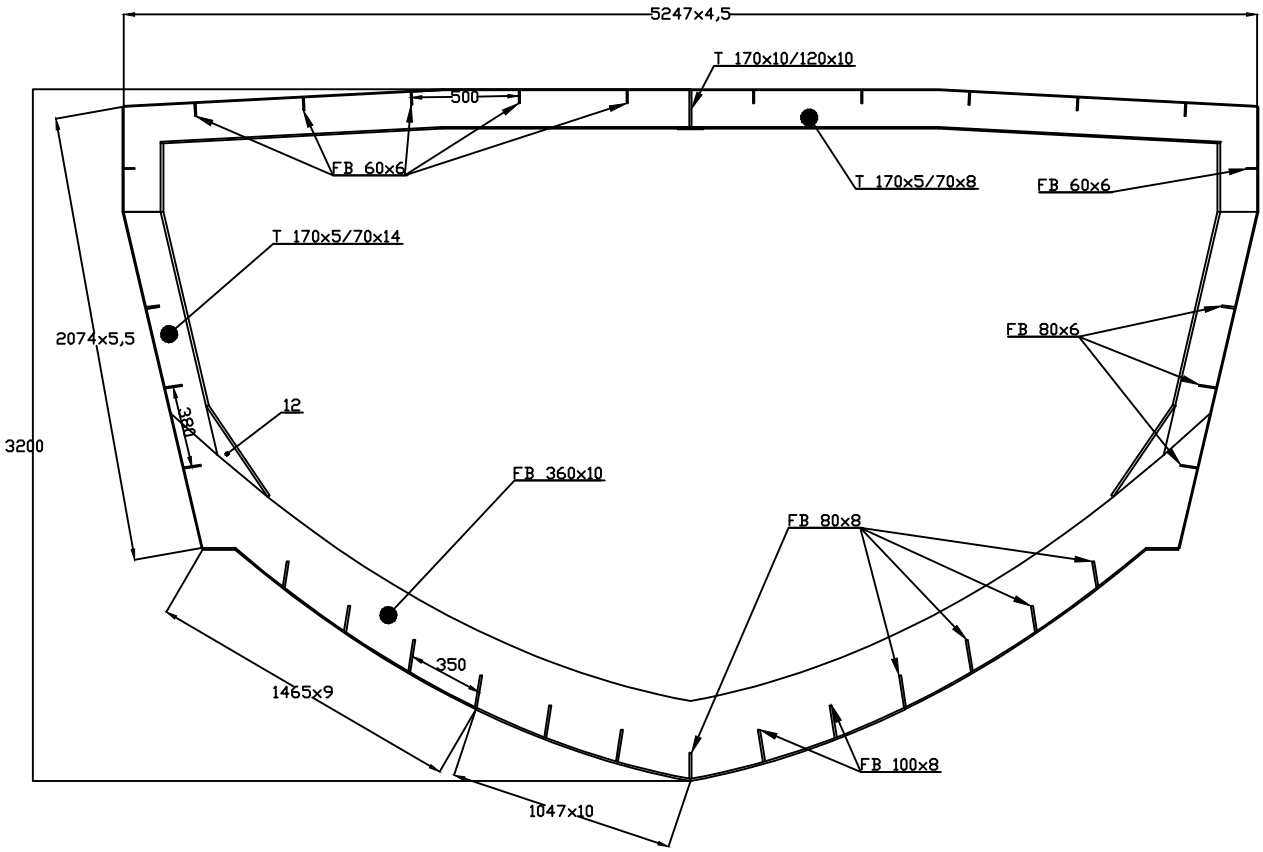
[10] *Microsoft Excel 2016,* USA: Microsoft office 365, 2016.

[11] »Capral Catalog,« 2013. [Mrežno]. Available: http://www.capral.com.au/industrialsolutions. [Pokušaj pristupa 24 6 2021].

PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tehnička dokumentacija



	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao		Marko Buconić	
Razradio			
Crtao			
Pregledao			

FSB Zagreb

Objekt:

Objekt broj:

R. N. broj:

Napomena:

Kopija

Materijal:

Masa:

Naziv: Glavno rebro

Pozicija:

Format:

Mjerilo originala 1:35

Listova:

Crtež broj: 1

List:

Design by CADLab