

Strukturalna analiza riječnog plovnog pristana

Baće, Vito

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:179490>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vito Baće

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Dr. sc. Antonio Mikulić, mag.ing.

Student:

Vito Baće

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se mentorima na korisnim savjetima i prenesenom znanju, te obitelji i prijateljima na bezvjetnoj podršci.

Vito Baće



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vito Baće**

JMBAG: 0035224656.

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Strukturna analiza riječnog plovnog pristana**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural analysis of a river floating dock**

Opis zadatka:

Plovna pristaništa koriste se na rijekama kao veza između broda i obale. Naime, zbog velikih oscilacija visine vodostaja na rijekama iskrcaj putnika iz riječnih brodova obavlja se preko plovnih pristana koji su zatim pristupnim rampama povezani s obalom. U zadatku je potrebno provesti strukturnu analizu plovnog pristana slijedećih izmjera: $L=100$ m; $B=12$ m; $T=2$ m prema Pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB) za unutarnju plovidbu te priloženom predlošku generalnog plana plovnog pristana.

Zadatak obuhvaća:

- 1) Analizu dostupne literature i upoznavanje s relevantnim Pravilima HRB-a *Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels Part 2 – HULL AND HULL EQUIPMENT, July 2024* za dimenzioniranje elemenata brodske trupa. Prilikom proračuna dinamičkih komponenti opterećenje uzeti područje plovidbe $IWW=0.6$.
- 2) Na temelju dostupnih preliminarnih dimenzija glavnog rebra i postojećeg CAD modela pristana potrebno je izraditi model cijelog pristana metodom konačnih elemenata (MKE).
- 3) MKE model opteretiti globalnim opterećenjem prema pravilima HRB za dva slučaja opterećenja (maks. pregib i progib), te provesti statičku linearnu MKE analizu.
- 4) Detaljno analizirati distribuciju primarnih naprezanja po visini broda, te ocijeniti podobnosti početnog prijedloga rješenja konstrukcije na razini dopuštenih naprezanja i kriterija izvijanja. U slučaju nezadovoljenja strukturnih kriterija provesti redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata i dati prijedlog podobnog rješenja.

Za izradu modela i provođenjem direktnog proračuna metodom konačnih elemenata koristiti neki od računalnih sustava dostupnih na FSB-u (FEMAP, MAESTRO, itd.).

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

Zadatak zadan:

19. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Dr.sc. Antonio Mikulić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
1.1. Uvod.....	1
1.2. Generalni opis pristrana i preliminarne dimenzije.....	1
1.3. Interakcija trup nadgrađe	5
2. IZRADA STRUKTURNOG MODELA PRISTANA	8
2.1. Opis izrade modela	8
2.2. Najčešće greške pri modeliranju.....	12
2.3. Opis mreže i korištenih tipova konačnih elemenata	13
2.4. Proračun korozijskih dodataka.....	15
3. PROJEKTNA OPTEREĆENJA I RUBNI UVJETI.....	16
3.1. Globalna opterećenja	16
3.2. Lokalna opterećenja po palubama	16
3.3. Implementacija opterećenja na MKE model.....	18
3.4. Rubni uvjeti.....	22
4. STRUKTURNA ANALIZA PRISTANA	23
4.1. Analiza pomaka	23
4.2. Analiza naprezanja.....	25
4.3. Analiza podobnosti	31
4.4. Redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata i ostala podobna rješenja.....	36
5. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA	42

POPIS SLIKA

Slika 1.	CAD model riječnog plovnog pristana u programu Rhino	2
Slika 2.	Drugi pogled CAD modela riječnog plovnog pristana u programu Rhino	2
Slika 3.	Dimenzije poprečnog presjeka pristana	3
Slika 4.	Dimenzije uzdužnih konstrukcijskih elemenata	4
Slika 5.	Dimenzija poprečnih konstrukcijskih elemenata	5
Slika 6.	Raspodjela naprezanja broskog trupa kao idealizirane grede	6
Slika 7.	Unesena Rhino geometrija sa sakrivenom glavnom palubom.	9
Slika 8.	Detalj završetka pločastog elementa	10
Slika 9.	Detalj završetka oplate pramca.....	10
Slika 10.	Prikaz krova nadgrađa	11
Slika 11.	Završni izgled modela	11
Slika 12.	Greške projiciranih elemenata	12
Slika 13.	Greška diskontinuiteta konstrukcije	12
Slika 14.	Greška distorziranog elementa	13
Slika 15.	Greška elementa premalih dimenzija	13
Slika 16.	Prikaz debljina opločenja	14
Slika 17.	Korozijski dodaci prema pravilima HRB-a [1]	15
Slika 18.	Opterećenje na izloženim palubama prema HRB-u [1]	17
Slika 19.	Prikaz projektnih tlakova po palubama	18
Slika 20.	Raspored projektnih tlakova (tona/mm ²) za LC1	19
Slika 21.	Ukupni vertikalni progibni moment savijanja (statički + valni) u Nmm za LC1..	20
Slika 22.	Raspored projektnih tlakova (tona/mm ²) za LC2	20
Slika 23.	Ukupni vertikalni progibni moment savijanja (statički + valni) u Nmm za LC2..	21
Slika 24.	Raspored projektnih tlakova (tona/mm ²) za LC3	21
Slika 25.	Ukupni vertikalni pregibni moment savijanja (statički + valni) u Nmm za LC3..	22
Slika 26.	Rubni uvjeti	22
Slika 27.	Vertikalni pomaci za LC1	24
Slika 28.	Vertikalni pomaci za LC2	24
Slika 29.	Vertikalni pomaci za LC3	25
Slika 30.	Formule dozvoljenih naprezanja i definirani faktori sigurnosti [1]	26
Slika 31.	Uzdužna naprezanja poprečnog presjeka na sredini broda za LC1	27
Slika 32.	Raspodjela uzdužnih naprezanja po visini za LC1	27
Slika 33.	Uzdužna naprezanja poprečnog presjeka na sredini broda za LC3.....	28
Slika 34.	Raspodjela uzdužnih naprezanja po visini za LC3	28
Slika 35.	Uzdužna naprezanja modela za LC1	29
Slika 36.	Smična naprezanja modela za LC1	29
Slika 37.	Naprezanja (aksijalna+savojna) u jakim nosačima za LC1.....	30
Slika 38.	Naprezanja (aksijalna+savojna) u jakim nosačima za LC2.....	30
Slika 39.	Naprezanja (aksijalna+savojna) u jakim nosačima za LC3	31
Slika 40.	Vrijednosti faktora podobnosti PCMY za LC1	33
Slika 41.	Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC1	33
Slika 42.	Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC3	34
Slika 43.	Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC1	35
Slika 44.	Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC2	35
Slika 45.	Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC3	36
Slika 46.	Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC1 za redimenzionirani model	37

Slika 47.	Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC3 za redimenzionirani model	38
Slika 48.	Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC3 za redimenzionirani model.....	38
Slika 49.	Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC1 za redimenzionirani model.....	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne značajke	2
Tablica 2. Vertikalni momenti savijanja	16
Tablica 3. Vrijednosti tlakova na izloženim palubama	17
Tablica 4. Maksimalni vertikalni pomaci	23
Tablica 5. Maksimalna dozvoljena naprezanja	26
Tablica 6. Kriteriji podobnosti s odabranim faktorima sigurnosti	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	Duljina pristana
B	m	Širina pristana
T	m	Gaz pristana
D	m	Visina pristana
C_B		Blok koeficijent
$M_{s,S}$	Nmm	Vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi u progibu
$M_{s,H}$	Nmm	Vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi u pregibu
$M_{w,S}$	Nmm	Vertikalni valni moment savijanja u progibu
$M_{w,H}$	Nmm	Vertikalni valni moment savijanja u pregibu
M_{ukupni}	Nmm	Ukupni vertikalni moment savijanja
H	m	Značajna valna visina
p_E	N/mm^2	Tlak izloženih paluba
t_C	mm	Ukupni korozijski dodatak
t_{C1}	mm	Korozijski dodatak za jednu stranu lima
t_{C2}	mm	Korozijski dodatak za drugu stranu lima
σ_x	N/mm^2	Maksimalno dopušteno aksijalno naprezanje
σ_e	N/mm^2	Maksimalno dopušteno ekvivalentno naprezanje
R_{eH}	N/mm^2	Granica razvlačenja za obični brodograđevni čelik
τ	N/mm^2	Maksimalno dopušteno smično naprezanje
f_s		Faktor sigurnosti

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je strukturna analiza plovnog pristana za unutarnje vode.

Prva faza se sastoji od upoznavanja s relevantnim pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB) za dimenzioniranje elemenata broskog trupa i za proračun dinamičkih komponenti opterećenja za područje plovidbe $IWW = 0.6$.

Druga faza projektiranja se sastoji od izrade cijelog modela pristana metodom konačnih elemenata (MKE) na temelju postojećeg CAD modela pristana i preliminarnih dimenzija konstrukcijskih elemenata glavnog rebra.

U trećoj fazi MKE model je opterećen globalnim opterećenjem prema pravilima HRB, u slučaju maksimalnog pregiba i maksimalnog progiba, te se provela statička linearna analiza strukturnog odziva korištenjem metode konačnih elemenata.

Posljednja faza sastoji se od analize distribucije primarnih naprezanja po visini broda i ocjene podobnosti originalnog prijedloga rješenja konstrukcije na razini dopuštenih naprezanja i kriterija izvijanja. U slučaju nezadovoljenja kriterija čvrstoće provedeno je redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata te je dan prijedlog zadovoljavajućeg rješenja.

Ključne riječi: MKE, riječni plovni pristan, HRB pravila, kriterij dozvoljenih naprezanja, popuštanje, izvijanje, redimenzioniranje

SUMMARY

The subject of this project is conducting a structural analysis of a river floating dock.

The first phase involves familiarizing themselves with the relevant rules of the Croatian Register of Ships (CRS) for dimensioning the elements of the ship's hull and calculating the dynamic components of the load for the navigation area $IWW = 0.6$.

The second phase of the design consists of creating the entire dock model using the finite element method based on the existing CAD model of the dock and the preliminary structural dimensions of the midship section.

In the third phase, it is necessary to load the model with global loads according to the CRS rules, considering the case of maximum bending and maximum deflection, and to perform a static linear analysis using the finite element method.

The final phase involves analysing the distribution of primary stresses along the height of the ship and evaluating the suitability of the original proposed structural solution in terms of allowable stresses and buckling criteria. If the yield or buckling criteria are not met, the structural elements must be redesigned, and a satisfactory solution has been proposed.

Key words: FEM, river floating dock, CRS rules, criteria of permissible stresses, yield stress, buckling, redefining

1. UVOD

1.1 Uvod

U posljednjih nekoliko godina međunarodna riječna krstarenja bilježe rastući trend, kako u Europi, tako i u Hrvatskoj. Rijeka Dunav, koja protječe kroz deset europskih zemalja, ima ključnu ulogu u ovom obliku nautičkog turizma. Dunav je danas najpoznatija rijeka za tzv. riječni *kruzing*, koji je na njoj najrazvijeniji. U Hrvatskoj je razvoj riječnih krstarenja započeo 2002. godine izgradnjom prvih putničkih pristaništa, odnosno javnih luka za putnički promet, u Vukovaru i Iloku. Riječni kruzeri predstavljaju jednu od ključnih vrsta brodova koje zahtijevaju postojanje plovnih pristana, što zauzvrat potiče razvoj turizma u regiji.

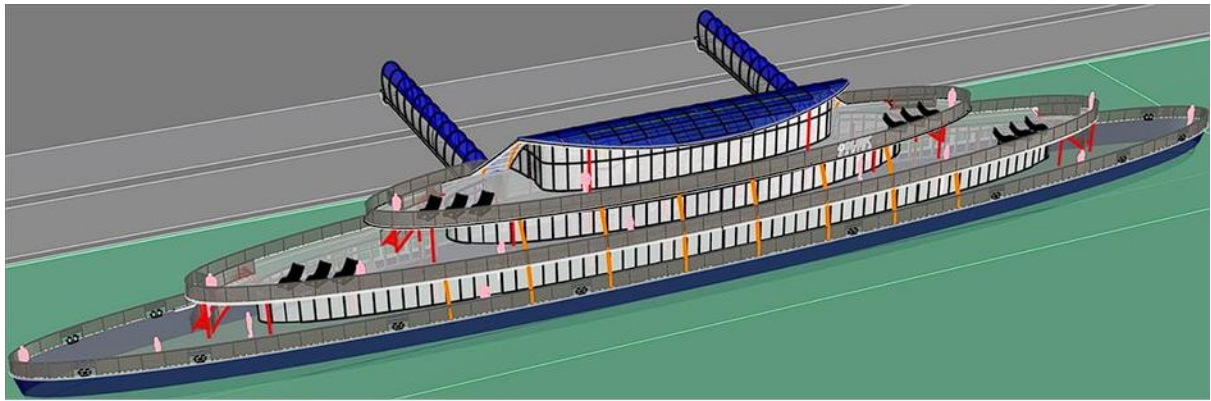
Plovni pristan je plutajući objekt namijenjen olakšavanju iskrcanja putnika s riječnih brodova, što je često otežano zbog promjena vodostaja rijeka tijekom godišnjih doba. Povezanost pristana s kopnom ostvaruje se putem pristupnih rampi. Za razliku od morskih krstarenja, riječni brodovi imaju znatno manje dimenzije. Prosječni riječni kruzer obično je dug oko 130 metara, širok 11 metara i može primiti do 200 putnika. Zbog specifičnosti riječnih plovnih puteva, koji ovise o visini vodostaja, ovi brodovi imaju plitak gaz i nisko nadgrađe.

Prema Uredbi o pristaništima unutarnjih voda [6] putničko pristanište je javno pristanište i mora imati:

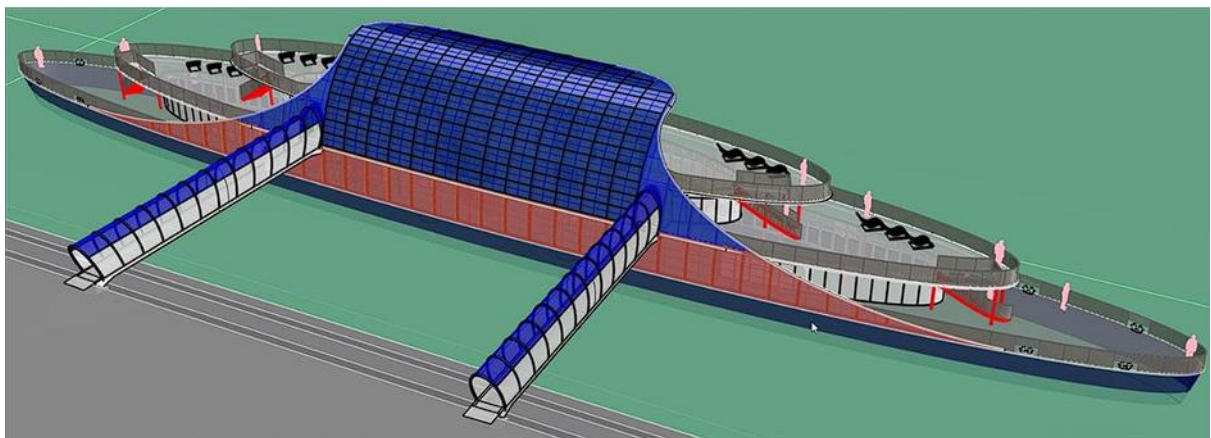
- pristane čija veličina odgovara vrsti plovila, uređaje i opremu za siguran privez plovila,
- pristupni most ili pokretni sifon za transfer putnika, konstruiran i opremljen na način koji jamči sigurno kretanje putnika,
- privez i odvez plovila,
- prihvat i otpremu putnika,
- pristane čija veličina odgovara vrsti plovila, uređaje i opremu za siguran privez plovila,

1.2 Generalni opis pristana i preliminarne dimenzije

Idejni projekt riječnog plovnog pristana izradila je tvrtka iCAT d.o.o [7]. Pristan se sastoji od glavne palube, gornje palube i palube nadgrađa koje su s obalne strane povezane s oplatom boka, na koju se s lijeve strane nadovezuje oplata krova nadgrađa na kojoj su također ugrađeni solarni paneli. S desne strane pristana, palube su povezane samo s nekoliko okvirnih rebara i sustavom upora. Pristan je s obalom povezan s dvije pristupne rampe, te je također simetričan po Z-Y ravnini.



Slika 1. CAD model riječnog plovnog pristana u programu Rhino



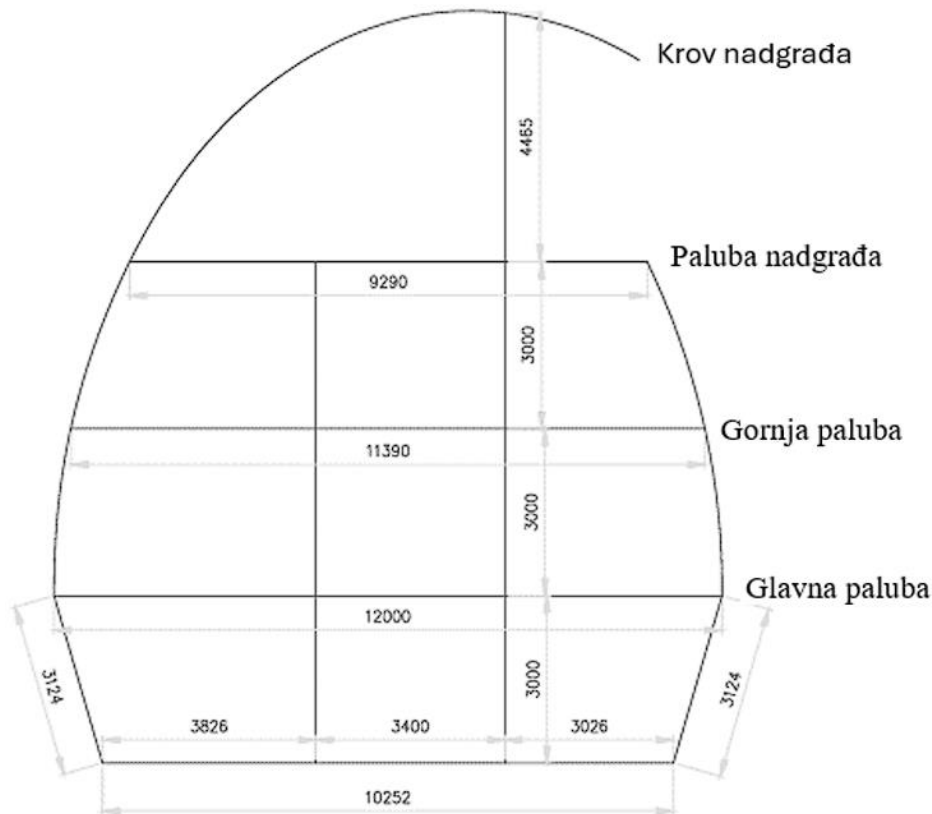
Slika 2. Drugi pogled CAD modela riječnog plovnog pristana u programu Rhino

Početni crteži i modeli pontona, koji su modelirani u softveru Rhino, dostavljeni su od strane iCat-a [7]. Donesena je početna odluka o razmaku okvirnih nosača (2 m) i razmaku uzdužnjaka (500 mm). Također je uzet u obzir broj vodonepropusnih pregrada, uključujući 2 uzdužne i 4 poprečne pregrade. Određene su i početne dimenzije pontona, kao što je prikazano.

Tablica 1. Osnovne značajke

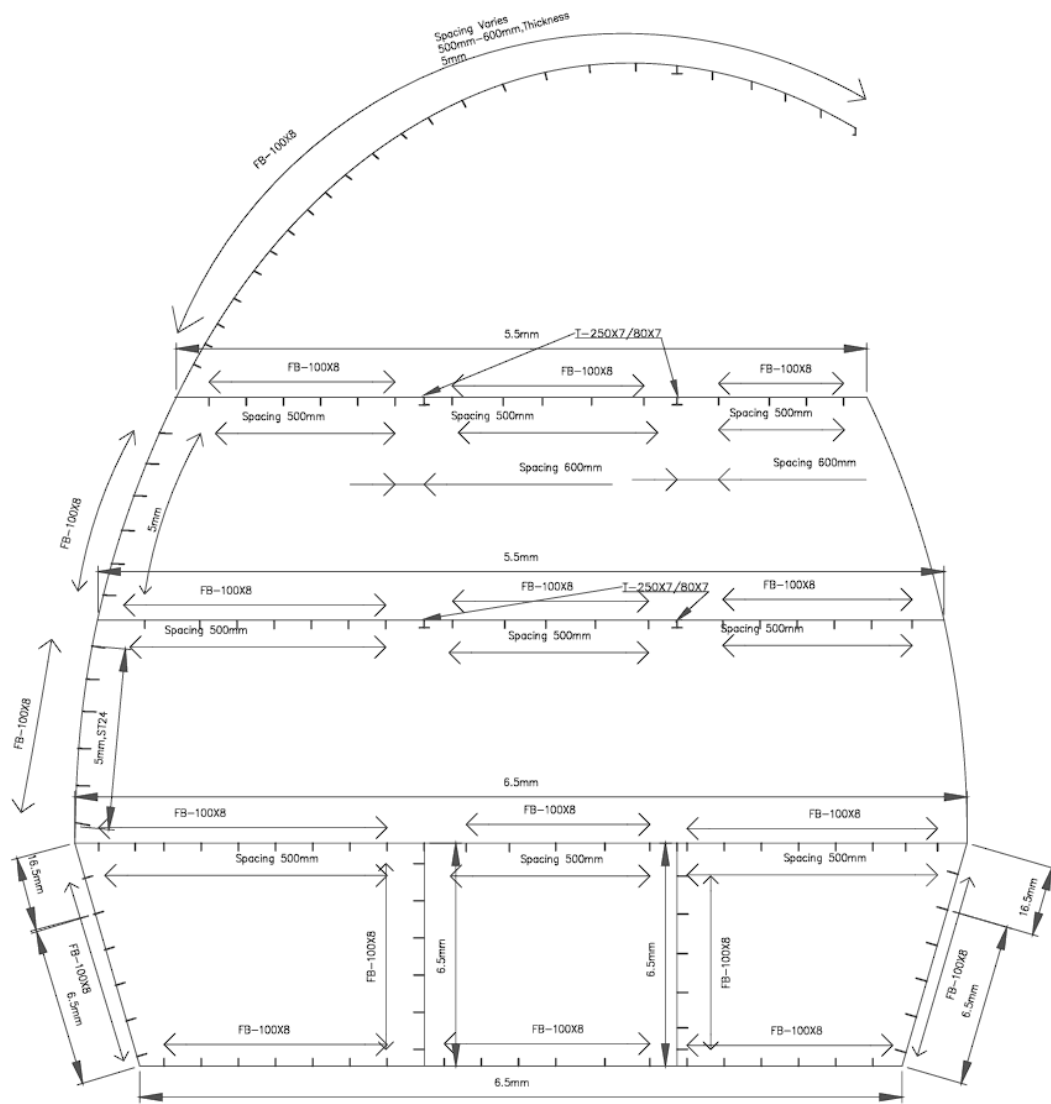
Duljina	L	100 m
Širina	B	12 m
Gaz	T	2 m
Visina	D	3 m
Blok Koeficijent	C_B	0.8

Ponton je projektiran u uzdužnom sustavu gradnje. Razmak okvirnih rebara je 2000 mm. To je uzdužno orebrenje izvedeno korištenjem plosnih profila. Osim toga, svakih 6 metara postavljene su upore koji podupiru gornje palube, uz uzdužnu pregradu koja pruža dodatnu potporu odozdo. Dimenzije dobivene ovim proračunom predstavljaju minimalne zahtjeve prema pravilima HRB-a [1] i služe kao ulazni podaci za strukturnu analizu konstrukcije metodom konačnih elemenata (MKE).

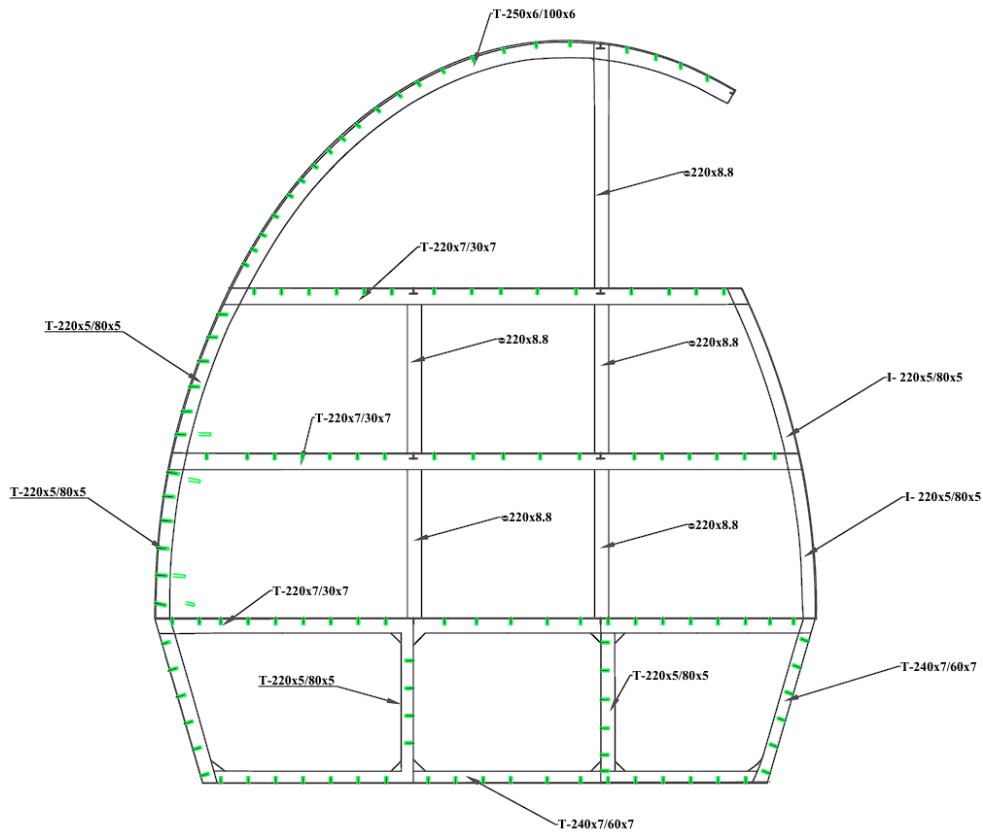


Slika 3. Nacrt dimenzija poprečnog presjeka pristana

Preliminarne dimenzije glavnog rebra su prikazane u slikama 4. i 5.



Slika 4. Dimenzije uzdužnih konstrukcijskih elemenata



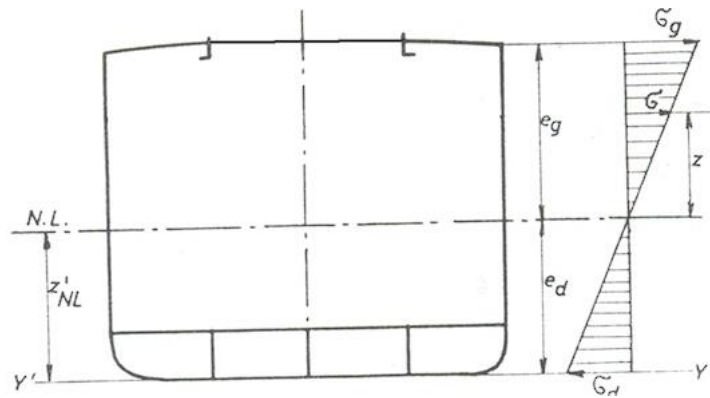
Slika 5. Dimenzija poprečnih konstrukcijskih elemenata

1.3 Interakcija trup-nadgrađe

Pod pojmom strukturnih interakcija trup-nadgrađe obično se misli na odziv trupa i nadgrađa na vertikalni moment savijanja. Glavni problem je usmjeren na određivanje raspodjele primarnih naprezanja u trupu i nadgrađu, s obzirom na uzdužnu čvrstoću broda. Ova analiza ključna je za razumijevanje kako se opterećenja raspodjeljuju između trupa i nadgrađa.

U klasičnoj Bernoullijevoj teoriji grede brodski se trup idealizira gredom složenog presjeka, a ona vrijedi za jednopalubne brodove (tankeri, brodovi za rasuti teret,..) s jasno definiranom najgornjom neprekinutom palubom. Klasična teorija grede pretpostavlja:

- Poprečni presjeci koji su normalni na neutralnu liniju grede prije savijanja ne deformiraju se nego samo zakreću te ostaju normalni na neutralnu liniju i nakon savijanja, što implicira linearnu raspodjelu deformacija po visini poprečnog presjeka.
- U elastičnom području deformacije su linearno proporcionalne naprezanjima, vrijedi linearna raspodjela naprezanja.



Slika 6. Raspodjela naprezanja broskog trupa kao idealizirane grede

Kod projektiranja brodova dugih nadgrađa, mehanizam prijenosa globalnih sila iz trupa u nadgrađe izrazito je složen. Klasična teorija grede, koja broski trup idealizira kao gredu složenog presjeka, nije primjenjiva. Utjecajni faktori u interakciji trup-nadgrađe su:

- Krutosti palube nadgrađa na kojoj leži nadgrađe i broj poprečnih pregrada
- Geometrija nadgrađa (duljina, širina, visina, pozicija...)
- Veličina bočnih otvora i postojanje uzdužnih pregrada
- Utjecaj krajeva nadgrađa

Osnovna postavka je sljedeća: što je nadgrađe ili palubna kućica duža, to ona u većoj mjeri preuzima naprezanja vezana uz uzdužnu čvrstoću broskog trupa. Drugim riječima, dužina nadgrađa povećava njegovu efikasnost u prijenosu globalnih opterećenja u konstrukciju nadgrađa, jer duža nadgrađa bolje sudjeluju u raspodjeli uzdužnih naprezanja.

Za male vrijednosti krutosti palube trupa, nadgrađe ima tendenciju savijanja u suprotnom smjeru od savijanja trupa. Ovo obrnuto savijanje dovodi do smanjenja uzdužnih naprezanja u palubi nadgrađa. Međutim, kako se krutost palube trupa povećava, krivulja zakrivljenosti nadgrađa počinje se približavati obliku zakrivljenosti trupa. Ovo približavanje rezultira povećanjem uzdužnih naprezanja u palubi nadgrađa.

Poprečne pregrade također povećavaju krutost palube trupa i prisiljavaju nadgrađe da prati zakrivljenost trupa. Što je veći broj poprečnih pregrada, to je veći stupanj sudjelovanja nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda. Veliki bočni otvori predstavljaju niz problema i izazova za projektanta konstrukcije. Ti otvori smanjuju efektivnost gornjih paluba i nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda. Osim toga, otvori u bočnoj stijenci, ovisno o njihovom rasporedu, veličini i obliku mogu dovesti do koncentracije naprezanja.

U slučaju plovnog pristana s asimetričnim poprečnim presjekom, gdje su s jedne strane gornja paluba i paluba nadgrađa povezane s oplatom boka (koja se nadovezuje na krov nadgrađa), dok su s druge strane palube povezane samo s nekoliko okvirnih rebara, javlja se složen problem. Na toj strani postoji veliki broj bočnih otvora, a iznad glavne palube nema ni uzdužnih ni poprečnih pregrada. Ova konfiguracija onemogućuje idealizaciju broskog trupa kao grede složenog presjeka, a analitičke metode ne mogu u potpunosti obuhvatiti sve utjecajne čimbenike. Zbog toga je za evaluaciju strukturne podobnosti neophodna primjena direktnog proračuna korištenjem metode konačnih elemenata na razini cjelokupnog modela plovnog pristana. Ova metoda omogućuje detaljnu analizu raspodjele naprezanja i deformacija, uzimajući u obzir sve specifičnosti konstrukcije, uključujući asimetriju i otvore. Samo na taj način moguće je osigurati pouzdanu procjenu uzdužne čvrstoće i krutosti konstrukcije.

2. IZRADA STRUKTURNOG MODELA PRISTANA

2.1 Opis izrade modela

Kroz ovo poglavlje prikazan je postupak izrade strukturnog modela korištenjem metode konačnih elemenata (MKE).

Izrada modela se provela se korištenjem računalnog programa Simcenter Femap.

Model je bio izrađen prema modelu pristana napravljenog u programu Rhino[2] od strane tvrtke iCAT. Prvi korak u izradi modela sastoji se od unošenja Rhino modela u Simcenter Femap. Nije bilo potrebno unijeti cijeli model, samo glavne dijelove koji su relevantni za izradu modela. Ti glavni elementi su površine za izradu svih oplata, okvirna rebra trupa i nadgrađa, pozicije svih upora, te eventualno neka pomoćna geometrija.

Kao što je već navedeno, proces modeliranja je započet od postojećeg CAD modela glavnog rebra s preliminarnim dimenzijama. Zbog simetričnosti modela s obzirom na Y-Z ravninu (osim 2 otvora na palubi nadgrađa i gornjoj palubi), bilo je dovoljno napraviti jednu stranu modela te se druga strana modela preslika.

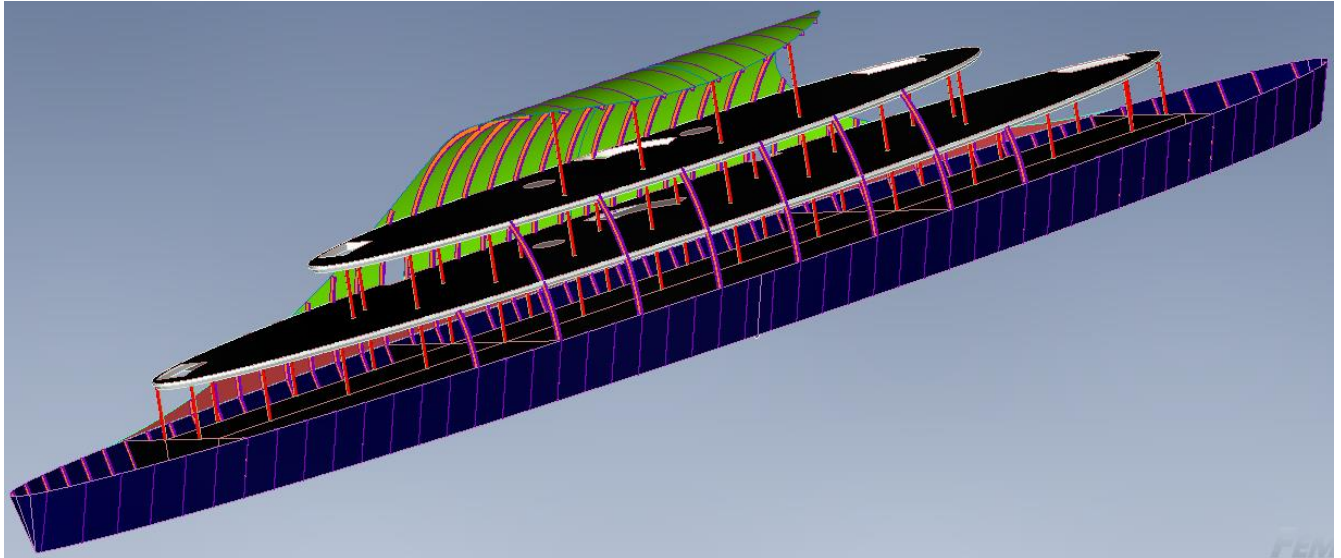
Koordinatni osi su definirane na sljedeći način:

- Globalna os X definirana je u smjeru duljine 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.

Model se može podijeliti na cjeline:

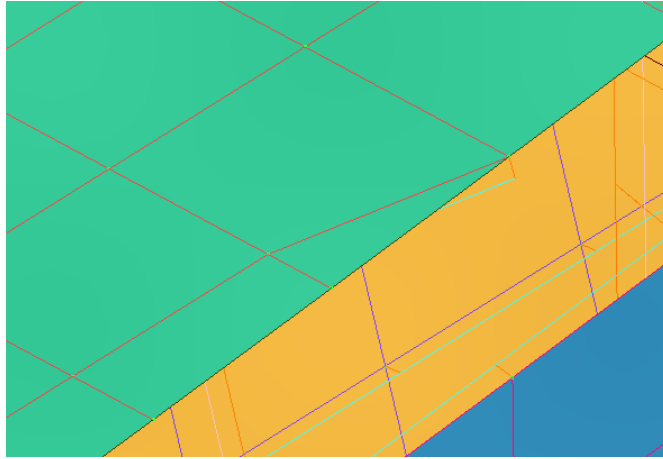
- Oplata dna
- Oplata trupa
- Oplata glavne palube
- Oplata gornje palube
- Oplata palube nadgrađa
- Oplata boka
- Oplata krova nadgrađa
- Oplata uzdužnih pregrada

- Oplata poprečnih pregrada



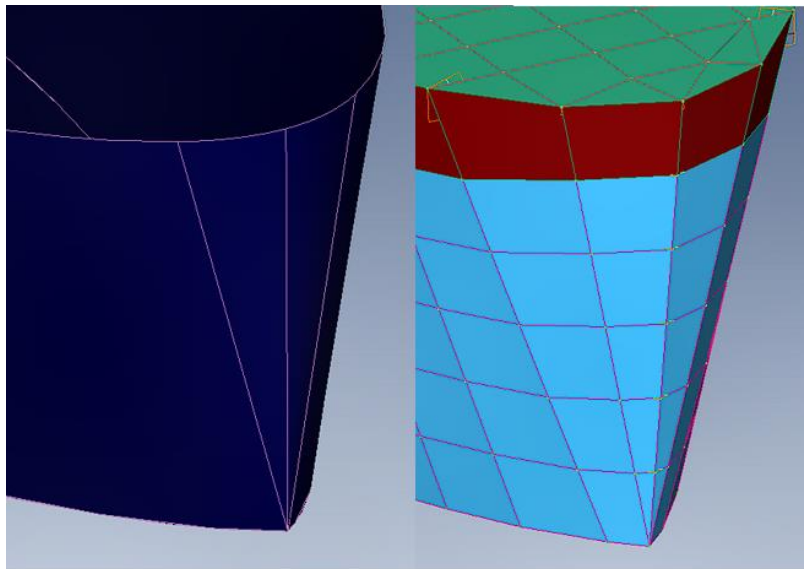
Slika 7. Unesena Rhino geometrija sa sakrivenom glavnom palubom.

Naravno, svaki dio oplata sadrži sa sobom pripadne uzdužne i poprečne nosače. Svi nosači, uključujući i okvirna rebra, modelirani su kao grede, dok su oplata su modelirane kao pločasti konačni elementi. Izradi modela se pristupilo na način da su ove cjeline modelirane jedna po jedna po vertikalnom redoslijedu, počevši od oplata dna pa redom sve do oplata krova nadgrađa. Pritom je bilo potrebno posebno paziti da su cjeline međusobno povezane u čvorovima. Zbog već postojećeg modela glavnog rebra, najjednostavniji pristup je bio kopiranje elemenata oplata i njihovih pripadnih nosača duž duljine broda. Zbog sužavanja širine broda po pomaku prema krmi/pramcu, bilo je potrebno brisati elemente koji su stršili izvan granica Rhino površina. Zatim su se čvorovi postojećih elemenata projicirali na površine ili rubne krivulje površina kako bi elementi bili u ravnini s tim površinama. Isto, zbog razloga sužavanja, moralo se raditi dio po dio pojedine cjeline, tj.: kopirati, zatim brisati elemente i na kraju projicirati čvorove. Zbog činjenice da elementi oplata ne mogu biti jako malih dimenzija, završetak jednog "reda elemenata uzdužnih oplata" izvodi se kao trokutni element koji završava na rubu površine zajedno s grednim elementom (uzdužnjakom) koji mu pripada.



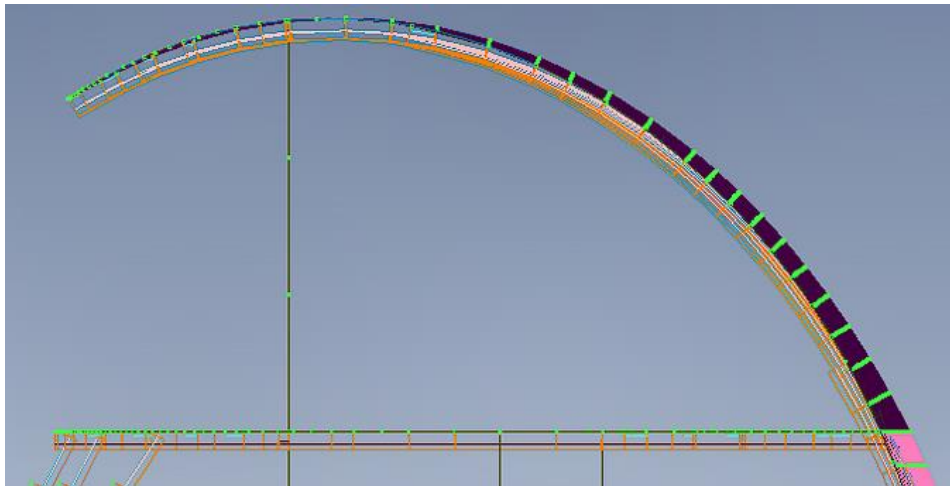
Slika 8. Detalj završetka pločastog elementa

Za neku kompliciraniju geometriju, kao što su pramčani pik i okvirna rebra, bilo je potrebno generirati čvorove duž krivulje. Zatim je te čvorove bilo potrebno spojiti s ostalim projiciranim čvorovima i kreirati nove elemente.



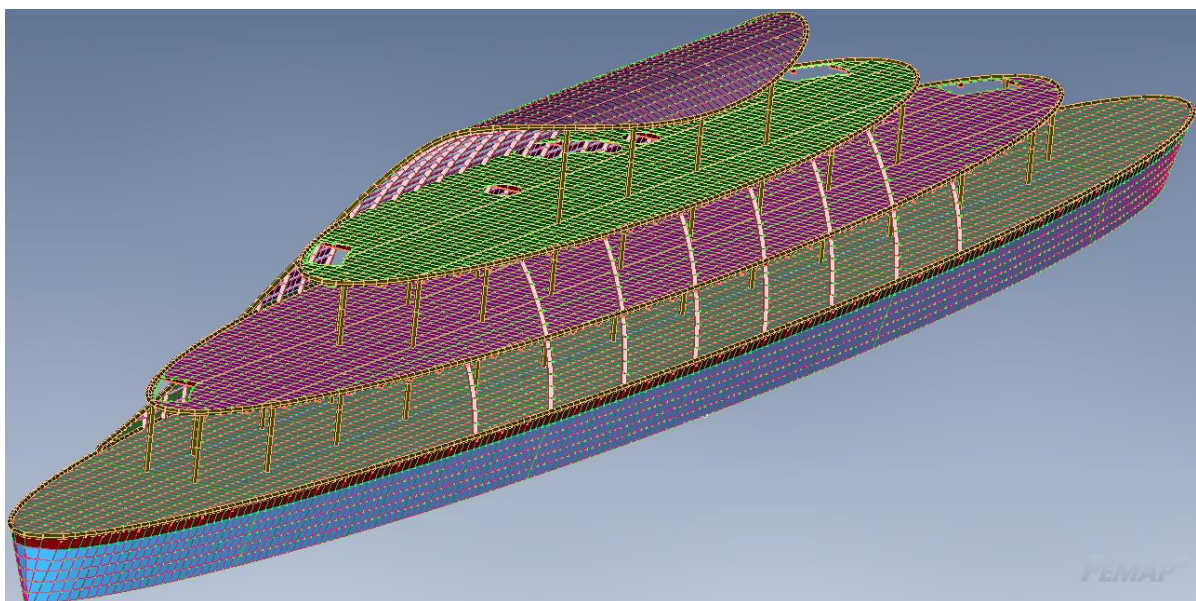
Slika 9. Detalj završetka oplata pramca

Najkompliciraniji dio je bio izrada krova nadgrađa jer je površina krova jako zakrivljena oko više koordinatnih osi. Za razliku od ostalih oplata, na kojima su se čvorovi mogli projicirati u smjeru globalne osi Y, za izradu oplata krova čvorovi su se morali lokalno, mali dio po dio, projicirati po normalama na površinu.



Slika 10. Prikaz krova nadgrađa

Nakon završetka modeliranja svih oplata i njihovih pripadnih nosača, dodane su upore koje su modelirane kao grede cilindričnog presjeka. Kao što se vidi na Slici 7, upore glavne palube naslanjaju se na uzdužne i poprečne pregrade, a zatim se upore gornje palube i palube nadgrađa oslanjaju na upore palube ispod njih. Također je bilo potrebno dodati rubni nosač paluba i rubni nosač na kraju oplata boka i krova nadgrađa. Ti nosači su modelirani kao grede cilindričnog presjeka. Naposljetku je trebalo napraviti otvore u gornjoj palubi i palubi nadgrađa. Ti otvori su otvori za lift, otvori za rampe i otvori za stepenice. Osim otvora za rampe, bilo je potrebno dodatno ojačati te otvore nosačima duž rubova otvora. S time je polovica modela gotova, a model se zatim preslikao preko Y-Z ravnine. Jedino su se dva otvora za stepenice na sredini broda morali napraviti nakon preslikavanja jer nisu simetrični s obzirom na Y-Z ravninu.

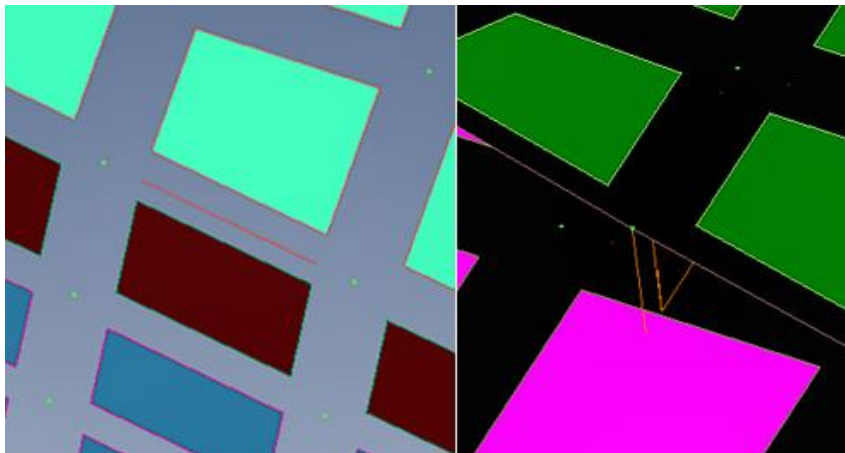


Slika 11. Završni izgled modela

2.2 Najčešće greške pri modeliranju

U nastavku se mogu vidjeti neke od najčešćih grešaka koje su bile urađene, te koje su se događale prilikom izrade modela. Učenjem na ovim greškama, moglo bi se uštedjeti puno vremena u sljedećim projektima.

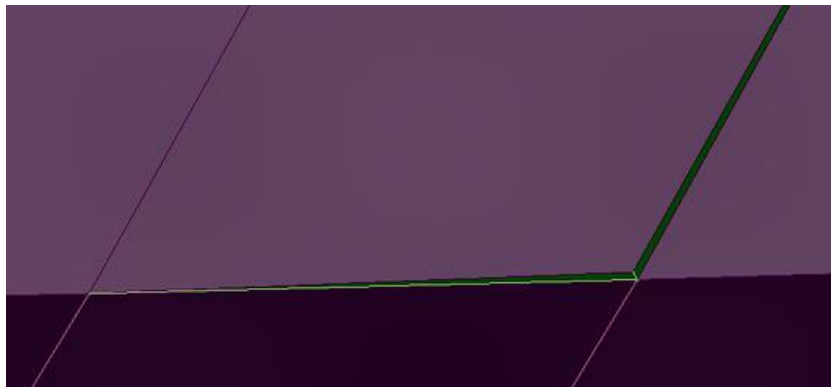
1. Projiciranje pločastih elemenata u krivulje i projiciranje grednih elemenata u točke. Ukoliko se prekomjerni elementi ne pobrišu te se projiciraju na određenu krivulju, ti elementi će biti višak koji se jako teško uoči. Potrebno je sa *shrink* funkcijom smanjiti sve elemente kako bi se greška uočila.



Slika 12. Greške projiciranih elemenata

2. Diskontinuitet konstrukcije.

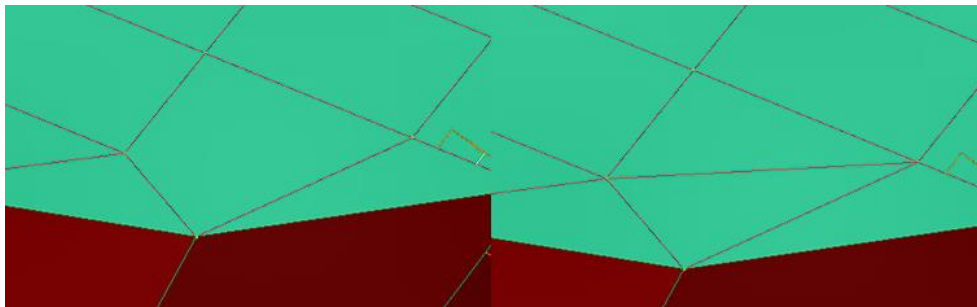
Prilikom kopiranja elemenata ili projiciranja čvorova može se dogoditi diskontinuitet u konstrukciji. Ovo je najlakše spriječiti tako da se u konstrukciji često provjeravaju slobodni krajevi.



Slika 13. Greška diskontinuiteta konstrukcije

3. Distorzirani elementi.

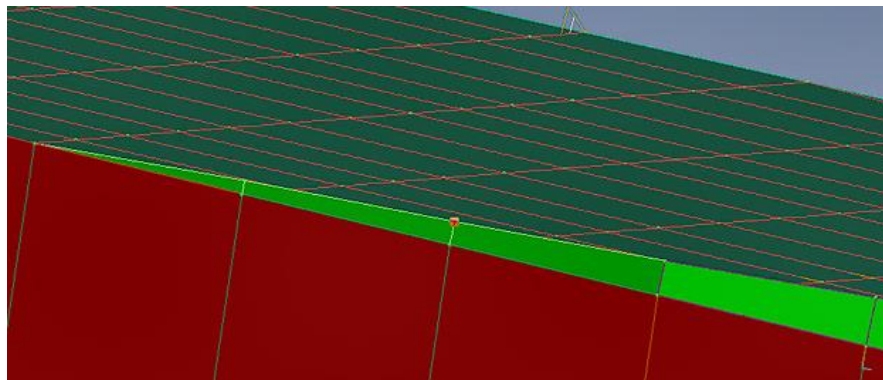
Neki kvadratni pločasti elementi (Q4 elementi) imaju previše distorzirane dimenzije, te ih je potrebno izbjeći ili korištenjem trokuta ili promjenom lokacije čvorova.



Slika 14. Greška distorziranog elementa.

4. Elementi premalih dimenzija.

Prilikom izrade se dogodi da su neki elementi premalih dimenzija, te se mora struktura čvorova promijeniti ili se sami elementi moraju pobrisati. Na slici su se zadnja 3 elementa oplata boka morala pobrisati.



Slika 15. Greška elementa premalih dimenzija

2.3 Opis mreže i korištenih tipova konačnih elemenata

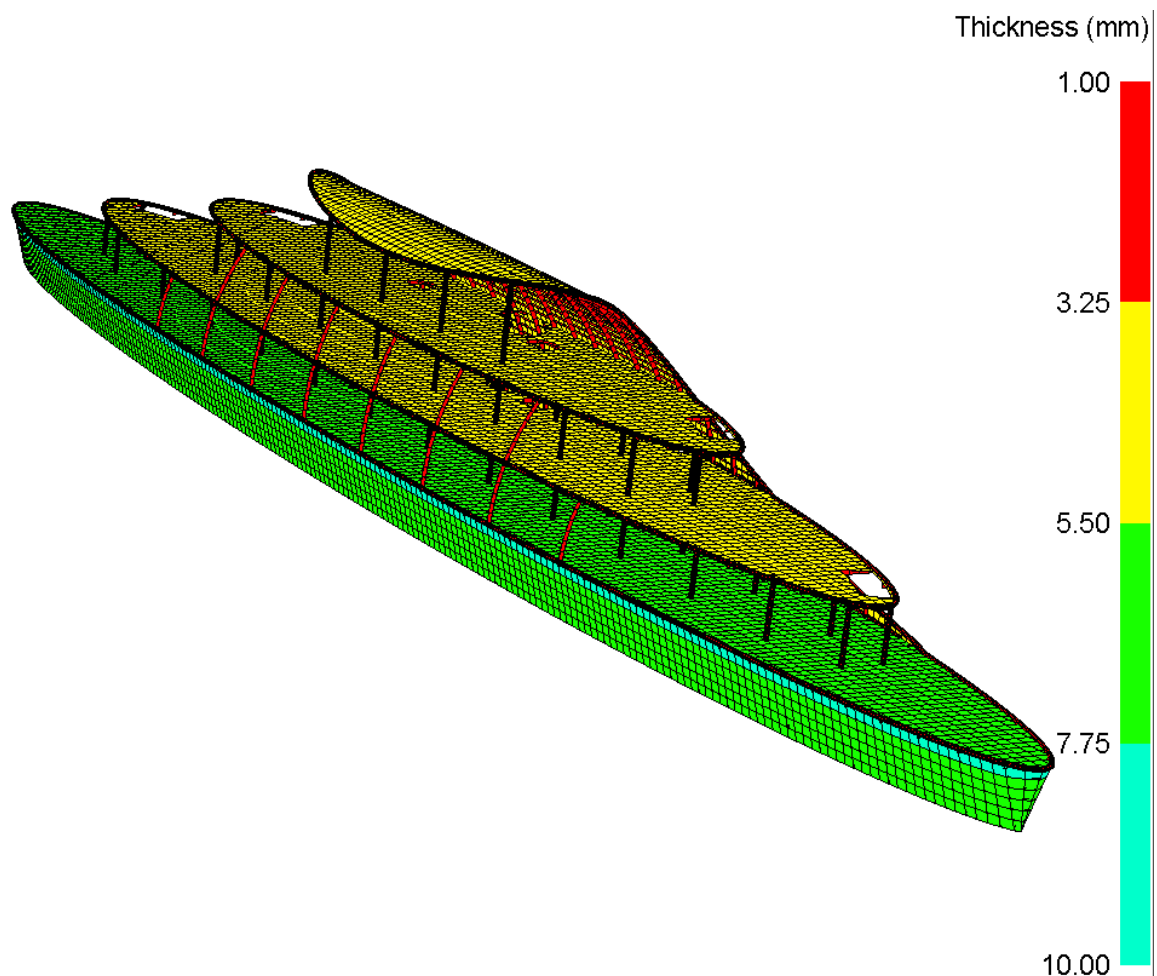
Veličina MKE mreža je provedena prema uobičajenim postavkama za globalni model:

- Uzdužno: razmak običnih rebara, 500 mm
- Poprečno: razmak uzdužnjaka, oko 500-700 mm
- Vertikalno: razmak uzdužnjaka, oko 500-700 mm

Na pojedinim pozicijama implementirana je još finija mreža ovisno o geometriji modela. Opločenje: dominantno standardni Q4 pločasti elementi i trokutasti pločasti elementi (u manjoj mjeri zbog potreba mreže).

Okvirna rebra u trupu: gredni element ekscentrične grede sa aksijalnom i savojnom krutošću. Uzdužnjaci, ukrepe poprečne i uzdužne pregrade, ukrepe protiv izvijanja: gredni element ekscentrične grede sa aksijalnom i savojnom krutošću.

Prema Bureau Veritas [3] većina Q4 pločastih elemenata treba biti takva da omjer duljine duže stranice i duljine kraće stranice ne prelazi 2. Neki od njih mogu imati omjer koji ne prelazi 4. Njihovi kutovi trebaju biti veći od 60° i manji od 120° . Kutovi trokutastih elemenata trebaju biti veći od 30° i manji od 120° . Za cijeli model plovnog pristana korišten je obični konstrukcijski čelik (MS) kvalitete A s gornjom granicom tečenja $R_{eH} = 235 \text{ N/mm}^2$. Nakon provedenog modeliranja korištenjem programa FEMAP model je prebačen u računalni program MAESTRO pomoću kojeg je provedena strukturalna analiza. U nastavku kroz sliku 16. dani su prikazi debljina opločenja u modelu.



Slika 16. Prikaz debljina opločenja

2.4 Proračun korozivskih dodataka

Također se prema pravilima HRB-a [1] određuju korozivski dodatci. Izraz za ukupni korozivski dodatak: $t_c = t_{c1} + t_{c2}$ [mm]. Gdje se t_{c1} i t_{c2} određuju prema slici 17:

Table 9.2-1
Minimum values, in [mm], for corrosion addition for one side exposure (t_{c1} or t_{c2})

Compartment type		General ¹⁾
Ballast tank		1.00
Cargo and fuel oil tanks	Plating of horizontal surfaces	0.75
	Plating of non-horizontal surfaces	0.50
	Horizontal members in cargo oil and fuel oil tanks.	
Dry bulk cargo hold	General	1.00
	Inner bottom plating	1.75
	Side plating for single hull vessel	
	Inner side plating for double hull vessel	
	Transverse bulkhead plating	
Supporting members	0.50	
Hopper well of dredging vessels		2.50
Accommodation space		0.00
Compartments and areas other than those mentioned above		0.50
Notes:		
1) Corrosion additions are applicable to all members of the considered item.		

Slika 17. Korozivski dodaci prema pravilima HRB-a [1]

Korozivski odbitak uzet je u obzir prema Pravilima HRB-a [1] te je implementiran ukupni korozivski odbitak od 1 mm na sve elemente trupa (dno, vanjsku oplatu do glavne palube, glavnu palubu, uzdužne i poprečne pregrade u trupu). Na konstrukciju iznad glavne palube nije implementiran korozivski odbitak. Proračun strukturnog odziva (pomaci i naprezanja) proveden je za *čiste* („net“) dimenzije.

Korozivski dodatci su izračunati za opločenje i ukrepe trupa i to za sljedeće cjeline: glavna paluba, dno, bok, uzdužne i poprečne pregrade. I za njih vrijedi $t_{c1} = t_{c2} = 0,5$ mm, te je ukupni $t_c = 1$ mm. Proračunati iznos korozivskog dodatka dodan je u MKE model kao odbitak sukladno činjenici da je MKE model napravljen za ugradbene (*gross*) dimenzije a HRB [1] zahtijeva provođenje proračuna čvrstoće za „čiste“ (*net*) dimenzije.

3. PROJEKTNA OPTEREĆENJA I RUBNI UVJETI

Projektne opterećenja (globalna i lokalna) su izračunata prema pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB) [1] te su u sljedećem koraku implementirana na 3D MKE model cijelog broda.

3.1 Globalna opterećenja

Ukupni vertikalni moment savijanja sastoji se od momenta savijanja na mirnoj vodi i momenta savijanja na valovima. Momenti savijanja na mirnoj vodi rezultat su neravnomjerne raspodjele uzgona i opterećenja te se određuju integracijom sila duž duljine broda. Maksimalni momenti savijanja na mirnoj vodi za slučaj pregiba (HOGG) i progiba (SAGG) definirani su od strane tvrtke iCAT sukladno stanjima krcanja.

Za proračun dinamičkih komponenti opterećenja korištena je značajna visina valova od 0,6 m. Prema pravilima HRB-a [1], vertikalni valni moment određen je izrazom za plovidbeno područje IWW-0.6 prema HRB-u.

$$M_w = 0,045 \cdot L^2 \cdot B \cdot C_b \quad (1)$$

$$M_w = 4320 \text{ kNm}$$

Vertikalni momenti savijanja u slučaju progiba (sagging) i pregiba (hogging) iznose:

Tablica 2. Vertikalni momenti savijanja

PROGIB (Sagg):	[kNm]
$M_{s,S}$	-13000
$M_{w,S}$	-4320
$M_{ukupni}=M_s+M_w$	-17320
PREGIB (Hogg):	[kNm]
$M_{s,H}$	7000
$M_{w,H}$	4320
$M_{ukupni}=M_s+M_w$	11320

3.2 Lokalna opterećenja po palubama

Prema Pravilima HRB-a [1] opterećenje na izloženim palubama je definirano kao:

Exposed deck	p_E , [kN/m ²]
Weather deck, Trunk	$3,15 \cdot (H+1,0)$
Exposed deck of superstructure or deckhouse:	
• public	4,0
• non public	2,0

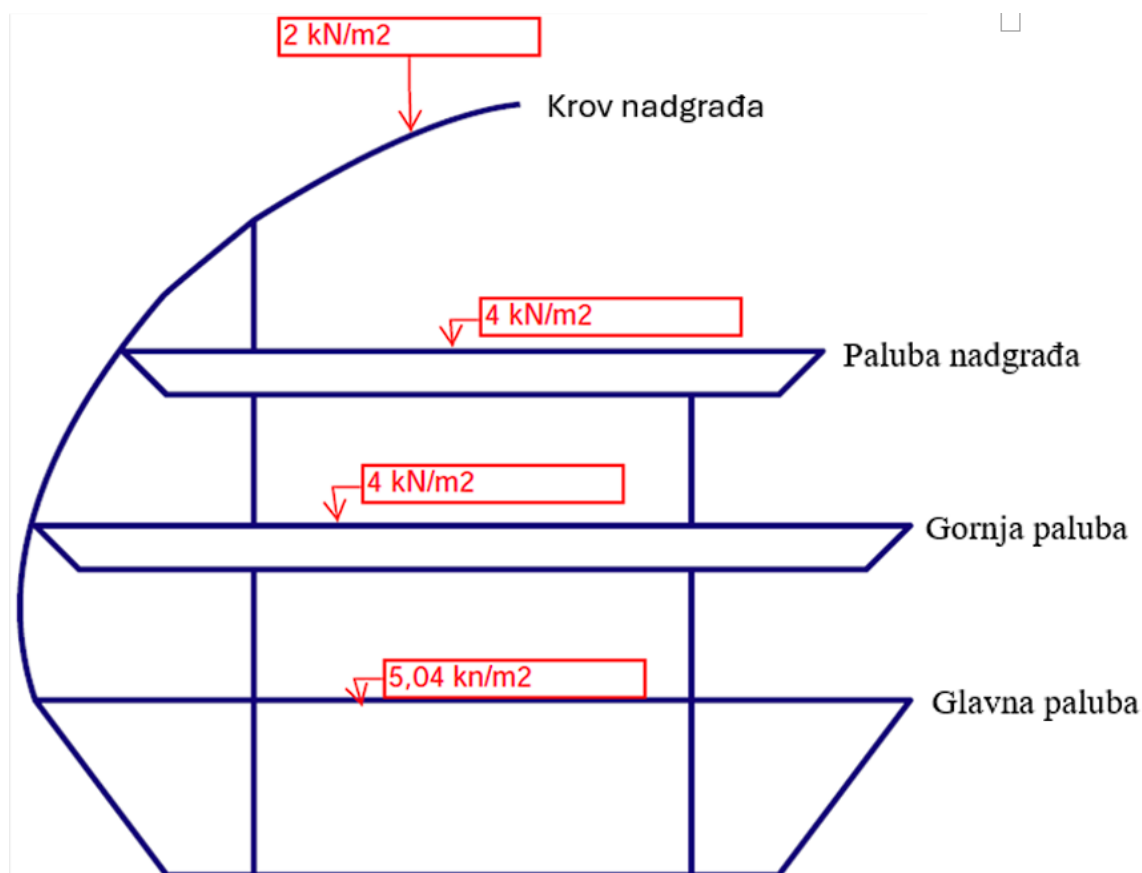
Slika 18. Opterećenje na izloženim palubama prema HRB-u [1]

Gdje je H značajna valna visina koja prema HRB-u[1] za područje plovidbe IWW=0.6 iznosi 0,6m

H=0,6 m

Tablica 3. Vrijednosti tlakova na izloženim palubama

Pozicija	Izraz	Iznos [kN/m ²]
Glavna paluba	$p_E = 3,15 \cdot (H + 1,0)$	5,04
Gornja paluba i Paluba nadgrađa	$p_E = 4,0$	4,0
Krov nadgrađa	$p_E = 2,0$	2,0



Slika 19. Prikaz projektnih tlakova po palubama.

3.3 Implementacija opterećenja na MKE model

Razmatrana su tri (3) kritična slučaja opterećenja: dva (2) za maksimalni progib i jedan(1) za maksimalni pregib. Opterećeni su momentima savijanja prema tablici i tlakovima prema tablici 2.

- **LC1 – Maksimalni progib A:**

Model je opterećen tlakom na sredini broda i ukupnim momentom progiba. Tlak je raspoređen po glavnoj palubi i gornjoj palubi.

- **LC2 – Maksimalni progib B:**

Model je opterećen tlakom na sredini broda i ukupnim momentom progiba. Tlak je raspoređen po palubi nadgrađa i krovu nadgrađa.

- **LC3– Maksimalni pregib:**

Model je opterećen tlakom na krajevima broda i ukupnim momentom pregiba. Tlak je raspoređen po glavnoj palubi i gornjoj palubi.

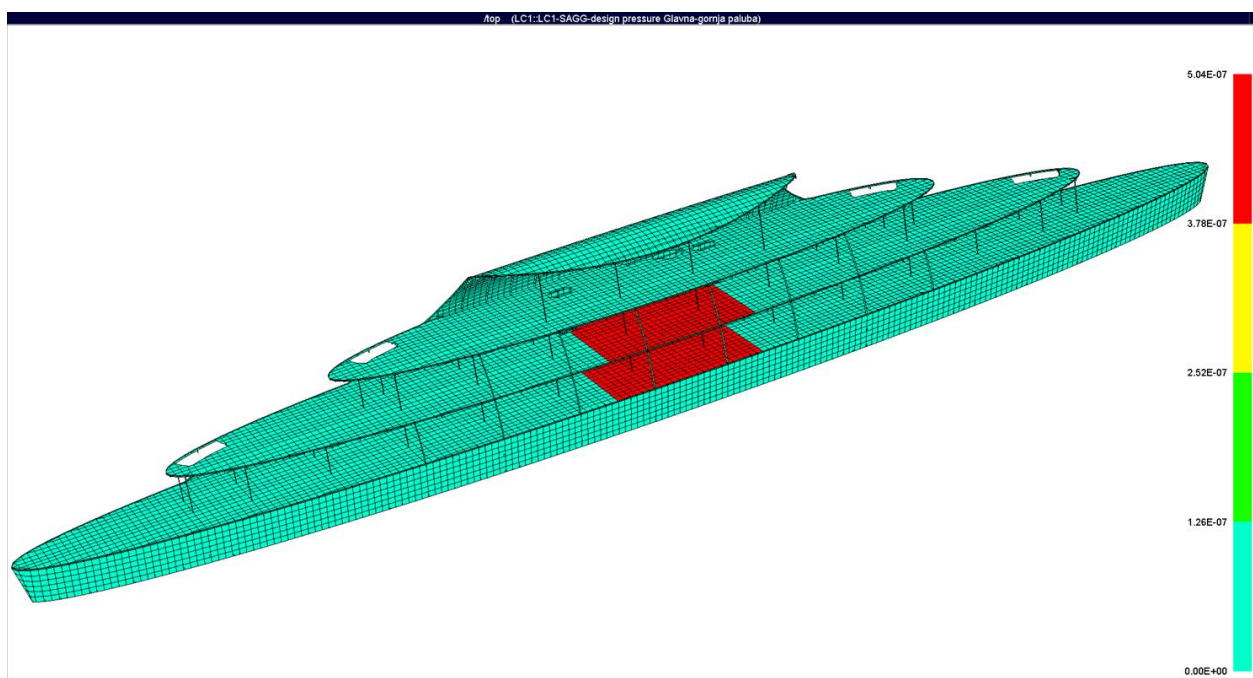
Masa lakog broda iznosi oko 404 tone. Od toga, masa čelične konstrukcije dobivena iz 3D MKE modela iznosi 334 tone, dok preostala oprema (staklo, mostići, navigacijska oprema, solari,

staklene površine, HVAC, električna i sl.) oko 70 tona te je raspoređena duž modela sukladno dostupnim podacima. Masa i raspored čelične konstrukcije dobivena je direktno iz MKE modela. Za svaki slučaj opterećenja MKE model statički je izbalansiran koristeći se automatskom procedurom u programu MAESTRO koji promjenom gaza, kuta nagiba i trima postiže balansni položaj kako na mirnoj vodi tako i na projektnom valu.

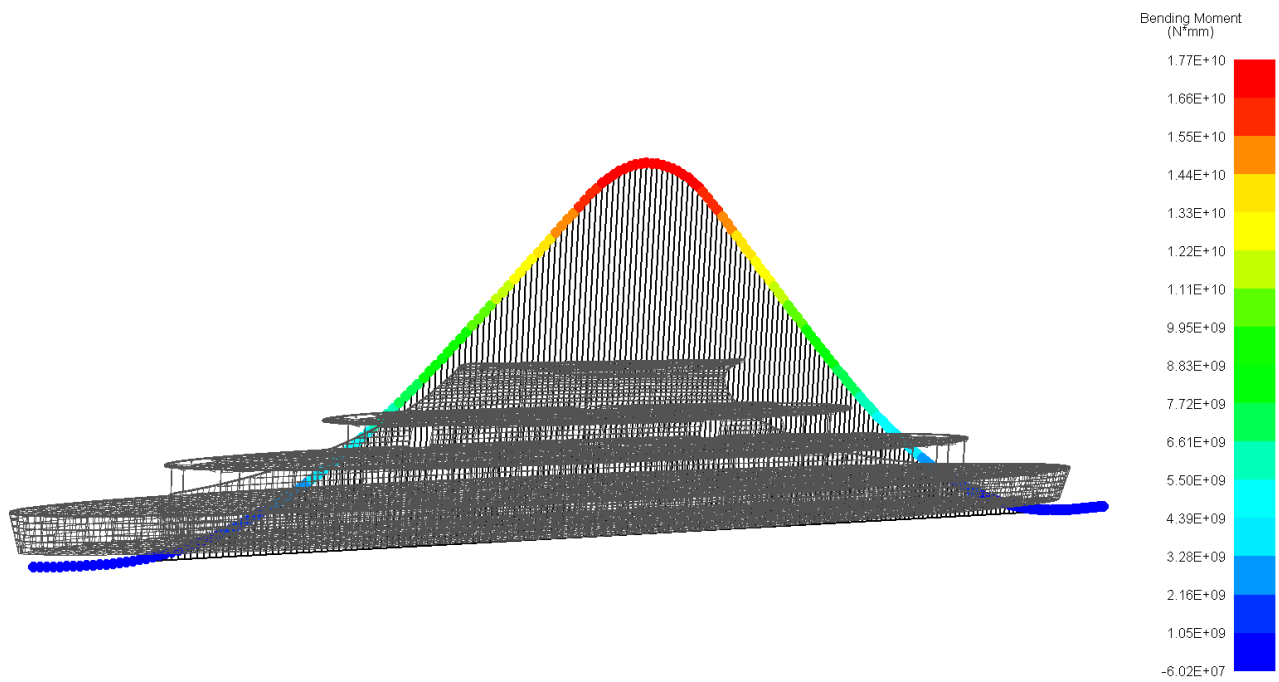
Raspored projektnih tlakova po palubama i globalnih momenata savijanja prikazan je na slikama u nastavku za svaki slučaj opterećenja.

Napomena: Progibni momenti savijanja (SAGG) su po konvenciji u računalnom programu MAESTRO pozitivni (+), a pregibni (HOGG) negativni (-).

Maksimalni Progib A (LC1)

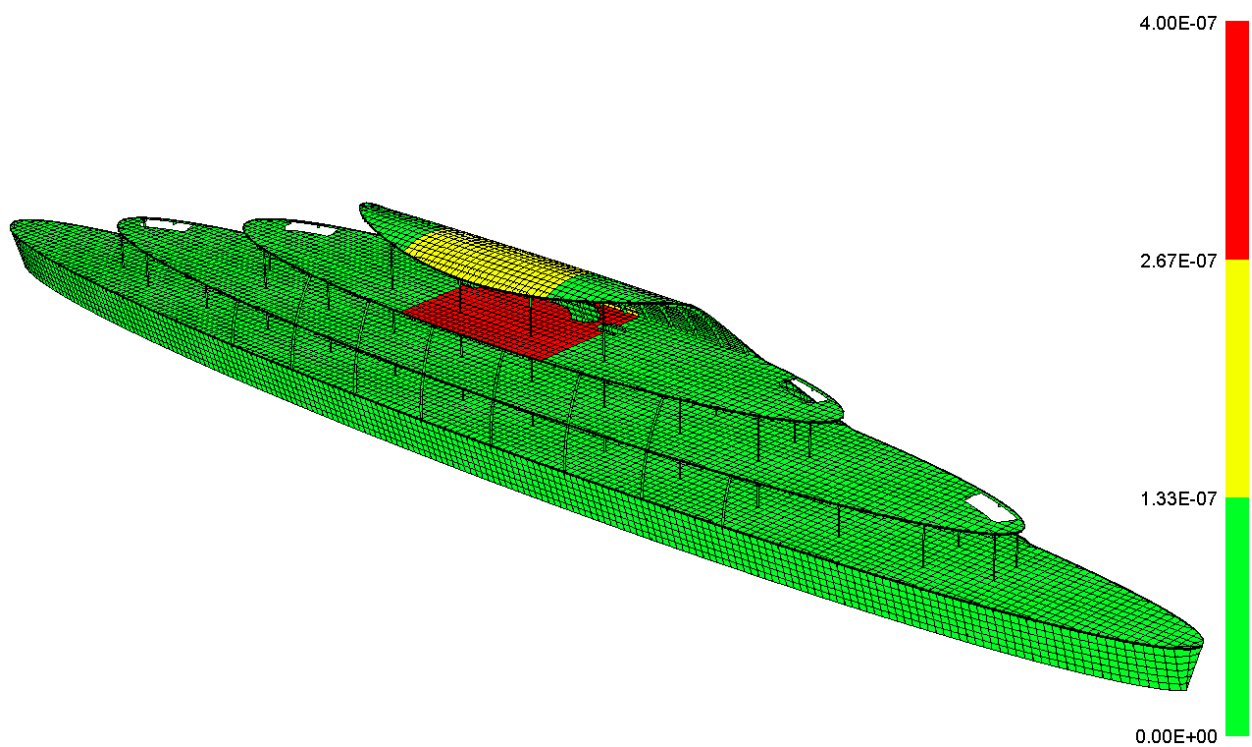


Slika 20. Raspored projektnih tlakova (tona/mm²) za LC1

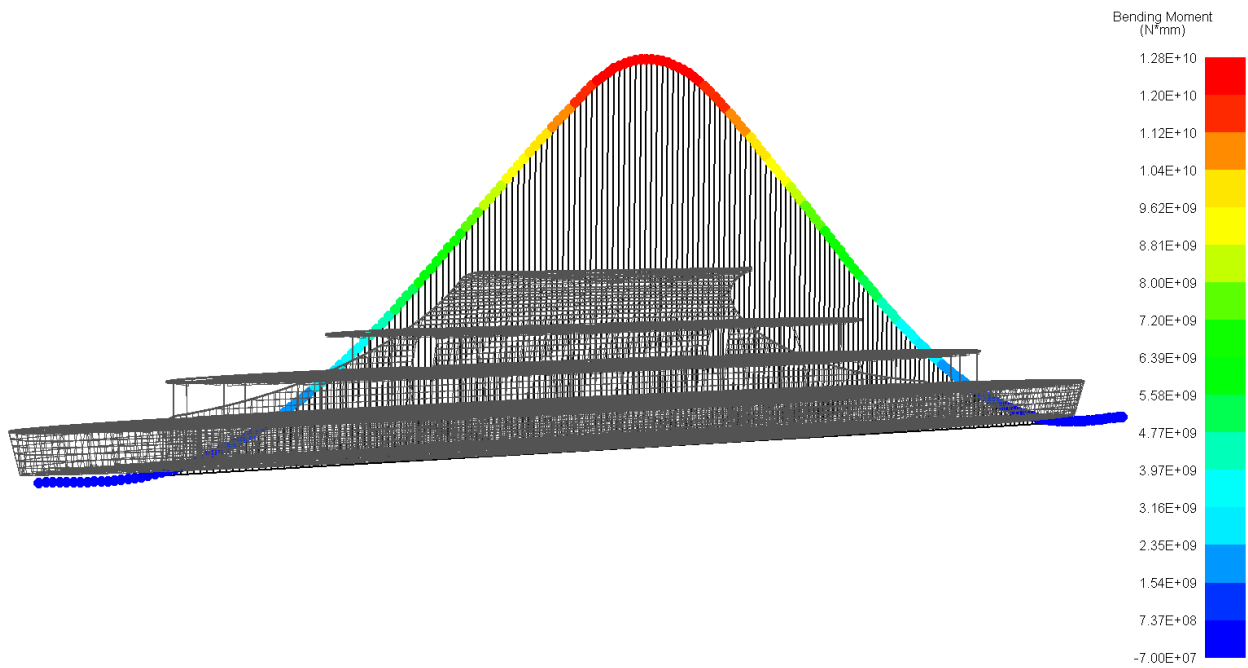


Slika 21. Ukupni vertikalni progibni moment savijanja (statički + valni) u Nmm za LC1

Maksimalni Progib B (LC2)

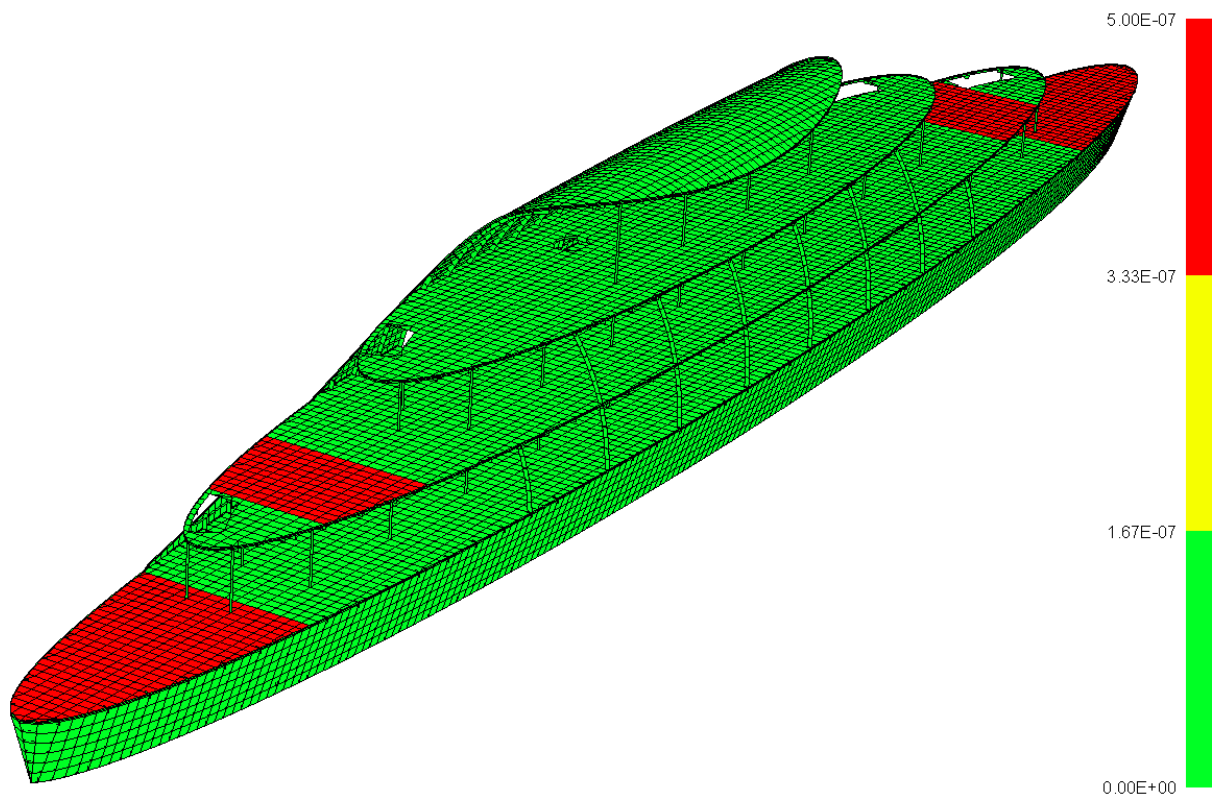


Slika 22. Raspored projektnih tlakova (tona/mm²) za LC2

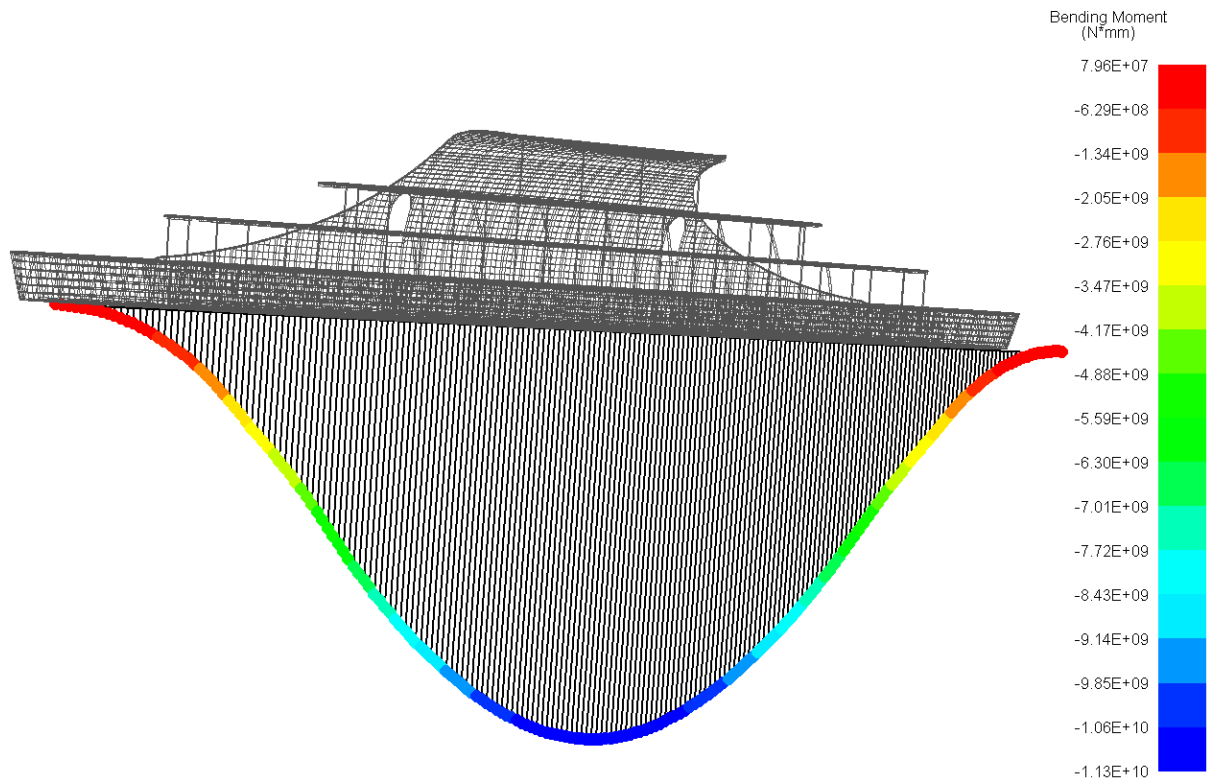


Slika 23. Ukupni vertikalni progibni moment savijanja (statički + valni) u Nmm za LC2

Maksimalni pregib (LC3)



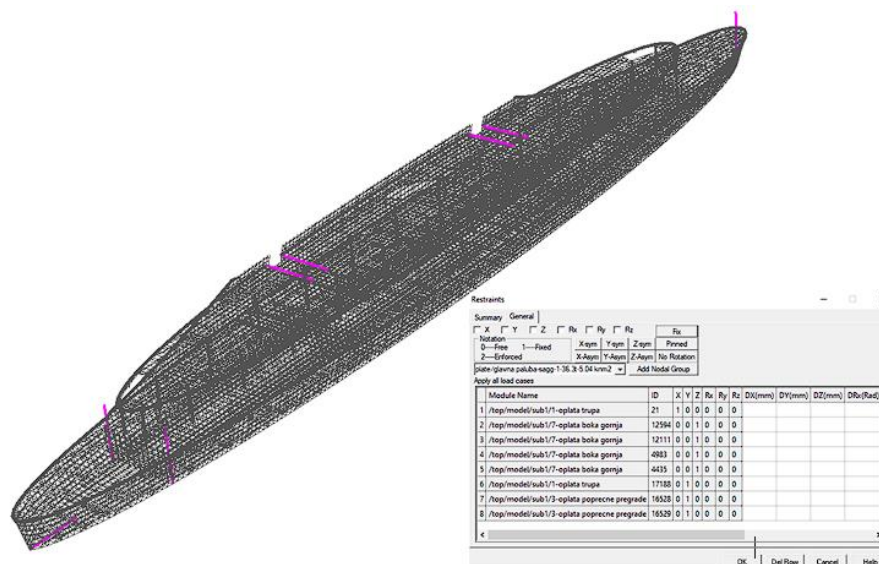
Slika 24. Raspored projektnih tlakova (tona/mm²) za LC3



Slika 25. Ukupni vertikalni pregibni moment savijanja (statički + valni) u Nmm za LC3

3.4 Rubni uvjeti

Prije početka analize potrebno je postaviti rubne uvjete pomaka. Rubni uvjeti služe da spriječe pomak modela kao krutog tijela. Rubni uvjeti se postavljaju u čvorovima spojeva jakih nosača i oplata zbog preuzimanja mogućih sila reakcija.



Slika 26. Rubni uvjeti

4. STRUKTURNA ANALIZA PRISTANA

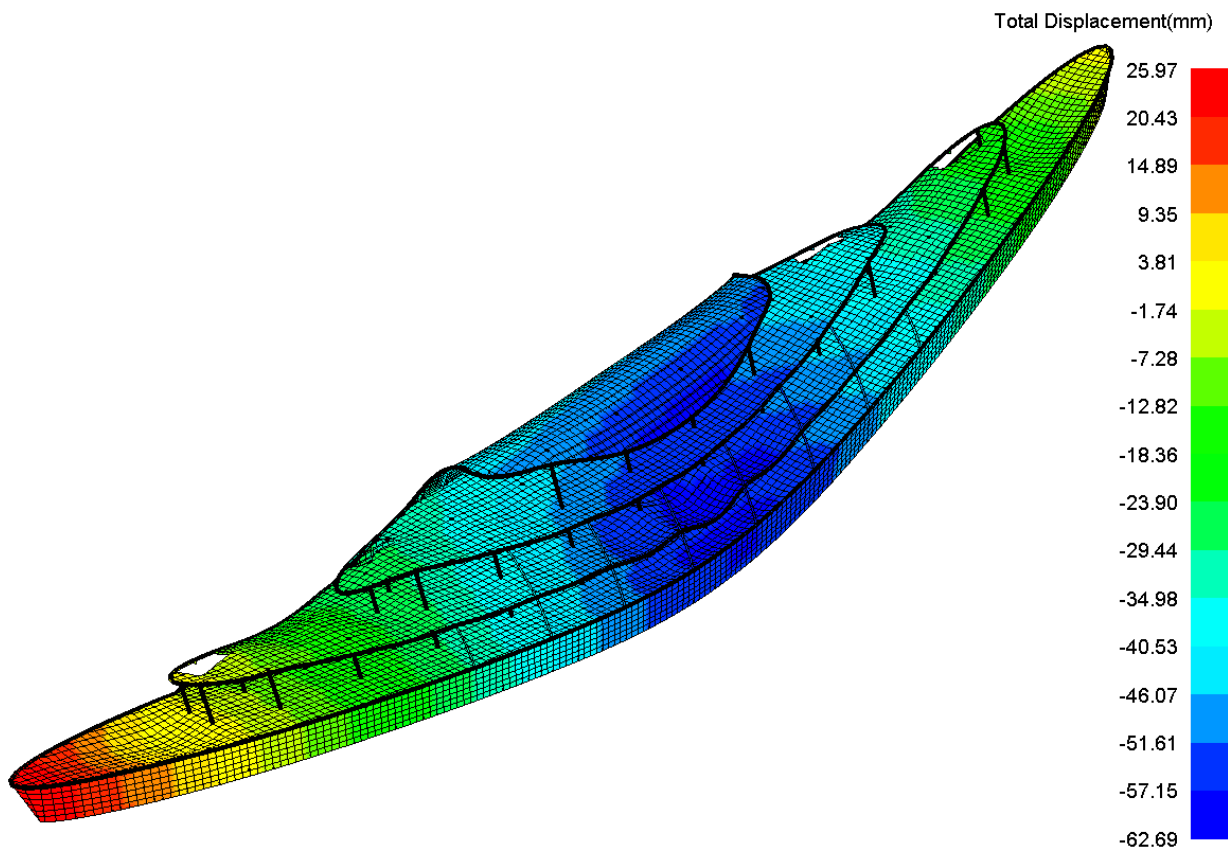
Strukturna analiza metodom konačnih elemenata plovnog pristana provedena je za tri (3) slučaja opterećenja (LC1 do LC3) definirana u poglavlju 3. Analiza modela je podijeljena na tri dijela: analiza pomaka, analiza naprezanja, analiza podobnosti.

4.1 Analiza pomaka

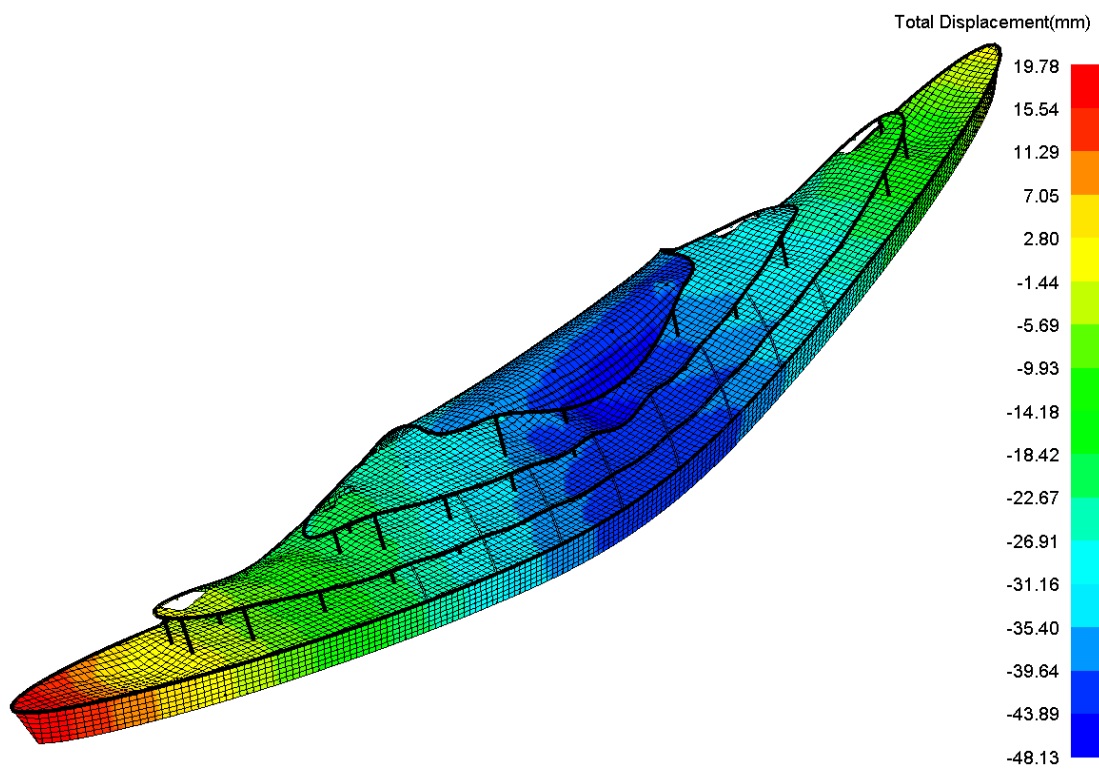
Analizirajući trup modela, najveći pomaci pojavljuju se na sredini modela, što je i očekivano jer su tu momenti savijanja najveći. U LC1 su najveći momenti savijanja, pa sukladno tome i u LC1 se pojavljuje najveći progib od 62,69 mm. U sva tri slučaja, središnji pomaci su veći na strani slabije povezane oplate. U slučaju LC3, zbog lokalnog tlaka dolazi do velikih pomaka na krajevima modela. To je i očekivano zbog završetka uzdužne pregrade na lokaciji zadnjih upora, te nema nikakve strukture koja bi poduprla oplatu glavne palube. Sažetak maksimalnih pomaka po slučajevima opterećenja dan je u tablici 4, a prikaz pomaka na slikama 27-29.

Tablica 4. Maksimalni vertikalni pomaci

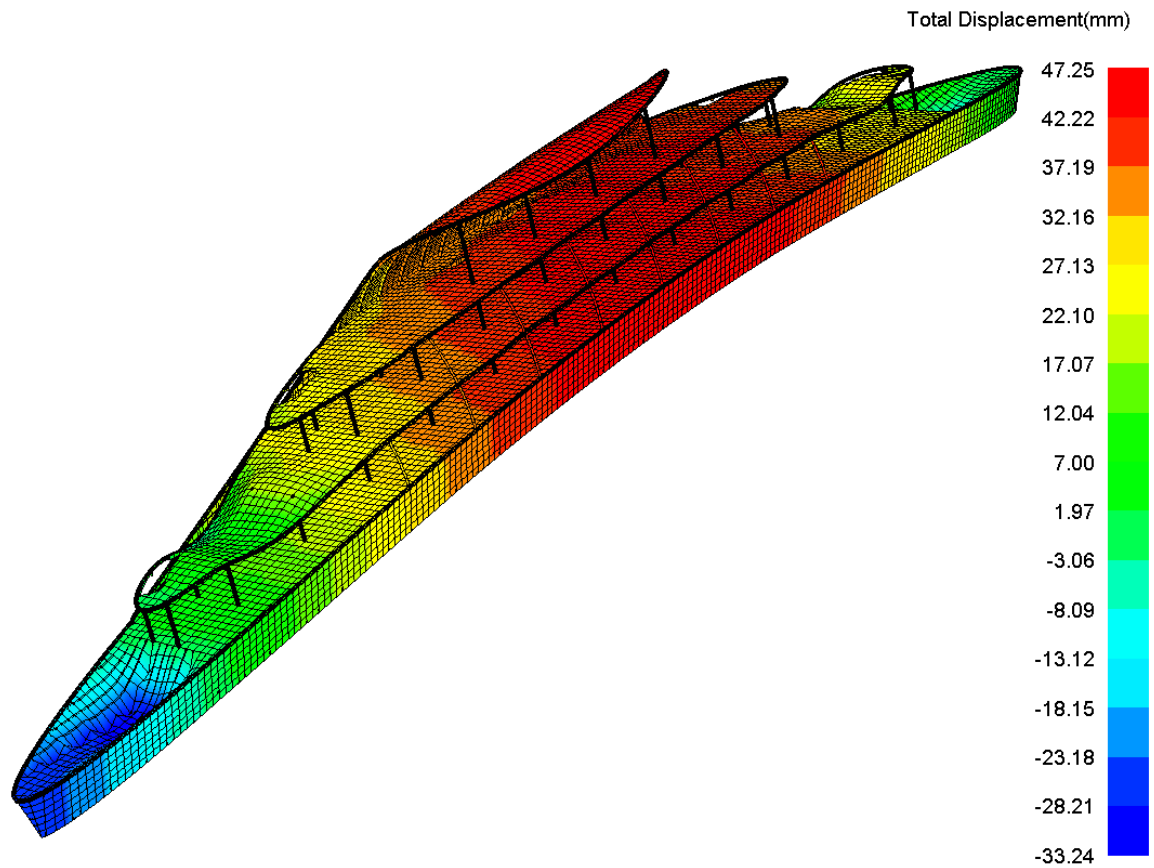
Slučaj opterećenja	Maksimalni vertikalni pomak [mm]	Grafički prikaz vertikalnih pomaka [mm]
LC1	62,69	Slika 27
LC2	48,13	Slika 28
LC3	33,24	Slika 29



Slika 27. Vertikalni pomaci za LC1



Slika 28. Vertikalni pomaci za LC2



Slika 29. Vertikalni pomaci za LC3

4.2 Analiza naprezanja

Analizirane su vrijednosti naprezanja u različitim slučajevima opterećenja i uspoređene s dozvoljenim razinama po Pravilima HRB-a [1]. Sva naprezanja u opločenju su dana u težištu Q4 elementa. Dozvoljena naprezanja definirana su na osnovi granice popuštanja materijala i faktora sigurnosti koji su definirani u skladu s Pravilima HRB-a [1]. Vidi Sliku 30. i tablicu 5.

The permissible normal stress σ , the permissible shear stress τ and the equivalent stress σ_e shall be in compliance with the following formulae:

$$\sigma \leq \frac{R_{eH}}{f_s}, \quad [N/mm^2]$$

$$\tau \leq 0,5 \cdot \frac{R_{eH}}{f_s}, \quad [N/mm^2] \quad (1.8.2.2-1)$$

$$\sigma_e \leq \frac{R_{eH}}{f_s}, \quad [N/mm^2]$$

Safety factors – ordinary stiffeners

Strength check	Condition	Safety factor, f_s
Yielding	General	1,10 ²⁾
	Flooding ¹⁾	1,05 ²⁾
	Testing	1,05
Buckling	Column buckling of pillars	1,10

Notes:
 1) Flooding load shall be applied only on watertight boundaries of compartments not intended to carry liquids.
 2) For ordinary stiffeners of the collision bulkhead $f_s = 1,28$.

Safety factors – primary supporting members

Strength check	Condition	Safety factor, f_s
Yielding	General	1,10 ^{2), 3), 4)}
	Flooding ¹⁾	1,05 ³⁾
	Testing	1,05
Buckling	Plate panels	1,10
	Pillar column buckling	1,20
	Pillar local buckling	1,10

Notes:
 1) Flooding load shall be applied only on watertight boundaries of compartments not intended to carry liquids.
 2) For bottom centre girders, bottom side girders and side stringers, $f_s = 1,20$.
 3) For primary supporting members of the collision bulkhead, $f_s = 1,28$.
 4) For beam finite elements and coarse mesh finite elements of 3D model, f_s shall be increased by 10%.

Safety factors – plating

Strength check	Condition	Safety factor, f_s
Yielding	General	1,20 ²⁾
	Flooding ¹⁾	1,08 ²⁾
	Testing	1,08
Buckling	General	1,10

Notes:
 1) Flooding load shall be applied only on watertight boundaries of compartments not intended to carry liquids.
 2) For plating of collision bulkhead $f_s = 1,28$.

Slika 30. Formule dozvoljenih naprezanja i definirani faktori sigurnosti [1]

Formule maksimalnih dopuštenih naprezanja računaju se prema HRB-u [1].

Za obični brodograđevni čelik minimalne granice popuštanja $R_{eH} = 235 \text{ N/mm}^2$ dani su faktori sigurnosti u Tablici 5.

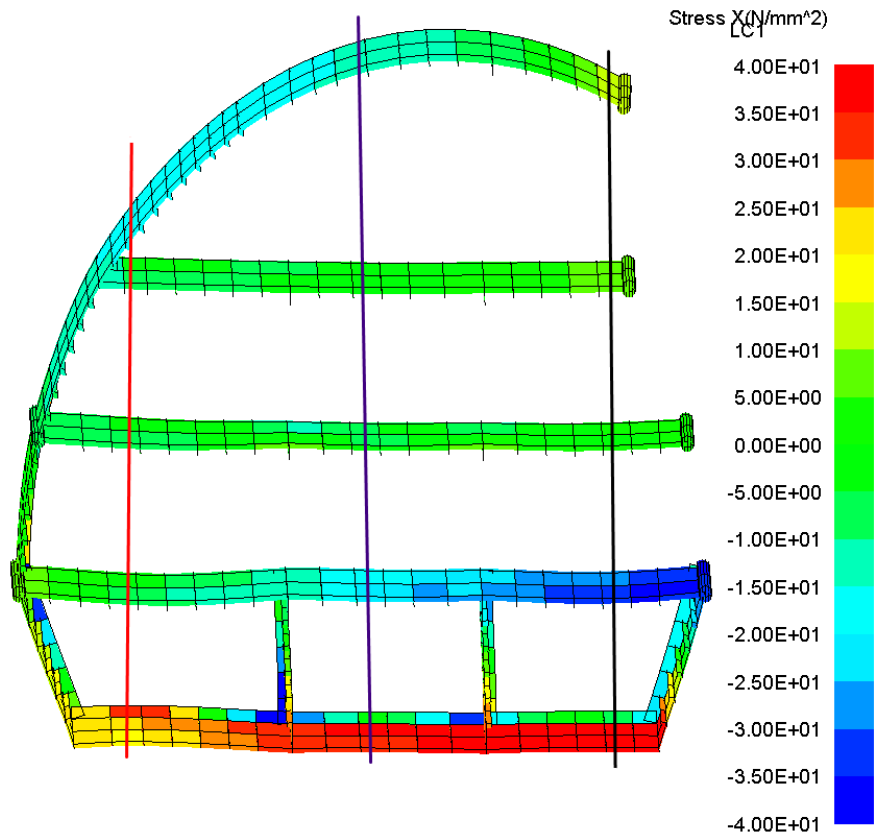
Tablica 5. Maksimalna dozvoljena naprezanja

Dio konstrukcije	f_s [N/mm ²]	σ_x [N/mm ²]	τ [N/mm ²]	σ_e [N/mm ²]
Jaki uzdužni nosači-Podveze	1,1*1,1=1,21	194,21	97,1	194,21
Jaki poprečni nosači-Sponje	1,1*1,1=1,21	194,21	97,1	194,21
Oplata	1,2	195,83	97,92	195,83
Uzdužnjaci	1,1	213,63	106,81	213,63

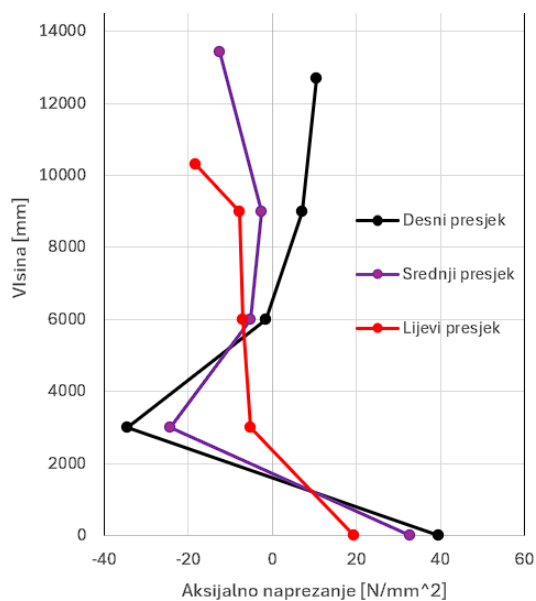
U analizi naprezanja prvo će se razmatrati raspodjela primarnih naprezanja po visini za poprečni presjek na sredini broda. Ta raspodjela daje dobar uvid u to koliko je dobro konstrukcija povezana po visini i koliko se dobro naprezanja prenose s jedne palube na drugu te kolika je efektivnost

gornjih paluba u uzdužnoj čvrstoći broda. Analiza je napravljena na 3 različita mjesta po presjeku, tj. za 3 različite vrijednosti Y koordinate, zbog nesimetričnosti poprečnog presjeka.

LC1:

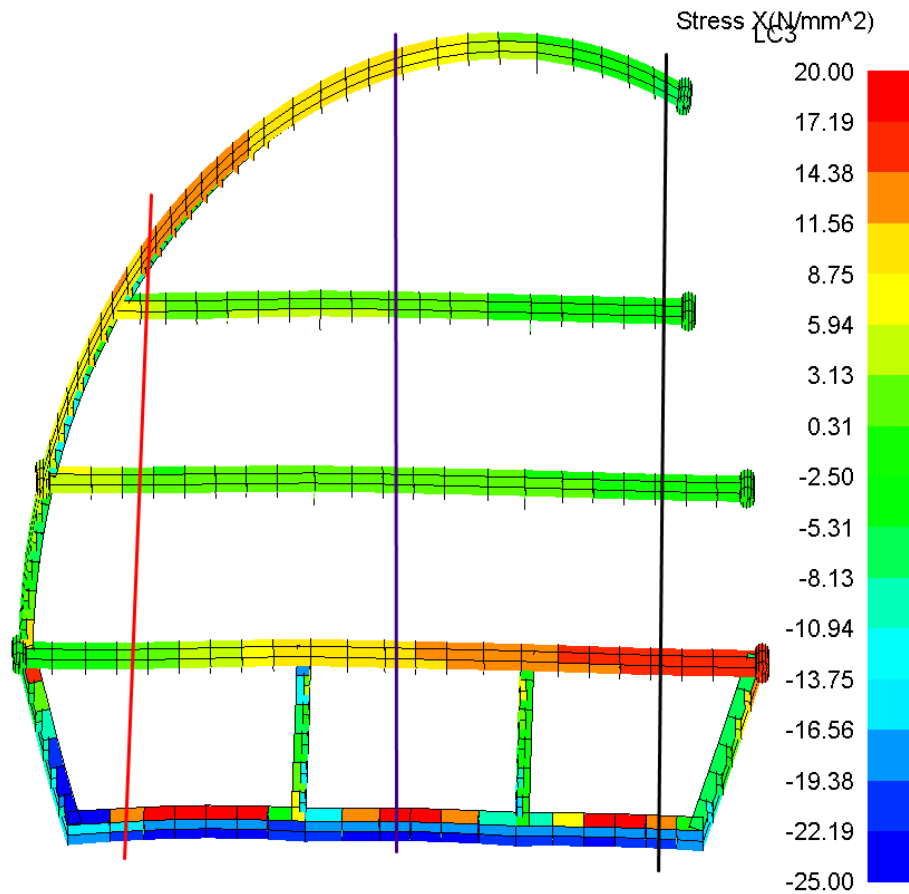


Slika 31. Uzdužna naprezanja poprečnog presjeka na sredini broda za LC1

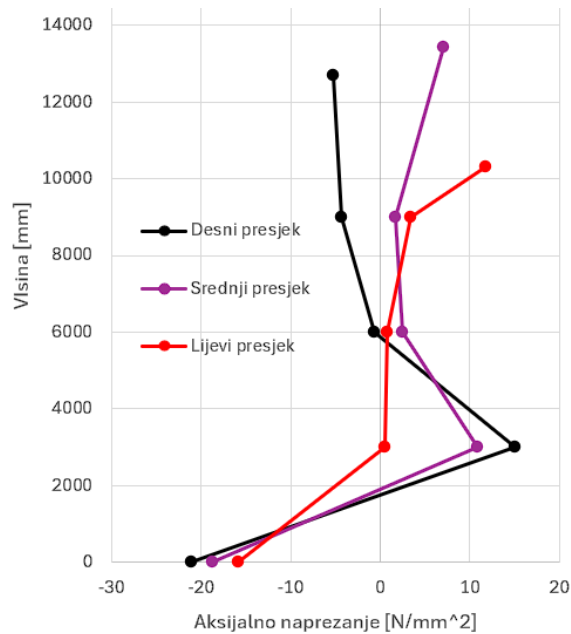


Slika 32. Raspodjela uzdužnih naprezanja po visini za LC1

LC3:



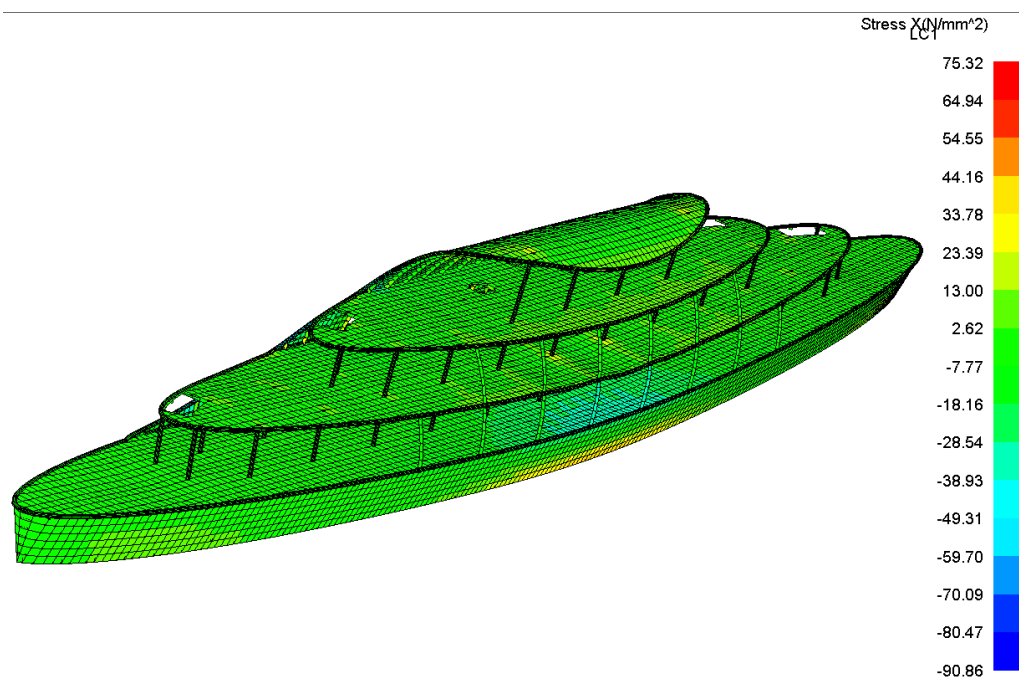
Slika 33. Uzdužna naprezanja poprečnog presjeka na sredini broda za LC3



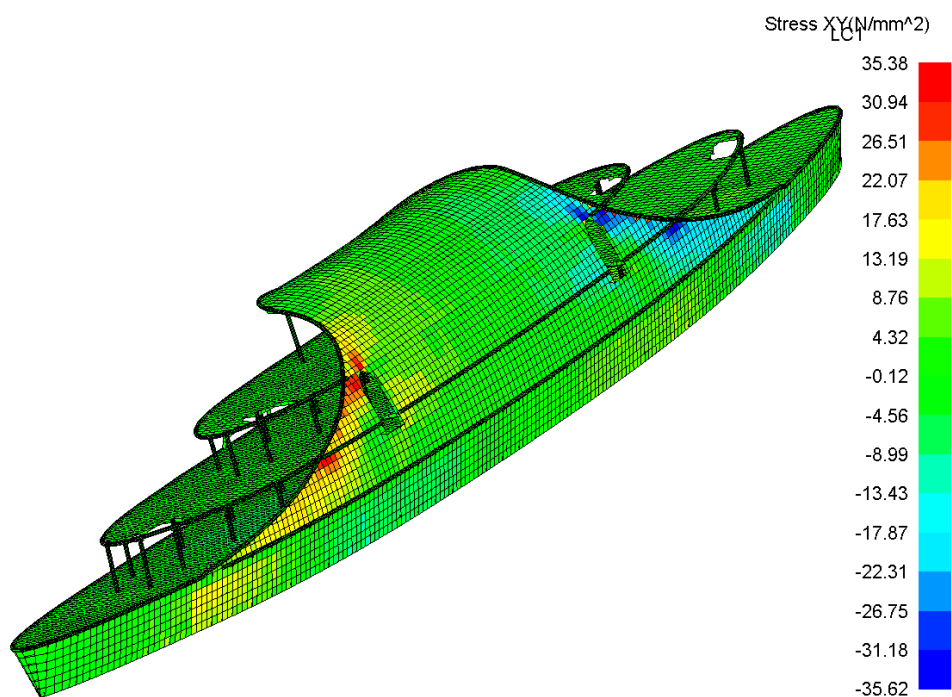
Slika 34. Raspodjela uzdužnih naprezanja po visini za LC3

Promatranjem grafova može se primijetiti da su naprezanja dna i glavne palube veća u desnom (crnom) i srednjem (ljubičastom) presjeku, za razliku od lijevog (crvenog) presjeka. Međutim,

naprezanja krova nadgrađa su najveća u lijevom presjeku. Ovo ponašanje je očekivano jer je na lijevom presjeku konstrukcija puno bolje povezana, te se naprezanja kroz oplatu boka mogu prenositi sve do krova. To ponašanje se također vidi u grafu lijevog presjeka, koji se ponaša sličnije idealnoj gredi.



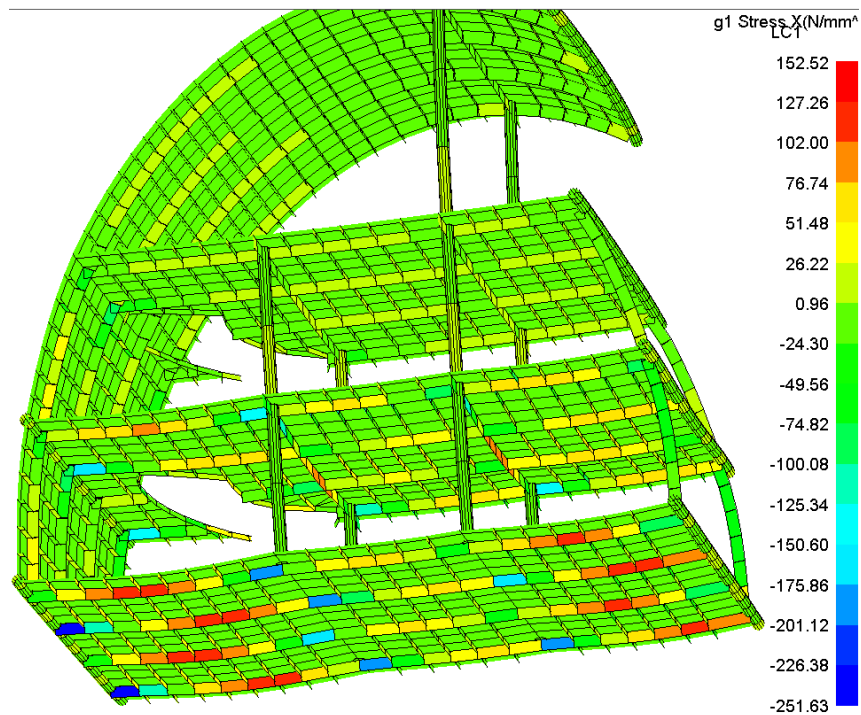
Slika 35. Uzdužna naprezanja modela za LC1



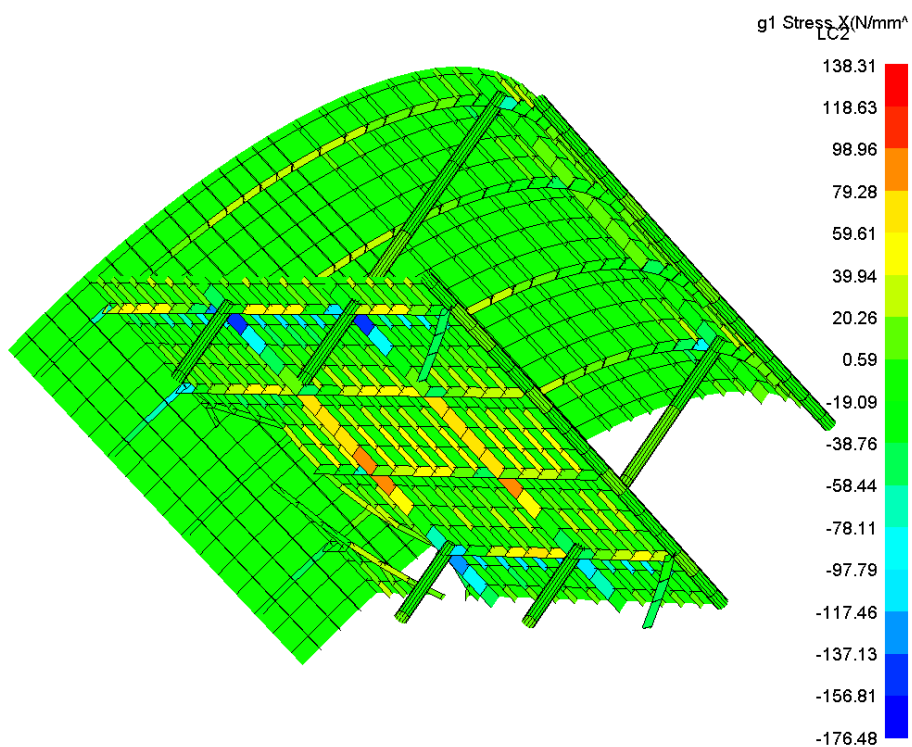
Slika 36. Smična naprezanja modela za LC1

Kao što je vidljivo na slikama 35. i 36. niti jedan pločasti element ne prelazi kritičnu vrijednost maksimalnog dopuštenog aksijalnog naprezanja i maksimalnog dopuštenog smičnog naprezanja

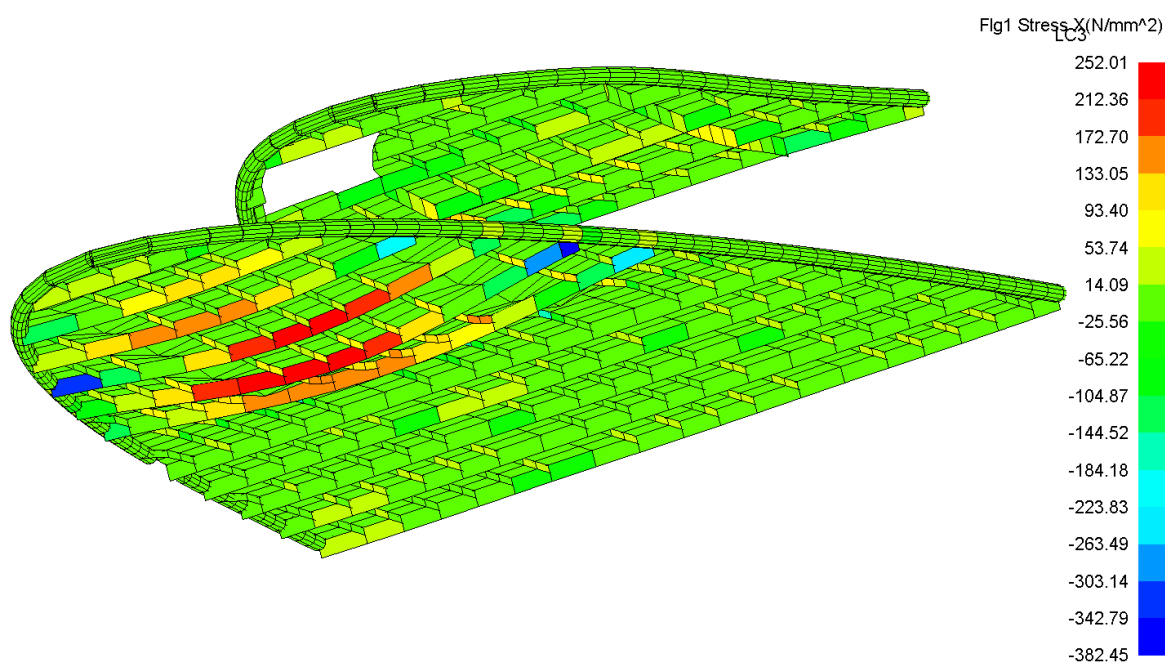
dobivenog u tablici 5. Najveća smična naprezanja se javljaju na krajevima oplate boka i oplate krova nadgrađa.



Slika 37. Naprezanja (aksijalna+savojna) u jakim nosačima za LC1



Slika 38. Naprezanja (aksijalna+savojna) u jakim nosačima za LC2



Slika 39. Naprezanja (aksijalna+savojna) u jakim nosačima za LC3

Na slikama 37.-39. su prikazana naprezanja (savojna+aksijalna) u jakim nosačima palube (okvirne sponje i podveze) za svaki slučaj opterećenja u kritičnim područjima. U tim područjima dolazi do velikih naprezanja uslijed projektnih tlakova na palubama. U LC1 dolazi do najvećih naprezanja u spojevima sponja sa oplatom i rebrima boka, te spojevima sponja sa uporama. U LC2 dolazi do najvećih naprezanja kod spojeva podveza s uporama. U LC3 najveća naprezanja se javljaju u spojevima sponja i oplata trupa. U LC1 i LC3 nekoliko grednih elemenata prelazi dopuštene granice maksimalnog naprezanja, dok u LC2 elementi ne prelaze dopuštene granice maksimalnog naprezanja.

4.3 Analiza podobnosti

Analiza podobnosti temelji se na analizi odziva konstrukcijskih elemenata na primijenjena naprezanja, s ciljem ocjene sposobnosti pojedinih dijelova konstrukcije da podnesu zadana opterećenja. Ukoliko određeni dijelovi nisu u stanju izdržati postavljene uvjete, potrebno je izvršiti redimenzioniranje kako bi se ispunili kriteriji podobnosti. Faktor podobnosti se definira sljedećom jednačinom:

$$g = (C - \gamma D) / (C + \gamma D) \quad (2)$$

gdje je:

- g – faktor podobnosti
- C – izdržljivost (Capability)

- D – zahtjev (Demand)
- γ – faktor sigurnosti

Faktor podobnosti može varirati u rasponu od -1 do +1. Donja granična vrijednost $g = -1$ postiže se kada je izdržljivost elementa jednaka nuli, dok se gornja granična vrijednost $g = +1$ postiže kada je opterećenje (zahtjev) jednako nuli. Ako faktor podobnost g poprima vrijednost manju od nule ($g < 0$), smatra se da element ne može podnijeti zadano opterećenje. Ako je vrijednost faktora podobnosti veća od nule ili jednaka nuli ($g \geq 0$) smatra se da element može podnijeti zadano opterećenje. Popis razmatranih kriterija pri evaluaciji podobnosti prikazan je u tablici 6., dok su faktori sigurnosti γ odabrani prema tablici 5.

Tablica 1. Kriteriji podobnosti s odabranim faktorima sigurnosti

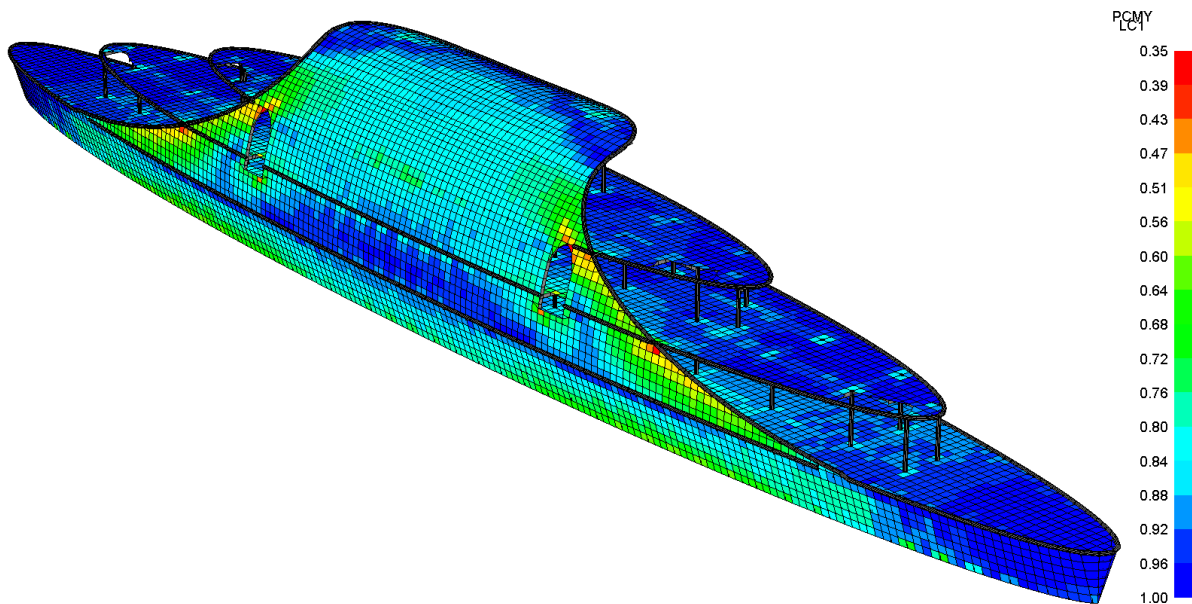
Kriterij	Opis kriterija	γ
PCCB	<i>Panel Collapse - Combined Buckling</i>	1,10
PCMY	<i>Panel Collapse - Membrane Yield</i>	1,20
BYF	<i>Beam Yield in Flange</i>	1,21

Kriteriji podobnosti podijeljeni su u dvije grupe. Prva se odnosi na opločenje gdje su se razmatrala dva kriterija: bi-aksijalno izvijanje (PCCB) i popuštanje (PCMY). Druga grupa kriterija se odnosi na popuštanje jakih greda (podveza i sponja) te je obuhvaćena u kriteriju popuštanja jakih nosača u prirubnici (BYF kriterijima).

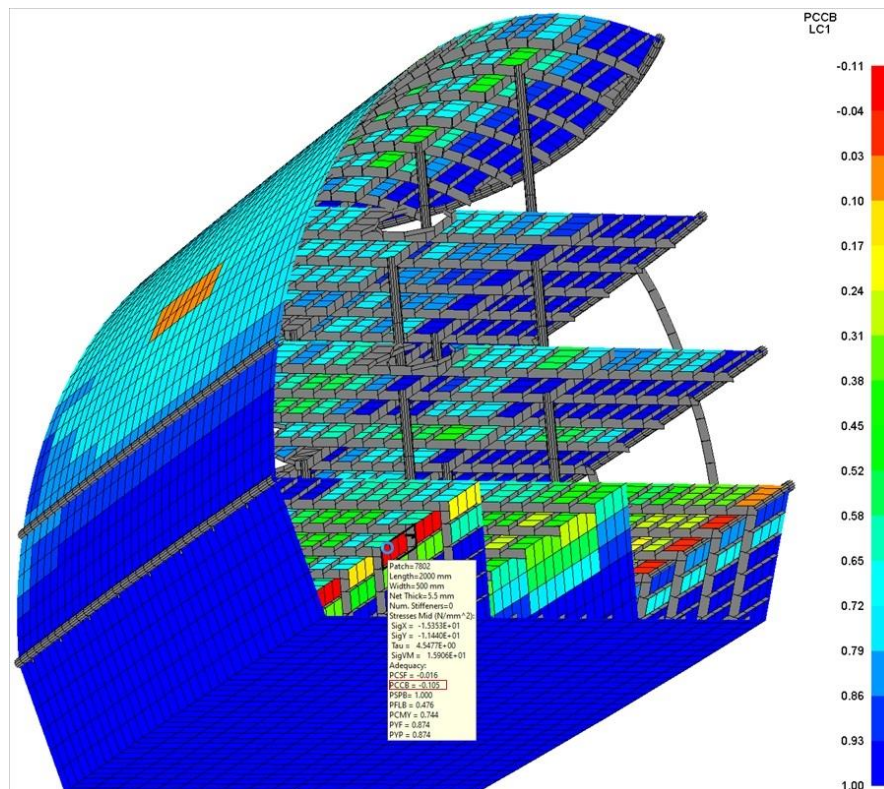
Analiza po kriteriju podobnosti za popuštanje opločenja (PCMY): Na Slici 40. je vidljivo, da cijela konstrukcija zadovoljava zahtjeve podobnosti, te da najniža vrijednost faktora podobnosti iznosi 0,35. Ovakav ishod je očekivan ako se promatraju relativno mala uzdužna i smična naprezanja iz Slike 35. i Slike 36. Najkritičnija područja se pojavljuju na grubo oblikovanih krajevima otvora za rampe, te na rubu oplata boka.

Analizom po kriteriju podobnosti za bi-aksijalno izvijanje opločenja (PCCB): Na Slici 41. je jasno vidljivo da najgornji elementi opločenja uzdužne pregrade ne zadovoljavaju kriterij za kombinirano izvijanje (PCCB). Ti elementi se nalaze ispod upore, te im upora direktno prenosi velika naprezanja u vertikalnom smjeru. Na Slici 42. se za LC3 vidi da pojedini elementi oplata glavne palube ne zadovoljavaju kriterije podobnosti. U ovom slučaju je razmak između uzdužnjaka duplo veći nego za ostatak konstrukcije te je zbog toga kritično naprezanje za izvijanje

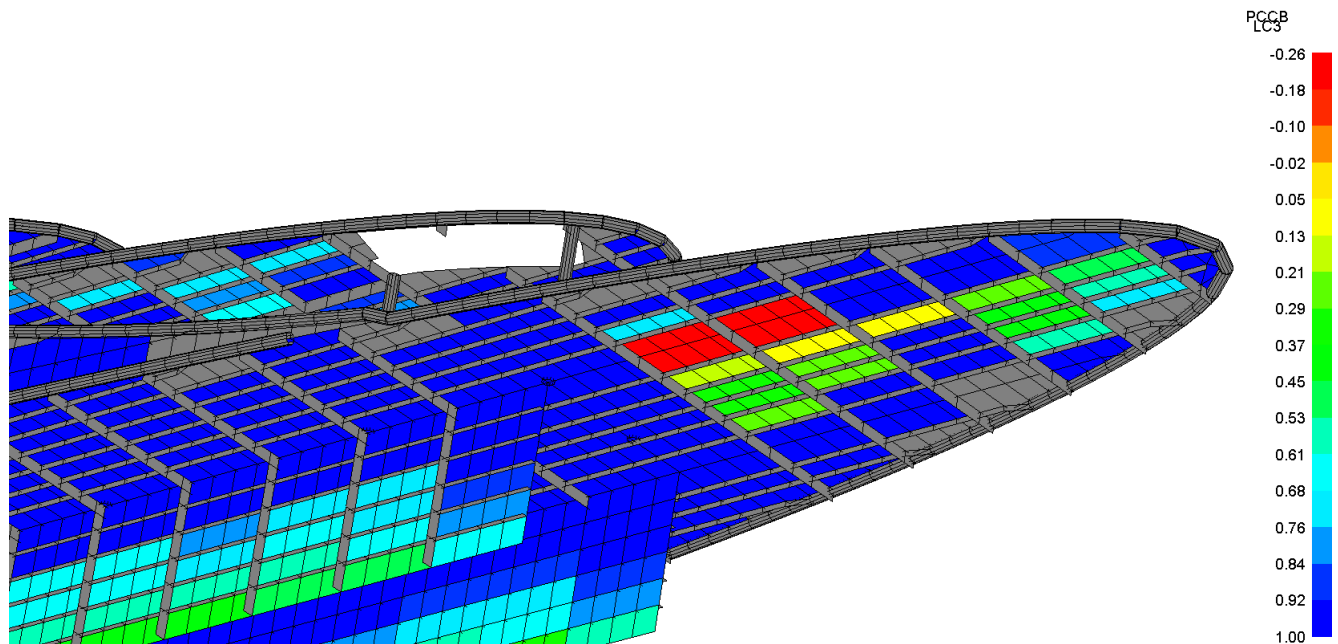
dosta manje. Cijela konstrukcija zadovoljava kriterije podobnosti izvijanja opločenja u slučaju LC2.



Slika 40. Vrijednosti faktora podobnosti PCMY za LC1 .

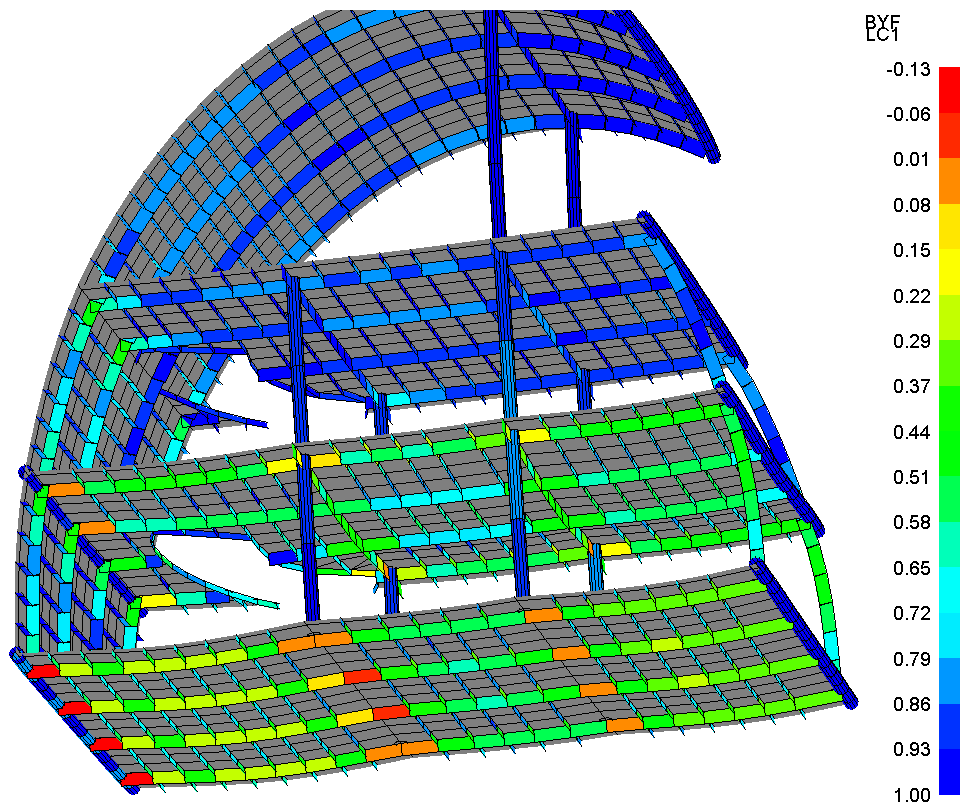


Slika 41. Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC1 .

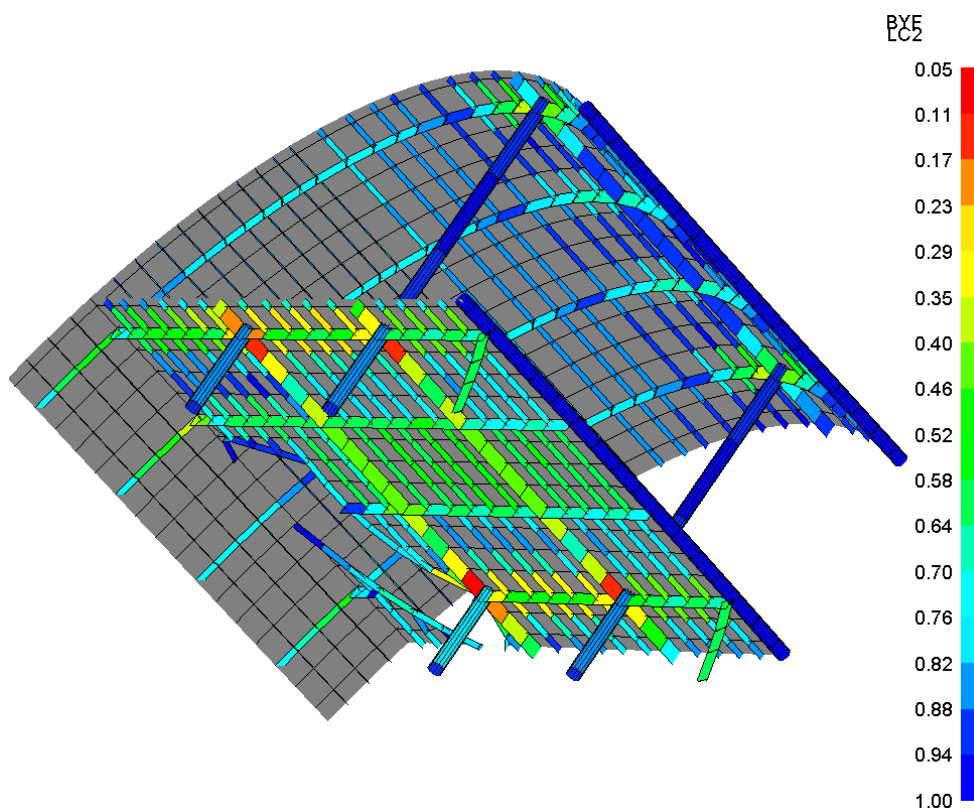


Slika 42. Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC3 .

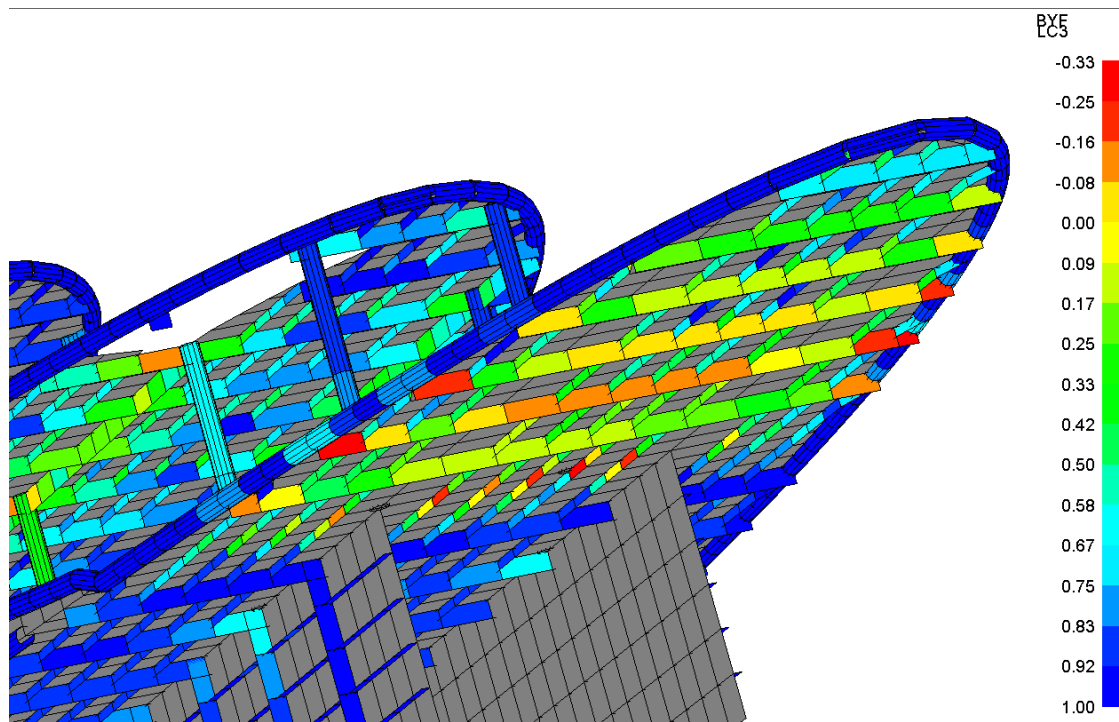
Analizom po kriteriju podobnosti za popuštanja jakih nosača u prirubnici (BYF): Do negativnih vrijednosti faktora podobnosti dolazi zbog djelovanja lokalnog tlaka. U slučaju LC1 negativne vrijednosti se javljaju u spojevima sponja i oplata boka, te spojeva sponja i uzdužne pregrade (vidi Sliku 43.) na glavnoj palubi. U LC2 zadovoljeni su svi kriteriji, najveća naprezanja identificirana su u spoju podveza i upora na palubi nadgrađa, Slika 44. U LC3 se negativne vrijednosti faktora podobnosti javljaju u spojevima sponja s oplatom trupa (vidi Sliku 45.) na glavnoj palubi (krma i pramac).



Slika 43. Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC1 .



Slika 44. Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC2 .



Slika 45. Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC3

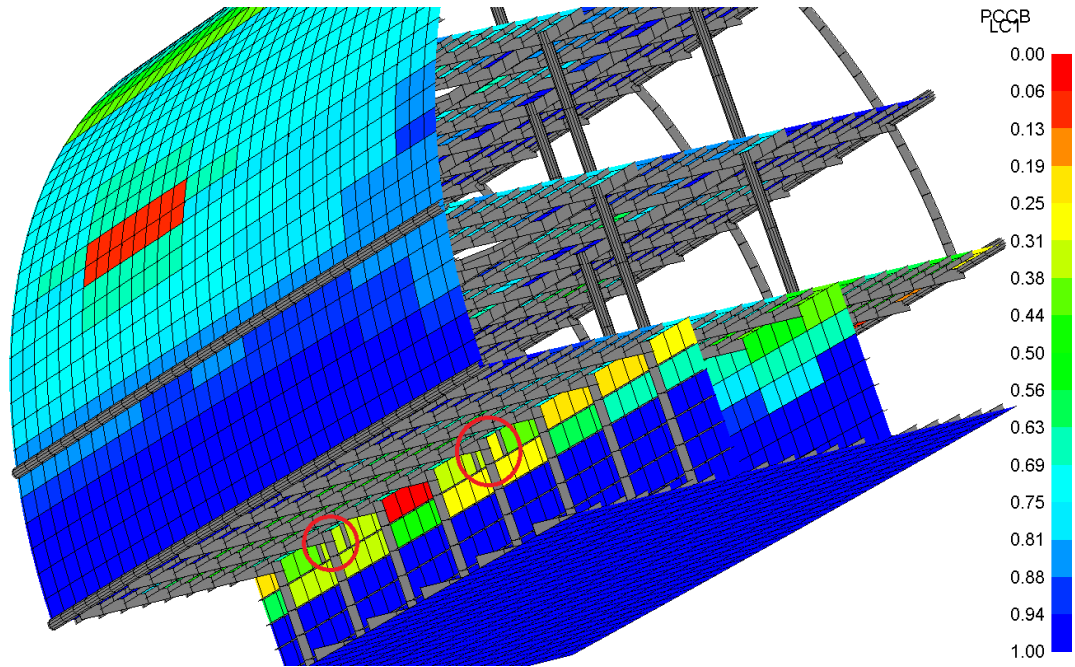
4.4 Redimencioniranje konstrukcijskih elemenata i ostala podobna rješenja

Nakon analize podobnosti potrebno je neke elemente redimencionirati ili dati prijedlog podobnog rješenja kako bi se zadovoljili kriteriji podobnosti zadani za kritična naprezanja.

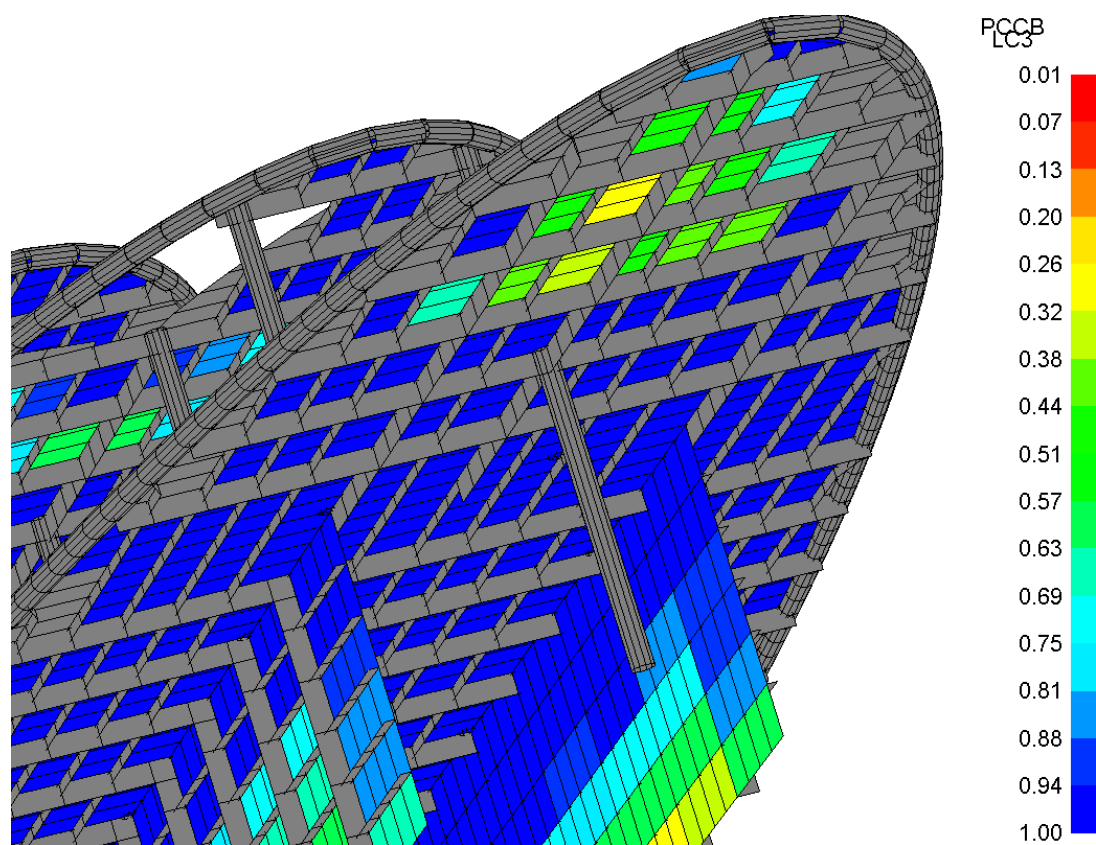
U slučaju uzdužne pregrade gdje se zbog upore prenose velika opterećenja na pregradu, dodane su vertikalne interkostalne ukrepe (FB 100x8) sa obje strane sponja na pregradi (vidi Sliku 46.). Time se širina neukrepljenog panela smanjila sa 2000 mm (razmak između rebara) na dva neukrepljena panela od širine 1500 mm i 500 mm.

Na poziciji pramca u slučaju LC3 opločenje glavne palube ne zadovoljava PCCB kriterij podobnosti, a sponje glavne palube ne zadovoljavaju BYF kriterij podobnosti. Sukladno tome su dodane dvije podveze koje se nastavljaju od pozicije uzdužnih pregrada. Time se efektivno duplo smanjuju širine neukrepljenih panela te se sprječava njihovo izvijanje. Također je središnji uzdužnjak zamijenjen s podvezom na koju je dodana jedna upora kako bi se smanjio nepoduprti raspon. Na kraju sponje koje su spojene na oplatu trupa u kojima se javlja najkritičnije naprezanje redimencionirane. Dimenzije originalnih sponja su T 220x7/30x7, dok su dimenzije novih sponja T 220x7/100x7. Prema Slikama 47. i 48. ovim promjenama su oba kriterija uspješno zadovoljena.

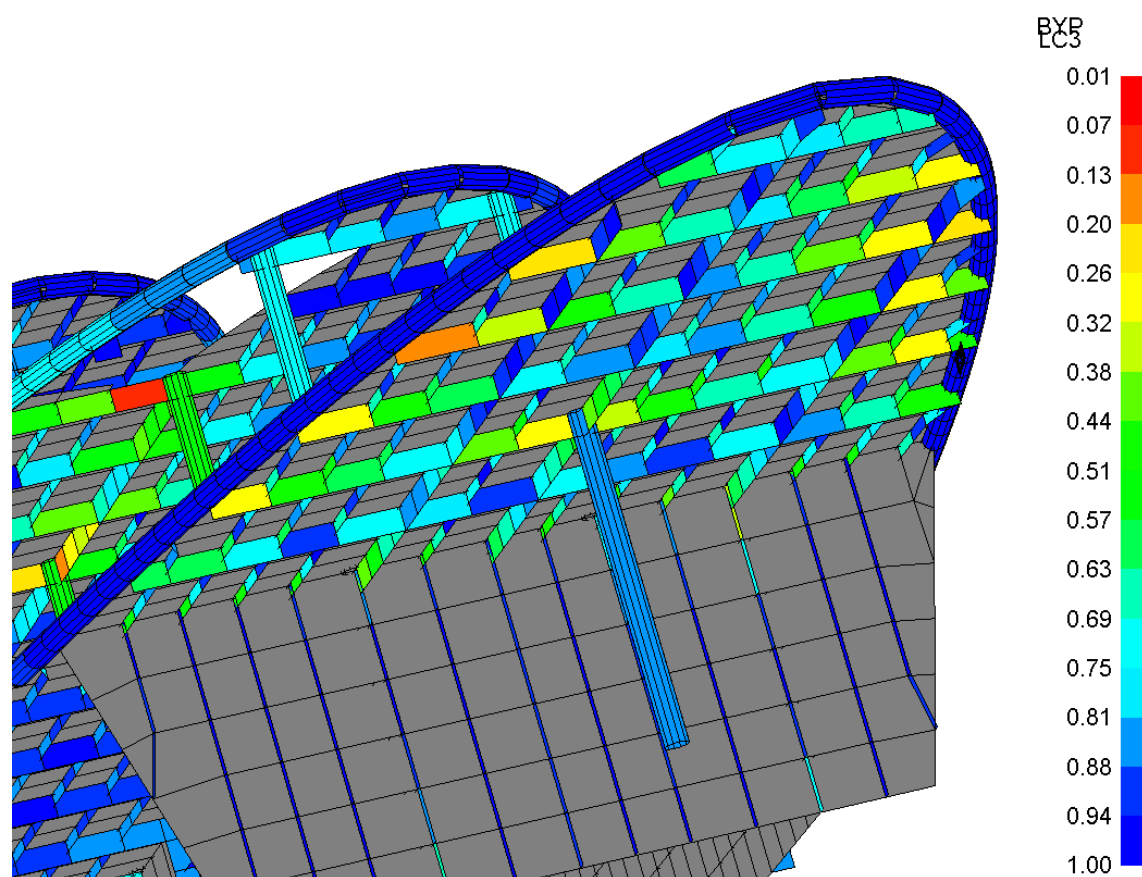
Naposljetku na poziciji sredine broda, sponje u spoju sa oplatom boka su također redimencionirane kako bi se spriječilo popuštanje i zadovoljio kriterij podobnosti BYF (vidi Sliku 49.). Dimenzije originalnih sponja su T 220x7/30x7, dok su dimenzije novih sponja T 220x7/100x7.



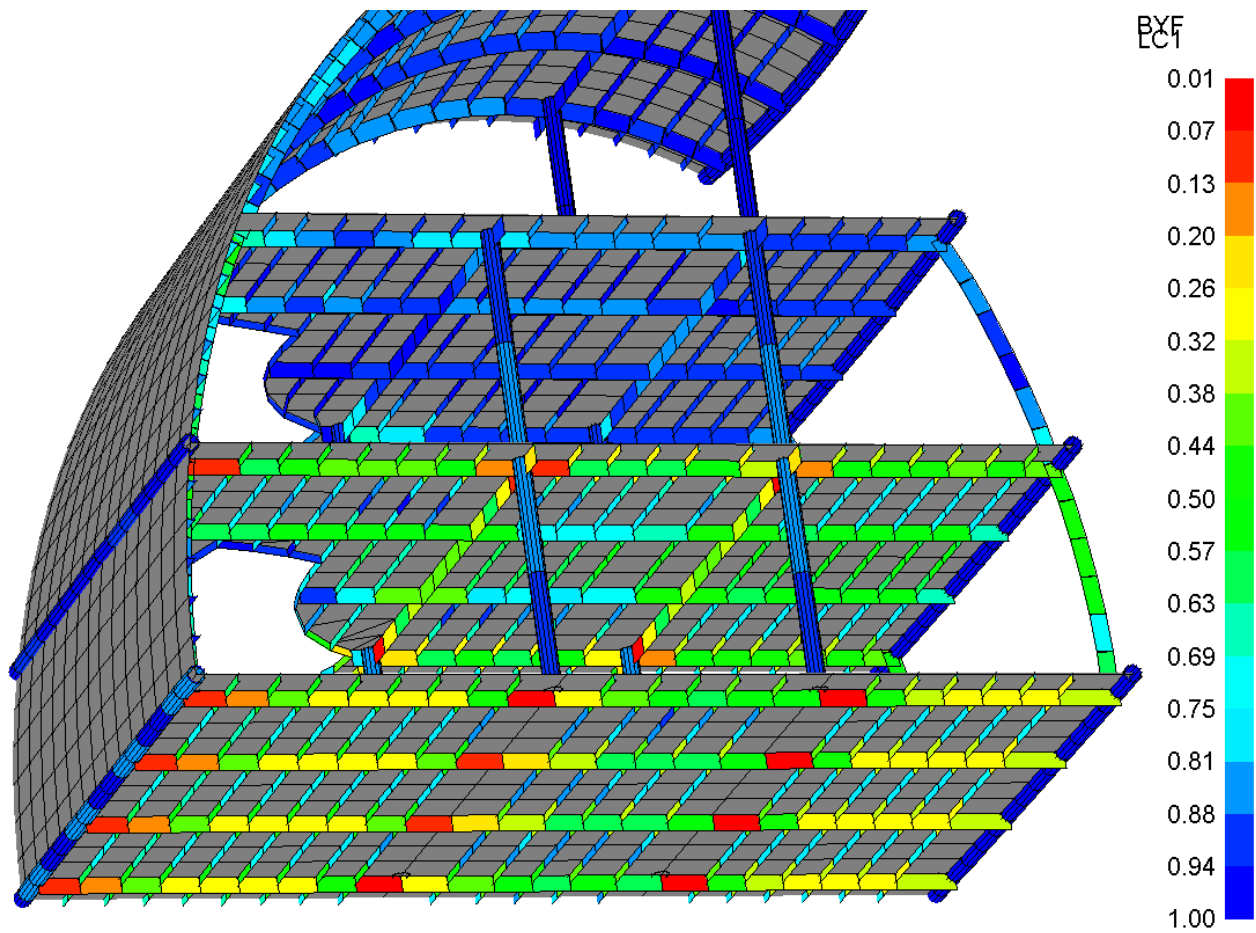
Slika 46. Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC1 za redimencionirani model.



Slika 47. Vrijednosti faktora podobnosti PCCB za LC3 za redimenzionirani model .



Slika 48. Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC3 za redimenzionirani model .



Slika 49. Vrijednosti faktora podobnosti BYF za LC1 za redimenzionirani model.

5. ZAKLJUČAK

Plovna pristaništa služe kao ključna veza između broda i obale. Zbog velikih oscilacija visine vodostaja iskrcaj putnika iz riječnih brodova se obavlja preko plovnih pristana. Cilj ovog rada je strukturna analiza riječnog plovnog pristana prema pravilima HRB-a za unutarnju plovidbu.

U prvoj fazi rada dan je prikaz relevantnih pravila HRB-a za dimenzioniranje elemenata broskog trupa i za proračun dinamičkih komponenti opterećenja za područje plovidbe $IWW = 0.6$. Navode se osnovne značajke pristana, te preliminarne dimenzije poprečnih i uzdužnih konstrukcijskih elemenata koje su dobivene prema navedenim pravilima. Zbog kompleksne interakcije trup-nadgrađe korištena je metoda konačnih elemenata na razini cijelog pristana kao priznati i točan pristup za strukturnu analizu složenih višepalubnih konstrukcija.

Druga faza projektiranja se sastojala od izrade cijelog modela pristana metodom konačnih elemenata (MKE) na temelju postojećeg CAD modela pristana i preliminarnih dimenzija konstrukcijskih elemenata glavnog rebra. Izrađenu geometriju u programu Rhino prema kojoj je cijeli model bio izrađen, bilo je nužno ubaciti u program FEMAP u kojem se provela izrada modela. Model je izrađen sa Q4 pločastim elementima, trokutastim pločastim elementima i grednim elementima ekscentrične grede sa aksijalnom i savojnom krutošću. Nakon provedenog modeliranja korištenjem programa FEMAP model je prebačen u računalni program MAESTRO u kojemu je provedena strukturna analiza.

Kroz treću fazu projektiranja implementirana su sva opterećenja na plovni pristan. Opterećenja se dijele na globalna i lokalna. Globalna opterećenja su statički i valni vertikalni momenti savijanja, dok su lokalna opterećenja tlakovi na izloženim palubama. Formirana su 3 kritična slučaja opterećenja: dva za maksimalni progib i jedan za maksimalni pregib.

U posljednjoj fazi projektiranja se provela strukturna analiza te redimenzioniranje plovnog pristana. Strukturna analiza se sastojala od analize pomaka, naprezanja i podobnosti. Dobivena aksijalna i smična naprezanja za oplatu i nosače su se uspoređivala sa maksimalnim dopuštenim naprezanjima prema Pravilima HRB-a. Od posebne važnosti je analiza raspodjele uzdužnog naprezanja po visini poprečnog presjeka glavnog rebra pristana. Ta analiza nam daje dobar uvid u to koliko je dobro konstrukcija povezana i koliko se dobro naprezanja prenose s jedne palube na drugu, te kolika je efektivnost gornjih paluba u uzdužnoj čvrstoći broda. Zadnja analiza je bila analiza podobnosti za 3 različita kriterija. Dijelovi konstrukcije koji nisu zadovoljili kriterije podobnosti su bili redimenzionirani u smislu povećanja debljine lima ili krutosti profila ili je dano drugačije podobno rješenje dodavanjem dodatnih konstrukcijskih elemenata.

Provedena strukturna analiza korištenjem globalnog MKE modela cijelog pristana dala je detaljan prikaz svih komponenata naprezanja i predstavlja izvršni numerički laboratorij za racionalno dimenzioniranje složenih tankostijenih plovnih konstrukcija kompleksne geometrije.

LITERATURA

- [1] Croatian Register of Shipping: Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels, Part 2 - Hull and Hull Equipment, July 2021
- [2] <https://www.rhino3d.com/> 18.02.2025
- [3] <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr217-rules-classification-inland-navigation-vessels> 18.02.2025
- [4] <https://www.maestromarine.com/> 18.02.2025
- [5] <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/mechanical-simulation/femap/> 18.02.2025
- [6] Vlada Republike Hrvatske, “Uredba o pristaništima unutarnjih voda,” Narodne novine, 2008.
- [7] <https://www.icat.hr/hr/> 18.02.2025