

Projektiranje konstrukcije plutajuće garaže

Lajtner, Iva Klara

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:423998>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Iva Klara Lajtner

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Iva Klara Lajtner

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Jerolimu Andriću na povjerenju, pruženoj pomoći, uloženom trudu i vremenu koje mi je posvetio tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svim profesorima i asistentima koji su mi uljepšali studij.

Zahvaljujem se obitelji i dečku Robiju na strpljenju, razumijevanju i ljubavi te prijateljima koji su bili uz mene.

Iva Klara Lajtner



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Iva Klara Lajtner**

JMBAG: 0035203439

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje konstrukcije plutajuće garaže**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of floating garage**

Opis zadatka:

Plutajuće garaže su jedno od rješenja za obalne gradove koji nemaju dovoljno parkirnog mjesta duž svoje obale. Na osnovu preliminarno definiranog generalnog plana plutajuće garaže s oko 450 parkirnih mjesta potrebno je projektirati konstrukciju plutajuće garaže pontonskog tipa. U zadatku je potrebno:

- Predložiti topološki koncept jakih poprečnih i uzdužnih nosača, pregrada te upora.
- Za predloženu topologiju, na osnovu preskriptivnih Pravila nekog od relevantnih klasifikacijskih društava (DNV, LR, HRB, itd.), potrebno je dimenzionirati oplatu, orebrenje i upore na osnovu lokalnog opterećenja (vozila, vanjski tlak mora) za sve konstrukcijske elemente dna, oplata, palube, pregrade, itd.
- Preliminarno dimenzionirati konstrukciju palubnog roštilja (palubne sponje i podveze) na osnovu 3D MKE parcijalnog modela koristeći kriterije popuštanja i dozvoljenih progiba.
- Konstrukcijski riješiti i proračunati sve konstrukcijske elemente rampe s koje se ulazi na pojedinu razinu (palubu) plutajuće garaže.
- Za finalnu evaluaciju konstrukcije izgraditi globalni 3D MKE model plovne garaže sa svim prethodno definiranim elementima. Definirati model opterećenja s obzirom na moguća stanja krcanja, te provesti finalni proračun odziva (naprezanja, pomaci) i podobnosti s obzirom na kriterij popuštanja i izvijanja koristeći program MAESTRO dostupan na FSB-u.
- Izraditi osnovne klasifikacijske nacрте predložene konstrukcije.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

11. studenoga 2021.

13. siječnja 2022.

17. – 21. siječnja 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Jerolim Andrić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Postojeći projekti plutajućih parkirnih objekata	2
1.2. Cilj rada.....	3
2. OPĆI PLAN PLUTAJUĆE GARAŽE	4
2.1. Organizacija mjesta za parkiranje i širine ceste	4
2.2. Organizacija prometnih tokova i rampi	5
2.3. Konačni opći plan	9
3. TOPOLOŠKI KONCEPT KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA I PROJEKTNI POSTUPAK.....	13
4. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PREMA PRAVILIMA DNV-a.....	17
4.1. Definicija opterećenja	17
4.1.1. Opterećenje od kotača.....	17
4.1.2. Opterećenje od vanjskog tlaka mora.....	18
4.2. Korozijski dodaci	18
4.3. Dimenzioniranje limova i profila teretnih paluba	19
4.4. Dimenzioniranje limova boka garaže	20
4.5. Dimenzioniranje limova i profila unutarnje rampe.....	21
4.6. Dimenzioniranje limova i profila uzgonskih pontona.....	21
5. STRUKTURNA ANALIZA I REPROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA.....	23
5.1. Kriteriji podobnosti	23
5.2. Korozijski odbici.....	25
5.3. Parcijalni MKE model plutajuće garaže	26
5.3.1. Izrada modela.....	26
5.3.2. Rubni uvjeti.....	27
5.3.3. Slučajevi opterećenja i implementacija	29
5.3.4. Dimenzioniranje konstrukcije	31
5.3.4.1. Slučaj opterećenja LC1	31
5.3.4.2. Slučaj opterećenja LC2	35
5.3.4.3. Slučaj opterećenja LC3	40
5.4. MKE model unutarnje rampe.....	43
5.4.1. Izrada modela.....	43

5.4.2.	Rubni uvjeti.....	44
5.4.3.	Slučaj opterećenja i implementacija	44
5.4.4.	Dimenzioniranje konstrukcije	45
5.5.	Globalni MKE model plutajuće garaže.....	47
5.5.1.	Izrada modela.....	47
5.5.2.	Rubni uvjeti.....	49
5.5.3.	Slučajevi opterećenja i implementacija	49
5.5.4.	Dimenzioniranje konstrukcije	53
5.5.4.1.	Dimenzioniranje uzgonskih pontona	53
5.5.4.2.	Dimenzioniranje prve palube	58
5.5.4.3.	Dimenzioniranje druge palube i boka garaže do druge palube.....	61
5.5.4.4.	Dimenzioniranje treće palube i boka garaže između druge i treće palube ..	66
5.5.4.5.	Dimenzioniranje krova garaže i boka između treće palube i krova.....	70
5.5.5.	Masa i položaj težišta.....	75
6.	ZAKLJUČAK.....	76
	LITERATURA.....	77
	PRILOZI.....	78

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz projekta plutajućih objekata u Puli [1]	2
Slika 2.	Prikaz plutajućeg garažnog objekta tvrtke MacGregor [3]	3
Slika 3.	Dimenzije okomitih i kosih mjesta za parkiranje [4]	4
Slika 4.	Usporedba parkirališta s pravokutnim i kosim razmještajem parkirnih mjesta	5
Slika 5.	Plan garaže s dvosmjernom vanjskom rampom	6
Slika 6.	Plan garaže s jednosmjernom vanjskom rampom	7
Slika 7.	Plan garaže s unutarnjom suprotnom rampom	8
Slika 8.	Prikaz 1. etaže u konačnom općem planu [5].....	10
Slika 9.	Prikaz 2. etaže u konačnom općem planu [5].....	11
Slika 10.	Prikaz 3. etaže u konačnom općem planu [5].....	12
Slika 11.	Dijagram toka projektiranja.....	13
Slika 12.	Shematski prikaz poprečnog presjeka plutajuće garaže	14
Slika 13.	Topologija konstrukcijskih elemenata unutarnje rampe	15
Slika 14.	Topologija konstrukcijskih elemenata teretne palube	16
Slika 15.	Parcijalni MKE model plutajuće garaže.....	27
Slika 16.	Grafički prikaz rubnih uvjeta parcijalnog modela.....	28
Slika 17.	Slučaj opterećenja LC1	29
Slika 18.	Slučaj opterećenja LC2, uron pontona	30
Slika 19.	Implementacija tlaka od kotača na prvu etažu za slučaj opterećenja LC3	30
Slika 20.	Deformacije za slučaj opterećenja LC1.....	31
Slika 21.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panel za LC1	32
Slika 22.	Naprezanja u grednim elementima.....	33
Slika 23.	Naprezanja u grednim elementima.....	33
Slika 24.	Aksijalna i savojna naprezanja u uporama	34
Slika 25.	Deformacije uzgonskih pontona za slučaj opterećenja LC1	36
Slika 26.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panel za LC2	36
Slika 27.	Naprezanja u grednim elementima središnjeg pontona.....	37
Slika 28.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor središnjeg pontona	38
Slika 29.	Naprezanja u grednim elementima bočnog pontona	39
Slika 30.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor bočnog pontona.....	39
Slika 31.	Deformacije prve palube za slučaj opterećenja LC3	41
Slika 32.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele za LC3	41
Slika 33.	Naprezanja u grednim elementima prve palube	42
Slika 34.	MKE model unutarnje rampe	43
Slika 35.	Grafički prikaz rubnih uvjeta MKE modela unutarnje rampe.....	44
Slika 36.	Slučaj opterećenja LC1 za dimenzioniranje elemenata unutarnje rampe.....	45
Slika 37.	Deformacije unutarnjih rampi	45
Slika 38.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panel rampe	46
Slika 39.	Naprezanja u grednim elementima rampi	46
Slika 40.	Globalni MKE model plutajuće garaže	47
Slika 41.	Prikaz modeliranih dodatnih konačnih elemenata.....	48
Slika 42.	Grafički prikaz rubnih uvjeta globalnog MKE modela plutajuće garaže.....	49
Slika 43.	Slučaj opterećenja LC1, uron pontona	50
Slika 44.	Implementacija tlaka od kotača na prvu etažu za slučaj opterećenja LC2	50

Slika 45.	Deformacije uzgonskih pontona globalnog MKE modela za LC7	53
Slika 46.	Pojačani dijelovi oplate i interkostalne ukrepe.....	54
Slika 47.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele uzgonskih pontona za LC7	54
Slika 48.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele uzgonskih pontona za LC6	55
Slika 49.	Naprezanja u grednim elementima na sredini središnjeg pontona za LC7	56
Slika 50.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor u središnjeg pontona za LC7	56
Slika 51.	Naprezanja u grednim elementima na sredini bočnog pontona za LC7	57
Slika 52.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor u bočnog pontona za LC7	57
Slika 53.	Deformacija prve palube globalnog MKE modela za LC8	59
Slika 54.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele prve palube za LC8.....	59
Slika 55.	Naprezanja u grednim elementima palube 1 globalnog modela	60
Slika 56.	Deformacija druge palube globalnog MKE modela za LC10.....	62
Slika 57.	Prikaz bruto debljina palube 2 i boka do palube 2	62
Slika 58.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele druge palube za LC10.....	62
Slika 59.	Maksimalna naprezanja u podvezi palube 2 za LC10.....	63
Slika 60.	Maksimalna naprezanja u sponji palube 2 za LC11	64
Slika 61.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor u na prvoj palubi	64
Slika 62.	Deformacija treće palube globalnog MKE modela za LC12	66
Slika 63.	Prikaz bruto debljina palube 3 i boka do palube 3	66
Slika 64.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele treće palube za LC12.....	67
Slika 65.	Maksimalna naprezanja u podvezi palube 3 za LC13.....	68
Slika 66.	Maksimalno naprezanje u okvirnom rebru boka između palube 2 i 3 za LC12....	68
Slika 67.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor u na drugoj palubi za LC13...	69
Slika 68.	Deformacija krova garaže globalnog MKE modela za LC14	71
Slika 69.	Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele krova garaže za LC14	71
Slika 70.	Maksimalna naprezanja u podvezi krova za LC15	72
Slika 71.	Maksimalna naprezanja u okvirnim rebrima boka između palube 3 i krova za LC14.....	73
Slika 72.	Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za upor u na trećoj palubi za LC15	73
Slika 73.	Masa i položaj težišta globalnog MKE modela.....	75

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osovinsko opterećenje vozila, otisci kotača i homogeno opterećenje	18
Tablica 2. Prikaz debljina i profila dobivenih prema pravilima [6]	22
Tablica 3. Dopuštena naprezanja konstrukcijskih elemenata prema pravilima [8].....	23
Tablica 4. Kriteriji podobnosti za panel prema programu MAESTRO	24
Tablica 5. Korozijski dodaci definirani u programu MAESTRO	25
Tablica 6. Šifrirani zapis rubnih uvjeta simetrije na krajevima modela.....	27
Tablica 7. Rubni uvjeti simetrije u simetralnoj ravnini	28
Tablica 8. Odabrane debljine oplata garaže	32
Tablica 9. Proračun izvijanja za upore garaže.....	34
Tablica 10. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata garaže	35
Tablica 11. Odabrane debljine oplata pontona	37
Tablica 12. Proračun izvijanja za uporu središnjeg pontona.....	38
Tablica 13. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata pontona.....	40
Tablica 14. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 1	42
Tablica 15. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata rampe.....	47
Tablica 16. Sažetak slučajeva opterećenja LC1 – LC5 s opterećenjima.....	51
Tablica 17. Sažetak slučajeva opterećenja za globalni model.....	52
Tablica 18. Odabrane konačne debljine oplata pontona.....	55
Tablica 19. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata pontona.....	58
Tablica 20. Odabrane konačne debljine oplata palube 1	60
Tablica 21. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 1	61
Tablica 22. Odabrane konačne debljine oplata palube 2 te boka garaže.....	63
Tablica 23. Proračun izvijanja za upore na prvoj palubi	65
Tablica 24. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 2.....	65
Tablica 25. Odabrane konačne debljine oplata palube 3 te boka garaže.....	67
Tablica 26. Proračun izvijanja za upore na drugoj palubi	69
Tablica 27. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 3.....	70
Tablica 28. Odabrane konačne debljine krova garaže te boka garaže.....	72
Tablica 29. Proračun izvijanja za upore na trećoj palubi	74
Tablica 30. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata krova	74

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1 Glavno rebro

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
p_{wl-1}	kN/m^2	Tlak od kotača za uvjete u luci
Q	t	Maksimalno osovinsko opterećenje
n_o	-	Broj opterećenih površina po osovini
a_1	mm	Dimenzija otiska kotača paralelna s ukrepama
b_1	mm	Dimenzija otiska kotača okomita na ukrepe
g	m/s^2	Ubrzanje zemljine sile teže
p_s	kN/m^2	Tlak od mora
ρ	t/m^3	Gustoća morske vode
T_{LC}	m	Visina do gaza na mirnoj vodnoj liniji
t_c	mm	Korozijski dodatak
t	mm	Debljina oplata
a	-	koeficijent
b	-	koeficijent
L_2	m	Proračunska duljina
α_p	-	Omjer širine i duljine panela
k_w	-	Koeficijent
c	mm	Širina opterećenja
b	mm	Širina panela
m	-	Koeficijent momenta savijanja
C_a	-	Koeficijent dopuštenog naprezanja za oplatu
β_a	-	Koeficijent
α_a	-	Koeficijent
σ_{hg}	N/mm^2	Primarno naprezanje
R_{eH}	N/mm^2	Granica razvlačenja
Z	cm^3	Zahtijevani moment otpora profila
k_z	-	Koeficijent
d	mm	Duljina opterećenja
l_{bdg}	m	Nepoduprti raspon ukrepa
C_s	-	Koeficijent dopuštenog naprezanja za profile
β_s	-	Koeficijent
α_s	-	Koeficijent
σ_a	N/mm^2	Dopušteno naprezanje
f_l	-	Koeficijent materijala
f_u	-	Koeficijent koji uzima u obzir nesimetričnost profila
s	mm	Razmak između ukrepa

f_{bdg}	-	Koeficijent momenta savijanja
g	-	Faktor podobnosti
C	N/mm^2	Izdržljivost
γ	-	Faktor sigurnosti
D	N/mm^2	Zahtjev
η	-	Ostvareni faktor iskoristivosti za izvijanje
η_{all}	-	Dopušteni faktor iskoristivosti za izvijanje
$\sigma_{x,FEM}$	N/mm^2	Očitano aksijalno naprezanje u KE
σ_{kr}	N/mm^2	Kritično naprezanje
σ_{EC}	N/mm^2	Elastično tlačno naprezanje
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
f_{END}	-	Faktor upetosti krajeva
I	cm^3	Moment tromosti profila
A	cm^3	Površina presjeka profila
l_{pill}	m	Duljina upore
f	mm	Dozvoljeni progib
b_s	mm	Najveći nepoduprti raspon nosača
h_w	mm	Visina struka profila
t_w	mm	Debljina struka profila
b_f	mm	Širina pojasa profila
t_f	mm	Debljina pojasa profila

SAŽETAK

Cilj ovog rada je projektiranje konstrukcije plutajuće garaže prema pravilima klasifikacijskog društva Det Norske Veritas (DNV-a).

U konceptualnoj fazi je na temelju kratke studije optimalnog planiranja garaže s obzirom na iskoristivost raspoložive površine izrađen opći plan garaže koji je poslužio kao temelj za definiranje topologije jakih poprečnih i uzdužnih nosača, pregrada te upora. Završno je, za predloženu topologiju, proveden proračun konstrukcijskih elemenata teretnih paluba, pontona i rampi na osnovu lokalnog opterećenja prema pravilima.

U preliminarnoj fazi je izrađen parcijalni model plutajuće garaže korištenjem metode konačni elemenata (MKE) u programu MAESTRO na osnovu kojeg je provedeno inicijalno dimenzioniranje svih elemenata koristeći kriterije popuštanja, izvijanja i dozvoljenih progiba.

Zatim je provedena strukturna analiza odziva unutarnjih rampi na temelju zasebnog MKE modela te dimenzioniranje pripadajućih konstrukcijskih elemenata s obzirom na kriterije podobnosti i dozvoljenih progiba.

U završnoj fazi je na temelju dimenzija dobivenih odzivom parcijalnog MKE modela izrađen globalni MKE model plutajuće garaže. Definirani su modeli opterećenja s obzirom na kritična stanja krcanja, a to je potpuno ispunjena garaža te je proveden finalni proračun odziva i redimenzioniranje nepodobnih elemenata s obzirom na kriterije podobnosti.

Ključne riječi: plutajuća garaža, projektiranje konstrukcije, DNV pravila, MKE model, stanja krcanja, kriteriji podobnosti

SUMMARY

The objective of this thesis is structural design of floating garage in accordance with the rules of Det Norske Veritas classification society (DNV).

In the concept phase, based on a brief study of garage optimal planning regarding the maximum utilization of parking space, general arrangement plan of garage was made on which topological positions of primary supporting members, bulkheads and pillars were developed. Finally, for the proposed topology, the calculation of structural elements of cargo decks, pontoons and ramps, considering local scantlings, was performed according to the rules.

In the preliminary phase the partial model of the floating garage with finite element method (FEM) was created in software MAESTRO in order to perform initial scantling determination of all elements considering the yield and buckling strength criteria and permissible deflection.

Then, the structural analysis of internal ramps was performed on the basis of separate FEM model and scantlings of associated structural elements with regard to the adequacy criteria and permissible deflections were determined.

In the final phase, on the basis of scantlings obtained by the response of partial FEM model, global FEM model of floating garage was created. According to critical loading conditions, which is full loaded garage with vehicles, final calculation of structural response was carried out and inadequate elements were resized in order to meet all the structural adequacy criteria.

Key words: floating garage, structural design, DNV rules, FEM model, loading condition, adequacy criteria

1. UVOD

U mnogim gradovima na hrvatskoj obali veliki problem predstavlja ograničenost kapaciteta koji se posebice očituje u vrijeme ljetne sezone kada infrastrukture starih gradova teško podnose prenapučenost. Stoga i bezvrijedna, popratna aktivnosti kao pronalazak parkinga često postaje zahtjevna, izdvaja puno vremena i preskupa, kako za turiste tako i za stanovnike. Potražnja za parkirnim mjestima na obali znatno je veća od ponude i prostora za izgradnju garaža je malo. Nedostatak zemljišta ili visoka cijena istih u gradovima na obali onemogućava da se parkirališni kapaciteti povećaju izgradnjom parkirališta na kopnu.

Alternativno rješenje za manjak parkinga pronalazi se u plutajućim garažama. Parkirni prostor bi na taj način bio izmješten iz gužve gradskih jezgri na obalu, u neiskorištena područja. Plutajuće garaže su autonoman, mobilan, ekonomičan, vizualno prilagodljiv i novčano produktivan proizvod.

Prednosti uporabe plutajuće garaže u gradovima:

- rasterećenje prometne gužve u gradskoj jezgri
- iskorištenje cjenovno prihvatljivih i neupotrijebljenih vodenih područja
- kao mobilan objekt može biti privremeno rješenje koje se premjesti po potrebi
- lokacija se može prilagoditi prema željenoj blizini turističkim lokacijama, poslovnim i trgovačkim objektima, stadionima...

Plutajuće garaže mogu poslužiti kao brzo dostupan privremen parkirni prostor za potrebe održavanja većeg događanja kao utakmice ili koncerta.

Projektiranje plutajuće garaže daje veću slobodu planiranja prometa od projektiranja garaže na kopnu. Pri planiranju garaža na kopnu potrebno je uklopiti prometne tokove u postojeću okolnu prometnu mrežu kako prometno opterećenje generirano garažom ne bi stvaralo zastoje. A i sama gradnja objekta odvija se u brodogradilištu i time ne stvara buku i zastoje koje stvara gradnja fiksne garaže.

Kapaciteti plutajućih garaža mogu biti različiti, od 300 do 800 parkirnih mjesta, ovisno o potrebama i zahtjevima gradova. Isto tako, dizajn može biti raznovrstan i prilagođen određenoj lokaciji. A sama pojava i mogućnost parkiranja u plutajućoj garaži može biti turistička atrakcija za sebe.

1.1. Postojeći projekti plutajućih parkirnih objekata

Hrvatski gradovi, Pula i Rijeka, pokazali su interes za projektom plutajućih objekata kao parkirališnim objektima, no iako su te ideje stare preko 20 godina, ovakav projekt nije realiziran u nijednom gradu. U Puli se čak razmatrala ideja o gradnji cijelog urbanističkog područja od pontona na kojima bi bili smješteni različiti sadržaji kao bazen, kazalište, klub i garaža za prihvata 500 automobila [Slika 1]. Plutajuća garaža bi mogla mijenjati svoju poziciju u skladu s potrebama, pa bi bila smještena ili uz gradsku jezgru ili uz Arenu za vrijeme većih događanja.



Slika 1. Prikaz projekta plutajućih objekata u Puli [1]

Brodogradilište Viktor Lenac je također prije 20-ak godina prepoznalo projekt plutajuće garaže kao rješenje za kroničnu nestašicu parkinga u gradu Rijeci. Ideja je bila prenamijeniti dok u njihovom posjedu na prostoru riječke luke u plutajuću garažu s 1020 parkirnih mjesta. [2]

Tvrtka MacGregor razradila je kompletan projekt plutajuće garaže, više-etažni fleksibilan objekt s malim gazom projektiran za prihvata od 400 do 800 automobila. Plutajući objekt je dizajniran na način da maksimalno iskoristi prostor i da ima jednostavan sistem kretanja garažom i pronalazjenja slobodnih mjesta. Izrađen je od nehrđajućeg čelika te stoga ne zahtjeva održavanje 20 godina. [Slika 2]



Slika 2. Prikaz plutajućeg garažnog objekta tvrtke MacGregor [3]

1.2. Cilj rada

Cilj ovog rada je na osnovu preliminarno definiranog generalnog plana plutajuće garaže s oko 450 parkirnih mjesta projektirati konstrukcije plutajuće garaže pontonskog tipa koristeći Pravila klasifikacijskog društva DNV.

2. OPĆI PLAN PLUTAJUĆE GARAŽE

Planiranje garaže obuhvaća određivanje broja etaža, rasporeda i položaja parkirnih mjesta, širinu cestovnih traka, organizaciju prometnog toka s unutarnjim rampama za kretanje između etaža i definiranje vanjske rampe. U svrhu određivanja optimalne iskoristivosti raspoložive parkirne površine i jednostavnosti prilikom vožnje garažom, razmatrano je više mogućih verzija prikazanih u nastavku.

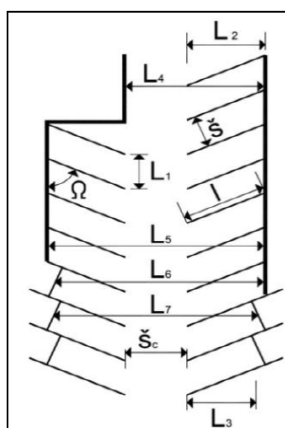
2.1. Organizacija mjesta za parkiranje i širine ceste

Osnovni tipovi oblikovanja mjesta za parkiranje su pravokutna izvedba, kosa izvedba i kombinirana izvedba [4].

Pravokutna mjesta su ona koja su položena pod kutom od 90° u odnosu na os prometnice. Prednost okomitog parkiranja je mogućnost ulaska na mjesto iz oba smjera. Nedostatak kod takvog načina parkiranja je velika zahtijevana širina prilazne ceste zbog potrebe za većim manevarskim prostorom prilikom ulaska i izlaska iz mjesta.

Kod kose izvedbe mjesta, vozila ulaze na parkirno mjesto pod određenim kutom u odnosu na smjer kretanja koji može iznositi 45° , 54° , 63° , 72° i 81° [4]. Prednost kosog parkiranja je jednostavnost ulaska u mjesto što omogućava neometano odvijanje prometa, no nedostatak je što u mjesto nije moguće ući iz oba smjera kretanja.

Širina ceste i dimenzije mjesta za parkiranje su zavisne o kutu parkiranja. Povećanjem kuta ulaska s 45° na 90° povećava se zahtijevanja širina ceste s 3 metra na 6 metara. Isto tako, osnovna duljina parkirnog mjesta opada s 6,86 metara na 5 metara. [Slika 3]

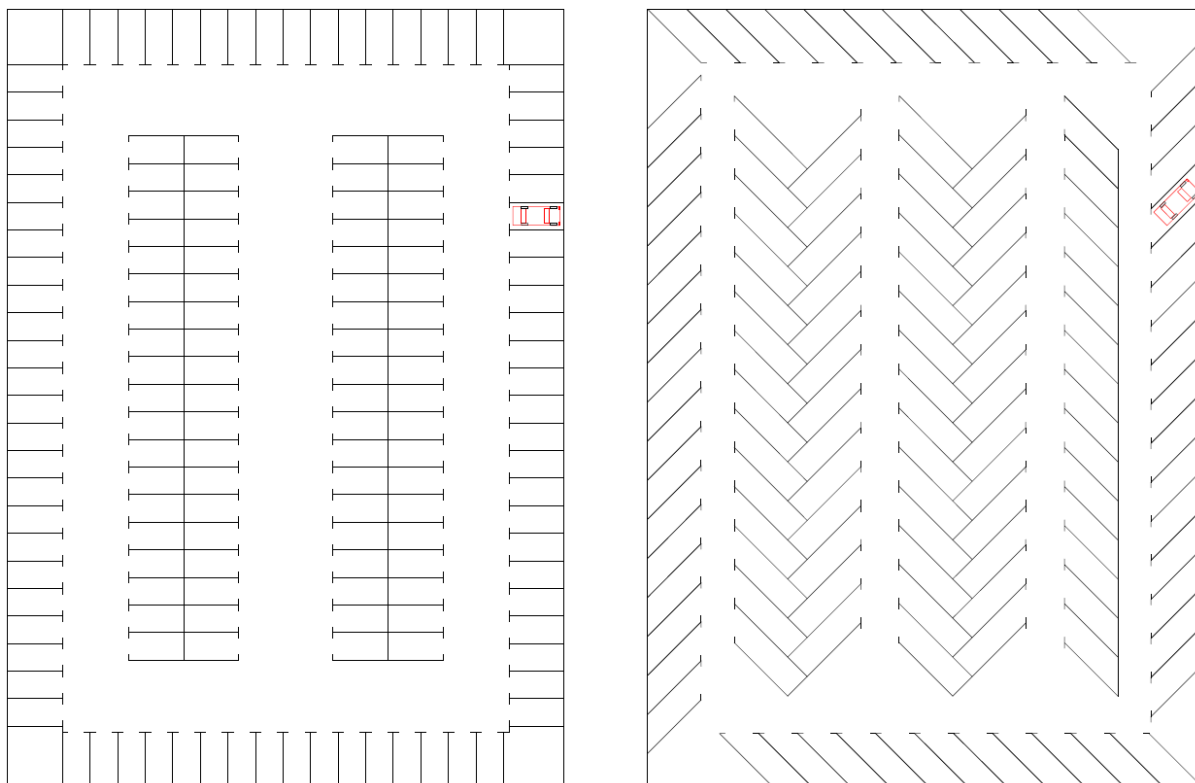


Ω - kut parkiranja($^\circ$)	45	54	63	72	81	90
\check{s} - osnovna širina p.m. - m	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
l - osnovna duljina p.m. - m	6,86	6,37	5,95	5,63	5,32	5
\check{s}_c - širina ceste (jednosmjerna)	3	3,5	4	4,5	5,25	6
\check{s}_c - širina ceste (dvosmjerna)	3	3,5	4	4,5	5,25	6
L_1 - m	3,54	3,09	2,81	2,63	2,53	2,5
L_2 - m	4,85	5,15	5,3	5,35	5,25	5
L_3 - m	3,97	4,42	4,73	4,97	5,06	5
L_4 - m (jednosmjerno)	7,85	8,65	9,3	9,85	10,5	11
L_5 - m (jednosmjerno)	12,7	13,81	14,6	15,21	15,76	16
L_6 - m (jednosmjerno)	11,82	13,07	14,04	14,82	15,56	16
L_7 - m (jednosmjerno)	10,93	12,34	13,47	14,44	15,37	16
L_4 - m (dvosmjerno)	7,85	8,65	9,3	9,85	10,5	11
L_5 - m (dvosmjerno)	12,7	13,81	14,6	15,21	15,76	16
L_6 - m (dvosmjerno)	11,82	13,07	14,04	14,82	15,56	16
L_7 - m (dvosmjerno)	10,93	12,34	13,47	14,44	15,37	16

Slika 3. Dimenzije okomitih i kosih mjesta za parkiranje [4]

Kako bi se utvrdila optimalna izvedba s obzirom na iskoristivost raspoložive površine, izrađena su dva rješenja. Jedno s okomitim mjestima i širinom ceste od 6 m i drugo s kosim mjestima

pod kutom od 45° i širinom ceste od 3 m. Osnovne dimenzije parkirnog mjesta su 2,5 m širine i 5 m duljine, no kod kosih mjesta duljina ovisna o kutu ulaska postaje 6,86 m [Slika 4].



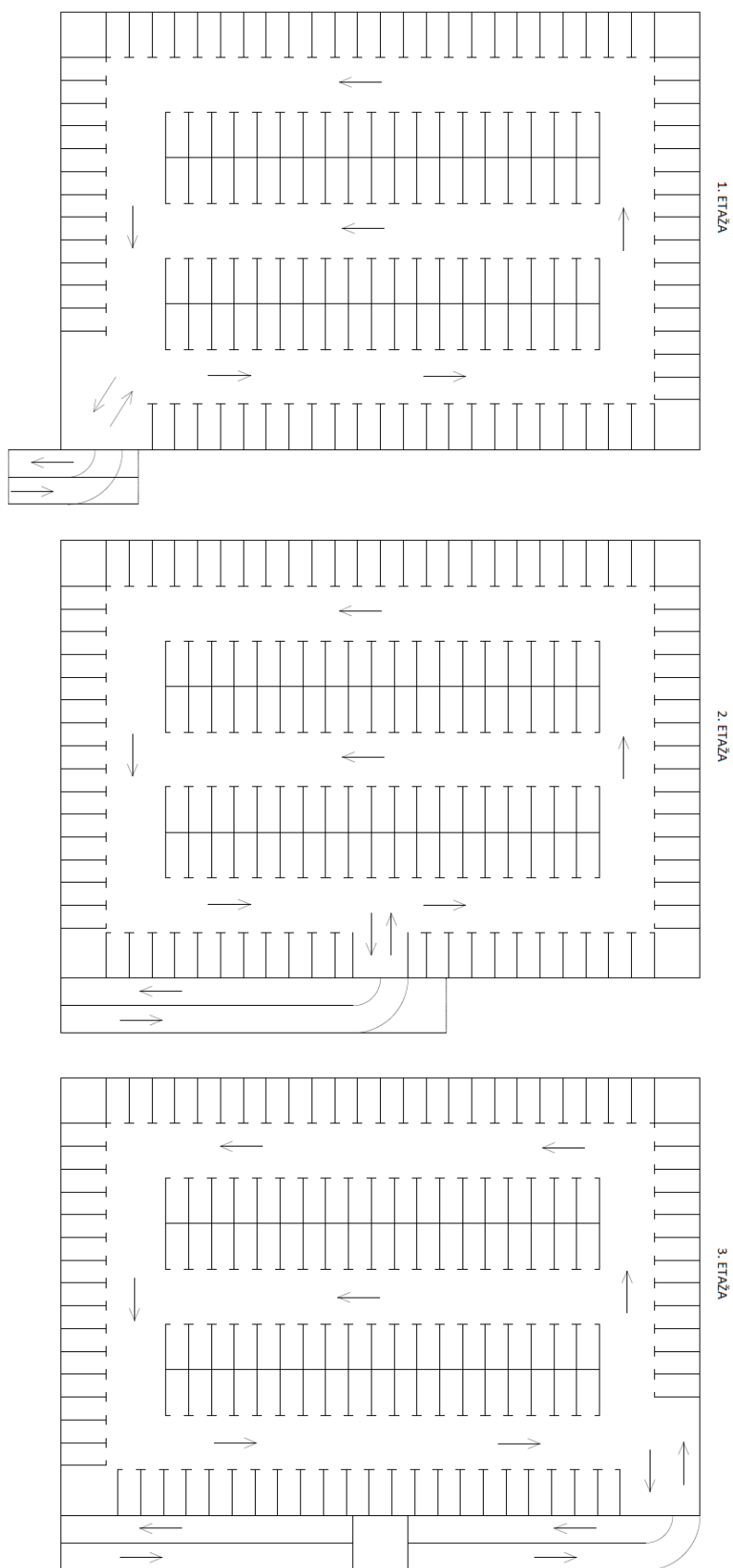
Slika 4. Usporedba parkirišta s pravokutnim i kosim razmještajem parkirnih mjesta

Premda manja širina ceste ostavlja prostora za još jedan red mjesta kod kosog parkiranja te daje ukupno 122 mjesta, veći broj mjesta dobije se s pravokutnim mjestima te iznosi 156 mjesta. Stoga su okomita mjesta odabrana kao optimalna za maksimalnu iskoristivost površine plutajuće garaže od 50 m širine i 70 m duljine.

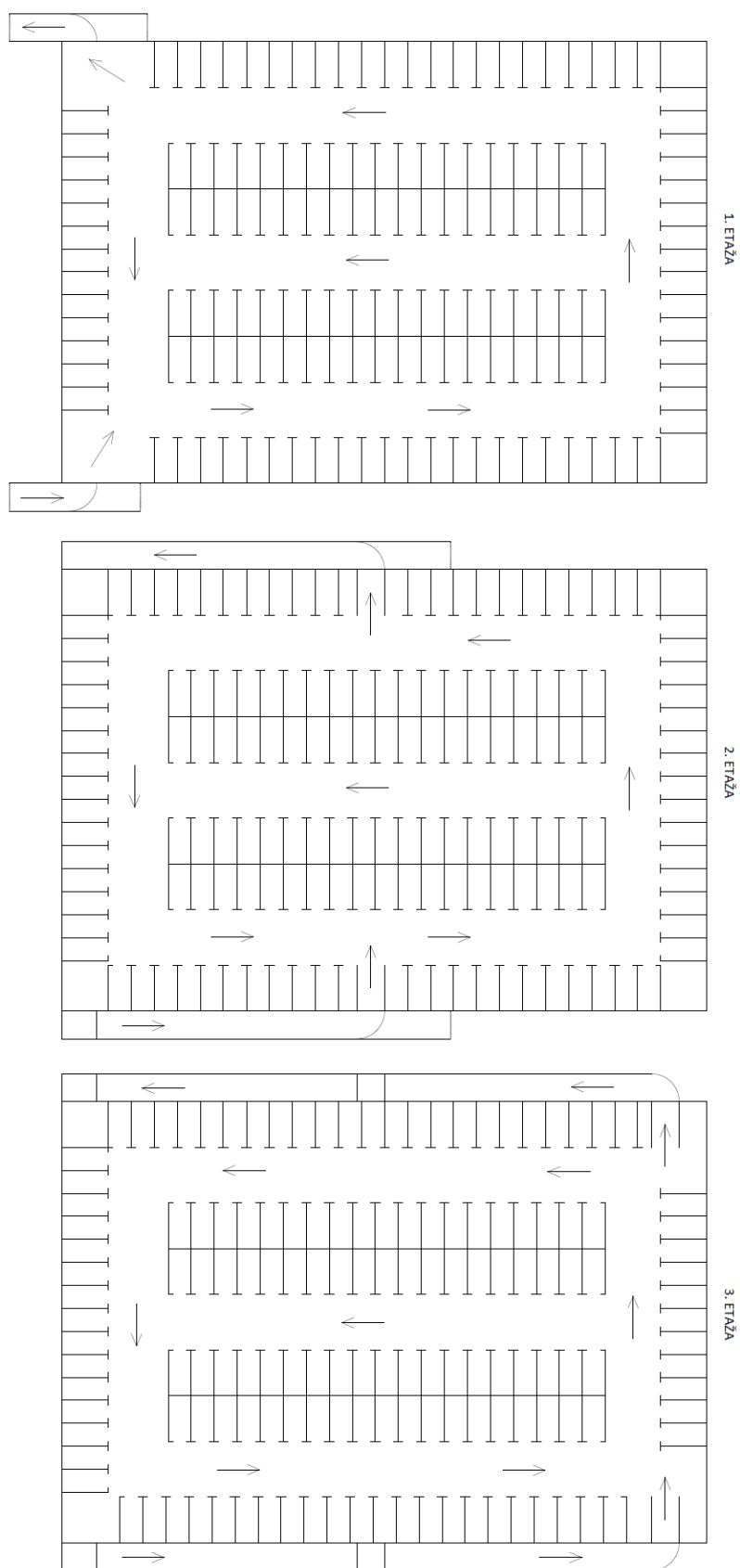
U svrhu ispunjenja projektnog zadatka u vidu smještaja oko 450 automobila, izabrana je garaža na tri nivoa od kojih je tlocrtna površina svakog nivoa (palube) oko 3500 m².

2.2. Organizacija prometnih tokova i rampi

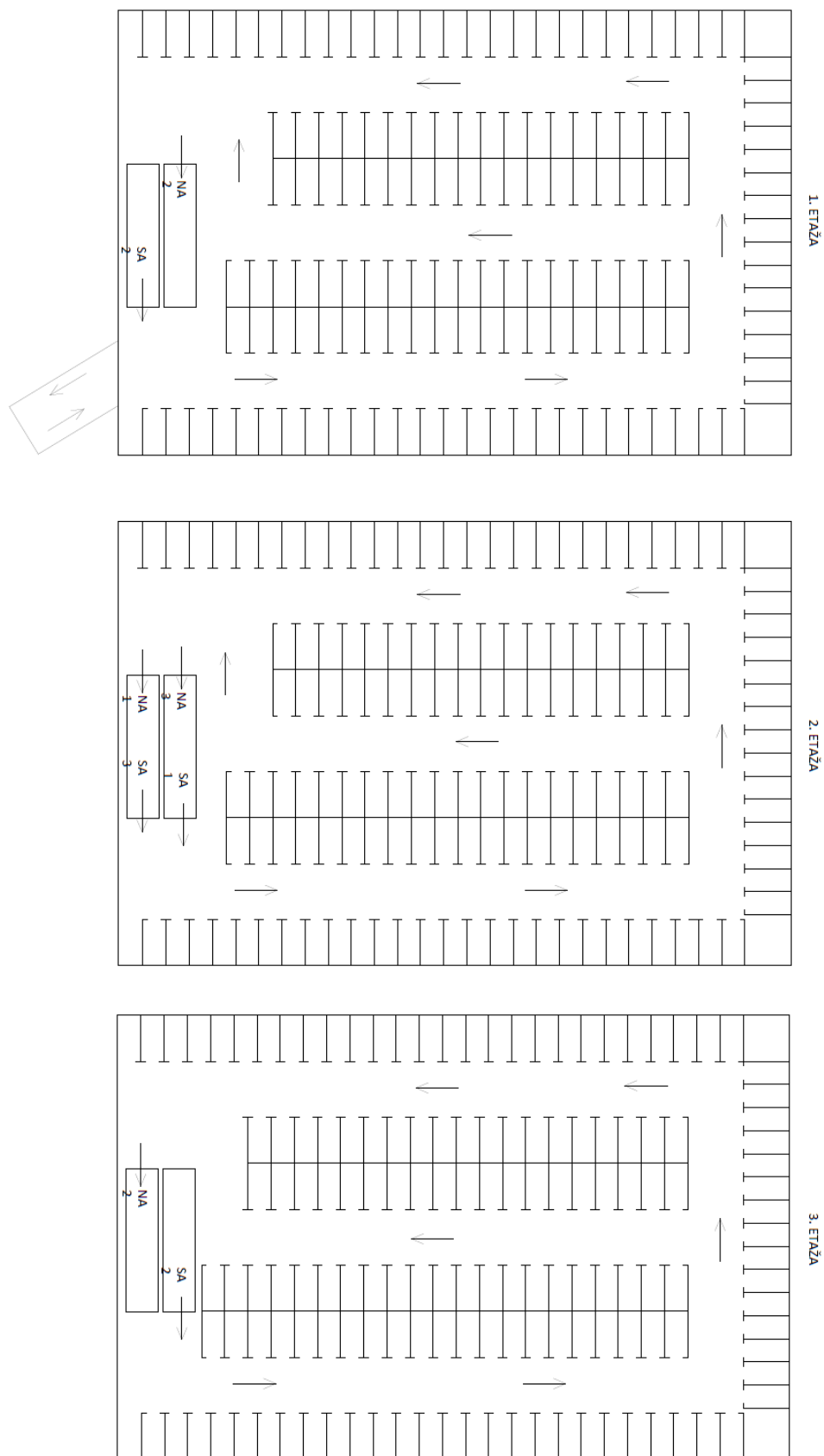
Zbog jednostavnosti, lakšeg snalaženja u garaži i pronalaska mjesta za potrebe provedbe kratke studije s ciljem utvrđivanja optimalnog plana, odabrane su jednosmjerne ceste. Za kretanje s jednog nivoa garaže na drugi, razmatrane su vanjska dvosmjerna rampa, vanjska jednosmjerna rampa i unutarnja suprotna rampa [Slika 5, Slika 6 i Slika 7].



Slika 5. Plan garaže s dvosmjernom vanjskom rampom



Slika 6. Plan garaže s jednosmjernom vanjskom rampom



Slika 7. Plan garaže s unutarnjom suprotnom rampom

Rampe smještene izvan moguće parkirne površine ostavljaju više prostora za parkirna mjesta i čine garažu atraktivnom za potrošače. Garaža s vanjskom dvosmjernom rampom može prihvatiti ukupno 452 osobna vozila [Slika 5], a garaža s vanjskom jednosmjernom rampom za kretanje između etaža ima kapacitet od ukupno 448 vozila [Slika 6].

Klasične unutarnje rampe u pravcu mogu biti paralelnog sustava, gdje su uzlazna i silazna rampa paralelne te suprotnog sustava s uzlaznom rampom suprotnog nagiba od silazne [4]. Unutarnje rampe suprotnog sustava omogućavaju jednostavnu organizaciju jednosmjernog kretanja, dobru protočnost kroz garažu, pa su s toga i najčešće primjenjivani oblici rampi u garažama. Garaža s unutarnjim suprotnim rampama može prihvatiti ukupno 420 osobnih vozila [Slika 7].

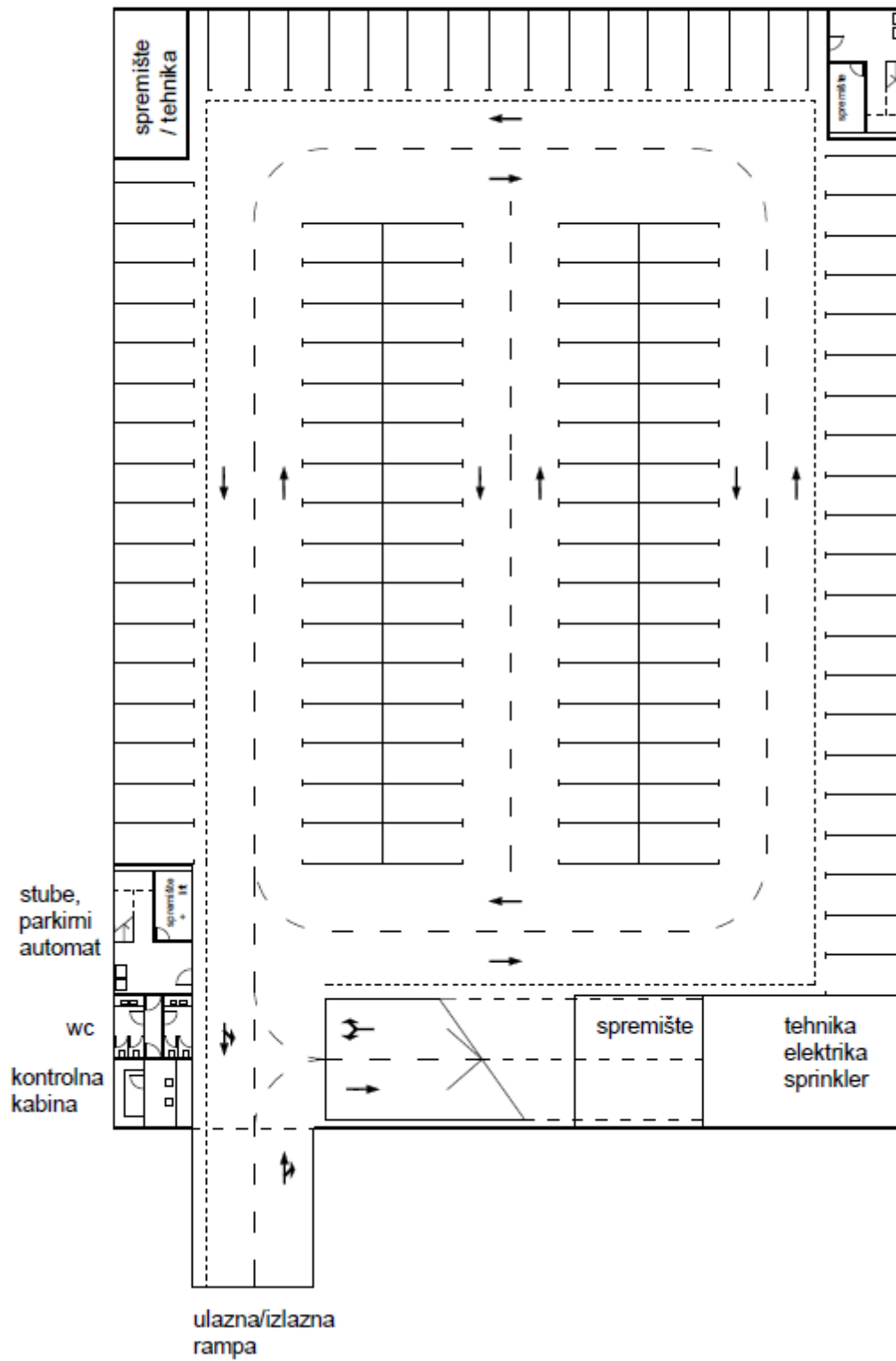
Iz prethodno donesenih činjenica se vanjske rampe čine pogodnijima od unutarnje, međutim, problematika dvosmjerne vanjske rampe je u konstrukciji koja će ju podržati. Potporna podstruktura rampe širine minimalno 6 metara morala bi biti izrazito robusna zbog nemogućnosti oslanjana na nosive stupove. Rješenje bi moglo biti u jednosmjernoj vanjskoj rampi gdje bi uzlazna rampa bila na desnoj strani, a silazna na lijevoj strani plutajuće garaže, što znači da bi imala duplo manji nepoduprti raspon. Veliki nedostatak takve rampe je u njenom povezivanju s prilaznim prometnicama. U tom slučaju bi se morao osigurati prostor od 50 metara na rivi ispred garaže za prilaznu i odlaznu cestu, što u većini riva ili luka nije moguće. Stoga je za daljnju razradu općeg plana u projektu osnivanja plutajuće garaže [5] odabran opći plan koji odgovara općem planu garaže s unutarnjom suprotnom rampom kao polazište [Slika 7].

2.3. Konačni opći plan

Konačni opći plan plutajuće garaže [Slika 8, Slika 9 i Slika 10] izradio je Luka Erhardt u sklopu svog diplomskog rada [5].

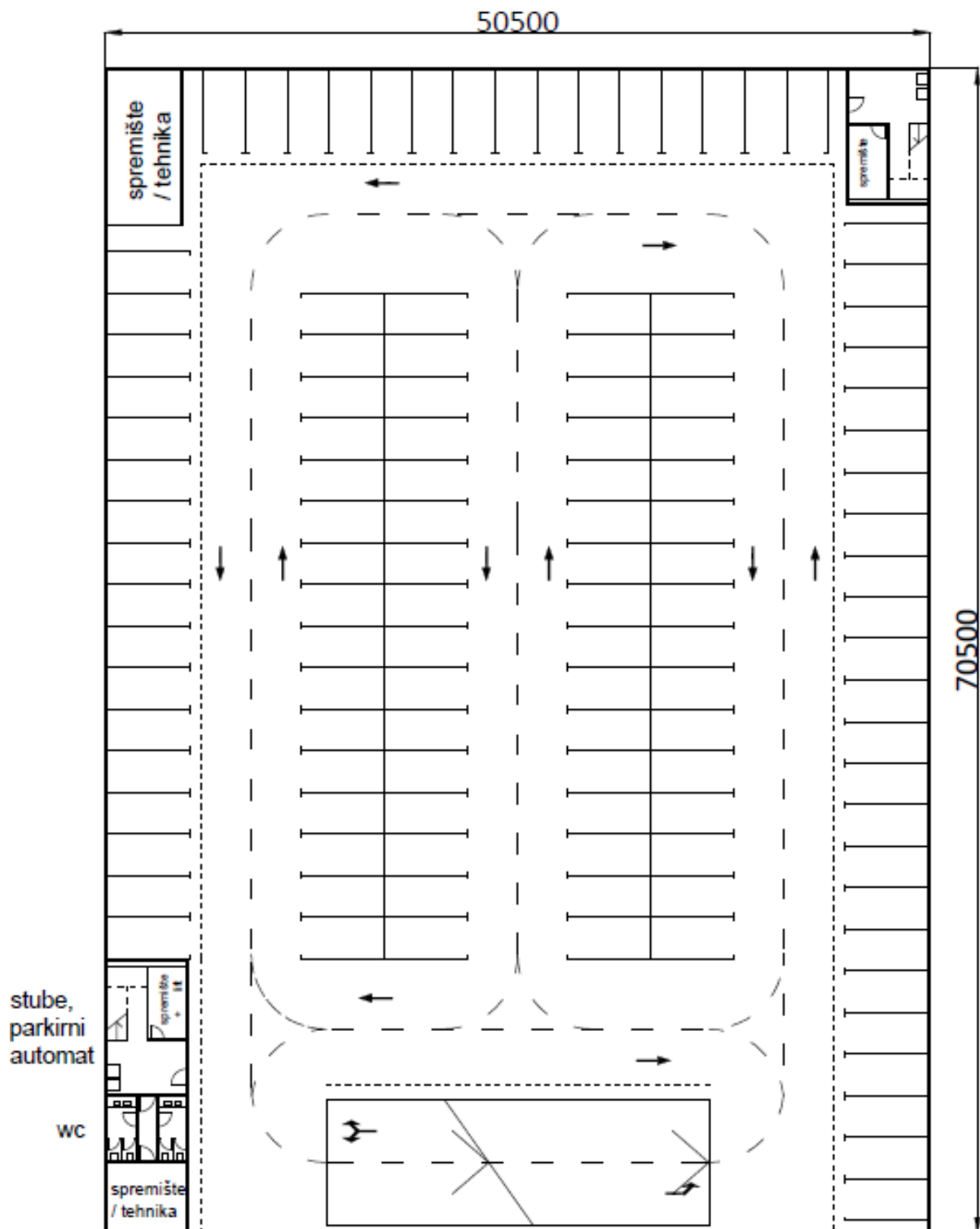
Završno je odabrana unutarnja rampa paralelnog sustava. Raspored mjesta nije promijenjen izuzev smanjenja broja mjesta uslijed smještaja neophodnih objekata kao sanitetskog čvora, spremišta, kontrolne kabine, stubišta itd. Konačne dimenzije garaže su 70,5 m duljine te 50,5 m širine.

ETAŽA 1
121 garažnih parkirnih mjesta



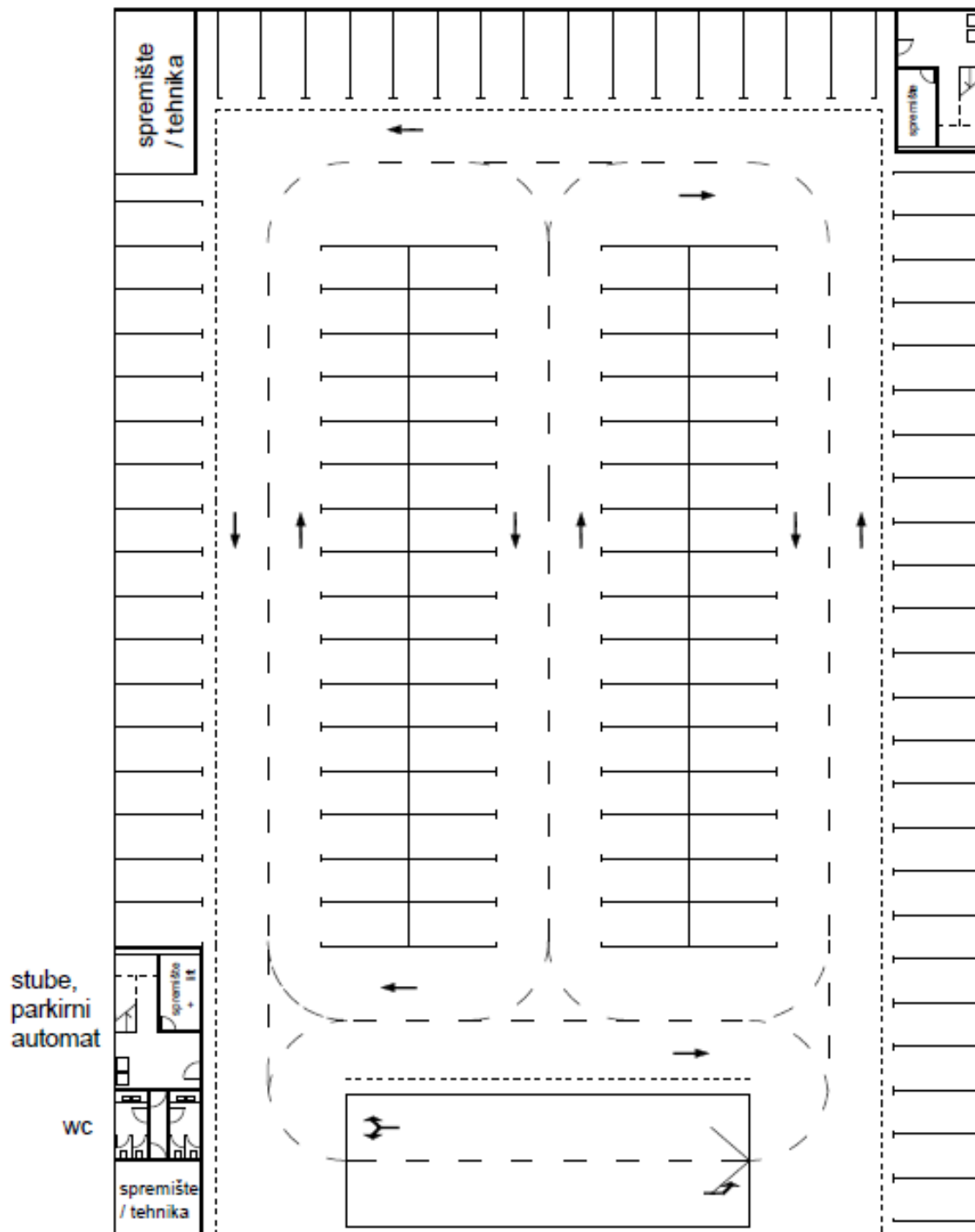
Slika 8. Prikaz 1. etaže u konačnom općem planu [5]

ETAŽA 2 120 garažnih parkirnih mjesta



Slika 9. Prikaz 2. etaže u konačnom općem planu [5]

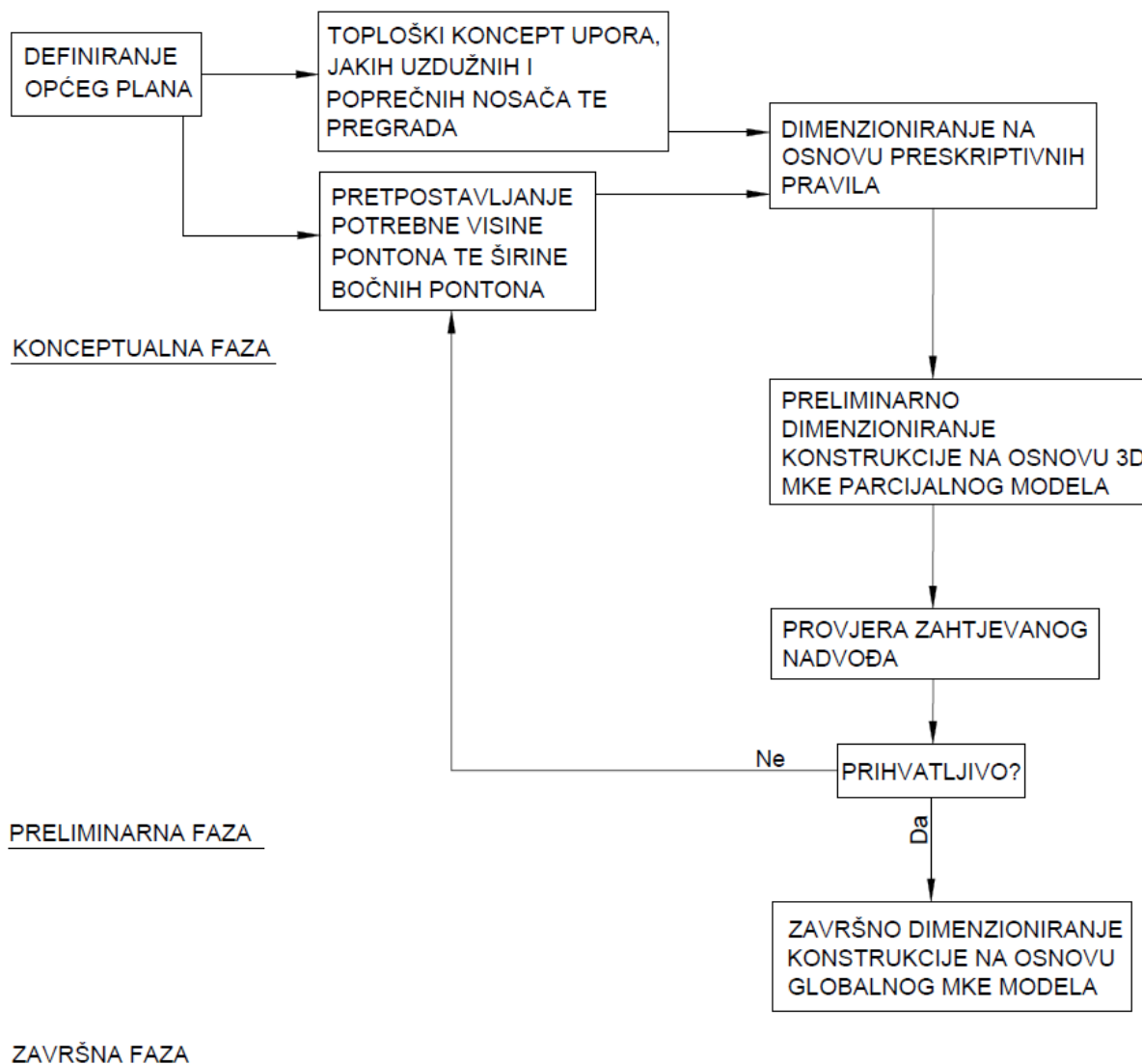
ETAŽA 3 120 garažnih parkirnih mjesta



Slika 10. Prikaz 3. etaže u konačnom općem planu [5]

3. TOPOLOŠKI KONCEPT KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA I PROJEKTNI POSTUPAK

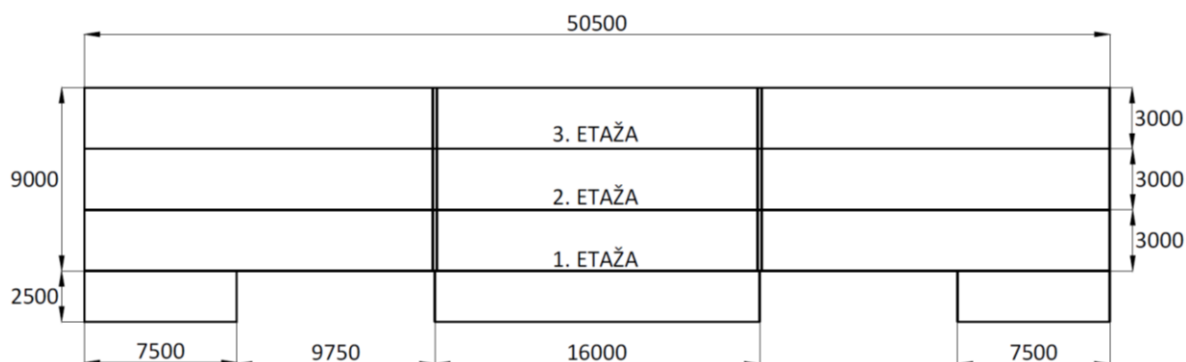
Topologija konstrukcije plutajuće garaže je u potpunosti diktirana funkcionalnošću garaže. Ispravan redoslijed pri projektiranju garaže je za definiran raspored parkirnih mjesta i cesta odrediti raspored nosivih stupova tako da ne ometaju prostor za parkiranje i tokove kretanja [Slika 11].



Slika 11. Dijagram toka projektiranja

Stupovi su postavljeni na krajevima mjesta za parkiranje odn. između dvostrukog reda mjesta za parkiranje. Na taj način se ne smanjuje broj parkirnih mjesta, nego se takva mjesta skrate i služe za parkiranje manjih vozila. Prihvatljivi raspon stupova u garažama iznosi od 15 do 20 m. Postoje dva stupca upora po širini garaže, a odabrani razmak između bočne stjenke garaže i

upore iznosi 17 m, a između dva stupa iznosi 16 m [Slika 12]. U uzdužnom smislu najveći razmak između stupova iznosi 15 m.



Slika 12. Shematski prikaz poprečnog presjeka plutajuće garaže

Podveze paluba su poduprte uporama. Shodno tome, najveći nepoduprti raspon podveze odgovara najvećem uzdužnom razmaku između upora i iznosi 15 m.

Sponje teretnih paluba se poklapaju s okvirnim rebrima po boku garaže. Odabran je razmak između okvirnih rebara, time i između sponja, od 2,5 m što odgovara širini parkirnih mjesta.

Odabrani razmak uzdužnjaka teretnih paluba iznosi 750 mm. [Slika 14]

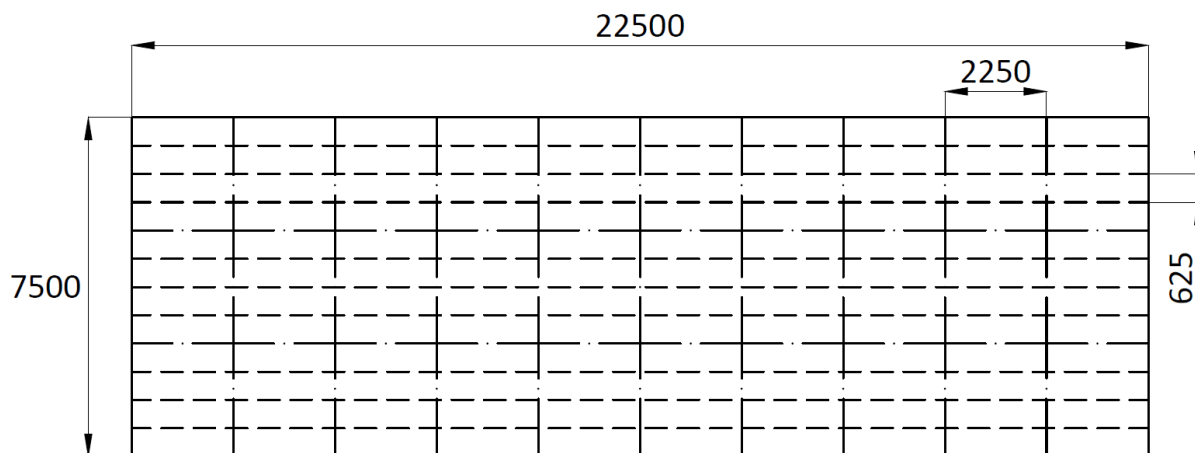
Visina između etaža iznosi 3 m. Nije određena potrebnom svjetlom visinom za neometano prometovanje osobnih automobila, nego da se ostvari određena razina ugođe u garaži.

Orebrenje prednje i stražnje stjenke garaže određeno je razmakom uzdužnjaka teretnih paluba, stoga vertikalne ukrepe stjenke prate razmak od 750 mm, a jaki vertikalni nosači imaju razmak koji odgovara višekratniku razmaka vertikalnih ukrepa.

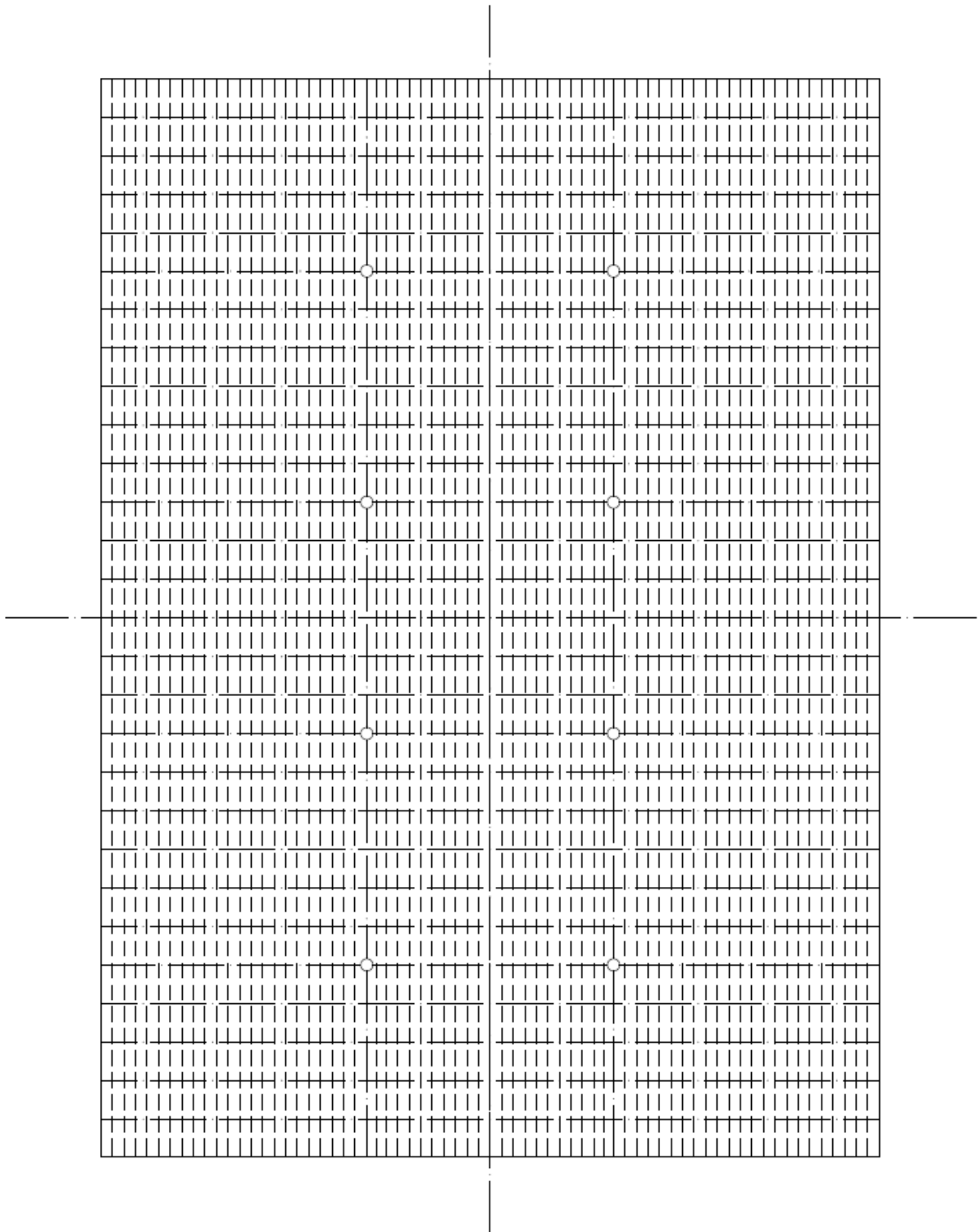
Topologija jakih uzdužnih i poprečnih nosača rampi također je uvjetovana prethodno definiranom topologijom orebrenja stjenki te teretnih paluba. Razmak poprečnih nosača rampi poklapa se s višekratnikom razmaka vertikalnih ukrepa prednje stjenke, a pozicije uzdužnih nosača rampi s pozicijama sponja teretnih paluba. [Slika 13]

Za ostvarivanje uzgona služe tri pontona, središnji i dva bočna. Širina srednjeg pontona je također definirana općim planom. Naime, bočne strane središnjeg pontona nalaze se ispod linije nosivih stupova [Slika 12]. Stoga širina središnjeg pontona iznosi 16 m. Širina bočnih pontona i visine sva tri pontona definirane su zahtjevom za dovoljnim nadvođem od 1 m. U konceptualnoj fazi je odabrana visina pontona 2,5 m i širina bočnih pontona od 7,5 m. Poprečne pregrade središnjeg pontona se nalaze ispod upora, a poprečne pregrade bočnih pontona se nalaze na istoj poziciji. Poprečne pregrade su vertikalno orebrene s razmakom koji odgovara

razmaku uzdužnjaka. Prva teretna paluba je ujedno i paluba pontona, pa poprečni konstrukcijski elementi boka i dna pontona prate razmake sponja palube.



Slika 13. Topologija konstrukcijskih elemenata unutarnje rampe



Slika 14. Topologija konstrukcijskih elemenata teretne palube

4. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PREMA PRAVILIMA DNV-a

Za prethodno definiranu topologiju konstrukcijskih elemenata proveden je proračun s obzirom na zahtjeve za lokalnom čvrstoćom prema preskriptivnim pravilima DNV-a [6].

Lokalno se dimenzionira oplata između ukrućenja te uzdužnjaci teretnih paluba na proračunato opterećenje od kotača vozila, a oplata dna i boka pontona te uzdužnjaci pontona na vanjski tlak od mora.

Pravila propisuju i minimalne debljine oplata za sve elemente, dno, paluba, bok, pregrade itd. Minimalna zahtijevana debljina oplata je ona veća od dvije proračunate.

Dimenzija dobivene proračunom prema pravilima su najmanje zahtijevane i služe kao ulazni podaci za direktni proračun konstrukcije metodom konačnih elemenata.

4.1. Definicija opterećenja

4.1.1. Opterećenje od kotača

Teretne palube garaže opterećene su težinom vozila koja se manifestira kroz otisak gume kojom vozilo naliježe na palubu. Garaža je namijenjena za prihvatanje osobnih vozila, odn. automobila i kombija, stoga je, kao mjerodavno, uzeto najveće moguće opterećenje koje iznosi 1,6 t na prednjoj osovini kombija. Opterećenje kotača po osovini i dimenzije otiska gume uzete su prema zadanom predlošku. [Tablica 1]

Propisani tlak za uvjete u luci ovisi o osovinskom opterećenju i dimenzijama otiska gume (1)

$$P_{wl-1} = \frac{Q}{n_o a_1 b_1} \left(g + \frac{3}{\sqrt{Q}} \right) 10^6 = 440,6 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

gdje je:

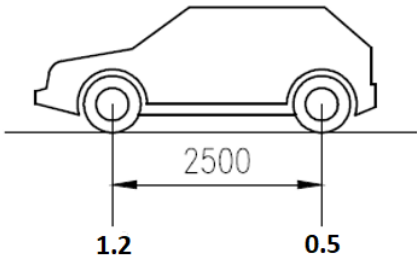
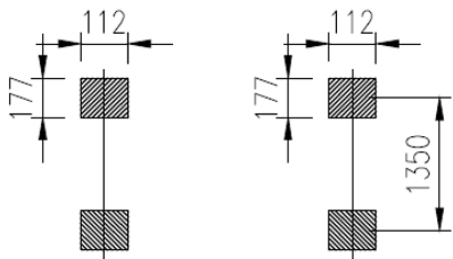
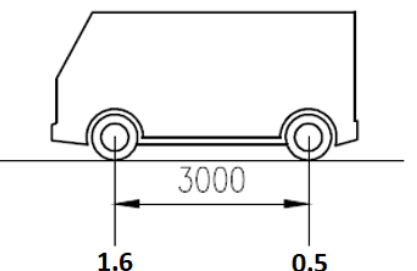
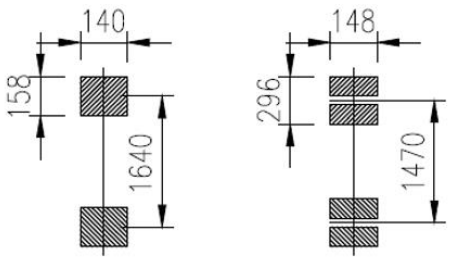
Q=1,6 t – maksimalno osovinsko opterećenje

n_o=2 – broj opterećenih površina po osovini

a₁=158 mm – dimenzija otiska kotača paralelna s ukrepama

b₁=140 mm – dimenzija otiska kotača okomita na ukrepe

Tablica 1. Osovinsko opterećenje vozila, otisci kotača i homogeno opterećenje

	Osovinsko opterećenje [t]	Otisak kotača [mm]	Homogeno opterećenje [t/m ²]
Osobni automobil	<p>L=4.2 m B=1.6 m</p> 		0,2
Kombi	<p>L=4.9 m B=2.0 m</p> 		0,25

4.1.2. Opterećenje od vanjskog tlaka mora

Lokalno su dimenzionirani oplata boka i dna pontona i uzdužnjaci za hidrostatski tlak mora uslijed najvećeg gaza. U preliminarnoj fazi gaz, T_{LC} , je pretpostavljen te iznosi 1,5 m.

Na dno pontona djeluje tlak iznosa 15,1 kN/m²

$$p_s = \rho g(T_{LC} - z) = 15,1 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Na prvi uzdužnjak boka pontona djeluje tlak iznosa 6,74 kN/m²

$$p_s = \rho g(T_{LC} - z) = 6,74 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

4.2. Korozijski dodaci

Zahtijevane dimenzije koje propisuju pravila su neto dimenzije, to jest dimenzije konstrukcijskih elemenata koje se mogu oduprijeti opterećenjima bez uvećanja za korozijski dodatak.

Korozijski dodaci elemenata plovne garaže:

- za oplatu teretne palube i boka iznosi $t_c=1,0$ mm
- za ukrepe teretnih paluba i boka garaže iznosi $t_c=0,5$ mm
- za oplatu boka i dna pontona iznosi $t_c=1,5$ mm
- za ukrepe pontona iznosi $t_c=1,5$ mm
- za oplatu nepropusne pregrade pontona iznosi $t_c=0,5$ mm
- za orebrenje nepropusne pregrade pontona iznosi $t_c=0,5$ mm
- za oplatu rampe iznosi $t_c=1,0$ mm
- za orebrenje rampe iznosi $t_c=0,5$ mm

4.3. Dimenzioniranje limova i profila teretnih paluba

Minimalna debljina oplata palube određena je izrazom

$$t = a + bL_2\sqrt{k} = 5,2 \text{ mm} \quad (4)$$

gdje je:

$$a=4,5$$

$$b=0,01$$

Neto debljina oplata teretne palube opterećene kotačima ne smije biti manja od vrijednosti dobivene izrazom

$$t = \frac{77,4\alpha_p\sqrt{k_w c b p_{wl-1}}}{\sqrt{m C_a R_{eH}}} 10^{-3} = 5,05 \text{ mm} \quad (5)$$

gdje je:

$\alpha_p=1$ - omjer širine i duljine panela; maksimalno može iznositi 1

Koeficijent k_w

$$k_w = 1,3 - \frac{4,2}{\left(\frac{a_1}{b_1} + 1,8\right)^2} = 0,261 \quad (6)$$

$c=140$ mm – širina opterećenja

$b=750$ mm – širina panela

Koeficijent momenta savijanja m

$$m = \frac{38}{\left(\frac{b_1}{b}\right)^2 - 4,7\frac{b_1}{b} + 6,5} = 6,717 \quad (7)$$

Koeficijent dopuštenog naprezanja za oplatae C_a

$$C_a = \beta_a - \alpha_a \frac{\sigma_{hg}}{R_{eH}} = 1,8 \quad (8)$$

$$\beta_a = 1,9$$

$$\alpha_a = 0,5$$

$\sigma_{hg} = 10 \text{ N/mm}^2$ pretpostavljeno naprezanje uslijed primarne čvrstoće

Odabrana debljina oplatae uvećana za korozijski dodatak iznosi 6 mm.

Zahtijevani moment otpora profila opterećenih kotačima iznosi

$$Z = \frac{P_{pwl-1} k_z c d l_{bdg}}{m C_s R_{eH}} 10^{-3} = 19.92 \text{ cm}^3 \quad (9)$$

gdje je:

$$k_z = 1 \text{ za } b_1/b < 0,6$$

$d = 158 \text{ mm}$ – duljina opterećenja

Koeficijent momenta savijanja m

$$m = \frac{38}{\left(\frac{a_1}{1000l}\right)^2 - 4,7 \frac{ba_1}{1000l} + 6,5} = 6,122 \quad (10)$$

Koeficijent dopuštenog naprezanja C_s

$$C_{as} = f_m \left(\beta_s - \alpha_s \frac{\sigma_{hg}}{R_{eH}} \right) = 0,85 \quad (11)$$

$$\beta_s = 0,95$$

$$\alpha_s = 1$$

$\sigma_{hg} = 10 \text{ N/mm}^2$ pretpostavljeno naprezanje uslijed primarne čvrstoće

Odabrani profili uzdužnjaka teretnih paluba su HP80x7.

4.4. Dimenzioniranje limova boka garaže

Minimalna debljina oplatae boka, u mm, određena je izrazom

$$t = a + bL_2 \sqrt{k} \quad (12)$$

gdje je:

$$a = 4,0$$

$b = 0,035$ za dio boka od prve druge palube

$b = 0,01$ za dio boka od druge palube do krova

Minimalna debljina oplatae boka, uvećana za korozijski dodatak, između prve i druge palube iznosi 7,5 mm, a između druge palube i krova iznosi 5,5 mm.

4.5. Dimenzioniranje limova i profila unutarnje rampe

Proračun konstrukcijskih elemenata rampe istovjetan je onome u poglavlju 4.3. Neto debljina oplata rampe opterećene kotačima ne smije biti manja od vrijednosti

$$t = \frac{77,4\alpha_p \sqrt{k_w c b p_{wl-1}}}{\sqrt{m C_a R_{eH}}} 10^{-3} = 4,9 \text{ mm} \quad (13)$$

Odabrana bruto debljina oplata iznosi 6 mm.

Zahtijevani moment otpora profila rampe iznosi

$$Z = \frac{P_{pwl-1} k_z c d l_{bdg}}{m C_s R_{eH}} 10^{-3} = 17,94 \text{ cm}^3 \quad (14)$$

Odabrani profili uzdužnjaka rampe je HP80x7.

4.6. Dimenzioniranje limova i profila uzgonskih pontona

Minimalna debljina oplata dna pontona određena je izrazom

$$t = a + b L_2 \sqrt{k} = 6,95 \quad (15)$$

gdje je:

$$a=4,5$$

$$b=0,035$$

Neto debljina oplata dna pontona opterećene tlakom od mora ne smije biti manja od vrijednosti dobivene izrazom

$$t = 0,0158 \alpha_p b \sqrt{\frac{p}{C_a R_{eH}}} 10^{-3} = 3,1 \text{ mm} \quad (16)$$

gdje je:

$$b=750 \text{ mm} - \text{-razmak uzdužnjaka dna}$$

Minimalna debljina oplata boka pontona određena je izrazom

$$t = a + b L_2 \sqrt{k} = 6,45 \quad (17)$$

gdje je:

$$a=4,0$$

$$b=0,035$$

Neto debljina oplata boka pontona opterećene tlakom od mora ne smije biti manja od vrijednosti dobivene izrazom

$$t = 0,0158 \alpha_p b \sqrt{\frac{p}{C_a R_{eH}}} 10^{-3} = 3,4 \text{ mm} \quad (18)$$

gdje je:

$b=830$ mm – razmak uzdužnjaka boka

Odabrane bruto debljine oplata iznose 8,5 mm za dno i 8,0 mm za bok pontona.

Zahtijevani moment otpora profila dna opterećenih vanjskim tlakom mora iznositi

$$Z = \frac{f_u p s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} 10^{-3} = 40,8 \text{ cm}^3 \quad (19)$$

Odabrani profili uzdužnjaka dna pontona su HP120x8.

Zahtijevani moment otpora profila boka opterećenih vanjskim tlakom mora iznositi

$$Z = \frac{f_u p s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s R_{eH}} 10^{-3} = 20,2 \text{ cm}^3 \quad (20)$$

Odabrani profili uzdužnjaka dna pontona su HP80x7.

Minimalna debljina oplata nepropusnih pregrada pontona određena je izrazom

$$t = a + b L_2 \sqrt{k} = 5,55 \text{ mm} \quad (21)$$

gdje je:

$a=4,5$

$b=0,0015$

Odabrana bruto debljina oplata nepropusnih pregrada pontona iznosi 6 mm.

Sažetak bruto dimenzija, debljina i profila, dobivenih prema pravilima na osnovu lokalnog opterećenja [Tablica 2].

Tablica 2. Prikaz debljina i profila dobivenih prema pravilima [6]

	Debljina oplata	Profil
Teretne palube	6,0	HP80x7
Bok garaže između palube 1 i 2	7,5	-
Bok garaže između palube 2 i 3	5,5	-
Bok garaže između palube 3 i krova	5,5	-
Unutarnje rampe	6,0	HP80x7
Ponton – dno	8,5	HP120x8
Ponton – bok	8,0	HP80x7
Ponton – nepropusne pregrade	6,0	-

5. STRUKTURNA ANALIZA I REPROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA

5.1. Kriteriji podobnosti

Evaluacija konstrukcije plutajuće garaže provesti će se s obzirom na kriterij popuštanja i izvijanja koristeći program MAESTRO [7].

Direktni proračun konstrukcije s konačnim elementima omogućava provjeru strukturnog odziva složenih konstrukcija uslijed narinutog opterećenja s obzirom na podobnost.

Dozvoljena naprezanja propisuju pravila kako ne bi došlo do plastičnih deformacija uslijed premašivanja granice razvlačenja materijala. Iznosi dopuštenih naprezanja određuju se prema formulama:

$$\sigma_a = 180f_1 \text{ N/mm}^2 \text{ za poprečne i vertikalne nosače} \quad (22)$$

$$\sigma_a = 190f_1 \text{ N/mm}^2 \text{ za uzdužne nosače} \quad (23)$$

$$\sigma_a = 245f_1 \text{ N/mm}^2 \text{ za uzdužnjake} \quad (24)$$

gdje je

$f_1=1,0$ – koeficijent materijala za običan čelik ST24

$f_1=1,28$ – koeficijent materijala za čelik povišene čvrstoće AH32

U skladu s pravilima DNV-a [8] definirana su dopuštena naprezanja. [Tablica 3]

Tablica 3. Dopuštena naprezanja konstrukcijskih elemenata prema pravilima [8]

σ_a [N/mm ²]	POPR. I VERT. NOSAČI	UZDUŽNI NOSAČI	UZDUŽNJACI
ST24	180	190	245
AH23	230,4	243,2	313,6

Drugi način oštećenja prema kojem će se dimenzionirati konstrukcija plutajuće garaže je izvijanje uslijed tlačnih opterećenja. Uvid u prekoračenje dozvoljenog odziva s obzirom na izvijanje nam daje model podobnosti te se izražava na sljedeći način:

$$g = \frac{C-\gamma D}{C+\gamma D} \quad (25)$$

gdje je g faktor podobnosti, C izdržljivost, D zahtjev i γ faktor sigurnosti.

Granične vrijednosti faktora podobnosti su -1 i $+1$ gdje -1 znači da je izdržljivost jednaka nuli, a $+1$ da je zahtjev jednak nuli. Podobni su oni elementi konstrukcije koji imaju faktor podobnosti veći ili jednak nuli.

Program MAESTRO ima mogućnost razlikovanja više kriterija podobnosti koji se korigiraju kroz pripadajuće faktore sigurnosti.

Paneli plutajuće garaže su se evaluirali prema MAESTRO-vim kriterijima podobnosti za panel. [Tablica 4]

Tablica 4. Kriteriji podobnosti za panel prema programu MAESTRO

Kriterij podobnosti	Puni naziv	γ
PCSF	Panel Collapse, Stiffener Flexure	1,11
PCCB	Panel Collapse, Combined Buckling	1,00
PCMY	Panel Collapse, Membrane Yield	1,00
PFLB	Panel Failure, Local Buckling	1,11

Glavni kriterij za dimenzioniranje upora je onaj na izvijanje. Kritična naprezanja prilikom izvijanja određena su sukladno DNV-ovim pravilima i ovisna su o geometrijskim karakteristikama [9]. Za rad u luci je dopušteni faktor iskoristivosti $\eta_{all}=0,65$ [7].

$$\eta = \frac{\sigma_{x,FEM}}{\sigma_{kr}} \leq \eta_{all} \quad (26)$$

gdje je

$$\sigma_{kr} = \sigma_E \text{ za } \sigma_E \leq 0,5R_{eH} \quad (27)$$

$$\sigma_{kr} = \left(1 - \frac{R_{eH,S}}{4\sigma_E}\right) R_{eH} \text{ za } \sigma_E > 0,5R_{eH} \quad (28)$$

$$\sigma_{EC} = \pi^2 E f_{end} \frac{I}{Al_{pill}^2} 10^{-4} \quad (29)$$

$f_{end}=2$ – faktor upetosti krajeva

$l_{pill}=3$ m – duljina upore na etažama

$l_{pill}=2,5$ m – duljina upore uzgonskih pontona

$E=206000$ N/mm² – modul elastičnosti

Za rampe i palube za prijevoz vozila dopušteni progib se određuje prema formuli

$$f < \frac{b_s}{200} \quad (30)$$

gdje je:

b_s – najveći nepoduprti raspon nosača

Konstruktivski elementi koji ne zadovoljavaju kriterije podobnosti smatraju se nepodobnima te ih je potrebno redimenzionirati.

5.2. Korozijski odbici

U programu MAESTRO [7] zadani su korozijski odbici za sve konstrukcijske elemente plutajuće garaže [Tablica 5]. Odabrani iznosi korozijskih dobitaka definirani su prema pravilima ovisno o poziciji elemenata. Odbici se definiraju u korozijskim grupama gdje se njihov iznos upisuje za debljinu pridruženu pločastim elementima te za debljine struka i pojasa pridružene grednim elementima. Strukturni model je zadan na način da su svi konstrukcijski elementi definirani u modelu s ugradbenim (bruto) dimenzijama (eng. *gross thickness*) dok se za proračun odziva i podobnosti od tako zadanih ugradbenih dimenzija odbija dobitak za koroziju u iznosu 100%. To znači da se proračun provodi za „čiste“ dimenzije (eng. *net thickness*).

Tablica 5. Korozijski dodaci definirani u programu MAESTRO

Element	Korozijski dobitak [mm]
Oplata – bok garaže	1
Orebrenje – bok garaže	0
Oplata – paluba 2, 3, krov	1
Orebrenje – paluba 2, 3, krov	0
Oplata – paluba 2, 3, krov	1,5
Orebrenje – paluba 2, 3, krov	1,5
Oplata – uzgonski pontoni	1,5
Orebrenje – uzgonski pontoni	1,5
Oplata – nepropusne pregrade	0,5
Orebrenje – nepropusne pregrade	0,5

U nastavku, navedeni odabrani profili orebrenja i debljine oplata su na temelju ugradbenih (bruto) dimenzija.

5.3. Parcijalni MKE model plutajuće garaže

5.3.1. Izrada modela

Izrađen je parcijalni polovinski model plutajuće garaže koji će poslužiti za preliminarno dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata. Kod izrade parcijalnog modela, pravila [10] nalažu da se, uz modeliranje dijela konstrukcije između dvije upore koji će se podvrgnuti evaluaciji, modelira i konstrukcija u duljini pola razmaka između upora ispred i iza upore. To područje osigurava realno ponašanje konstrukcije između upora, bez utjecaja rubnih uvjeta na strukturni odziv.

Model je izrađen grubom mrežom konačnih elemenata, gdje veličina elementa u poprečnom smjeru odgovara razmaku između uzdužnjaka, a u uzdužnom smjeru je područje između dva okvirna rebra podijeljeno na četiri elementa. U vertikalnom smjeru su između dvije palube izrađena četiri elementa, a po visini pontona su implementirana tri konačna elementa.

Model je smješten u MAESTRO-vom koordinatnom sustavu koji je definiran na sljedeći način:

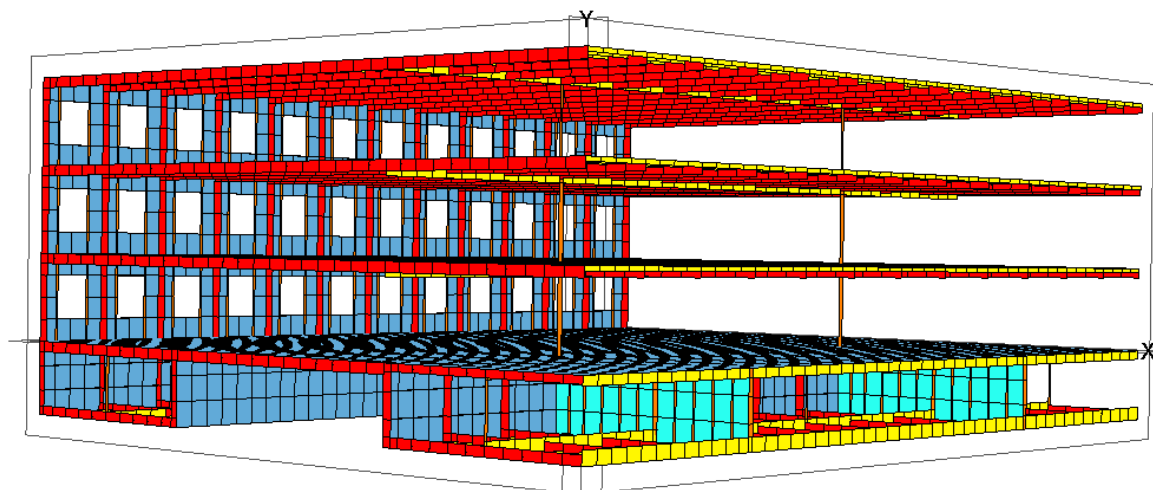
- ishodište se nalazi u sjecištu ravnine simetrije plutajuće garaže s ravninom prve palube
- globalna X os se proteže uzduž garaže i pozitivna je prema naprijed
- globalna Z os se proteže u poprečnom smislu i pozitivna je prema desno od osi X
- globalna Y os je vertikalna os i pozitivna je prema gore

Uz prethodno definiranje odabranog materijala i geometrijskih karakteristika, dijelom dobivenih proračunom prema pravilima, dijelom proizvoljno odabranih, modelirana je lijeva strana garaže s prikladnim konačnim elementima.

U idućim točkama objašnjen je postupak izrade modela.

1. definiranje modula, to jest položaja, broja i razmaka sekcija kako bi se dobila željena duljina modela s odgovarajućom duljinom konačnih elemenata
2. postavljanje čvorova u prostoru kako bi se generirala željena gustoća mreže u poprečnom smislu
3. definiranje materijala i potrebnih geometrijskih karakteristika
4. postavljanje konačnih elemenata s pridruženim odgovarajućim geometrijskim karakteristikama između čvorova

Parcijalni model dobiven je spajanjem šest modula, gdje četiri modula predstavljaju etaže tj. palube, jedan središnji ponton i jedna bočni ponton. [Slika 15]



Slika 15. Parcijalni MKE model plutajuće garaže

Teretne palube, bok garaže, dno i bokovi pontona izrađeni su uzdužnim elementima u vidu vojeva koji imaju definiranu debljinu, materijal, uzdužnjake, uzdužne nosače i poprečne nosače. Vertikalne ukrepe po boku garaže izrađene su dodatnim grednim elementima kao i upore. Poprečne pregrade u pontonima izrađene su pločastim elementima ojačanim grednim elementima.

5.3.2. Rubni uvjeti

U poprečnim ravninama na krajevima modela bilo je potrebno definirati rubne uvjete simetrije. Rubni uvjeti simetrije onemogućavaju pomak čvora iz ravnine simetrije te ih se u program zadaje u šifriranom obliku s vrijednostima 0 za slobodno i 1 za spriječeno. [Tablica 6]

Tablica 6. Šifrirani zapis rubnih uvjeta simetrije na krajevima modela

Pozicija	X	Y	Z	RX	RY	RZ
X=0 m	1	0	0	0	1	1
X=30 m	1	0	0	0	1	1

Odnosno, zadani rubni uvjeti simetrije su:

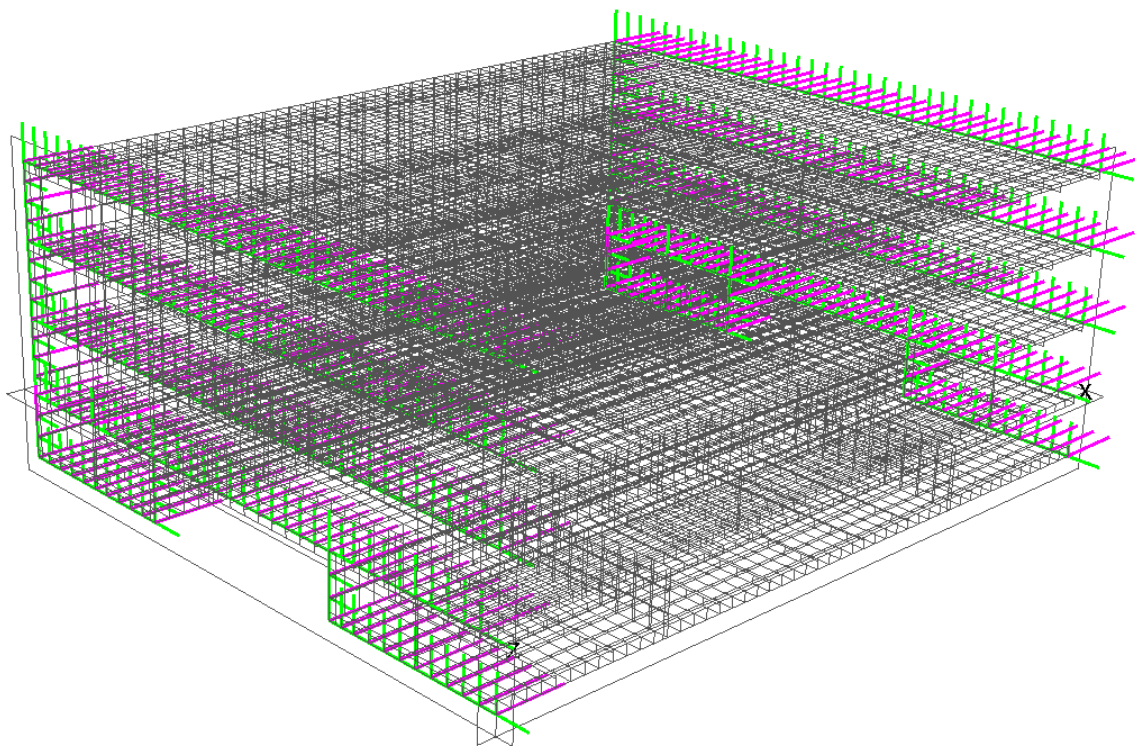
- translacija u smjeru osi X je spriječena
- translacija u smjeru osi Y je slobodna
- translacija u smjeru osi Z je slobodna
- rotacija oko osi X je slobodna
- rotacija oko osi Y je spriječena
- rotacija oko osi Z je spriječena

U simetralnoj ravnini plutajuće garaže program podrazumijeva rubne uvijete simetrije ukoliko je model ispravno definiran kao da je poprečno simetričan. Oni su ekvivalentni prethodno opisanim. [Tablica 7]

Tablica 7. Rubni uvjeti simetrije u simetralnoj ravnini

Pozicija	X	Y	Z	RX	RY	RZ
X=0 m	0	0	1	1	1	0
X=30 m	0	0	1	1	1	0

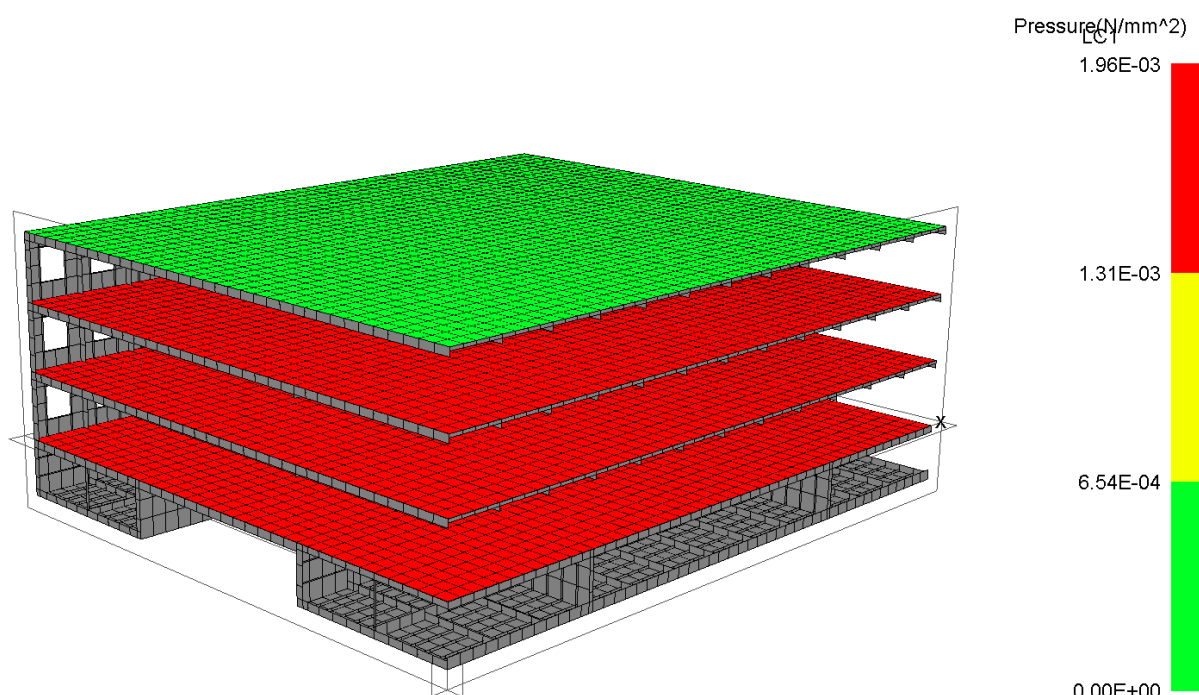
Nadalje je spriječen pomak u vertikalnom smjeru u dvije krajnje točke na visini prve palube kako bi se spriječio pomak modela kao krutog tijela. [Slika 16]



Slika 16. Grafički prikaz rubnih uvjeta parcijalnog modela

5.3.3. Slučajevi opterećenja i implementacija

Na teretne palube je implementiran projektni tlak uslijed krcanja osobnih automobila koji odgovara opterećenju kotača vozila, u t/m^2 , iz Tablica 1 i preračunat u mjerne jedinice za tlak iznosi $0,001962 \text{ N/mm}^2$. Na najgornju palubu zadan je proračunski tlak od mogućeg taloženja snijega na krovu. Za priobalje i otoke taj tlak iznosi $0,5 \text{ kN/m}^2$. Skup prethodno definiranih opterećenja predstavlja slučaj opterećenja LC1 za kojeg su dimenzionirani konstrukcijski elementi garaže, odn. druga i treća teretna paluba, bok garaže i krov. [Slika 17]

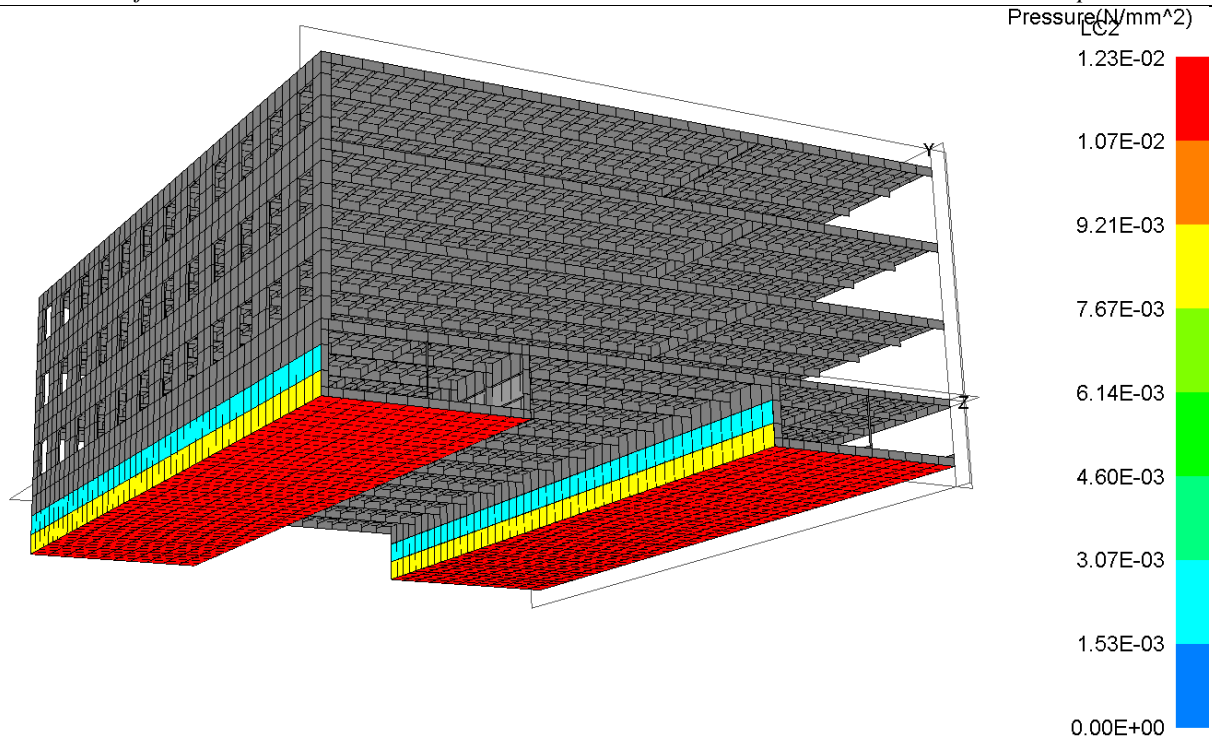


Slika 17. Slučaj opterećenja LC1

Uzgonski pontoni su dimenzionirani za slučaj opterećenja LC2. Naime, stanje krcanja koje odgovara LC1 daje nerealno veliki gaz. Stoga je u opterećenju LC2 na svaku palubu zadano maseno od automobila koliko stvarno stane po pojedinoj etaži te je na krov zadan prethodno definiran tlak od snijega.

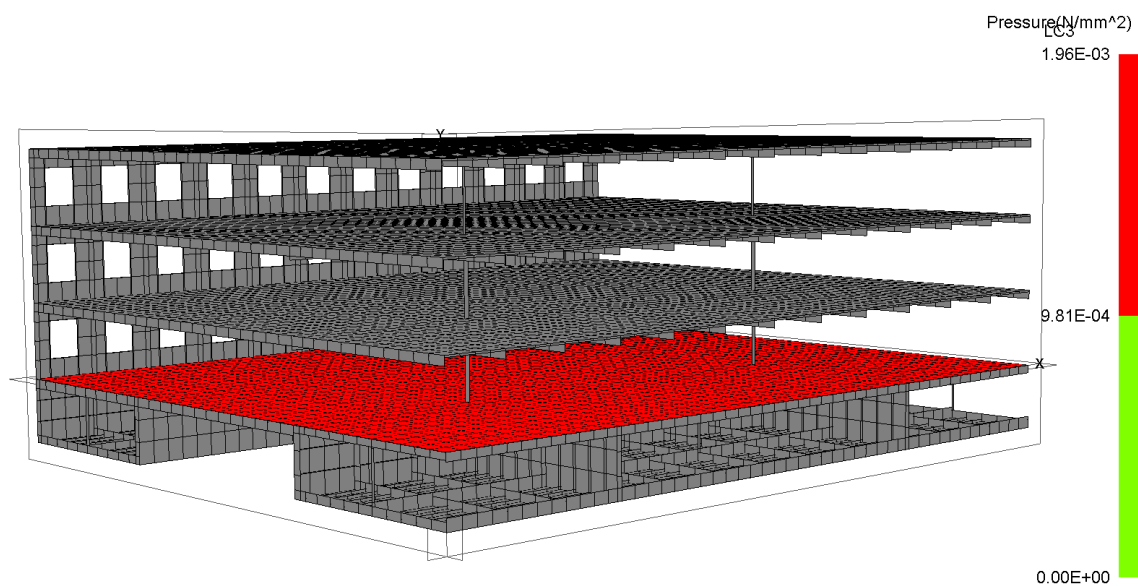
S homogeno zadanim tlakom od kotača automobila dobije se da je garaža opterećena s 700 t po etaži dok je u stvarnosti opterećena s maksimalno 256 t.

U slučaju LC2 je opterećenje na teretne palube zadano kao maseno na grupu pločastih KE s dodanom rezervom od 10 t po svakoj etaži za pretpostavljenu masu opreme. Konstrukcijski elementi dna i boka pontona evaluirani su za tlak od mora koji odgovara uronu od 1,18 m. [Slika 18]



Slika 18. Slučaj opterećenja LC2, uron pontona

Prva paluba je ujedno teretna paluba i paluba pontona. Za slučaj opterećenja LC1 se na roštilj prve palube prenose prevelika opterećenja preko boka pontona uzrokovana nerealnim gazom te uzrokuju velika tlačna naprezanja u prirubnici sponja na spoju s bokom. Stoga je za evaluaciju konstrukcije prve palube definiran slučaj opterećenja LC3 gdje je na njenu oplatu zadan tlak od kotača istovjetan onome u LC1, na dvije palube iznad je zadano maseno opterećenja koje odgovara onome u LC2. Na taj način plutajuća garaža uroni 1,28 m što ne odstupa značajno od urona za slučaj LC2. [Slika 19]

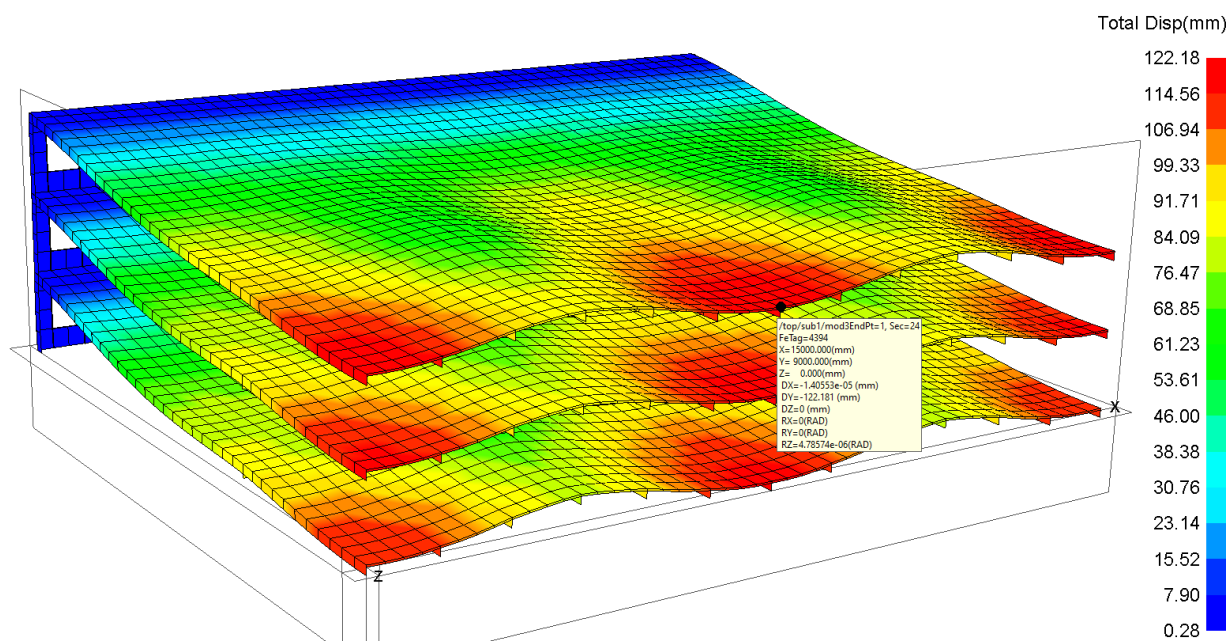


Slika 19. Implementacija tlaka od kotača na prvu etažu za slučaj opterećenja LC3

5.3.4. Dimenzioniranje konstrukcije

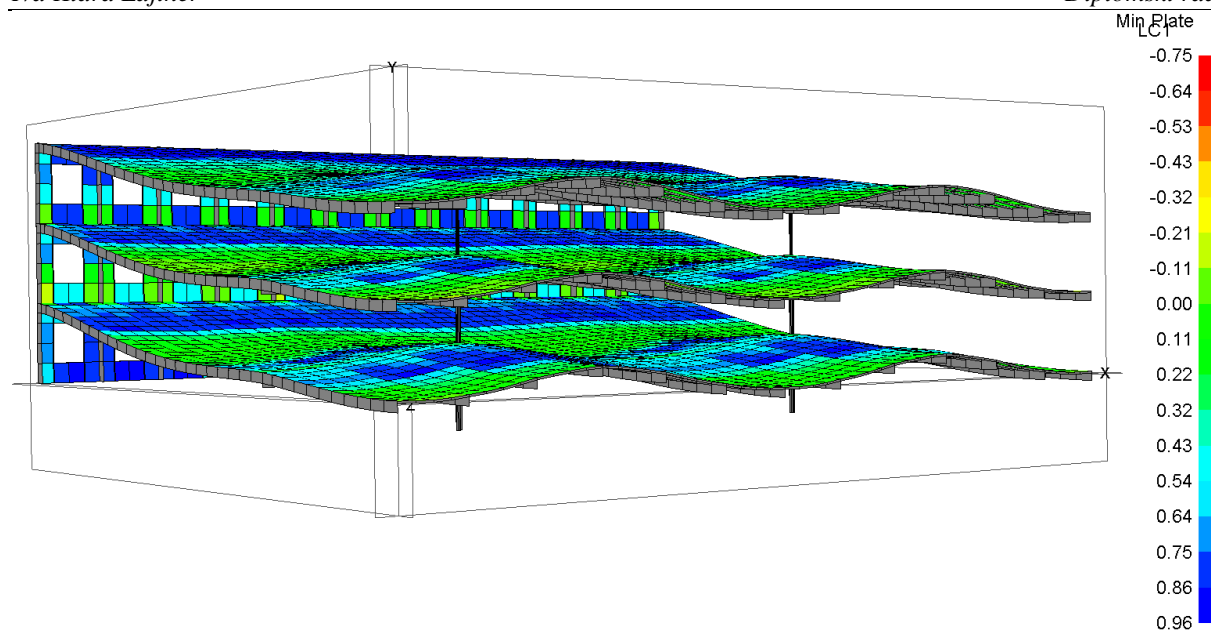
5.3.4.1. Slučaj opterećenja LC1

Očekivano, najveći progib javlja se u sredini parcijalnog modela u simetralnoj ravnini na zadnjoj palubi te iznosi 122 mm. Dopušteni progib dobiva se prema izrazu (30), gdje je b_s nepoduprtom rasponu sponja teretnih paluba između boka garaže, odn $b_s=50,5$ m. Maksimalni dozvoljeni progib stoga iznosi 252,5 mm. [Slika 20]



Slika 20. Deformacije za slučaj opterećenja LC1

Debljina oplata teretnih paluba lokalno dimenzionirana u poglavlju nije zadovoljila kriterije izvijanja, pa je debljina povećana na 7 mm. Također, debljina oplata boka između druge palube i krova dobivena prema zahtjevu za minimalnu nije zadovoljila kriterije izvijanja, pa je povećana na 7 mm. Redimenzionirane debljine oplata zadovoljavaju sve kriterije podobnosti za panel. [Slika 21]



Slika 21. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panel za LC1
 Sažetak odabranih debljina oplata garaže utvrđenih direktnim proračunom za LC1. [Tablica 8]

Tablica 8. Odabrane debljine oplata garaže

Pozicija	Debljina oplata [mm]
Bok garaže od palube 1 do 2	7,5
Bok garaže od palube 2 do 3	7
Bok garaže od palube 3 do krov	7
Teretne palube 1, 2, 3	7
Krov	7

Kod dimenzioniranja jakih nosača poštivala su se ograničenja dimenzija T profila. [1]

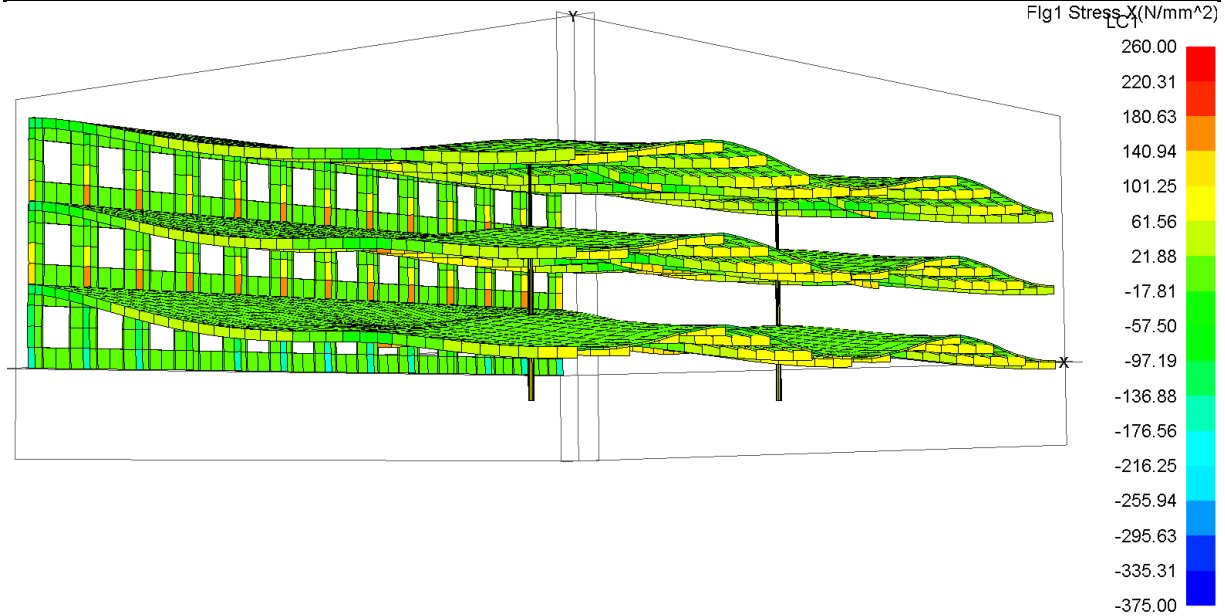
$$\frac{h_w}{t_w} \leq 90 \quad (31)$$

$$10 \leq \frac{b_f}{t_f} \leq 15 \quad (32)$$

$$0,2 \leq \frac{b_f}{h_w} \leq 0,5 \quad (33)$$

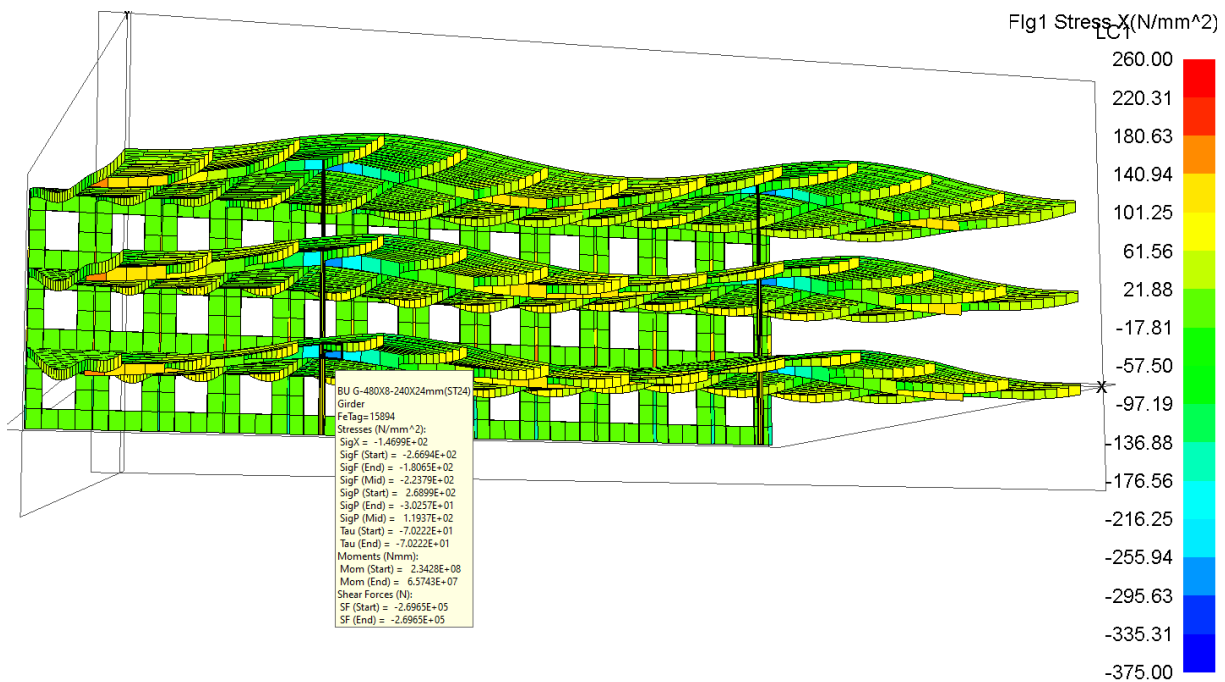
$$1 \leq \frac{t_f}{t_w} \leq 3 \quad (34)$$

Maksimalna vlačna naprezanja u pojasu koja se javljaju u okvirnim rebrima boka u spoju s palubama iznose do 180 N/mm^2 . [Slika 22]

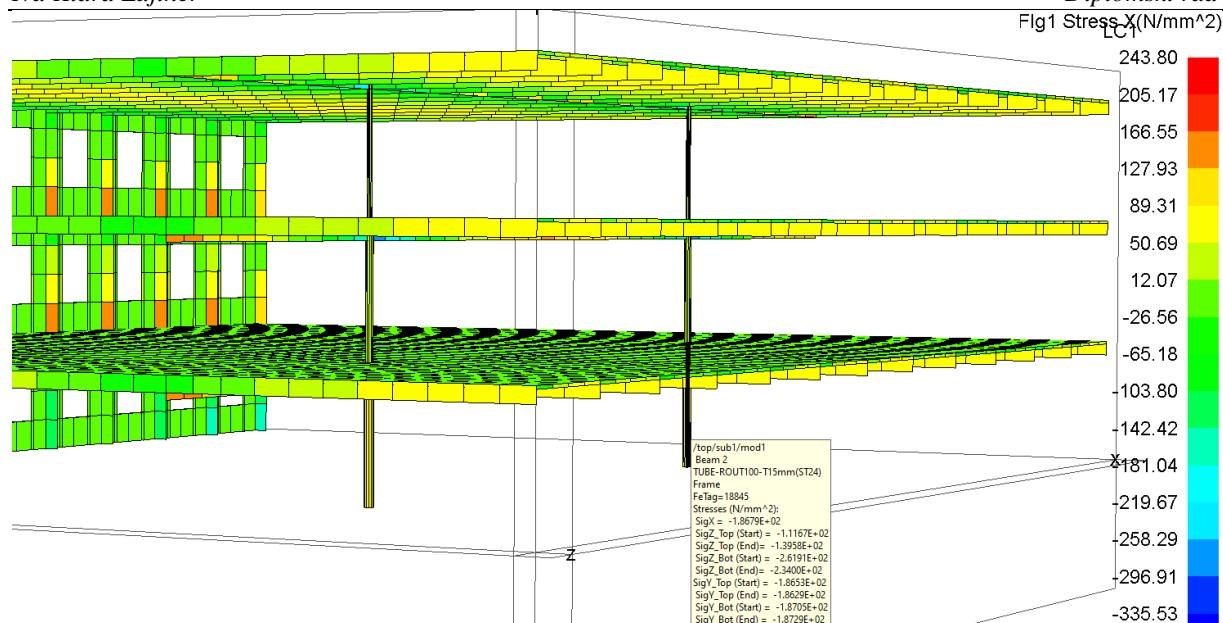


Slika 22. Naprezanja u grednim elementima

Maksimalna tlačna naprezanja u pojasu se javljaju u podvezi u spoju s uporom i iznose -266 N/mm^2 [Slika 23]. Zbog visokih razina naprezanja, odlučeno je da je podveza izrađena od čelika povišene čvrstoće AH32. Uobičajeno se spoj nosača s uporom izvodi povećanjem prirubnice, preko prethodno danih ograničenja, kako bi se dobio dovoljan moment otpora nosača. Na razini preliminarnog dimenzioniranja podveza je uzeta kao zadovoljavajuća, a u završnoj će se fazi povećati pojas na mjestu spoja s uporom kako bi se zadovoljio kriterij popuštanja.



Slika 23. Naprezanja u grednim elementima



Slika 24. Aksijalna i savojna naprezanja u uporama

Za očitana aksijalna tlačna naprezanja u uporama na etažama [Slika 24] je proveden proračun s obzirom na izvijanje prema pravilima [Tablica 9].

Tablica 9. Proračun izvijanja za upore garaže

	Upora paluba 1	Upora paluba 2	Upora paluba 3
Promjer profila [mm]	200	160	100
Debljina stjenke [mm]	20	15	10
Površ. poprečnog presjeka [cm ²]	113,1	68,3	28,3
Moment tromosti [cm ⁴]	4637,0	1815,0	289,8
σ_{EC} [N/mm ²]	1852,4	1200,1	463,1
σ_{kr} [N/mm ²]	227,5	223,5	205,2
$\sigma_{x,FEM}$ [N/mm ²]	144,0	140,3	103,5
η	0,633	0,628	0,504

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata utvrđenih direktnim proračunom za LC1. [Tablica 10]

Tablica 10. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata garaže

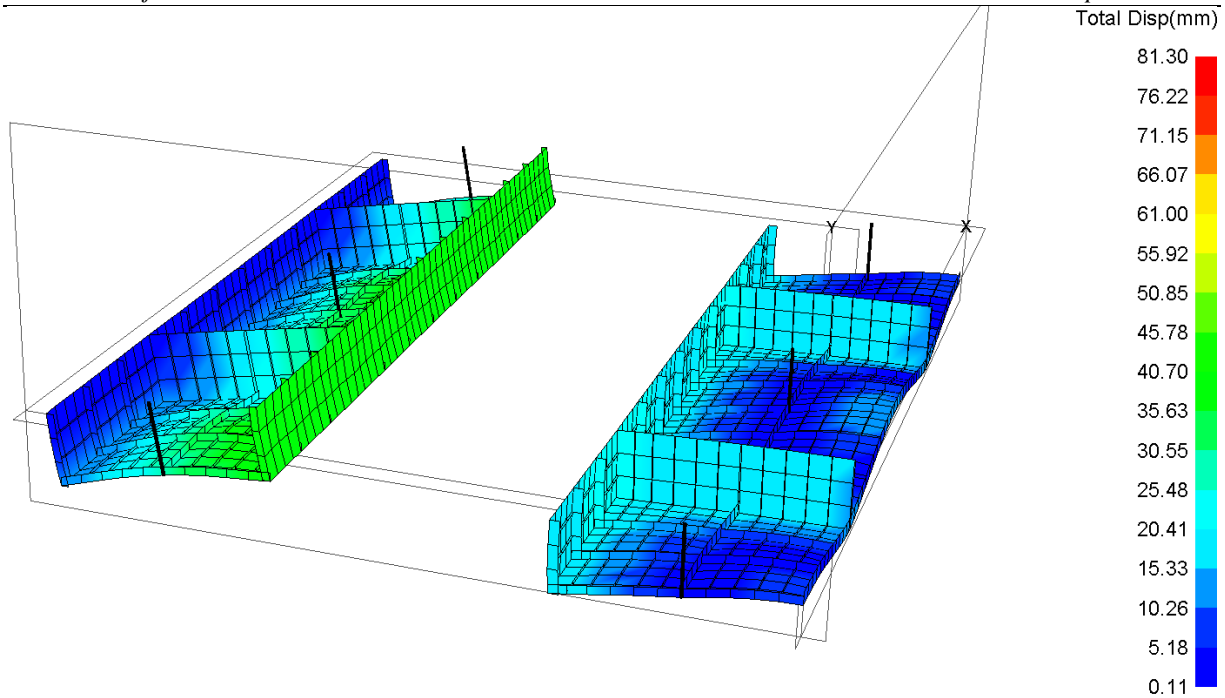
Element	Dimenzije profila
Bok garaže od palube 1 do 2 – okvirna rebra	T380x7/120x12
Bok garaže od palube 2 do 3 – okvirna rebra	T 390x7/120x12
Bok garaže od palube 3 do krov – okvirna rebra	T 360x7/120x12
Paluba 2 - sponje	T 340x7/170x17
Paluba 2 - podveza	T 480x8/240x24
Paluba 3 - sponje	T 340x7/170x17
Paluba 3 - podveza	T 480x8/240x24
Krov - sponje	T 350x7/100x10
Krov - podveza	T 350x7/170x17
Paluba 1 - upore	Φ 200x15
Paluba 2 - upore	Φ 160x15
Paluba 3 - upore	Φ 100x10
Bok garaže – vertikalne ukrepe	HP 80x7
Palube - uzdužnjaci	HP 80x7

Ukupna masa druge i treće palube, krova te boka garaže iznosi 401,1 t za modeliranu duljinu od 30 m.

5.3.4.2. Slučaj opterećenja LC2

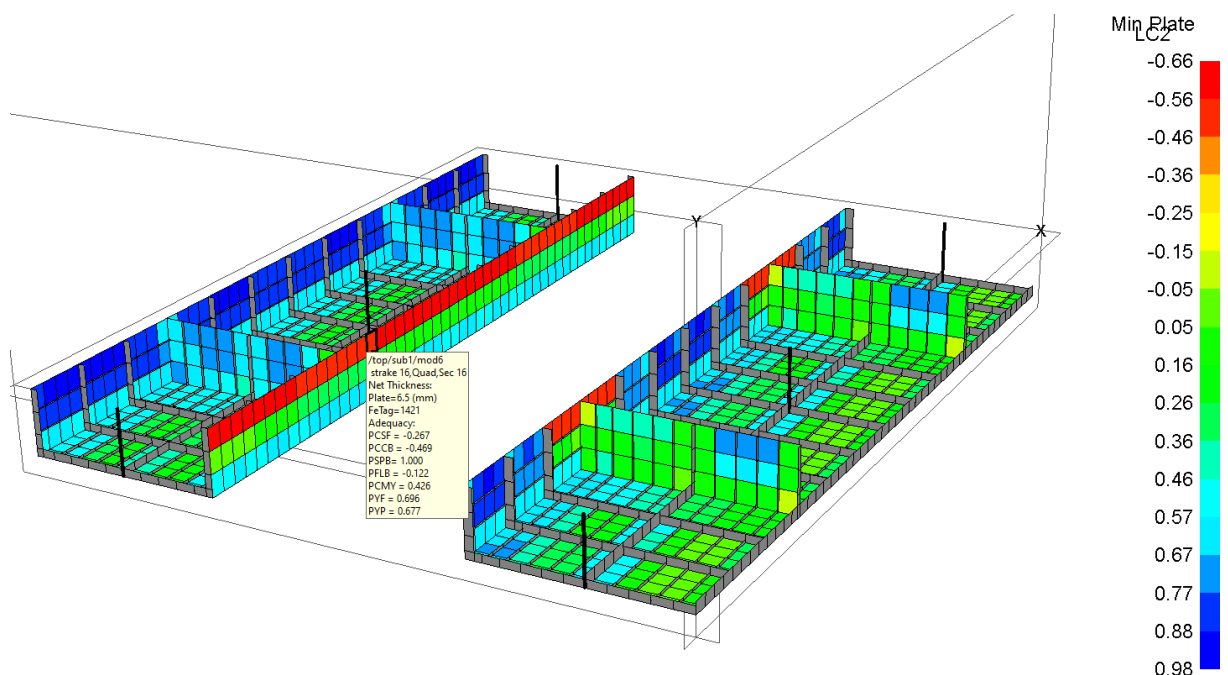
Kod uzgonskih pontona se najveći progib javlja na desnoj strani bočnog pontona jer s te strane ponton nije poduprt redom upora na etažama ili bokom garaže, te iznosi 35 mm. [Slika 25]

Dopušteni progib prema (30) iznosi 75 mm gdje je b_s nepoduprti raspon hrptenice između poprečnih pregrada te iznosi 15 m.



Slika 25. Deformacije uzgonskih pontona za slučaj opterećenja LC1

Oplata dna oba pontona zadovoljava sve kriterije podobnosti za panel. U oplati boka se javljaju veće razine napreznja na mjestu spoja s palubom i na mjestu pozicija upora prve palube. Za te panele nije zadovoljen kriterij PCSF i PCCB [Slika 26]. Pošto je na većini mjesta debljina oplata, dobivena prema zahtjevu za minimalnu, podobna, u završnom koraku će se ojačati oplata na tim mjestima i dodavanjem interkostalnih ukrepa će se značajno utjecati na porast razine kritičnog napreznja.



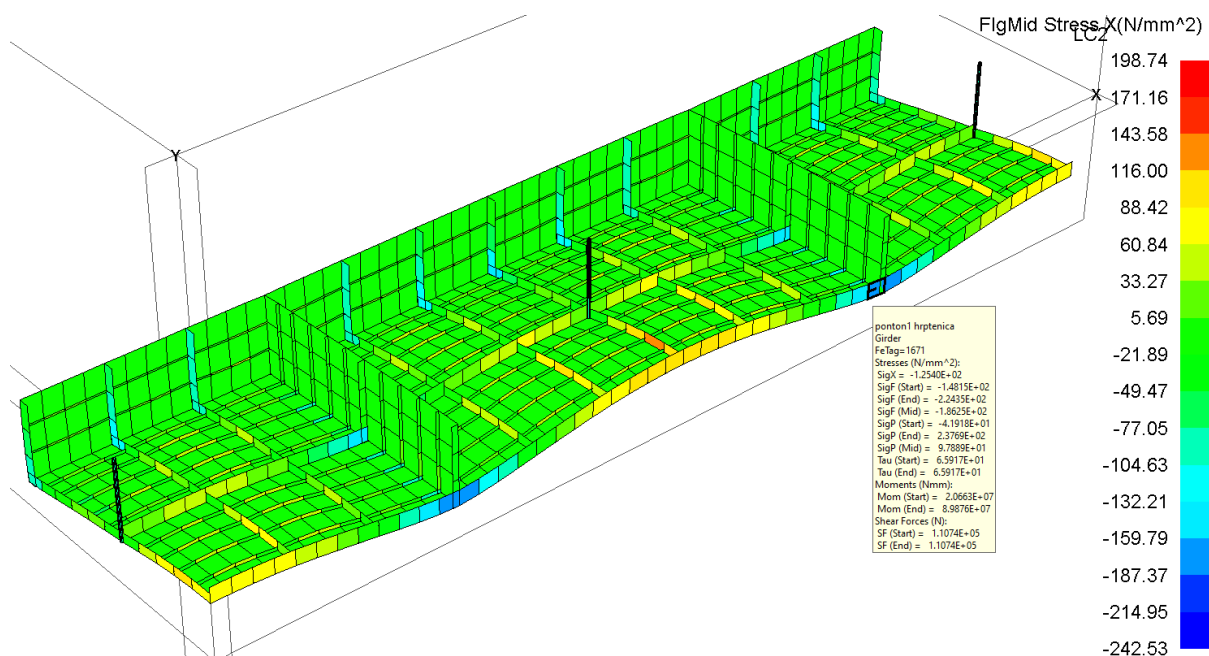
Slika 26. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panel za LC2

Sažetak odabranih debljina oplata pontona utvrđenih direktnim proračunom za LC2. [Tablica 11]

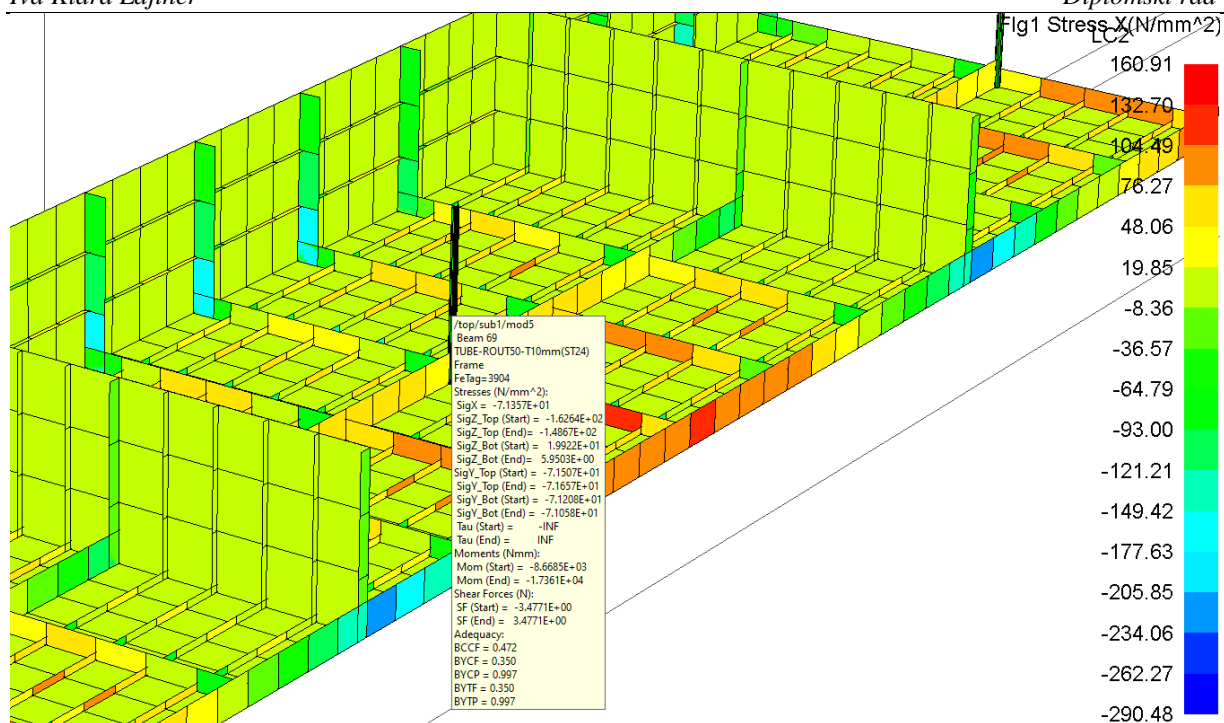
Tablica 11. Odabrane debljine oplata pontona

Pozicija	Debljina oplata [mm]
Dno pontona	8,5
Bok pontona	8
Nepropusne pregrade	7

Vlačna naprezanja u prirubnicama nosača za sve elemente su ispod granice dozvoljenih. Najveća vlačna naprezanja javljaju se u središnjoj rebrenici i iznose $131,6 \text{ N/mm}^2$. Tlačna naprezanja u pojasu rastu u spojevima jakih nosača, npr. rebrenica s okvirnim rebrima, podveza s vertikalnim nosačem pregrade. Upravo zbog toga se spojevi jakih konstrukcijskih elemenata izvode s koljenima koji omogućavaju neprekinut prijenos opterećenja između elemenata bez pojave koncentracija naprezanja. Stoga su u elementima koji se preklapaju zadovoljene razine tlačnih naprezanja u sredini konačnog elementa, a ne na kraju. Najveće tlačno naprezanje koje se javlja u pojasu sponje iznosi $-135,4 \text{ N/mm}^2$. Najveće tlačno naprezanje javlja se u pojasu podveze u spoju s vertikalnim nosačem pregrade i iznosi $186,3 \text{ N/mm}^2$. [Slika 27]



Slika 27. Naprezanja u grednim elementima središnjeg pontona



Slika 28. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu središnjeg pontona

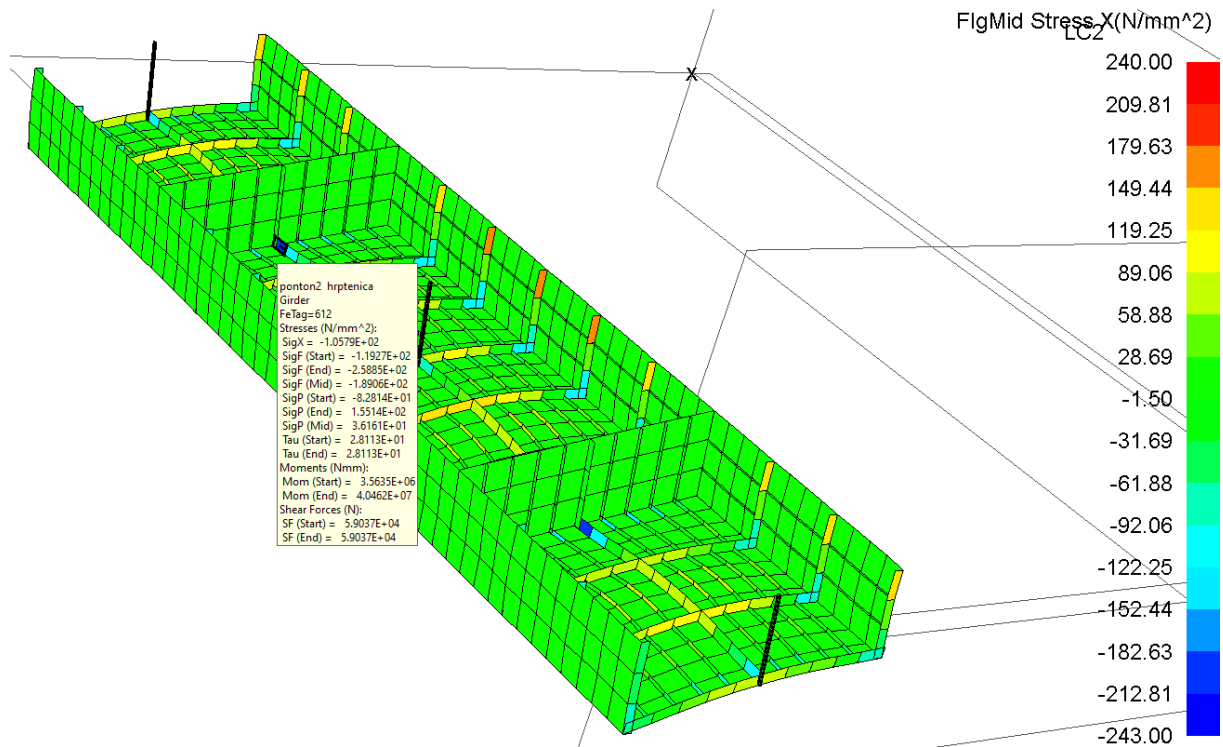
Za očitana aksijalna tlačna naprezanja u upori središnjeg pontona [Slika 28] je proveden proračun s obzirom na izvijanje prema pravilima [Tablica 12].

Tablica 12. Proračun izvijanja za uporu središnjeg pontona

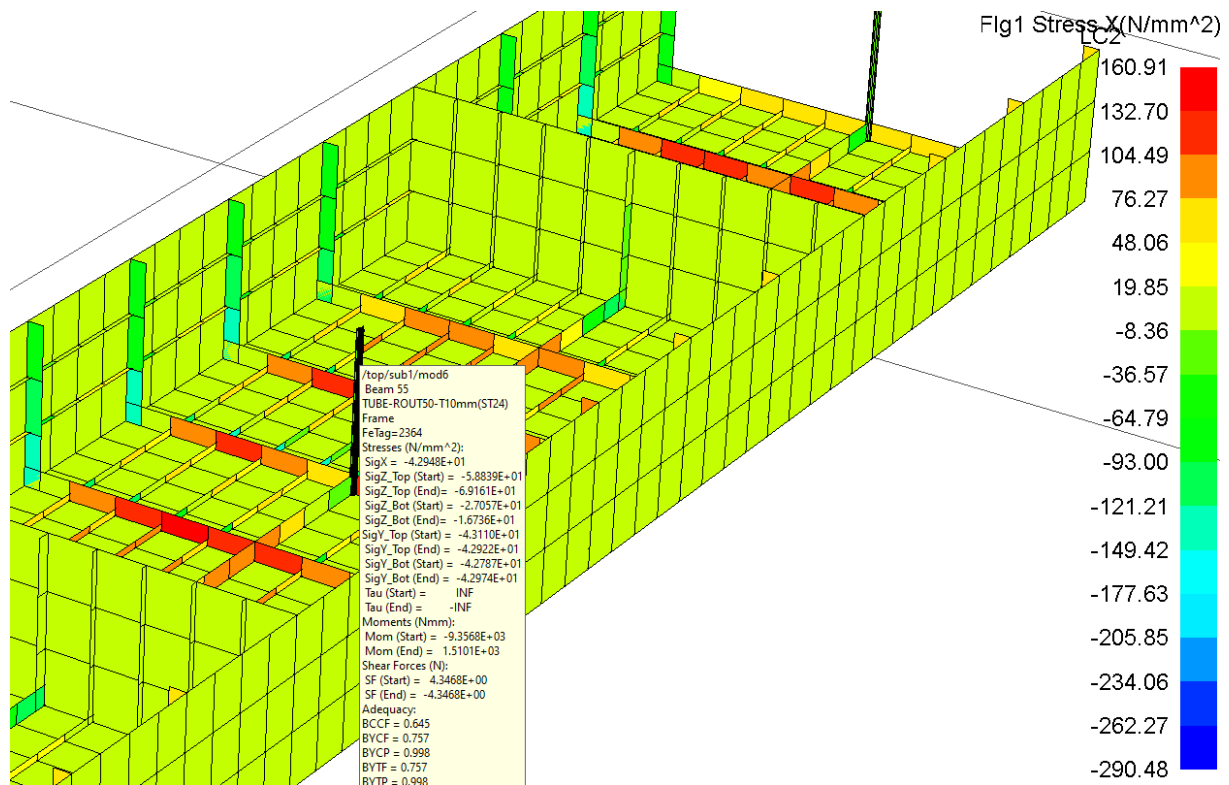
	Upora središnjeg pontona
Promjer profila [mm]	100
Debljina stjenke [mm]	10
Površ. poprečnog presjeka [cm ²]	28,3
Moment tromosti [cm ⁴]	289,8
σ_{EC} [N/mm ²]	666,9
σ_{kr} [N/mm ²]	214,3
$\sigma_{x,FEM}$ [N/mm ²]	71,4
η	0,333

Najveća vlačna naprezanja u elementima bočnog pontona javljaju se u pojasu okvirnih rebara u spoju sa sponjama, te maksimalno iznosi 177,6 N/mm². Na krajevima rebrenica i podveze

javljaju se tlačna naprezanja. Maksimalno tlačno naprezanje javlja se u pojasu podveze te iznosi $189,1 \text{ N/mm}^2$. [Slika 29]



Slika 29. Naprezanja u grednim elementima bočnog pontona



Slika 30. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu bočnog pontona

Za očitana aksijalna tlačna naprezanja u upori bočnog pontona [Slika 30] je proveden proračun s obzirom na izvijanje prema pravilima. Geometrijske karakteristike upore bočnog pontona i iznos kritičnog naprezanja odgovaraju onima u Tablica 12. Očitano tlačno aksijalno naprezanje iznosi 42,9 te je time ostvaren koeficijent iskoristivosti η koji iznosi 0,2.

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata pontona utvrđenih direktnim proračunom za LC2. [Tablica 13]

Tablica 13. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata pontona

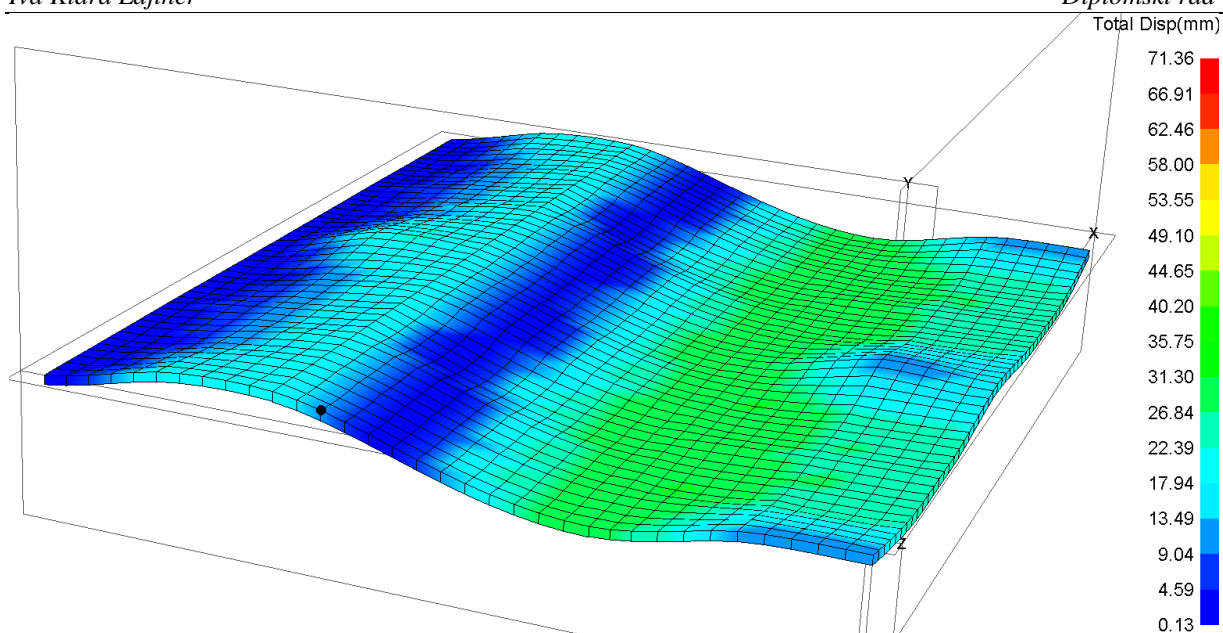
Element	Dimenzije profila
Središnji ponton - rebrenice	T 300x8/100x10
Središnji ponton - hrptenica	T 480x8,5/240x24
Središnji ponton – uzdužni nosač dna	T 450x8,5/220x22
Središnji ponton – okvirna rebra	T 260x8/130x13
Središnji ponton – upore	Φ 100x10
Bočni ponton - rebrenice	T 300x8/100x10
Bočni ponton - hrptenica	T 300x8,5/100x10
Bočni ponton – okvirna rebra	T 260x8/130x13
Bočni ponton - upore	Φ 100x10
Nepropusne pregrade – vertikalni nosač	T 200x7/100x10
Nepropusne pregrade – vertikalne ukrepe	FB 80x7
Pontoni dno - uzdužnjaci	HP 120x8
Pontoni bok - uzdužnjaci	HP 80x7

Masa modeliranog dijela središnjeg pontona iznosi 32,6 t. Masa bočnog pontona u duljini od 30 m iznosi 34,5 t. Ukupna masa za tri uzgonska pontona za duljinu od 30 m iznosi 134,2 t.

5.3.4.3. Slučaj opterećenja LC3

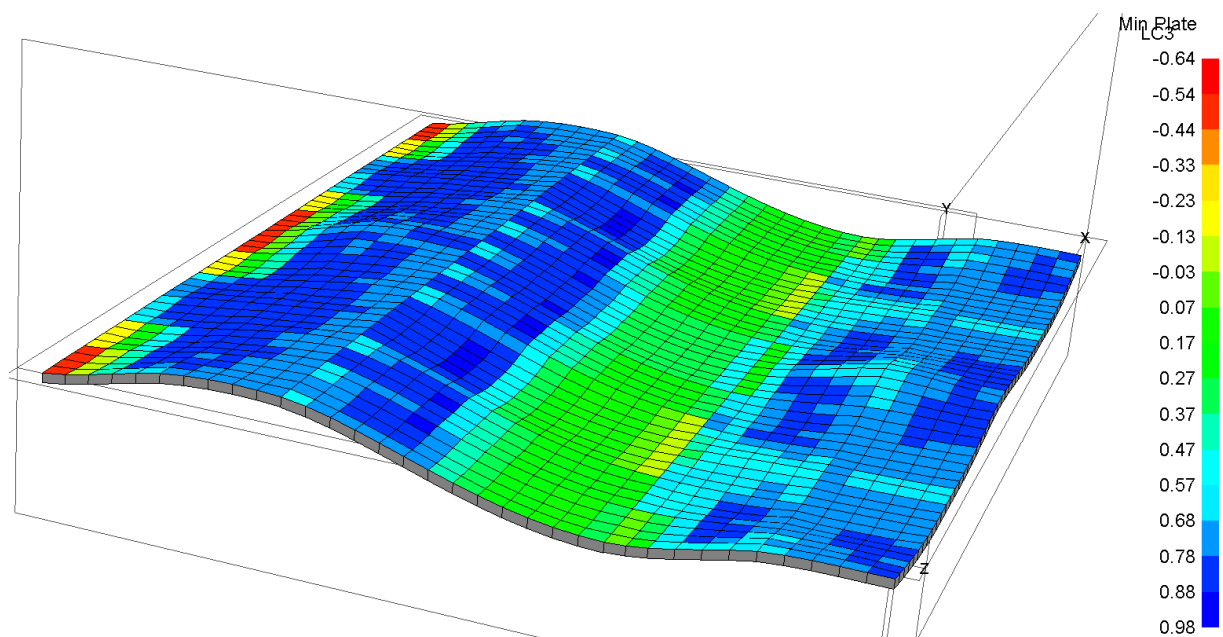
Najveći vertikalni progib palube 1 iznosi 30 mm. [Slika 31]

Najveći nepoduprti raspon za palubu 1 odgovara duljini podveze između nepropusnih poprečnih pregrada te dozvoljeni progib iznosi 75 mm. (30)



Slika 31. Deformacije prve palube za slučaj opterećenja LC3

Izuzev panela prve palube u spoju s bokom garaže ili oko upora gdje dolazi do koncentracije naprezanja, ostali paneli prve palube debljine 7 mm su podobni prema svim kriterijima podobnosti za panel [Slika 32]. U završnoj fazi će se ojačati oplata na kritičnim mjestima ili dodavanjem interkostalnih ukrepa ili i podebljanjem oplata dok ne postane podobna.

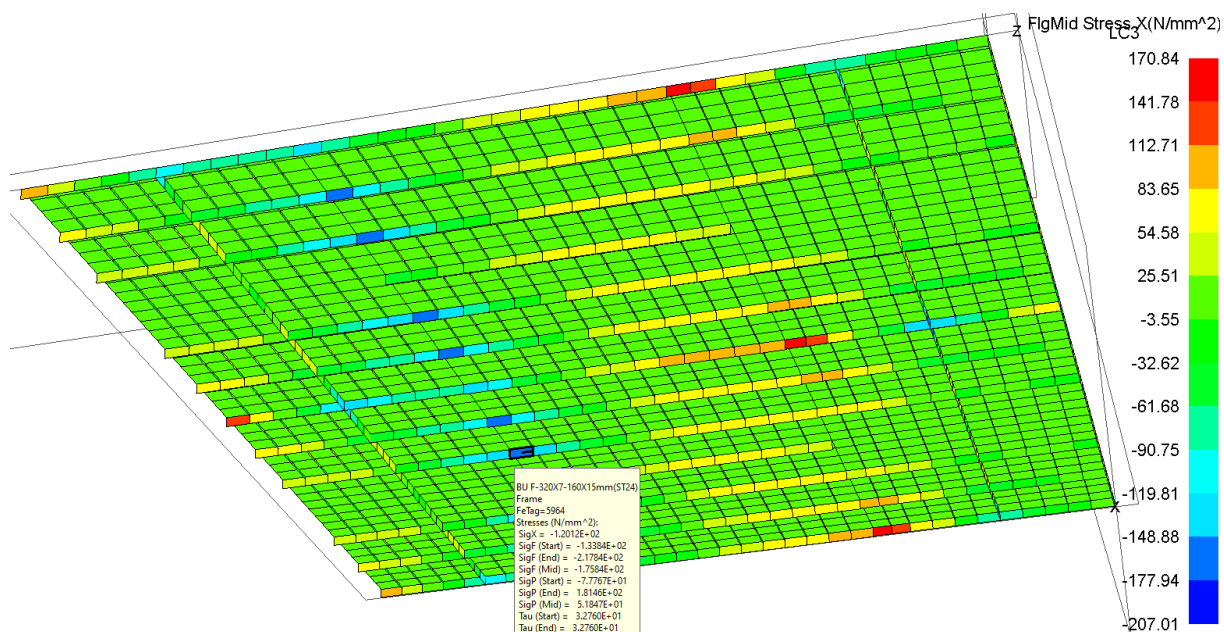


Slika 32. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele za LC3

Poprečni nosači prve palube su idejno podijeljeni na sponje središnjeg pontona, sponje bočnog pontona i sponje prve palube. Isto tako uzdužni nosači pripadaju pontonima.

Maksimalna vlačna naprezanja javljaju se u sponjama prve palube u spoju s elementima boka središnjeg pontona te iznose $170,8 \text{ N/mm}^2$. Maksimalna tlačna naprezanja također se javljaju u pojasu sponja prve palube u spoju s elementima boka bočnog pontona te iznose $175,8 \text{ N/mm}^2$.

[Slika 33]



Slika 33. Naprezanja u grednim elementima prve palube

Sažetak podobnih dimenzija prve palube utvrđenih direktnim proračunom za opterećenje LC3.
[Tablica 14]

Tablica 14. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 1

Element	Dimenzije profila
Središnji ponton - sponje	T 300x7/120x12
Središnji ponton - podveza	T 300x7/150x15
Paluba 1 - sponje	T 320x7/160x15
Bočni ponton - sponje	T 300x7/120x12
Bočni ponton - podveza	T 300x7/100x10
Palube 1 - uzdužnjaci	HP 80x7

Ukupna masa prve palube za duljinu od 30 m iznosi 120,6 t.

Odgovarajuća ukupna masa svih elemenata konstrukcije plutajuće garaže dobivena preliminarnim proračunom na temelju MKE parcijalnog modela, a preračunata za punu duljinu od 70 m iznosi 1530 t.

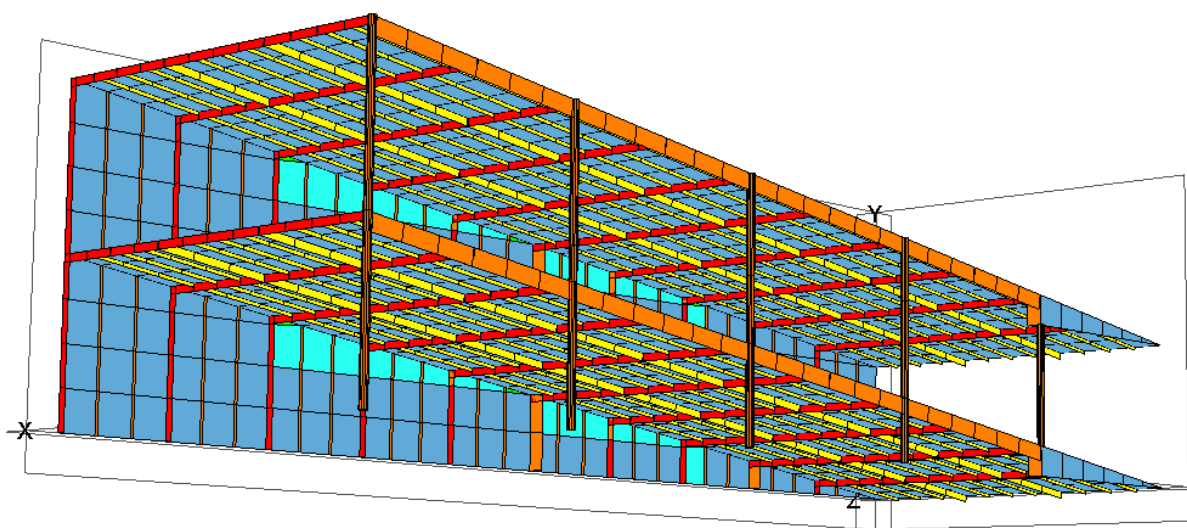
5.4. MKE model unutarnje rampe

5.4.1. Izrada modela

Konstrukcija unutarnje rampe i pripadnog dijela prednje stjenke garaže izrađena je prema odabranoj topologiji predstavljenoj u poglavlju 3. Model je izrađen uzdužnim elementima u vidu vojeva s definiranom debljinom oplata, okvirima i uzdužnim grednim elementima. Upore i vertikalne ukrepe po boku su modelirane dodatnim grednim elementima. Spoj prednje stjenke s rubnim elementima rampe izveden je dodatnim pločastim trapeznim i trokutnim elementima. [Slika 34]

Evaluacijsko područje je područje rampi i nosivih stupova te jakih vertikalnih nosača. Prednja stjenka s jakim nosačima je podupiruća struktura rampama, stoga je modelirana da se ostvari realno ponašanje konstrukcije rampi.

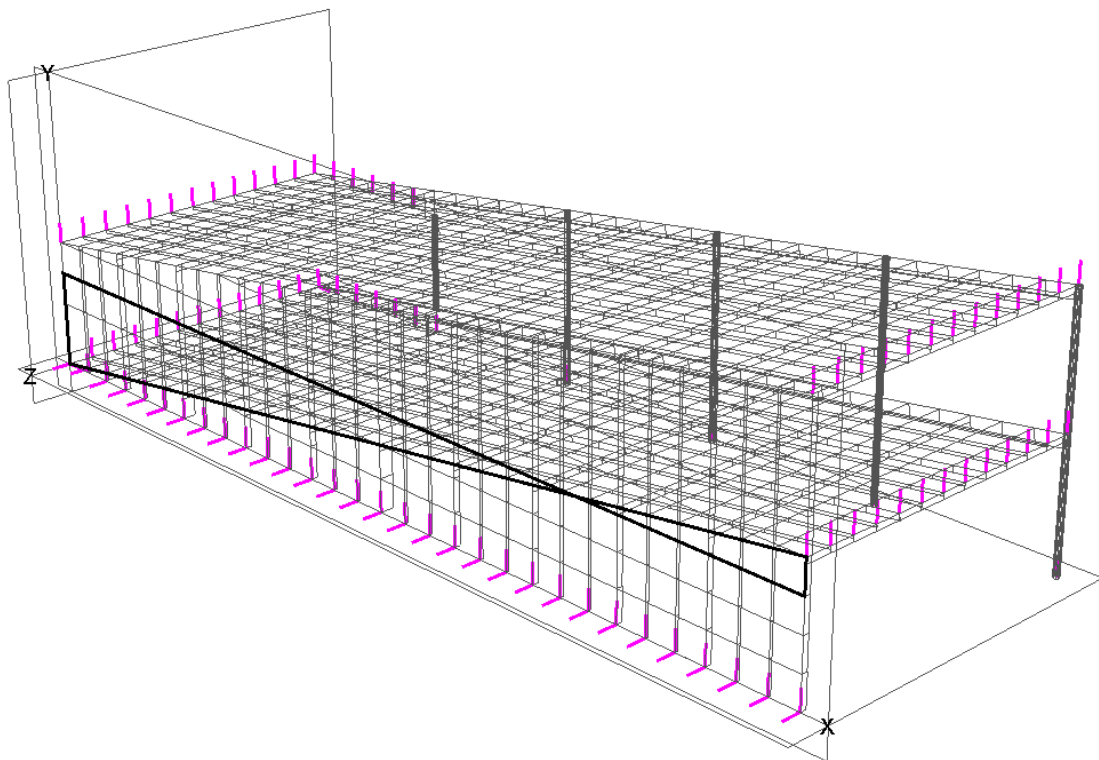
Sam postupak izrade modela odgovara prethodno opisanom u poglavlju 5.3.1.



Slika 34. MKE model unutarnje rampe

5.4.2. Rubni uvjeti

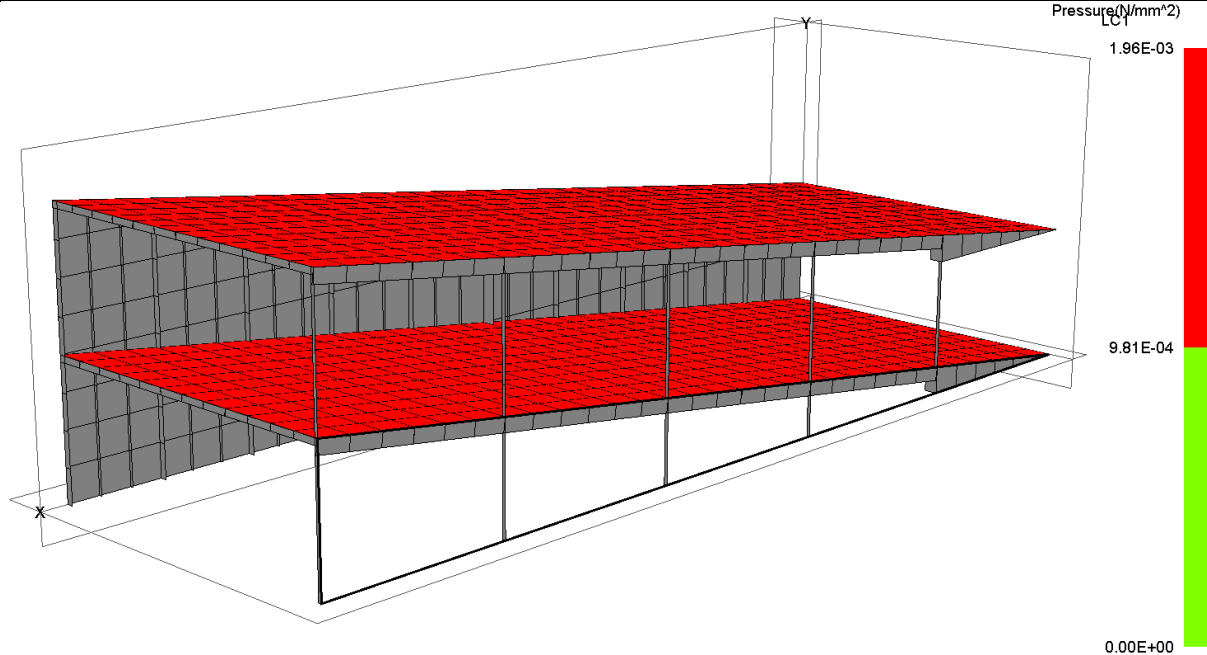
Vertikalne translacije su spriječene u točkama na krajevima rampe, u donjim točkama upora i točkama gdje rampa nasjeda na palubu ispod. U najdonjim točkama prednje stjenke su spriječene translacije u vertikalnom i poprečnom smjeru jer je u stvarnosti na tom mjestu kruti spoj boka s prvom palubom. [Slika 35]



Slika 35. Grafički prikaz rubnih uvjeta MKE modela unutarnje rampe

5.4.3. Slučaj opterećenja i implementacija

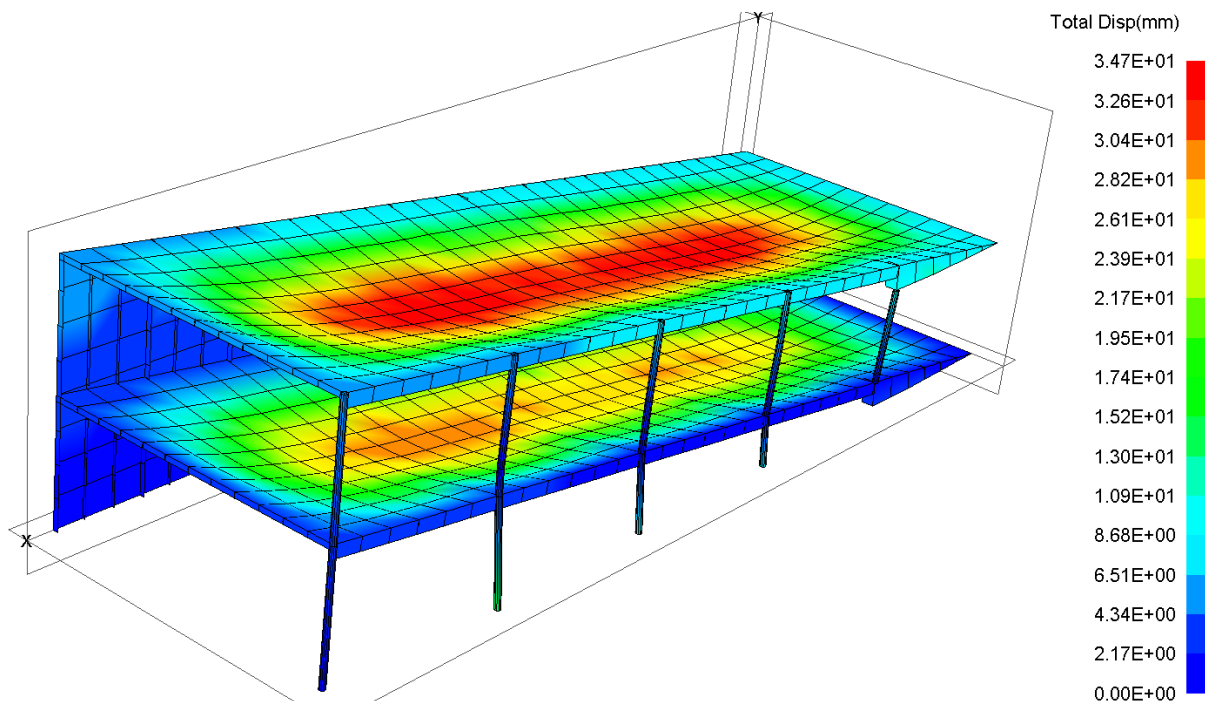
Konstrukcija rampi je evaluirana za slučaj opterećenja LC1 gdje je na gornju i donju rampu implementiran tlak od kotača automobila koji odgovara onome zadanom na teretne palube u poglavlju 5.3.3 te iznosi $0,001962 \text{ N/mm}^2$ [Slika 36].



Slika 36. Slučaj opterećenja LC1 za dimenzioniranje elemenata unutarnje rampe

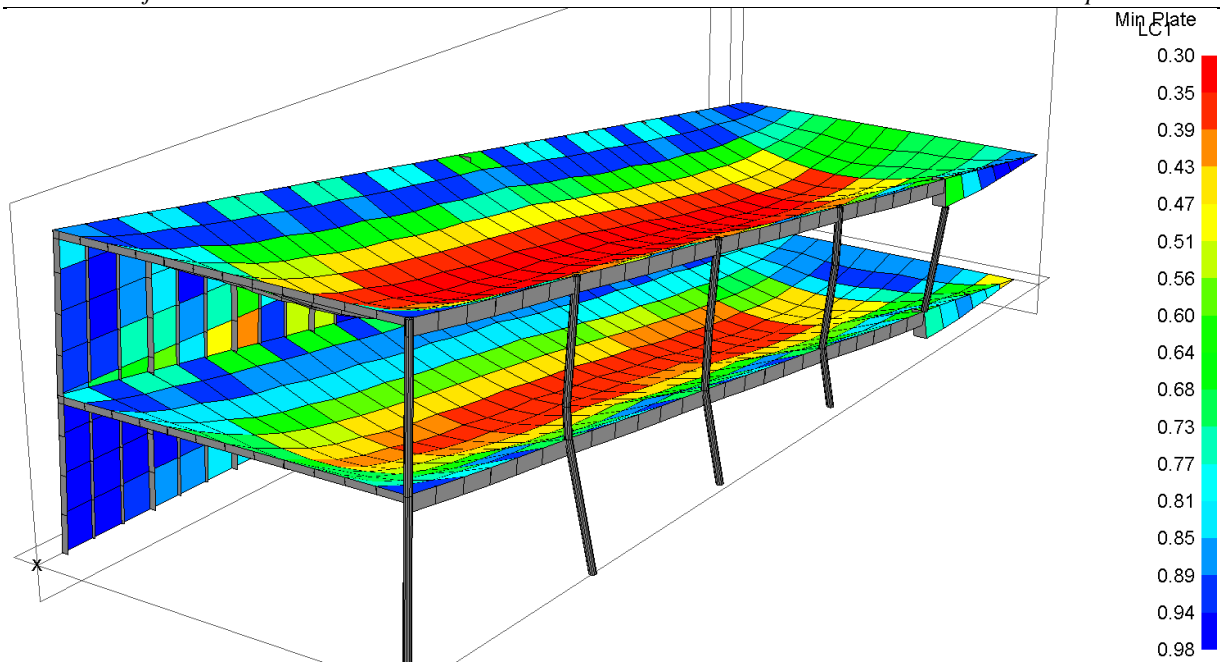
5.4.4. Dimenzioniranje konstrukcije

Maksimalni progib javlja se na drugoj rampi i iznosi 34,7 mm. Prva rampa se vertikalno progibne 29 mm [Slika 37]. Dopušteni progib prema (30) iznosi 37,5 mm gdje je b_s duljina poprečnih nosača rampe između oslonaca, to jest prednje stjenke i upora, te iznosi 7,5 m.



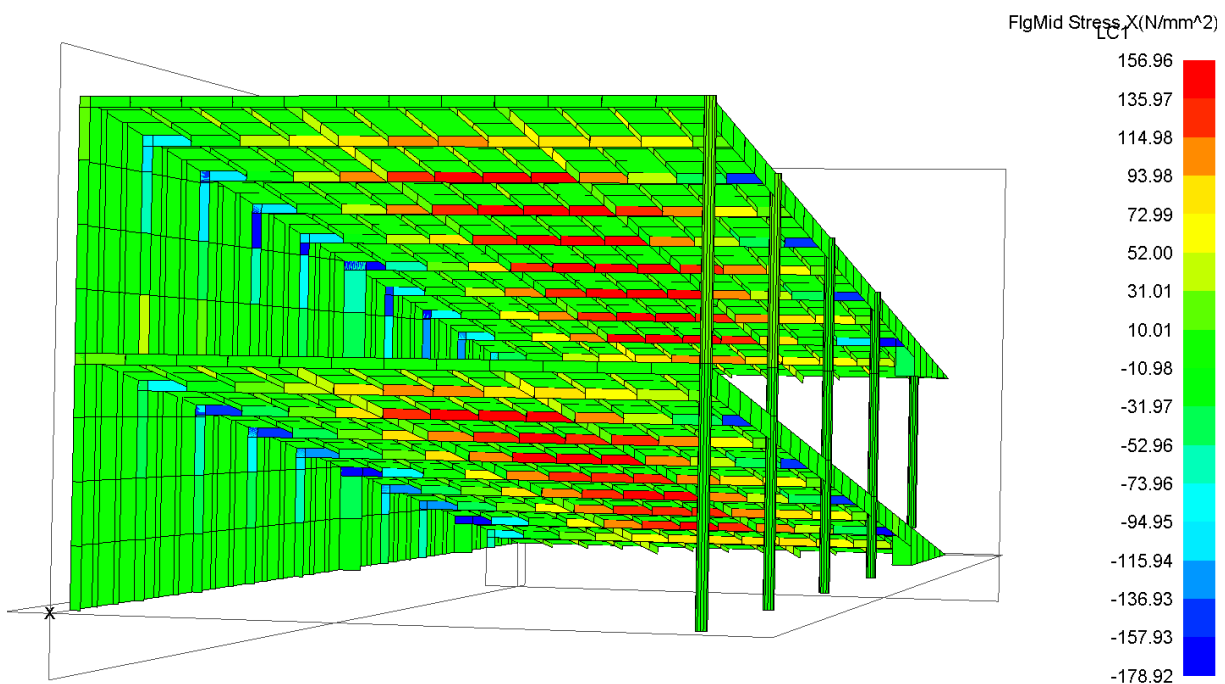
Slika 37. Deformacije unutarnjih rampi

Zbog logistike tehnologije za debljinu oplata rampi je odabrana debljina veća od one zahtijevane prema pravilima (13) te iznosi 7 mm. Svi paneli rampi su podobni [Slika 38].



Slika 38. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panel rampe

U spoju poprečnih nosača rampi s prednjom stjenkom i krajnjom podvezom se javljaju tlačna naprezanja, maksimalna po apsolutnoj vrijednosti, te su za njih dimenzionirani poprečni nosači. Zadovoljena su naprezanja u sredini grednih elemenata. Maksimalno tlačno naprezanje u poprečnom nosaču iznosi $178,9 \text{ N/mm}^2$ [Slika 39]. Najveće tlačno naprezanje u vertikalnom nosaču prednje stjenke iznosi 164 N/mm^2 . Uzdužni nosači rampe malo su opterećeni, no zbog tehnologije izrade zadržana je jednaka visina struka kao kod poprečnih nosača.



Slika 39. Naprezanja u grednim elementima rampi

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata rampe utvrđenih direktnim proračunom za LC1.

[Tablica 15]

Tablica 15. Odabrane dimenzije konstrukcijskih elemenata rampe

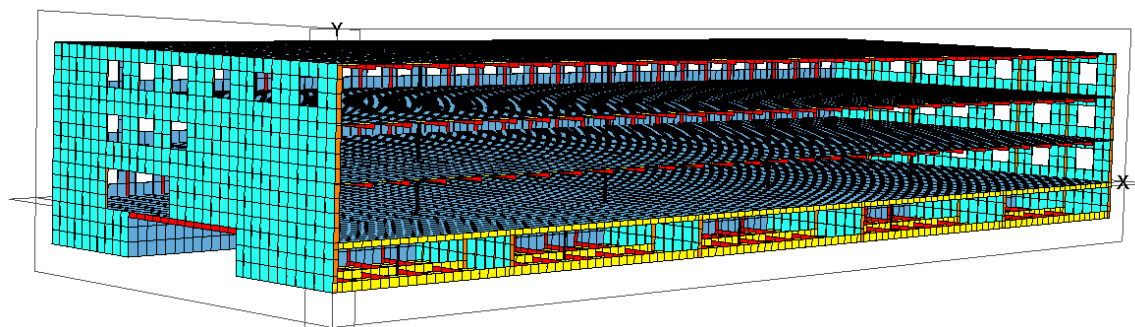
Element	Dimenzije profila
Poprečni nosači rampe	T 130x7/100x10
Uzdužni nosači rampe	T 130x7/70x10
Krajnji uzdužni nosač rampe	T 300x10/150x15
Uzdužnjaci rampe	HP 80x7
Upore	Φ 140x15
Vertikalni nosači prednje stjenke	T 130x7/70x10

Masa cijelog modela iznosi 33,9 t. Masa jedne unutarnje rampe iznosi približno 13 t.

5.5. Globalni MKE model plutajuće garaže

5.5.1. Izrada modela

MKE model cijele garaže dobiven je modifikacijom parcijalnog MKE modela. Prethodno modelirana podstruktura s podobnim konstrukcijskim elementima je produljena za duljinu između dvije sponje. Zatim je modificirana podstruktura kopirana čime se modelirala puna duljina plutajuće garaže od 70 m. Potom je modelirana prednja stjenka pločastim elementima te vertikalne ukrepe i nosači grednim konačnim elementima. Moduli koji čine prednju stjenku kopirani su i pozicionirani na kraj modela kako bi se dobila stražnja stjenka. [Slika 40]

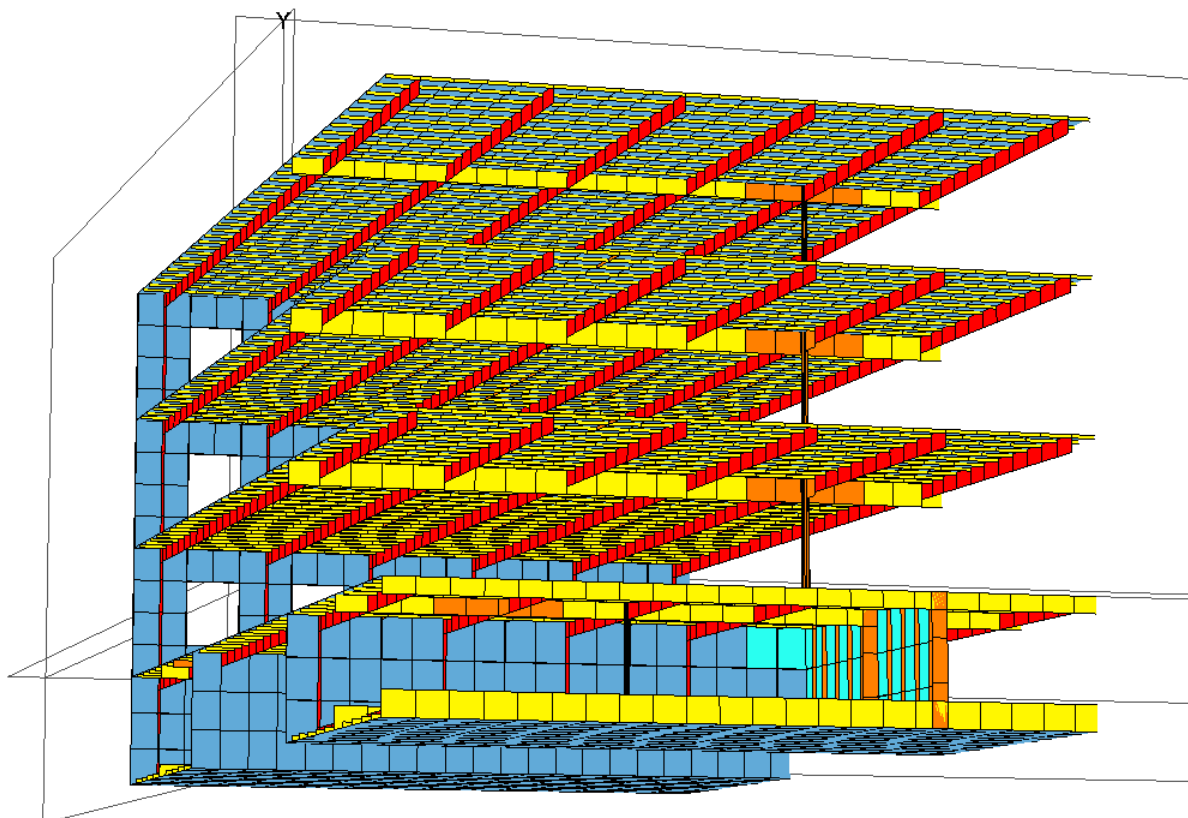


Slika 40. Globalni MKE model plutajuće garaže

Na temelju odziva parcijalnog modela, elementi izrađeni u sklopu vojeva u kojima dolazi do koncentracije naprezanja, kao spojevi jakih nosača s uporabom te oplata ispod upora, su izbrisani te su modelirani dodatni gredni ili pločasti konačni elementi koji omogućavaju pridruživanje

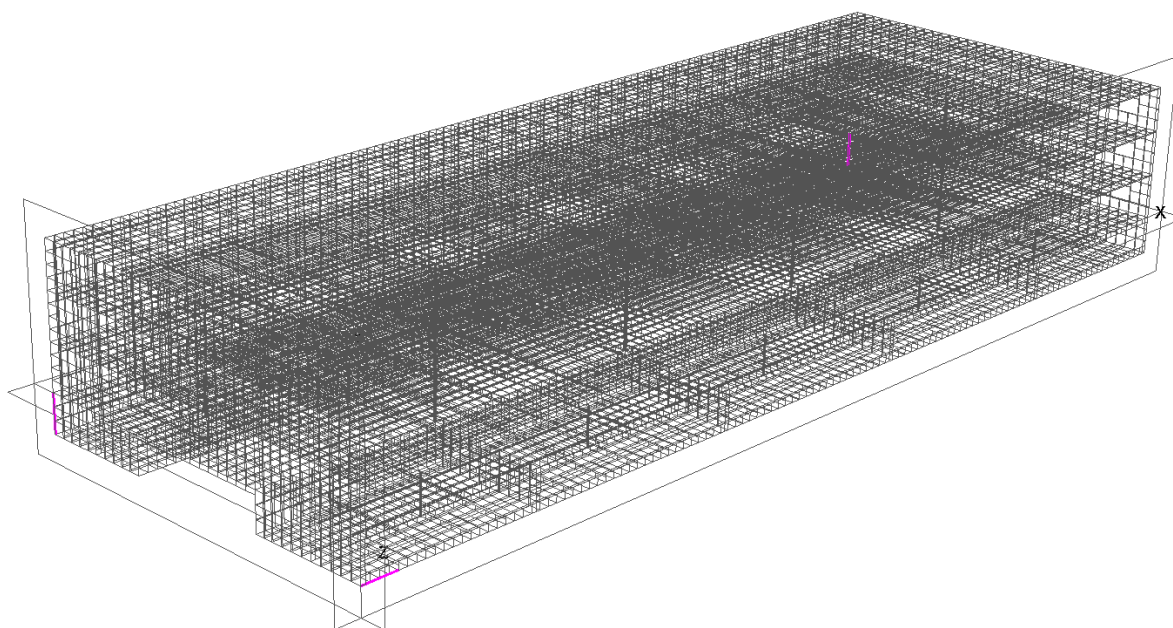
drugog geometrijskog svojstva elementu. Dodatno modelirani konačni elementi se lako raspoznaju po boji. Naime, jaki nosači su prikazani žutom ili crvenom bojom kad su izrađeni u sklopu vojeva, a dodatni gredni elementi su narančaste boje. Isto tako, oplata je prikazana plavom bojom kad je modelirana u sklopu vojeva, a na mjestima gdje joj je željeno promijeniti svojstvo je prikazana tirkiznom bojom. [Slika 41]

Također su modelirane interkostalne ukrepe između uzdužnjaka na panelima koji su se proračunom odziva globalnog modela pokazali kao nepodobni.



Slika 41. Prikaz modeliranih dodatnih konačnih elemenata

5.5.2. Rubni uvjeti



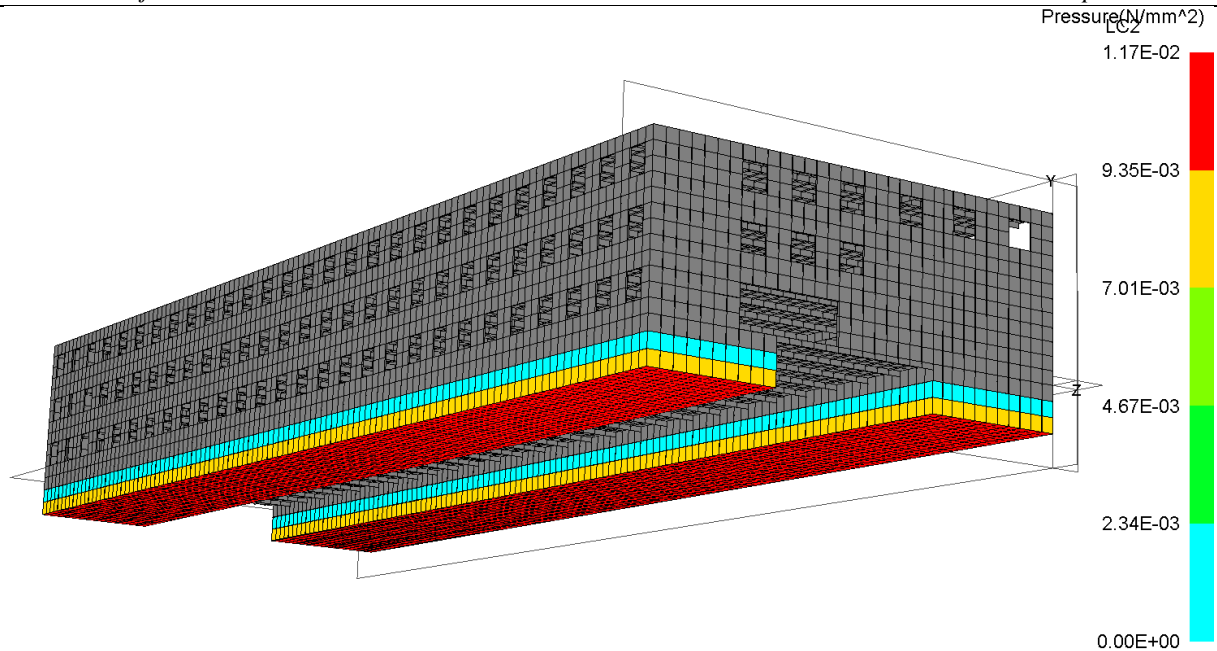
Slika 42. Grafički prikaz rubnih uvjeta globalnog MKE modela plutajuće garaže

Kako bi se mogla pokrenuti analiza strukturnog odziva globalnog modela u programu MAESTRO [7], potrebno je spriječiti pomake modela kao krutog tijela rubnim uvjetima koji predstavljaju oslonce. Stoga je spriječen pomak u vertikalnom smjeru u dvije krajnje točke te je u simetralnoj ravnini spriječen pomak u smjeru uzdužne osi X [Slika 42]. Navedeni rubni uvjeti su postavljeni u sjecištima jakih strukturnih elemenata kako bi imali što manji utjecaj na odziv konstrukcije.

5.5.3. Slučajevi opterećenja i implementacija

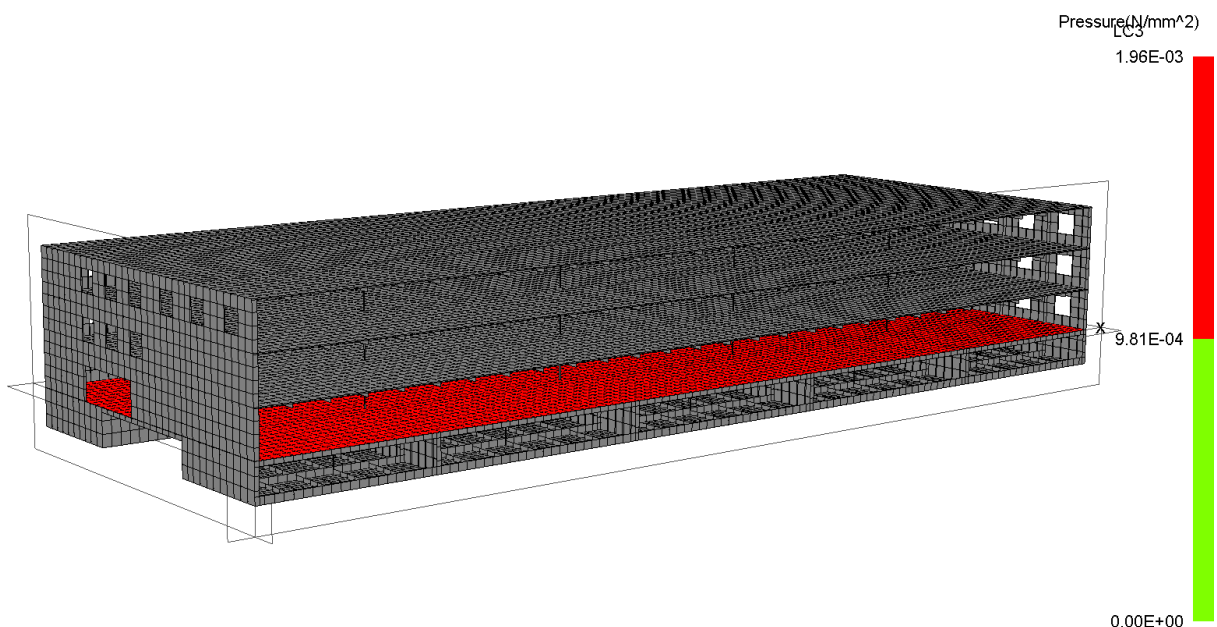
Za potrebe utvrđivanja podobnosti konstrukcije plutajuće garaže, detaljnije su definirani slučajevi opterećenja. Princip prema kojem je definiran slučaj opterećenja LC3 za dimenzioniranje prve palube parcijalnog modela u poglavlju 5.3.3 primijenjen je za evaluaciju svih paluba globalnog modela zasebno.

Slučaj opterećenja LC1 odgovara slučaju opterećenja LC2 parcijalnog modela. Za LC1 evaluira se konstrukcija uzgonskih pontona. U tom slučaju su sva opterećenja po palubama uslijed krcanja zadana kao masena na grupu pločastih konačnih elemenata. Definirano je da po palubi djeluje opterećenje od 140 t što odgovara potpuno nakrcanoj garaži plus rezerva od 12 t po palubi za masu opreme. Na krov je zadan tlak od taloženja snijega ekvivalentan onome iz poglavlja 5.3.3 te iznosi $0,5 \text{ kN/m}^2$. U LCI plutajuća garaža ima gaz od 1,16 m. [Slika 43]



Slika 43. Slučaj opterećenja LC1, uron pontona

Slučaj opterećenja LC2 odgovara opterećenju LC3 parcijalnog modela. Za LC2 se evaluira konstrukcija prve palube zbog čega je na nju zadan projektni tlak uslijed homogenog krcanja vozila koji iznosi $0,001962 \text{ N/mm}^2$, a na druge dvije palube zadano je realno maseno opterećenje ekvivalentno onome u prethodno obrađenom slučaju, LC1. Za opterećenje LC2 garaža uroni 1,27 m. [Slika 44]



Slika 44. Implementacija tlaka od kotača na prvu etažu za slučaj opterećenja LC2

Slučaj opterećenja LC3 definiran je za evaluaciju druge palube, a slučaj opterećenja LC4 za evaluaciju treće palube. Definirani su prema istom principu kao slučaj LC2 odn. na promatranu

palubu zadan je projektni tlak uslijed homogenog krcanja, a na preostale dvije teretne palube zadan je maseno opterećenje u iznosu od 140 t.

Za slučaj opterećenja LC5 je evaluirana paluba krova plutajuće garaže. On je definiran na način da je na teretne palube zadan maseno opterećenje u iznosu od 140 t na svaku palubu, a na krov je zadan projektni tlak uslijed taloženja snijega.

Pregled prethodno opisanih slučajeva opterećenja definiranih za projektne tlakove uslijed krcanja osobnih vozila i/ili taloženja snijega [Tablica 16].

Tablica 16. Sažetak slučajeva opterećenja LC1 – LC5 s opterećenjima

	Implementirano opterećenje [N/mm ² /t]				Gaz [m]
	1	2	3	4	
LC1	140 t	140 t	140 t	0,0005 N/mm ²	1,16
LC2	0,001962 N/mm ²	140 t	140 t	-	1,27
LC3	140 t	0,001962 N/mm ²	140 t	-	1,27
LC4	140 t	140 t	0,001962 N/mm ²	-	1,27
LC5	140 t	140 t	140 t	0,0005 N/mm ²	1,16

Za svaki prethodno opisan slučaj opterećenja definirana su još dva slučaja opterećenja s dodanim valom. Definirane karakteristike vala su značajna valna visina koja iznosi 0,8 m [5] te duljina vala koja odgovara duljini plutajuće garaže. U jednom slučaju je zadan val s valnim brijegom na sredini duljine garaže, a u drugom slučaju s valnim dolom na sredini duljine.

Što znači da je svaka evaluacijska cjelina u vidu uzgonskih pontona, pojedine teretne palube te krova evaluirana te redimenzionirana za implementirana tri odgovarajuća slučaja opterećenja.

U idućoj tablici dan je pregled slučajeva opterećenja s opisom [Tablica 17].

Tablica 17. Sažetak slučajeva opterećenja za globalni model

Slučaj opterećenja	Opis
LC1	Realno stanje krcanja; Dimenzioniranje uzgonskih pontona
LC2	Projektni tlak na prvu palubu; Dimenzioniranje prve palube
LC3	Projektni tlak na drugu palubu; Dimenzioniranje druge palube
LC4	Projektni tlak na treću palubu; Dimenzioniranje treće palube
LC5	Projektni tlak na krov; Dimenzioniranje krova
LC6	LC1 + valni dol; Dimenzioniranje uzgonskih pontona
LC7	LC1 + valni brijeg; Dimenzioniranje uzgonskih pontona
LC8	LC2 + valni dol; Dimenzioniranje prve palube
LC9	LC2 + valni brijeg; Dimenzioniranje prve palube
LC10	LC3 + valni dol; Dimenzioniranje druge palube
LC11	LC3 + valni brijeg; Dimenzioniranje druge palube
LC12	LC4 + valni dol; Dimenzioniranje treće palube
LC13	LC4 + valni brijeg; Dimenzioniranje treće palube
LC14	LC5 + valni dol; Dimenzioniranje krova
LC15	LC5 + valni brijeg; Dimenzioniranje krova

Za realno stanje krcanja maksimalni progibni vertikalni moment savijanja javlja se u sredini plutajuće garaže uslijed implementacije valnog dola (LC6) te iznosi $-2,43 \times 10^{10}$ Nmm, a progibni za implementiran valni brijeg (LC7) te iznosi $3,62 \times 10^{10}$ Nmm.

Moment otpora presjeka za palubu iznosi $5,17 \times 10^9$ mm³, a za dno iznosi $5,08 \times 10^9$ mm³.

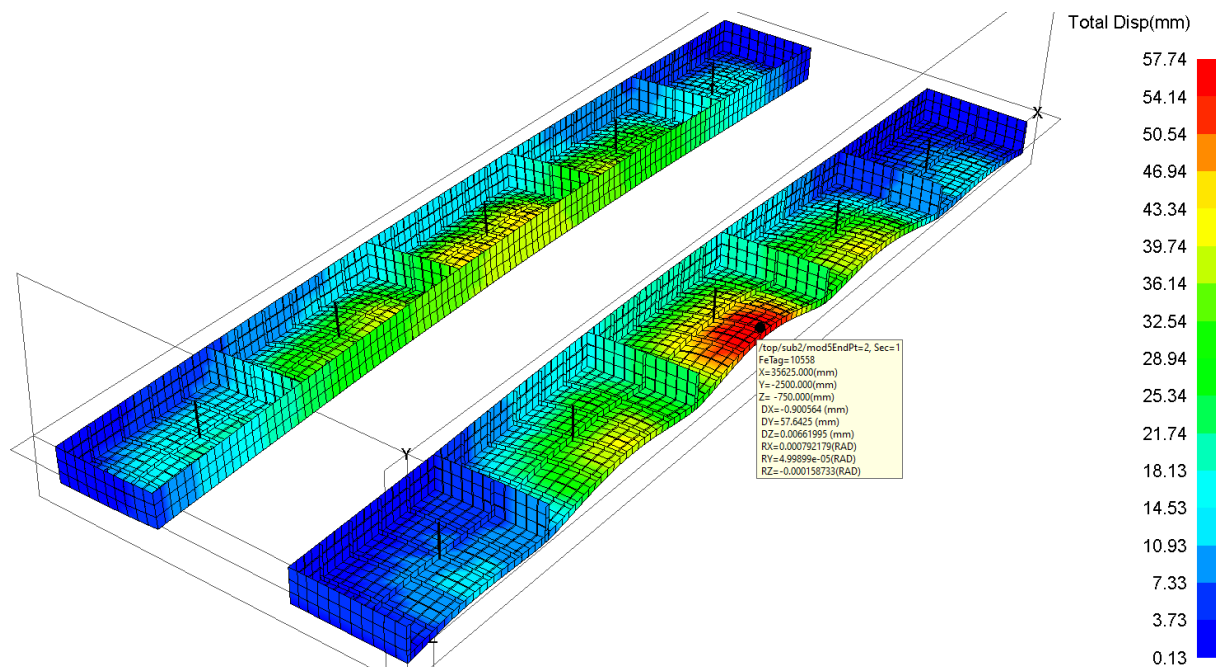
Uslijed većeg, pregibnog, vertikalnog momenta savijanja primarno naprezanje u dnu pontona plutajuće garaže iznosi $7,1$ N/mm², a u najgornjoj palubi iznosi $7,0$ N/mm².

Uzdužna čvrstoća nije relevantna za projekt plutajuće garaže jer su razine naprezanja koje se javljaju uslijed primarnog odziva zanemarive.

5.5.4. Dimenzioniranje konstrukcije

5.5.4.1. Dimenzioniranje uzgonskih pontona

Reprojektiranje konstrukcije uzgonskih pontona provedeno je na temelju strukturnih odziva za implementirane slučajeve opterećenja LC1, LC6 i LC7.



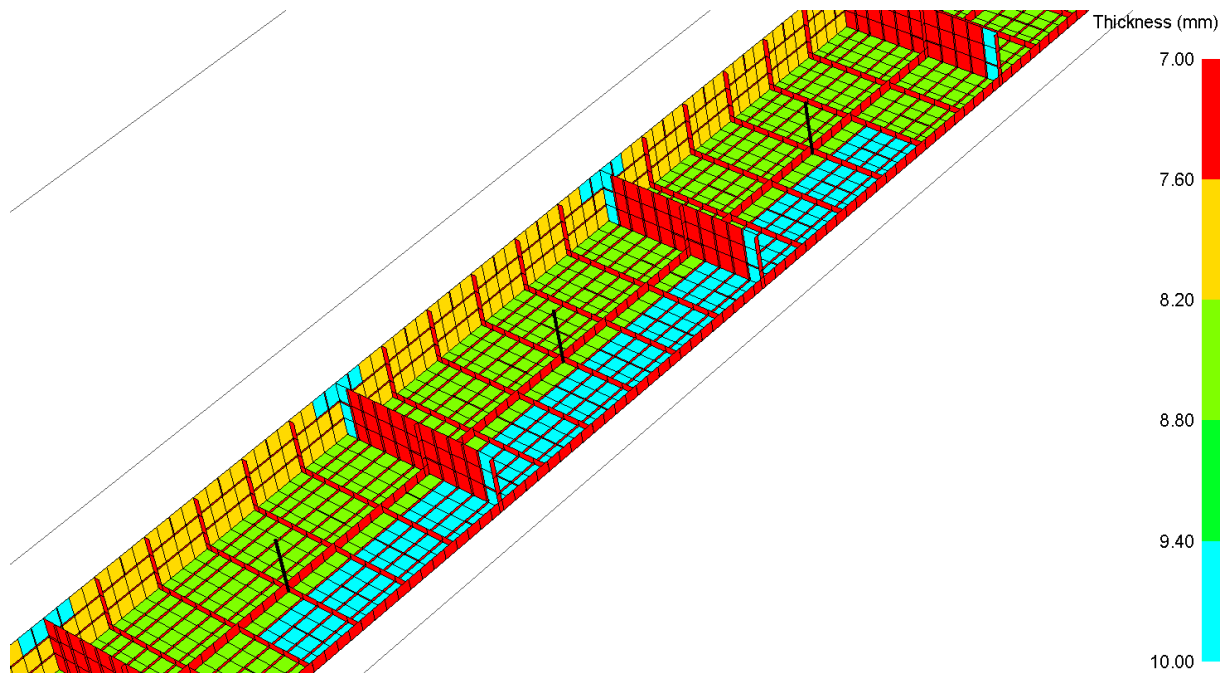
Slika 45. Deformacije uzgonskih pontona globalnog MKE modela za LC7

Maksimalni progib javlja se za slučaj opterećenja LC7 u sredini središnjeg pontona te iznosi 58 mm [Slika 45]. Bočni ponton se najviše deformira u sredini za 45 mm također u slučaju opterećenja LC7.

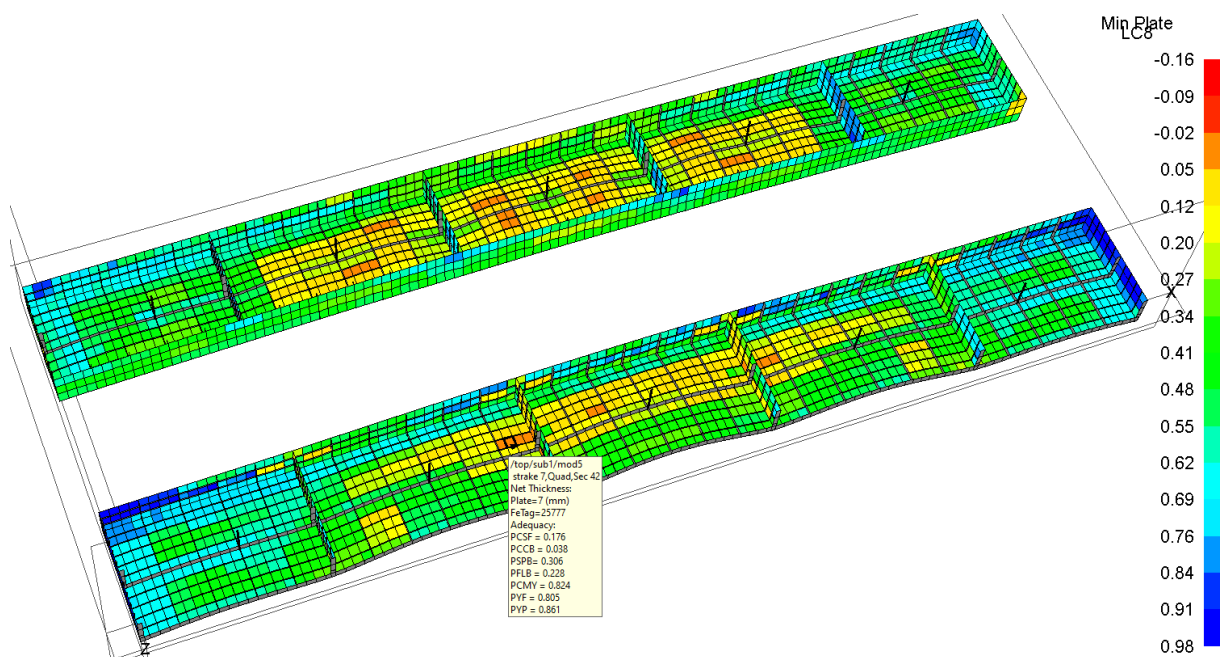
Različito zadana distribucija vala najviše utječe na podobnost panela. Valni brijeg uzrokuje najveća naprezanja u sredini oplata dna pontona, a valni dol na krajevima pontona. Kao posljedica toga dolazi do nezadovoljenja kriterija PCCB, to jest bi-aksijalnog naprezanja u panelima.

Uslijed valnog brijega, jako opterećena sredina središnjeg pontona izvedena je oplatom debljine 10 mm. Također je pojačana oplata boka pontona ispod pozicije upora te nepropusnih pregrada uz jake vertikalne elemente, vertikalni nosač ili bok pontona, na 10 mm [Slika 46]. Na kritična mjesta još su dodane interkostalne ukrepe koje prepolove duljinu panela čime svi elementi oplata uzgonskih pontona zadovoljavaju kriterije podobnosti za panel za implementirano opterećenje LC7 [Slika 47].

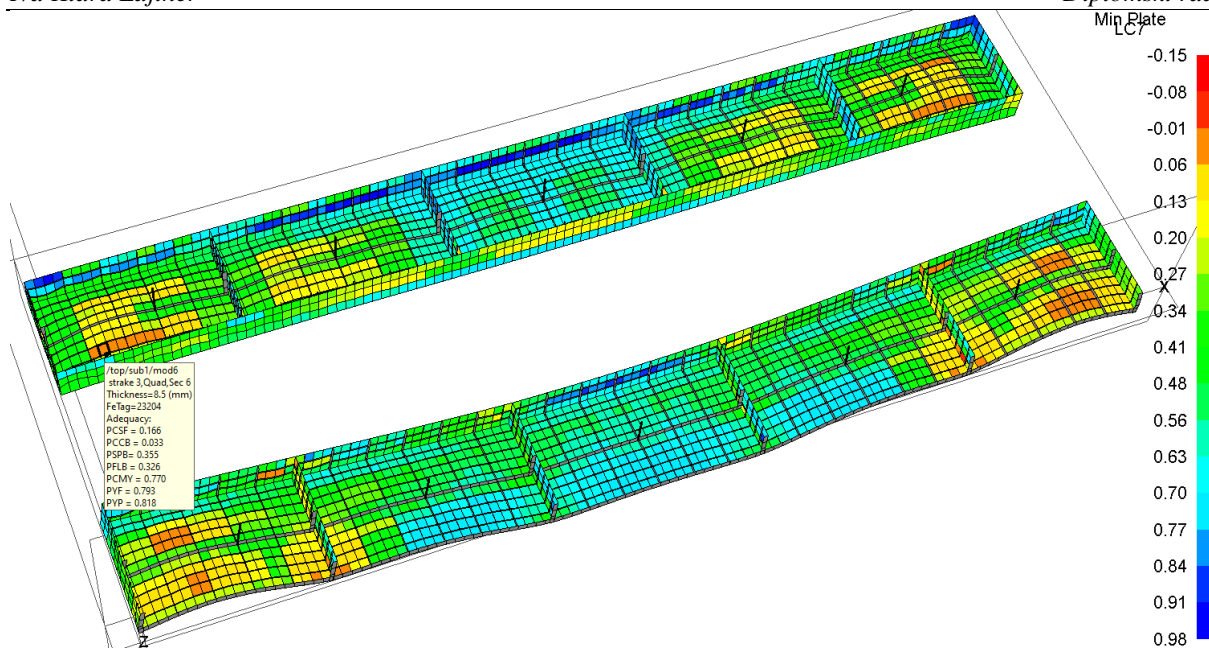
Za slučaj opterećenja LC6, odn. implementacije valnog dola, bilo je dovoljno modelirati interkostalne poprečne ukrepe na jače opterećenu oplatu dna na krajevima oba pontona kako bi se zadovoljili svi kriteriji podobnosti za panel.



Slika 46. Pojačani dijelovi oplate i interkostalne ukrepe



Slika 47. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele uzgonskih pontona za LC7



Slika 48. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele uzgonskih pontona za LC6

Sažetak odabranih debljina oplata pontona utvrđenih strukturalnom analizom globalnog MKE modela [Tablica 18].

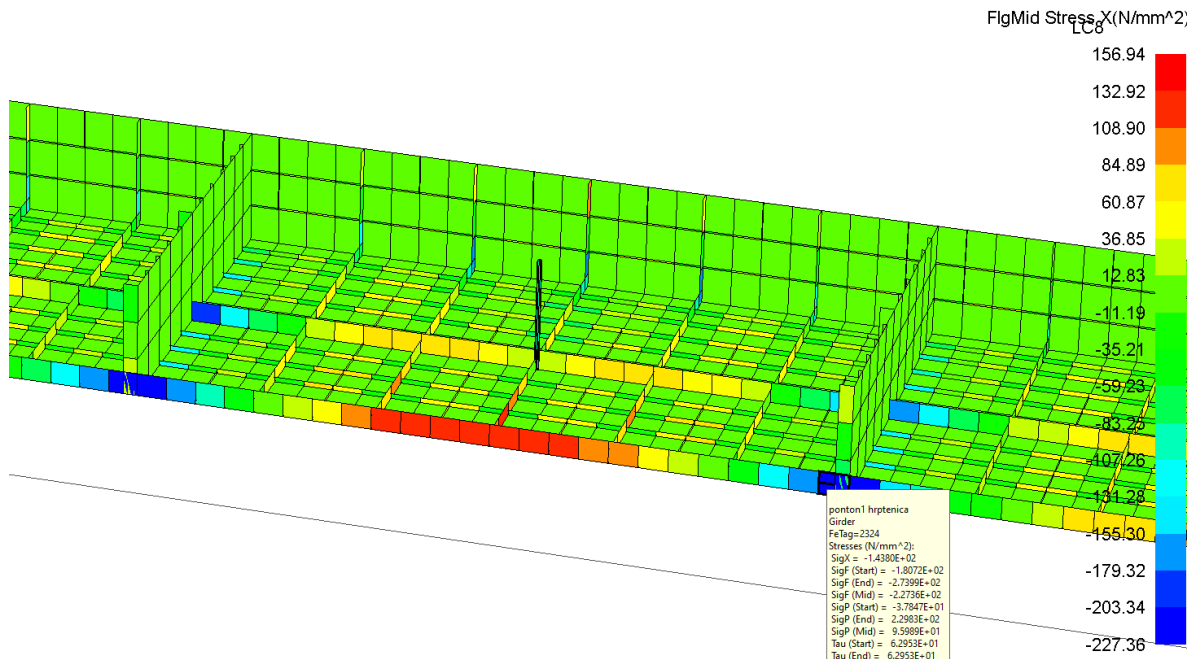
Tablica 18. Odabrane konačne debljine oplata pontona

Pozicija	Debljina oplata [mm]
Dno pontona	8,5
Dno pontona – pojačanje u sredini	10,0
Bok pontona	8,0
Bok pontona – pojačanje ispod upora	10,0
Nepropusne pregrade	7,0
Nepropusne pregrade – pojačanje uz jake vertikalne elemente	10,0

Jaki nosači središnjeg i bočnog pontona su dimenzionirani za najkritičniji slučaj opterećenja, LC7.

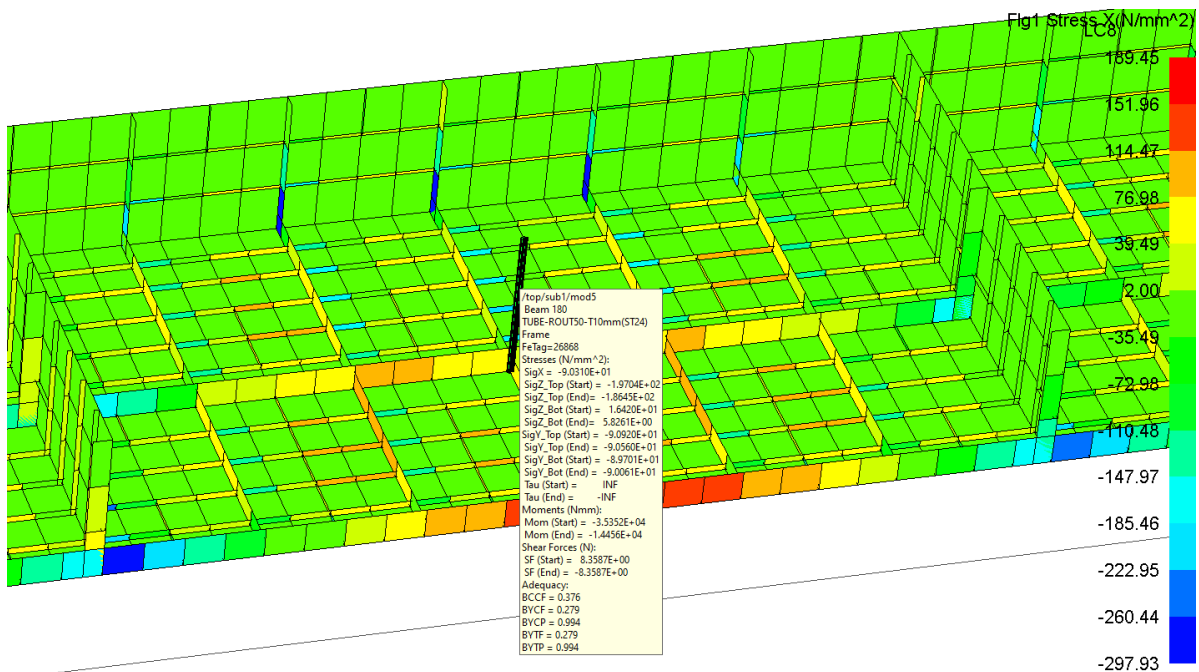
U hrptenci središnjeg pontona javljaju se najveća tlačna naprezanja u sjecištu s pregradom stoga je određeno da je izrađena od čelika povišene čvrstoće AH32. Najveće naprezanje očitano u središtu elementa iznosi $-227,4 \text{ N/mm}^2$ [Slika 49]. Razine u uzdužnom nosaču dna središnjeg pontona su nešto niže pa je za njega odabran običan čelik ST24. Tlačno naprezanje u pojasu u sjecištu s pregradom iznosi -184 N/mm^2 . Najveće naprezanje koje se javlja u pojasu rebrenice središnjeg pontona je vlačno te iznosi 120 N/mm^2 . Maksimalno naprezanje u pojasu okvirnog

rebra boka središnjeg pontona javlja se u spoju s rebrenicom te očitano u središtu elementa iznosi -171 N/mm^2 . Najveće naprezanje koje se javlja u uzdužnjacima dna iznosi -188 N/mm^2 .



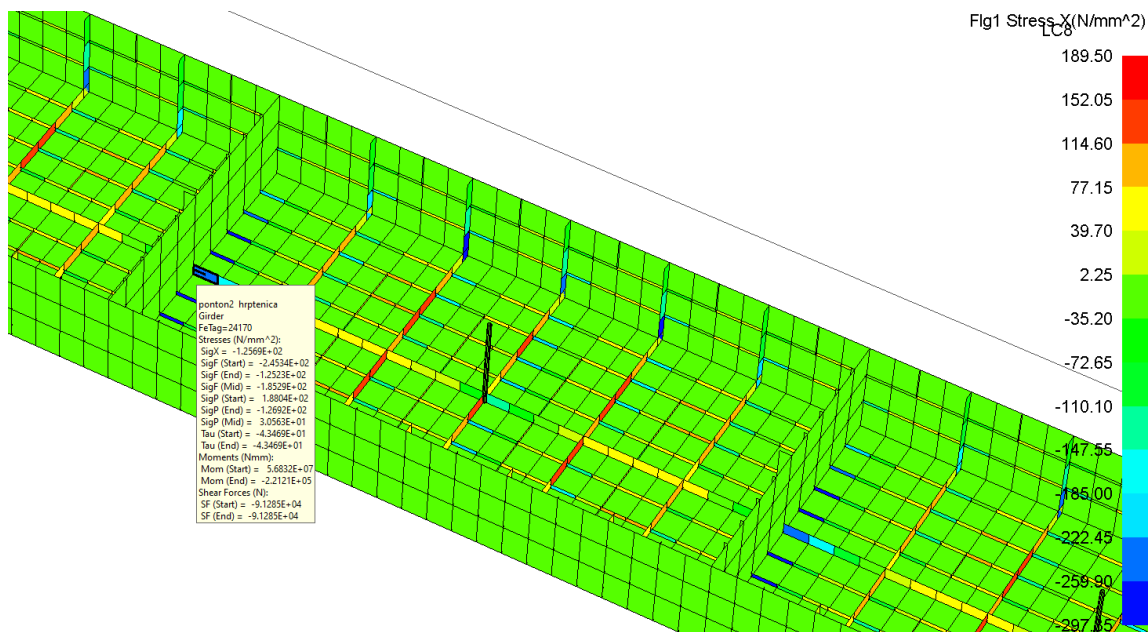
Slika 49. Naprezanja u grednim elementima na sredini središnjeg pontona za LC7

Najveće tlačno aksijalno naprezanje u središnjoj upori središnjeg pontona iznosi $90,3 \text{ N/mm}^2$ [Slika 50]. Geometrijske karakteristike upore i iznos kritičnog naprezanja odgovaraju onima u Tablica 12, te je ostvaren koeficijent iskoristivosti η u iznosu od 0,43.



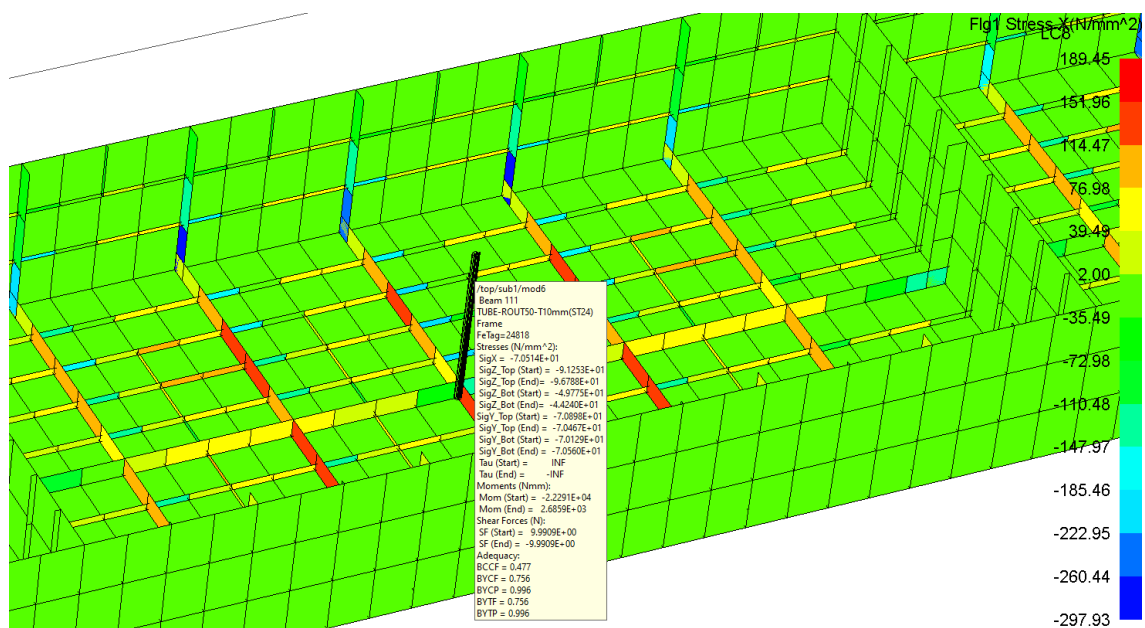
Slika 50. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu središnjeg pontona za LC7

U hrptenici bočnog pontona se također javlja maksimalno naprezanje u sjecištu s pregradom koje iznosi -185 N/mm^2 očitano u središtu elementa [Slika 51]. Maksimalno naprezanje u pojasu rebrenica je vlačno te iznosi $146,5 \text{ N/mm}^2$. Najveće naprezanje u pojasu okvirnog rebra boka bočnog pontona iznosi $178,6 \text{ N/mm}^2$. Maksimalno naprezanje u uzdužnjacima dna bočnog pontona iznosi -214 N/mm^2 .



Slika 51. Naprezanja u grednim elementima na sredini bočnog pontona za LC7

Najveće tlačno aksijalno naprezanje u središnjoj upori bočnog pontona iznosi $70,5 \text{ N/mm}^2$ [Slika 52]. Geometrijske karakteristike upore i iznos kritičnog naprezanja odgovaraju onima u Tablica 12, te je ostvaren koeficijent iskoristivosti η u iznosu od 0,33.



Slika 52. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu bočnog pontona za LC7

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata oba pontona utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela za slučajevne opterećenja LC1, LC6 i LC7 [Tablica 19].

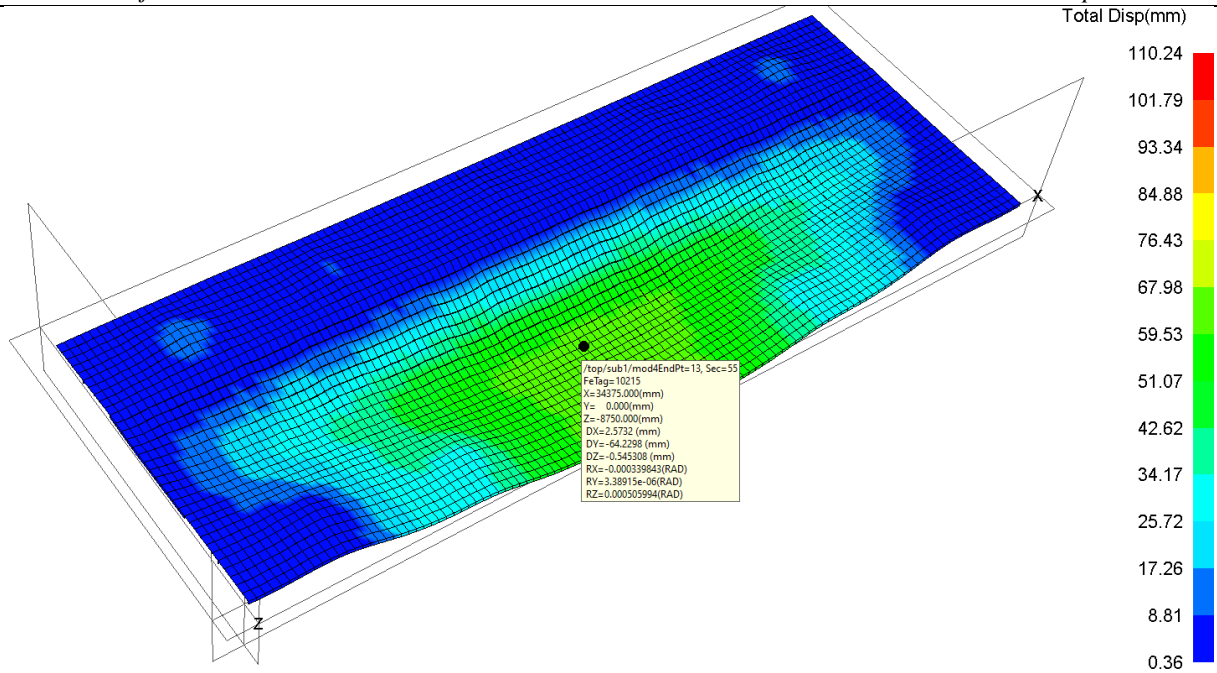
Tablica 19. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata pontona

Element	Dimenzije profila
Središnji ponton - rebrenice	T 300x8/150x15
Središnji ponton - hrptenica	T 500x12/250x25
Središnji ponton – uzdužni nosač dna	T 450x8,5/200x20
Središnji ponton – okvirna rebra	T 250x8/120x12
Središnji ponton – upore	Φ 100x10
Bočni ponton - rebrenice	T 300x8/120x12
Bočni ponton - hrptenica	T 300x8,5/150x15
Bočni ponton – okvirna rebra	T 250x8/100x10
Bočni ponton - upore	Φ 100x10
Nepropusne pregrade – vertikalni nosač	T 200x7/100x1
Nepropusne pregrade – vertikalne ukrepe	FB 80x7
Pontoni dno - uzdužnjaci	HP 120x8
Pontoni bok - uzdužnjaci	HP 80x7
Interkostalne ukrepe	FB 60x7

5.5.4.2. Dimenzioniranje prve palube

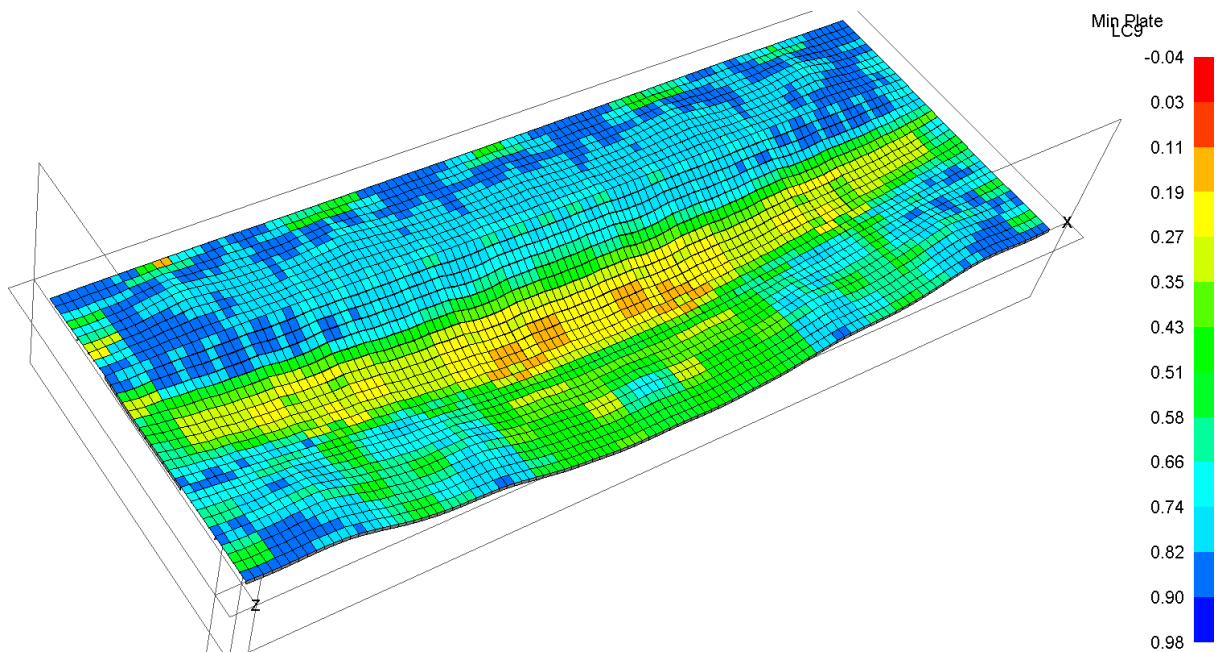
Reprojektiranje konstrukcije prve palube provedeno je na temelju strukturnih odziva za implementirane slučajevne opterećenja LC2, LC8 i LC9.

Najveće deformacije javljaju se u sredini palube 1 za slučaj opterećenja LC8 s implementiranim valnim dolom te iznose 64,3 mm, a dopušteni progib odgovara onome u poglavlju 5.3.4.3 te iznosi 75 mm [Slika 53].



Slika 53. Deformacija prve palube globalnog MKE modela za LC8

Najveća bi-aksijalna naprezanja javljaju se u izloženom dijelu oplata između bokova središnjeg i bočnog pontona također za slučaj opterećenja LC8. Stoga je u tom području promijenjena debljine oplata sa 7 mm na 8 mm. Na par mjesta su još dodane interkostalne ukrepe kako bi svi elementi oplata prve palube bili podobni [Slika 54].



Slika 54. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele prve palube za LC8

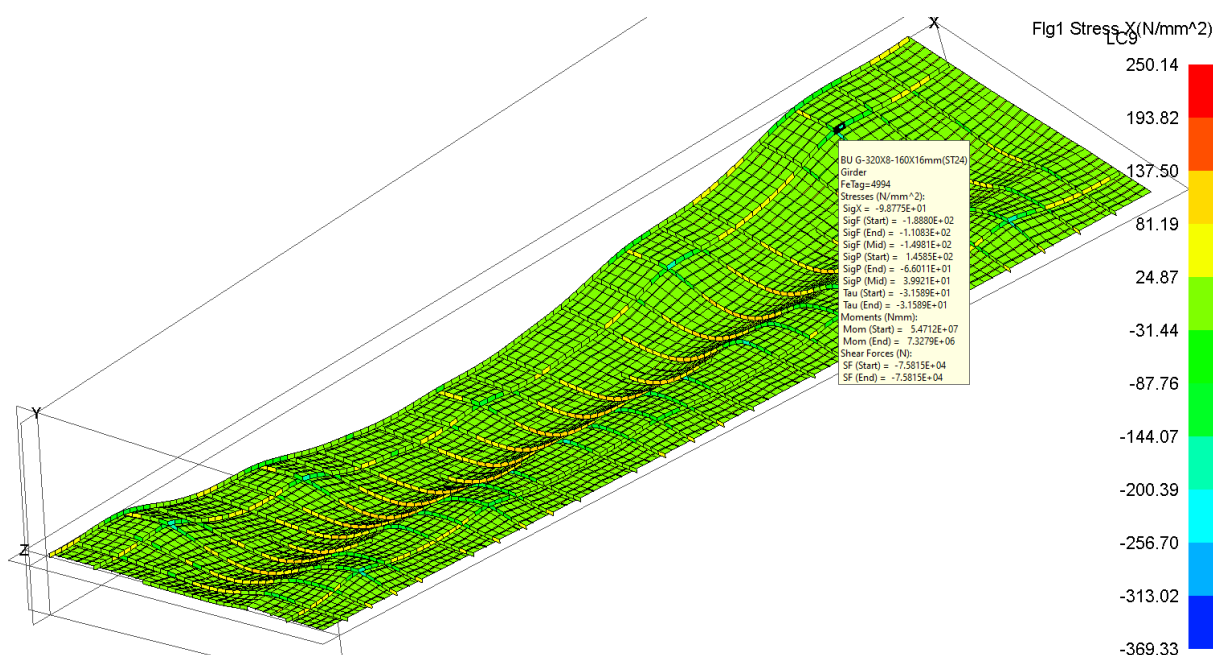
Sažetak odabranih debljina oplata palube 1 utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela [Tablica 20].

Tablica 20. Odabrane konačne debljine oplata palube 1

Pozicija	Debljina oplata [mm]
Paluba 1	7,0
Paluba 1 između bokova pontona	8,0

Nadalje, svi jaki uzdužni i poprečni nosači prve palube i sponje i podveze bočnog i središnjeg pontona su najviše opterećeni za slučaj opterećenja LC8 uslijed implementiranog valnog dola za koji su redimenzionirani.

Najveća naprezanja u podvezi središnjeg pontona su tlačna te se javljaju u pojasu podveze središnjeg pontona u spoju s zadnjom uporom te iznose 188 N/mm^2 [Slika 55], a najveća naprezanja u sponji središnjeg pontona iznose $-171,8 \text{ N/mm}^2$.



Slika 55. Naprezanja u grednim elementima palube 1 globalnog modela

U podvezi bočnog pontona najveće naprezanje iznosi $165,6 \text{ N/mm}^2$, a u sponji $-177,7 \text{ N/mm}^2$. Najveće naprezanje u sponji prve palube iznosi -135 N/mm^2 očitano u sredini elementa u spoju s bokom bočnog pontona.

Prema iskazanim razinama opterećenja u jakim konstrukcijskim elementima prve palube vidljivo je da su svi elementi podobni.

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata prve palube utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela za slučajevne opterećenja LC2, LC8 i LC9 [Tablica 21].

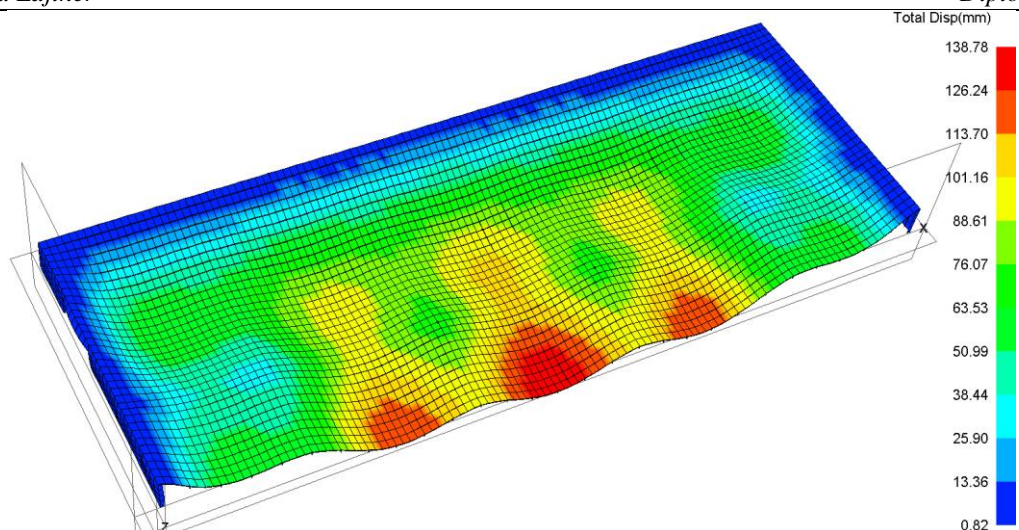
Tablica 21. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 1

Element	Dimenzije profila
Središnji ponton - sponje	T 320x7/120x12
Središnji ponton – sponja u sjecištu s uporom	T 320x7/160x20
Središnji ponton - podveze	T 320x8/160x16
Središnji ponton – podveze u sjecištu s uporom	T 320x8/160x20
Paluba 1 - sponje	T 300x7/120x12
Bočni ponton - sponje	T 300x7/120x12
Bočni ponton - sponja u sjecištu s uporom	T 300x7/150x15
Bočni ponton – podveza	T 300x8/120x12
Bočni ponton – podveza u sjecištu s uporom	T 300x7/150x15
Paluba 1 - uzdužnjaci	HP 80x7
Interkostalne ukrepe	FB 60x7

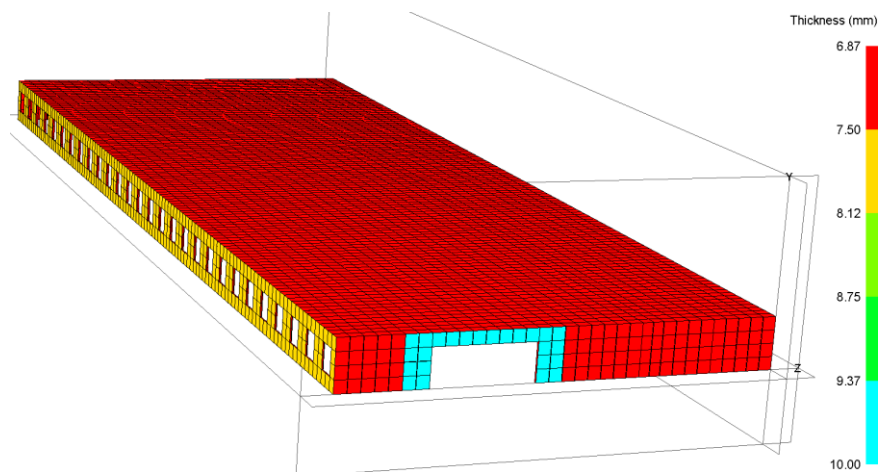
5.5.4.3. Dimenzioniranje druge palube i boka garaže do druge palube

Reprojektiranje konstrukcije druge palube i boka garaže do druge palube provedeno je na temelju strukturnih odziva za implementirane slučajevne opterećenja LC3, LC10 i LC11.

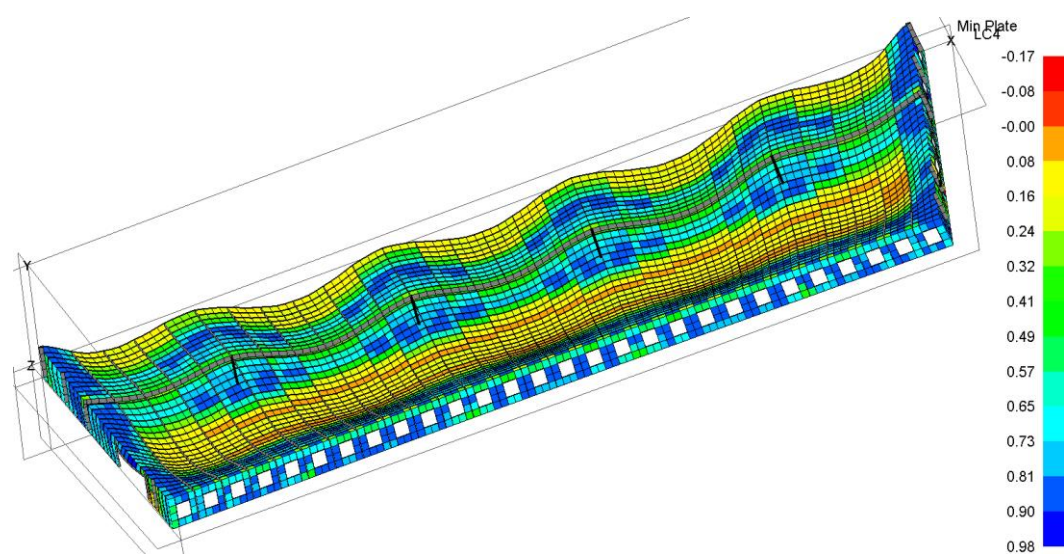
Druga paluba se najviše deformira u slučaju opterećenja LC10 s implementiranim valnim dolom. Dopušteni progib odgovara onome u poglavlju 5.3.4.1 te iznosi 252,5 mm, a očitani progib iznosi 138,8 mm [Slika 56]. Uz dodane interkostalne ukrepe, debljina oplata druge palube od 7 mm zadovoljava sve kriterije podobnosti za panel. Red interkostalnih ukrepa modeliran je uzduž palube između reda upora i boka garaže. Oko otvora na prednjoj stjenci za ulaznu rampu pojačana je oplata na debljinu od 10 mm [Slika 57], inače paneli prednje i stražnje stjenke debljine 7 mm su podobni. Svi paneli oplata boka garaže debljine 7,5 mm su podobni [Slika 58].



Slika 56. Deformacija druge palube globalnog MKE modela za LC10



Slika 57. Prikaz bruto debljina palube 2 i boka do palube 2



Slika 58. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele druge palube za LC10

Sažetak odabranih debljina oplata palube 2 te pripadajućeg boka utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela [Tablica 22].

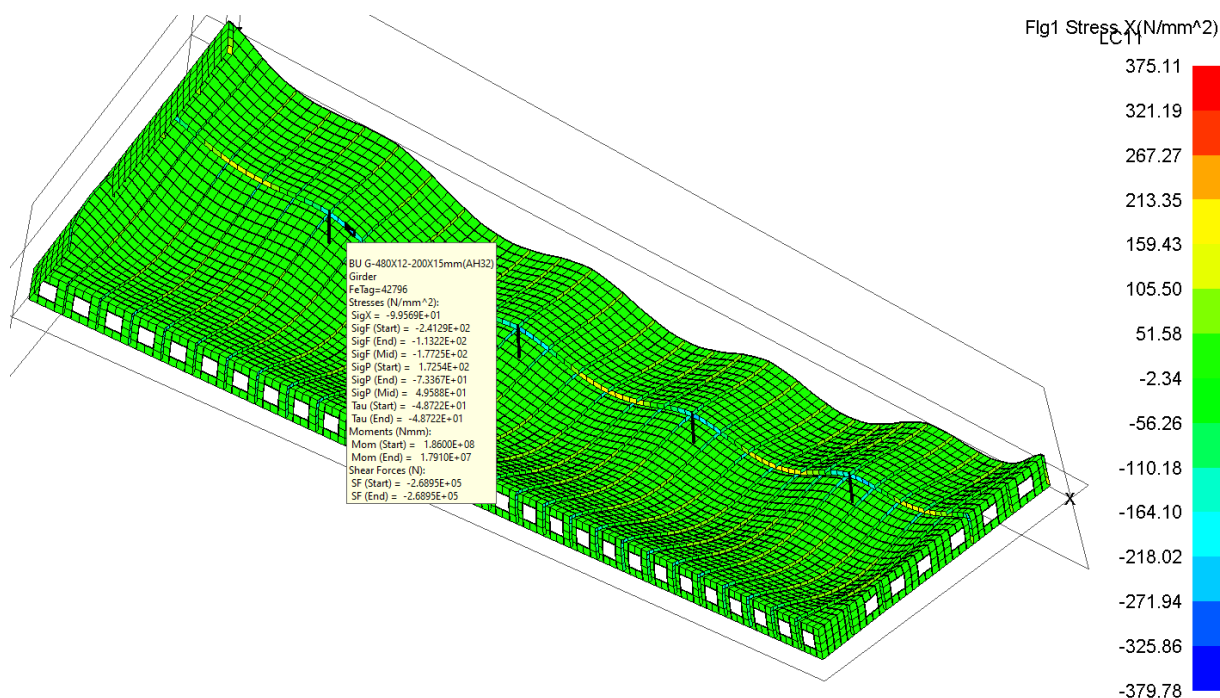
Tablica 22. Odabrane konačne debljine oplata palube 2 te boka garaže

Pozicija	Debljina oplata [mm]
Paluba 2	7,0
Prednja i stražnja stjenka	7,0
Prednja stjenka – pojačanje oko otvora	10,0
Bok do palube 2	7,5

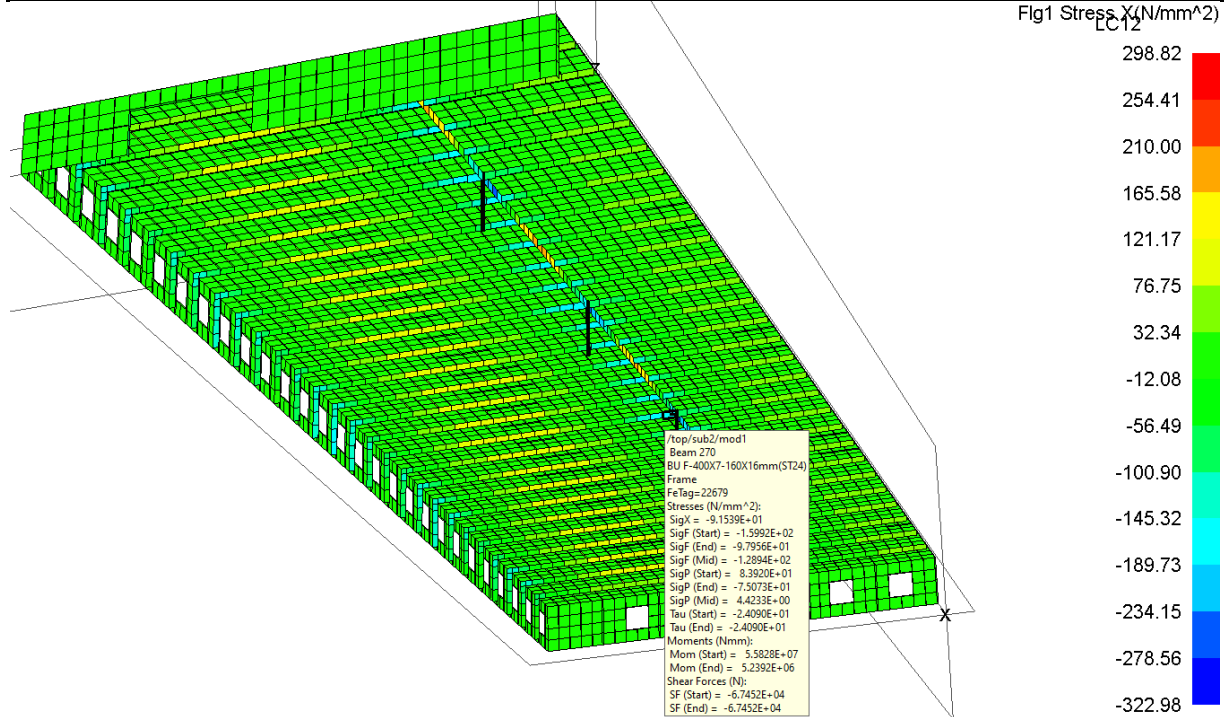
Najveća naprezanja u prirubnici podveze javljaju se na mjestu spoja s ojačanom prirubnicom zbog sjecišta s uporom te očitana u početku elementa iznose $-241,3 \text{ N/mm}^2$ [Slika 59].

Maksimalna naprezanja u prirubnici sponje javljaju se u spoju s uporom za slučaj opterećenja LC11 s implementiranim valnim brijegom te iznose 160 N/mm^2 [Slika 60].

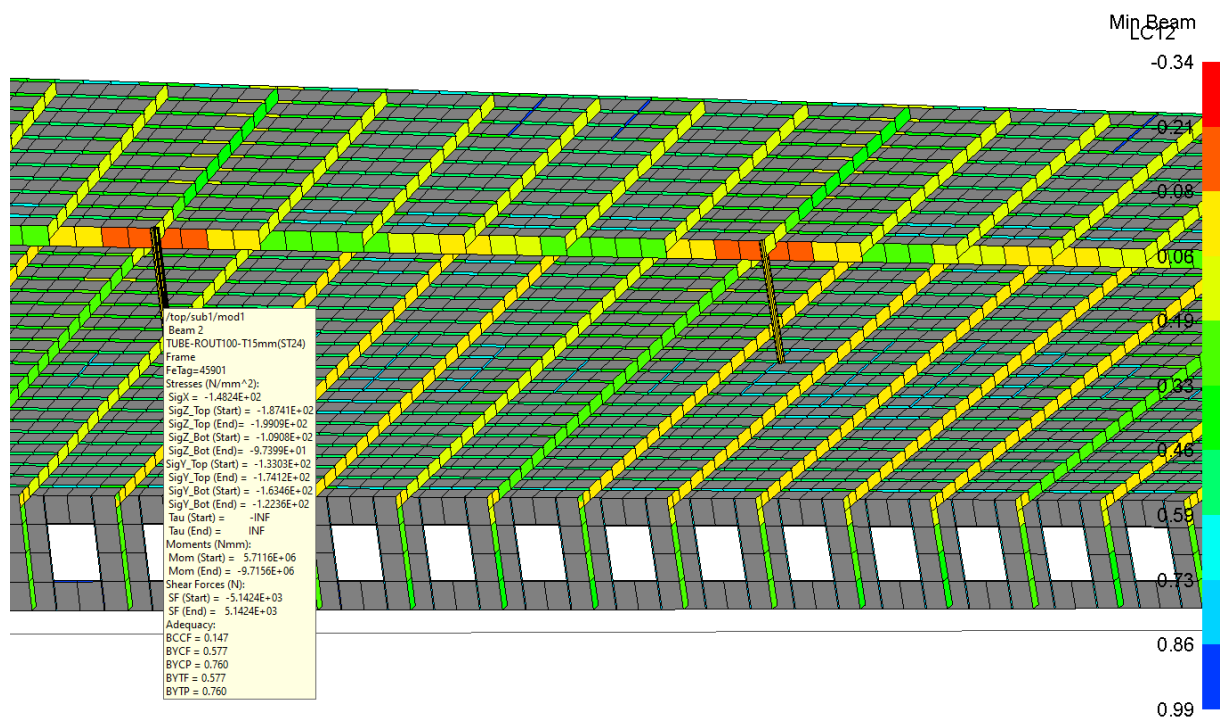
U vertikalnom nosaču boka maksimalna naprezanja javljaju se za slučaj LC11 u spoju s palubom 1 te očitana u početku elementa iznose $-159,7 \text{ N/mm}^2$.



Slika 59. Maksimalna naprezanja u podvezi palube 2 za LC10



Slika 60. Maksimalna naprezanja u sponji palube 2 za LC11



Slika 61. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu na prvoj palubi

Za očitana aksijalna tlačna naprezanja u upori na prvoj palubi [Slika 61] je proveden proračun s obzirom na izvijanje prema pravilima [Tablica 23].

Tablica 23. Proračun izvijanja za upore na prvoj palubi

	Upora paluba 1
Promjer profila [mm]	200
Debljina stjenke [mm]	15
Površ. poprečnog presjeka [cm ²]	87,2
Moment tromosti [cm ⁴]	3754,2
σ_{EC} [N/mm ²]	1945,6
σ_{kr} [N/mm ²]	227,9
$\sigma_{x,FEM}$ [N/mm ²]	148,2
η	0,649

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata druge palube te pripadajućeg boka utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela za slučajeve opterećenja LC3, LC10 i LC11 [Tablica 24].

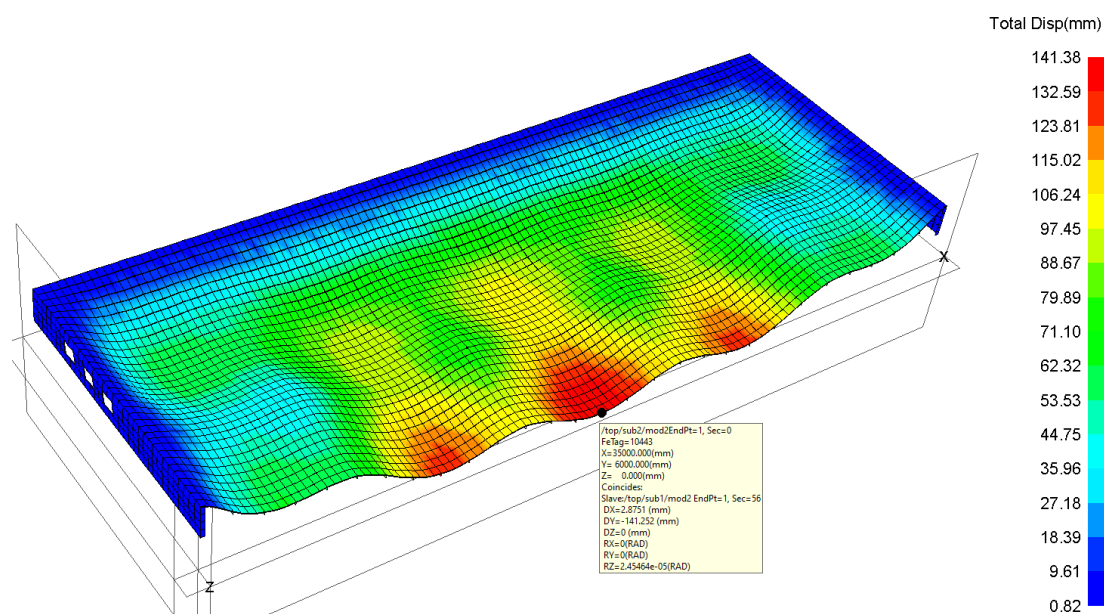
Tablica 24. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 2

Element	Dimenzije profila
Paluba 2 - sponje	T 330x7/160x16
Paluba 2 – sponja u sjecištu s uporom	T 400x7/160x16
Paluba 2 - podveze	T 480x12/200x15
Paluba 2 – podveza u sjecištu s uporom	T 480x12/240x30
Paluba 2 - uzdužnjaci	HP 80x7
Bok do palube 2 – okvirna rebra	T 330x7/100x10
Bok do palube 2 – vertikalne ukrepe	HP 80x7
Upore na palubi 1	Φ 200x15
Interkostalne ukrepe	FB 60x7

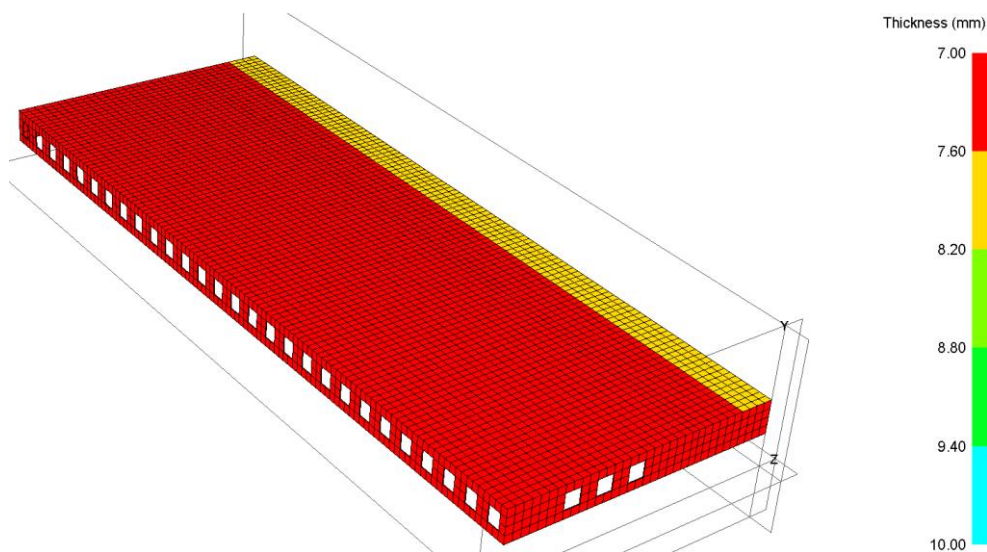
5.5.4.4. Dimenzioniranje treće palube i boka garaže između druge i treće palube

Reprojektiranje konstrukcije treće palube i boka garaže između druge i treće palube provedeno je na temelju strukturnih odziva za implementirane slučajeve opterećenja LC4, LC12 i LC13.

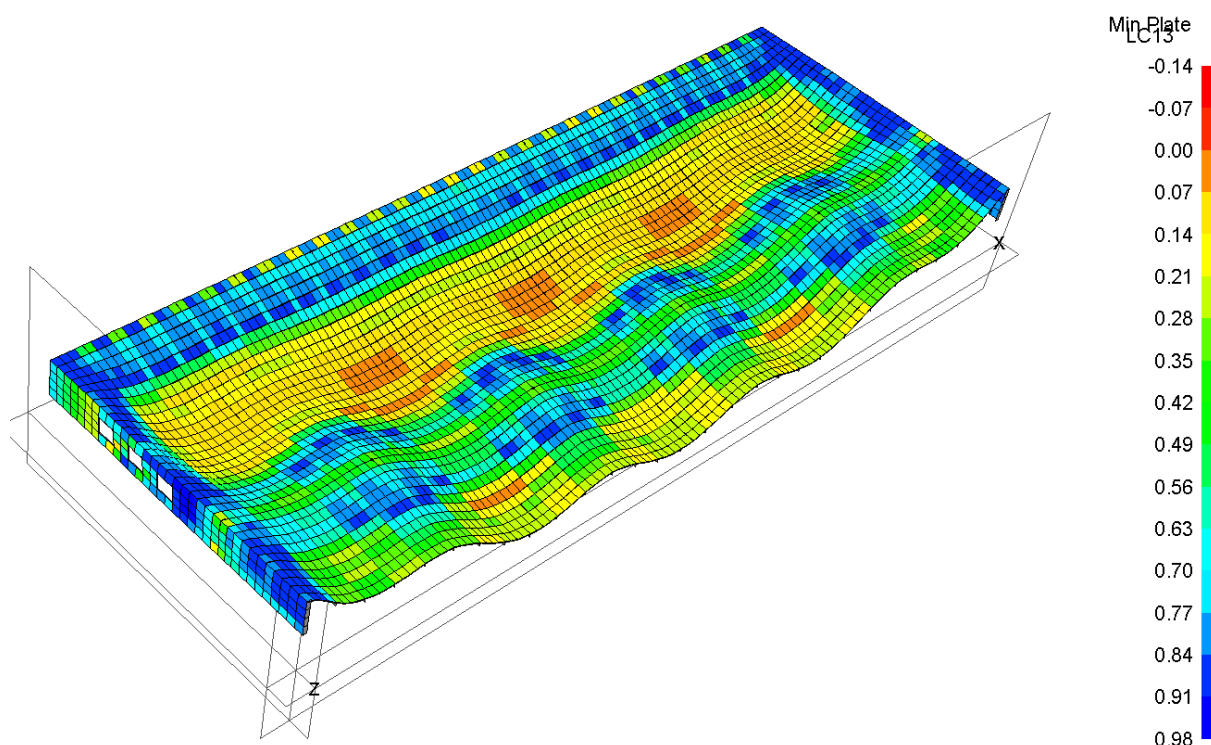
Treća paluba se najviše deformira u slučaju opterećenja LC12 s implementiranim valnim dolom. Dopušteni progib odgovara onome u poglavlju 5.3.4.1 te iznosi 252,5 mm, a očitani progib iznosi 141 mm [Slika 62]. Povećana je debljina oplata palube 3 uzduž sredine modela na 8 mm [Slika 63] te su, uz dodane interkostalne ukrepe, svi paneli palube podobni. Red interkostalnih ukrepa modeliran je uzduž palube između reda upora i boka garaže. Paneli prednje i stražnje stjenke te boka garaže debljine 7 mm su podobni [Slika 64].



Slika 62. Deformacija treće palube globalnog MKE modela za LC12



Slika 63. Prikaz bruto debljina palube 3 i boka do palube 3



Slika 64. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele treće palube za LC12

Sažetak odabranih debljina oplata palube 3 te pripadajućeg boka utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela [Tablica 25].

Tablica 25. Odabrane konačne debljine oplata palube 3 te boka garaže

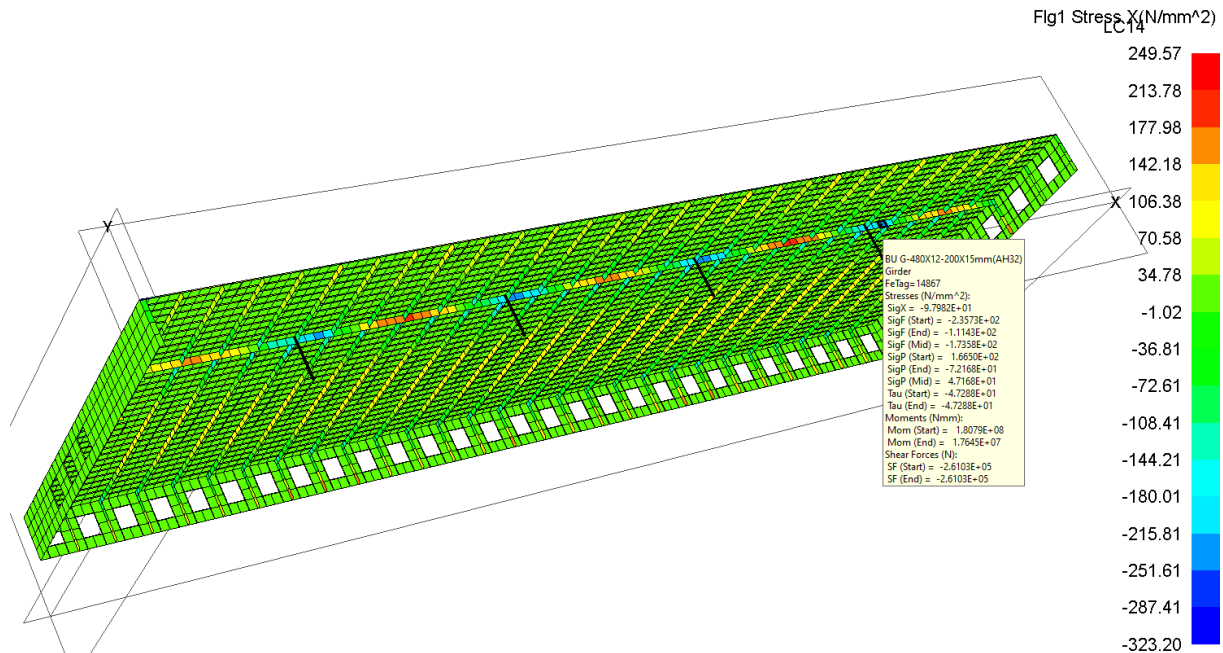
Pozicija	Debljina oplata [mm]
Paluba 3	7,0
Paluba 3 – oko simetralne ravnine	8,0
Prednja i stražnja stjenka između paluba 2 i 3	7,0
Bok između paluba 2 i 3	7,0

Podveza i sponje treće teretne palube su najviše opterećene za slučaj opterećenja LC13 s implementiranim valnim brijegom. Najveća naprezanja u prirubnici podveze javljaju se na mjestu spoja s ojačanom prirubnicom zbog sjecišta s uporom te očitana u početku elementa iznose $-235,7 \text{ N/mm}^2$ [Slika 65].

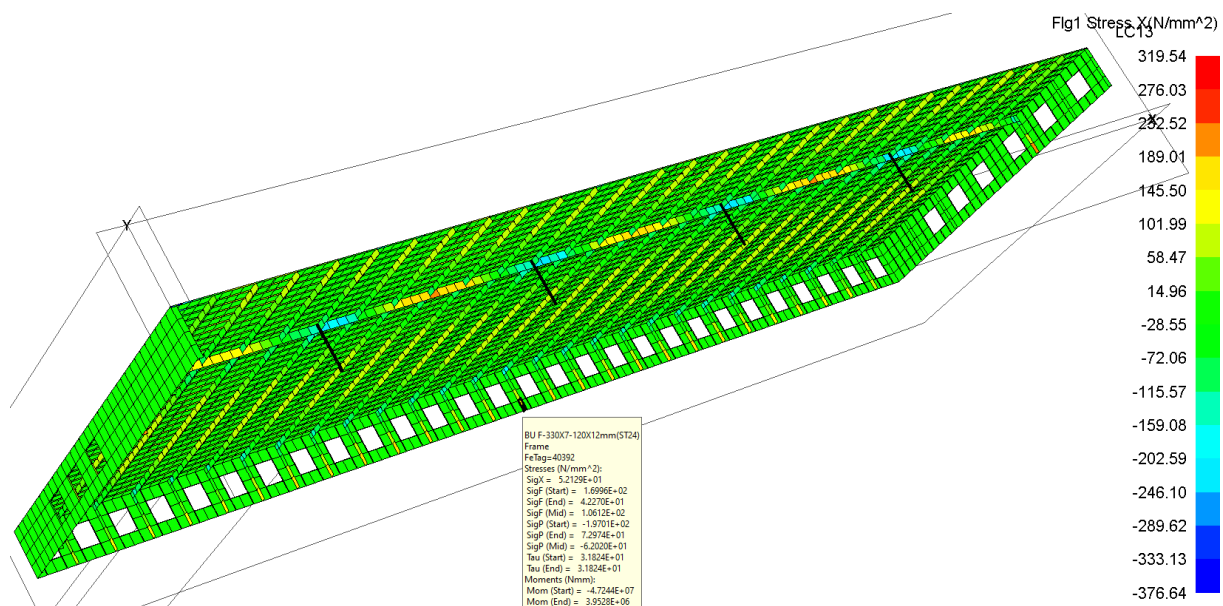
Maksimalna naprezanja u prirubnici sponje javljaju se u spoju s uporom te iznose -155 N/mm^2 .

U okvirnim rebrima boka maksimalna naprezanja javljaju se za slučaj LC12 s implementiranim valnim dolom u spoju s palubom 2 te očitana u početku elementa iznose -170 N/mm^2 [Slika 66].

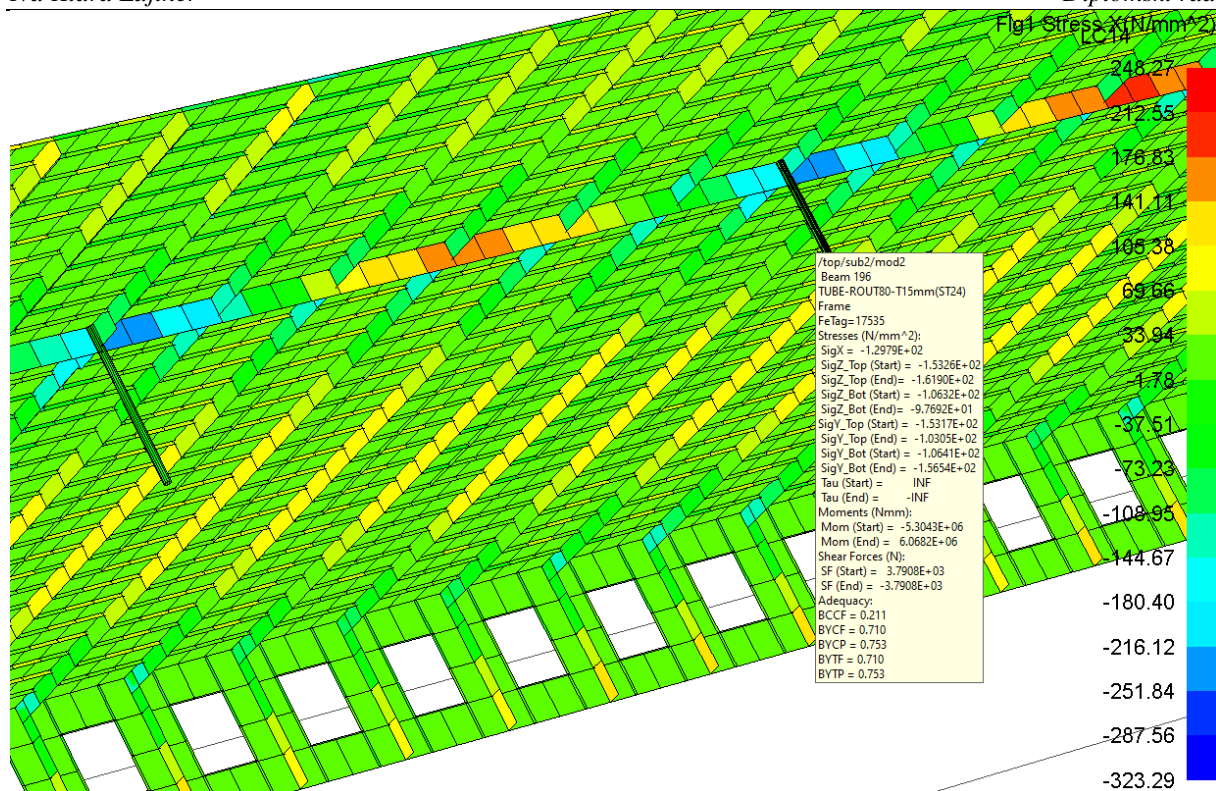
Najveće vlačno naprezanja javlja se u vertikalnom nosaču stražnje stjenke garaže u spoju s drugom palubom te očitano u početku elementa iznosi $178,9 \text{ N/mm}^2$.



Slika 65. Maksimalna naprezanja u podvezi palube 3 za LC13



Slika 66. Maksimalno naprezanje u okvirnom rebro boka između palube 2 i 3 za LC12



Slika 67. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu na drugoj palubi za LC13
Maksimalna tlačna naprezanja u uporama na drugoj palubi javljaju se za slučaj opterećenja LC13. Za očitano najveće aksijalno tlačno naprezanje u upori na drugoj palubi [Slika 67] je proveden proračun s obzirom na izvijanje prema pravilima [Tablica 26].

Tablica 26. Proračun izvijanja za upore na drugoj palubi

	Upora paluba 2
Promjer profila [mm]	160
Debljina stjenke [mm]	15
Površ. poprečnog presjeka [cm ²]	68,3
Moment tromosti [cm ⁴]	1815,0
σ_{EC} [N/mm ²]	1200,1
σ_{kr} [N/mm ²]	223,5
$\sigma_{x,FEM}$ [N/mm ²]	130
η	0,582

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata treće palube te pripadajućeg boka utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela za slučajeve opterećenja LC4, LC12 i LC31 [Tablica 27].

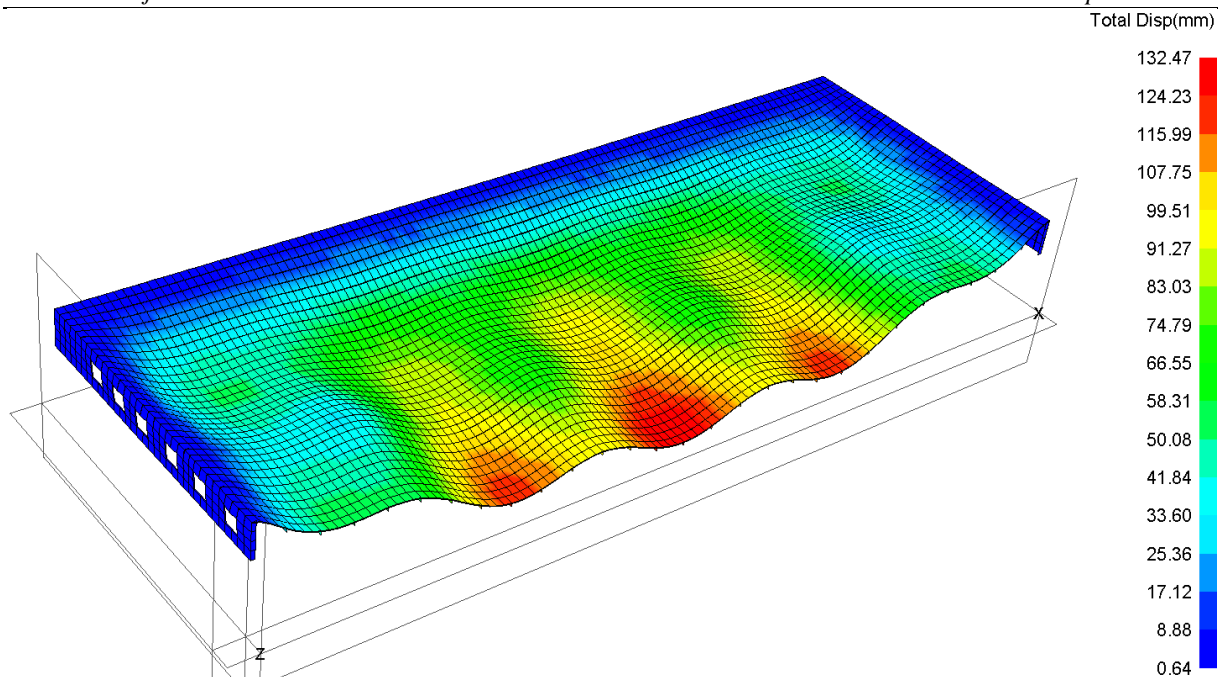
Tablica 27. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata palube 3

Element	Dimenzije profila
Paluba 3 - sponje	T 330x7/160x16
Paluba 3 – sponja u sjecištu s uporom	T 400x7/160x16
Paluba 3 - podveze	T 480x12/200x15
Paluba 3 – podveza u sjecištu s uporom	T 480x12/240x30
Paluba 3 - uzdužnjaci	HP 80x7
Bok između paluba 2 i 3 – okvirna rebra	T 330x7/120x12
Bok između paluba 2 i 3 – vertikalne ukrepe	HP 80x7
Stjenka – vertikalni nosač 8000 od C.L.-a	T 330x7/160x16
Upore na palubi 1	Φ 160x15
Interkostalne ukrepe	FB 60x7

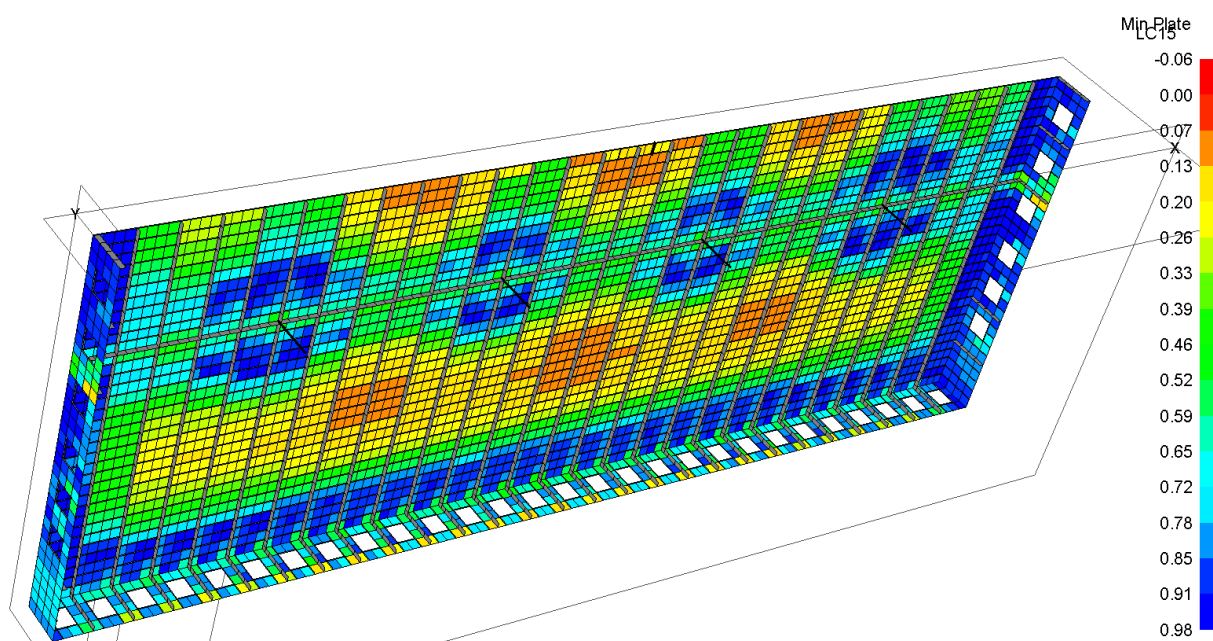
5.5.4.5. Dimenzioniranje krova garaže i boka između treće palube i krova

Reprojektiranje konstrukcije krova i boka garaže između treće palube i krova provedeno je na temelju strukturnih odziva za implementirane slučajeve opterećenja LC5, LC14 i LC15.

Krov garaže se najviše deformira u slučaju opterećenja LC14 s implementiranim valnim dolom. Dopušteni progib odgovara onome u poglavlju 5.3.4.1 te iznosi 252,5 mm, a očitani progib iznosi 132,5 mm [Slika 68]. Projektno opterećenje od snijega implementirano na krov znatno je manje od opterećenja po palubama, stoga su paneli krova debljine 7 mm podobni i bez smanjenja neukrepljene površine interkostalnim ukrepama. Paneli prednje i stražnje stjenke te boka garaže debljine 7 mm su podobni . [Slika 69]



Slika 68. Deformacija krova garaže globalnog MKE modela za LC14



Slika 69. Faktor podobnosti g za minimalno zadovoljen kriterij podobnosti za panele krova garaže za LC14

Sažetak odabranih debljina oplata krova garaže te bokova garaže utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela [Tablica 28].

Tablica 28. Odabrane konačne debljine krova garaže te boka garaže

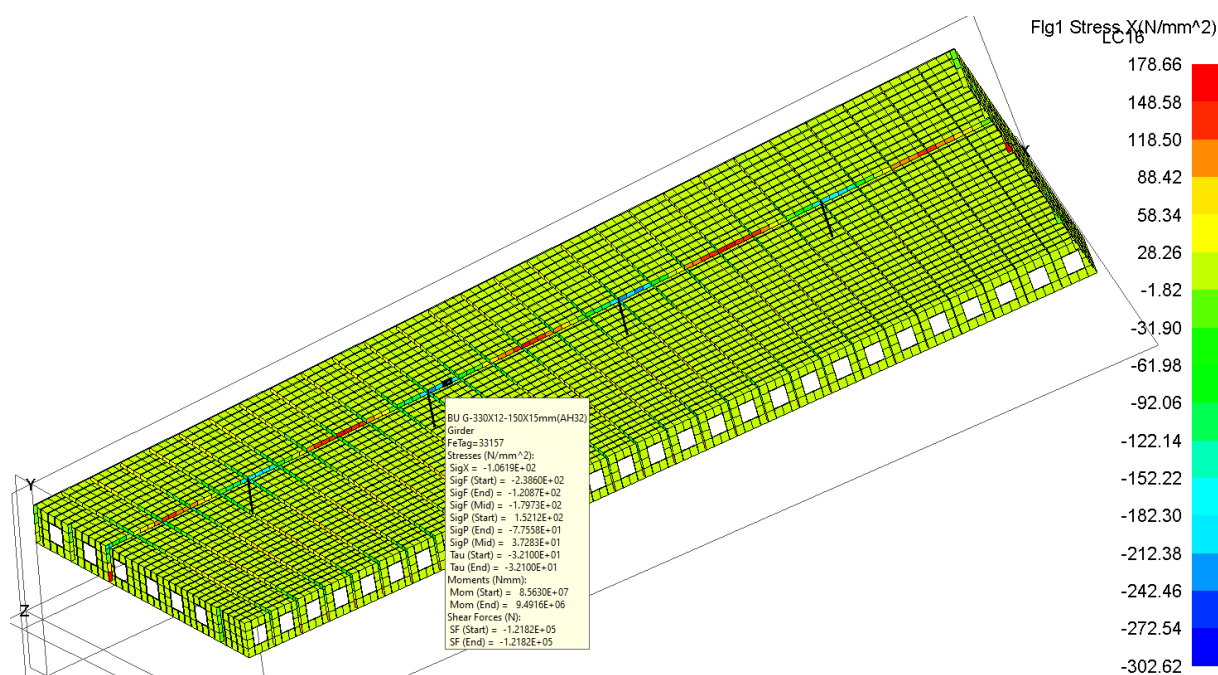
Pozicija	Debljina oplata [mm]
Krov	7,0
Prednja i stražnja stjenka – između palube 3 i krova	7,0
Bok između palube 3 i krova	7,0

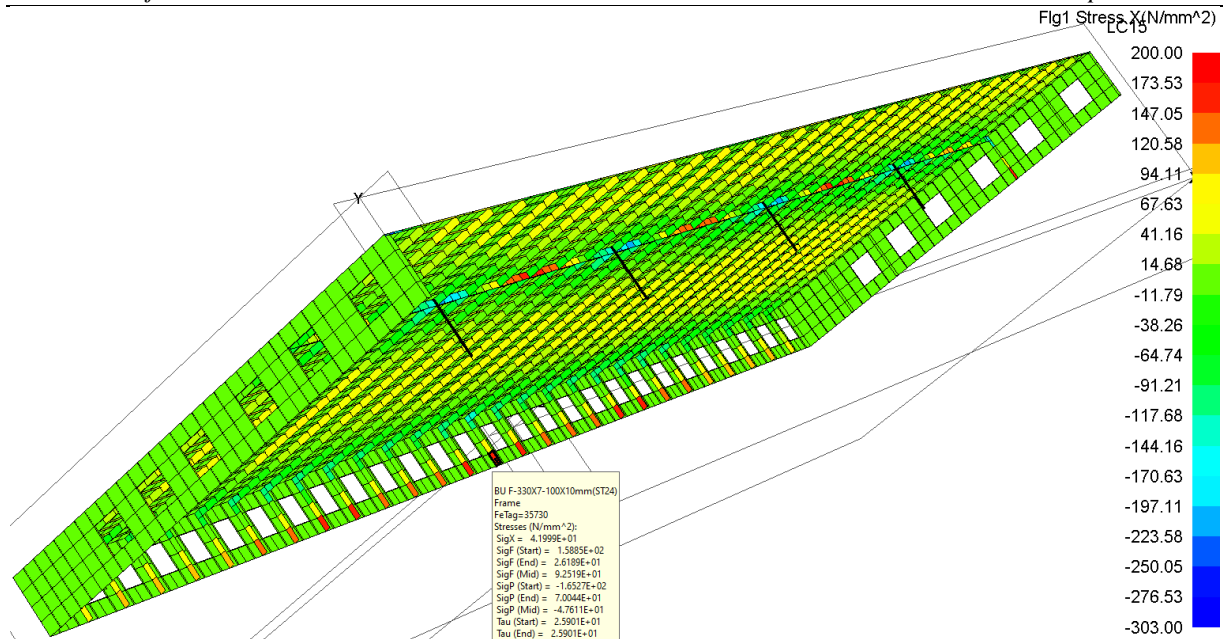
Podveza i sponje krova su najviše opterećene za slučaj opterećenja LC15 s implementiranim valnim brijegom. Najveća naprezanja u prirubnici podveze javljaju se na mjestu spoja s ojačanom prirubnicom zbog sjecišta s uporom te očitana u početku elementa iznose $-238,6 \text{ N/mm}^2$ [Slika 70].

Maksimalna naprezanja u prirubnici sponje javljaju se u spoju s uporom te iznose -149 N/mm^2 .

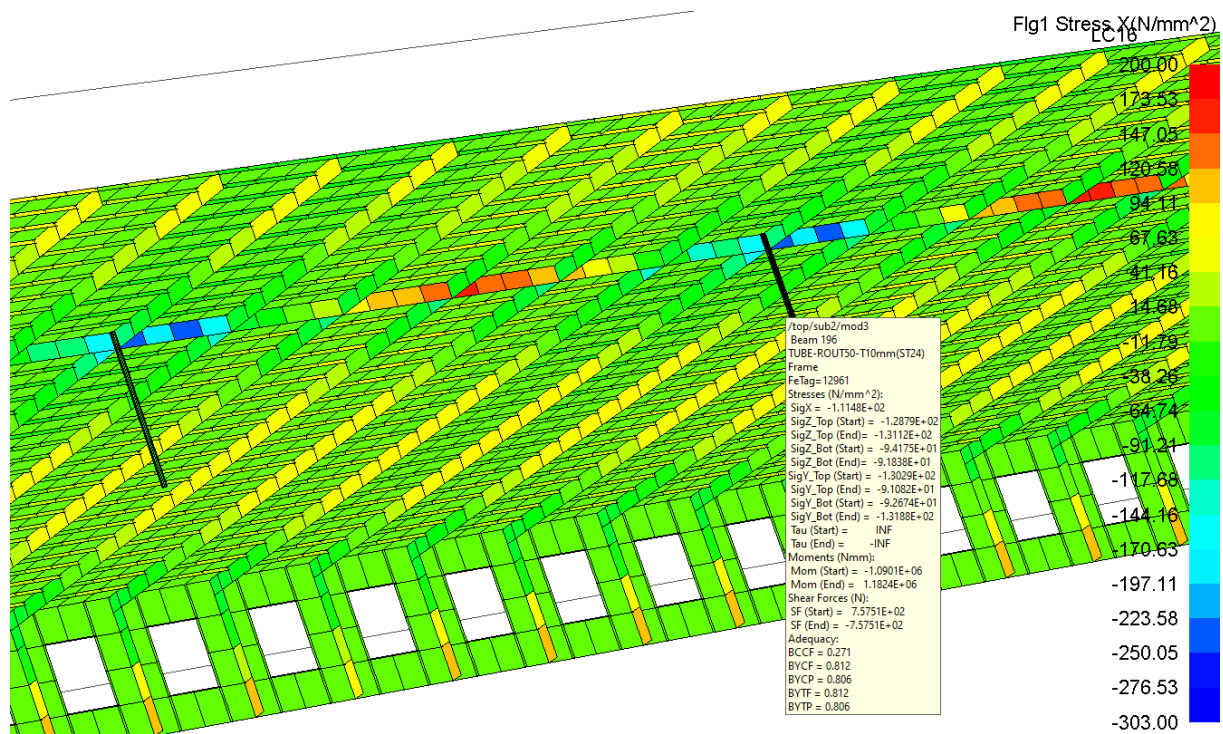
U okvirnim rebrima boka maksimalna naprezanja javljaju se za slučaj LC14 s implementiranim valnim dolom u spoju s palubom 3 te očitana u početku elementa iznose -159 N/mm^2 [Slika 71].

Najveće vlačno naprezanja javlja se u vertikalnom nosaču stražnje stjenke garaže u spoju s trećom palubom te očitano u početku elementa iznosi 165 N/mm^2 .

**Slika 70. Maksimalna naprezanja u podvezi krova za LC15**



Slika 71. Maksimalna naprezanja u okvirnim rebri boka između palube 3 i krova za LC14



Slika 72. Aksijalna naprezanja i kriteriji podobnosti za uporu na trećoj palubi za LC15

Maksimalna tlačna naprezanja u uporama na trećoj palubi javljaju se za slučaj opterećenja LC15. Za očitano najveće aksijalno tlačno naprezanje u upori na trećoj palubi [Slika 72] je proveden proračun s obzirom na izvijanje prema pravilima [Tablica 29].

Tablica 29. Proračun izvijanja za upore na trećoj palubi

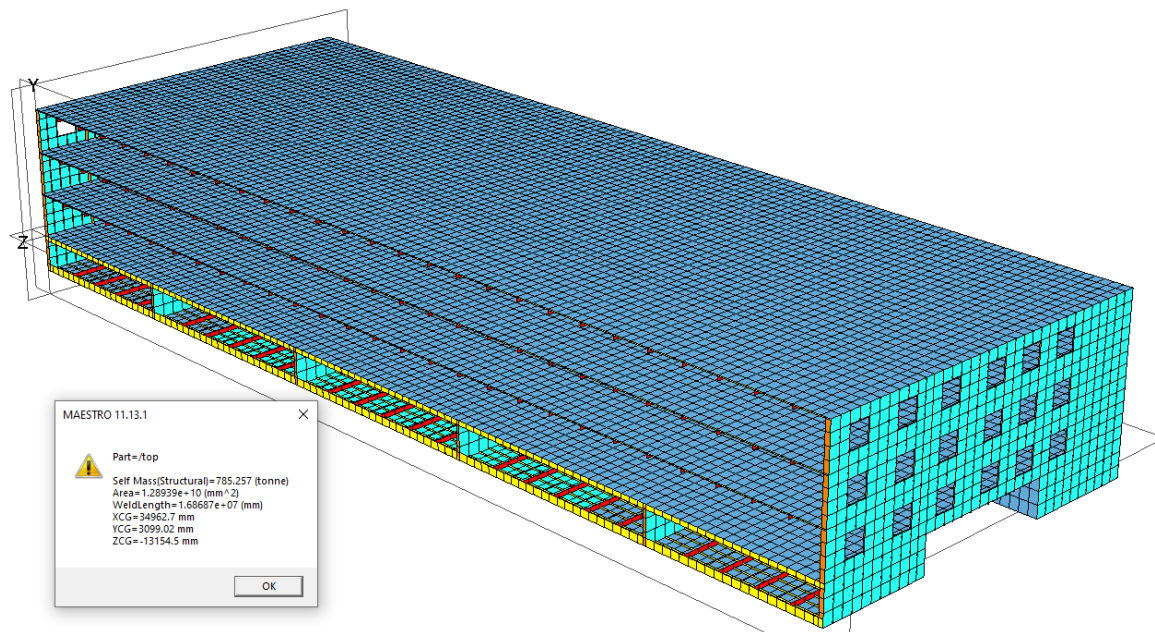
	Upora paluba 3
Promjer profila [mm]	100
Debljina stjenke [mm]	10
Površ. poprečnog presjeka [cm ²]	28,3
Moment tromosti [cm ⁴]	289,8
σ_{EC} [N/mm ²]	463,1
σ_{kr} [N/mm ²]	205,2
$\sigma_{x,FEM}$ [N/mm ²]	111,5
η	0,541

Sažetak dimenzija konstrukcijskih elemenata krova garaže te boka između palube tri i krova utvrđenih strukturnom analizom globalnog MKE modela za slučajeve opterećenja LC5, LC14 i LC15 [Tablica 30].

Tablica 30. Odabrane konačne dimenzije konstrukcijskih elemenata krova

Element	Dimenzije profila
Krov - sponje	T 330x7/120x12
Krov - podveze	T 330x12/150x15
Krov – podveza u sjecištu s uporom	T 330x12/150x30
Krov - uzdužnjaci	HP 80x7
Bok između palube 3 i krova– okvirna rebra	T 330x7/100x10
Bok između palube 3 i krova– vertikalne ukrepe	HP 80x7
Stjenka – vertikalni nosač 8000 od C.L.-a	T 330x7/150x15
Upore na palubi 1	Φ 100x10
Interkostalne ukrepe	FB 60x7

5.5.5. Masa i položaj težišta



Slika 73. Masa i položaj težišta globalnog MKE modela

Masa konstrukcije plutajuće garaže modeliranog polovinskog globalnog MKE modela, očitana u MAESTRO-u [7], iznosi 785,3 t [Slika 73]. Prema tome masa konstrukcije cijele plutajuće garaže iznosi 1570,6 t. Uzdužni položaj težišta se nalazi na 34,9 m, a vertikalni položaj težišta se nalazi na 5,6 m.

6. ZAKLJUČAK

Problem u većini gradova na hrvatskoj obali predstavlja nedostatak parkirnih prostora. Rješenje nije moguće u vidu izgradnje dodatnih parkirališta ili garaža zbog nedostatka kapaciteta i preskupih zemljišta. U ovom radu je predstavljena plutajuća garaža kao alternativno rješenje koje bi ponudilo dovoljan broj parkirnih mjesta, mogućnost pružanja parkirne usluge na lokaciji prema potrebi jer je mobilni objekt te bi rasteretilo gradske jezgre od prometnih gužvi.

U konceptualnoj fazi provedena je kratka studija optimalnog odabira mjesta, rasporeda mjesta te prometnih tokova u svrhu povećanja iskoristivosti raspoložive parkirne površine.

Na temelju definiranog općeg plana, razrađena je topologija jakih nosača, poprečnih pregrada te upora plutajuće garaže i unutarnje rampe.

Cilj ovog rada bilo je projektiranje svih konstrukcijskih elemenata plutajuće garaže koje je provedeno u tri faze, konceptualnoj, preliminarnoj te završnoj fazi.

Koristeći pravila DNV-a su u konceptualnoj fazi lokalno dimenzionirani konstrukcijski elementi, oplata i uzdužnjaci plutajuće garaže te unutarnje rampe, za lokalno opterećenje uslijed tlaka od kotača ili vanjskog tlaka od mora.

Potom je slijedio direktni proračun konstrukcijskih elemenata metodom konačnih elemenata u programu MAESTRO. U preliminarnoj fazi je na temelju preskriptivno dobivenih dimenzija izrađen parcijalni MKE model garaže te je provedena strukturna analiza i redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata za definirane slučajeve opterećenja s obzirom na dopuštena naprezanja, progibe te kriterije podobnosti za panel.

Također je izrađen MKE model unutarnje rampe s ulaznim dimenzijama definiranim u konceptualnoj fazi te je proveden proračun i redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata s obzirom na zadovoljenje kriterija podobnosti.

U završnoj fazi izrađen je globalni MKE model cijele garaže na temelju podobne konstrukcije parcijalnog MKE modela. Za definirane slučajeve opterećenja, s uzetim valom u obzir, ponovno je provedena strukturna analiza te reprojekiranje svih konstrukcijskih elemenata plutajuće garaže prema kriterijima podobnosti.

Na osnovu konačnih ugradbenih dimenzija izrađen je osnovni tehnički nacrt glavnog rebra.

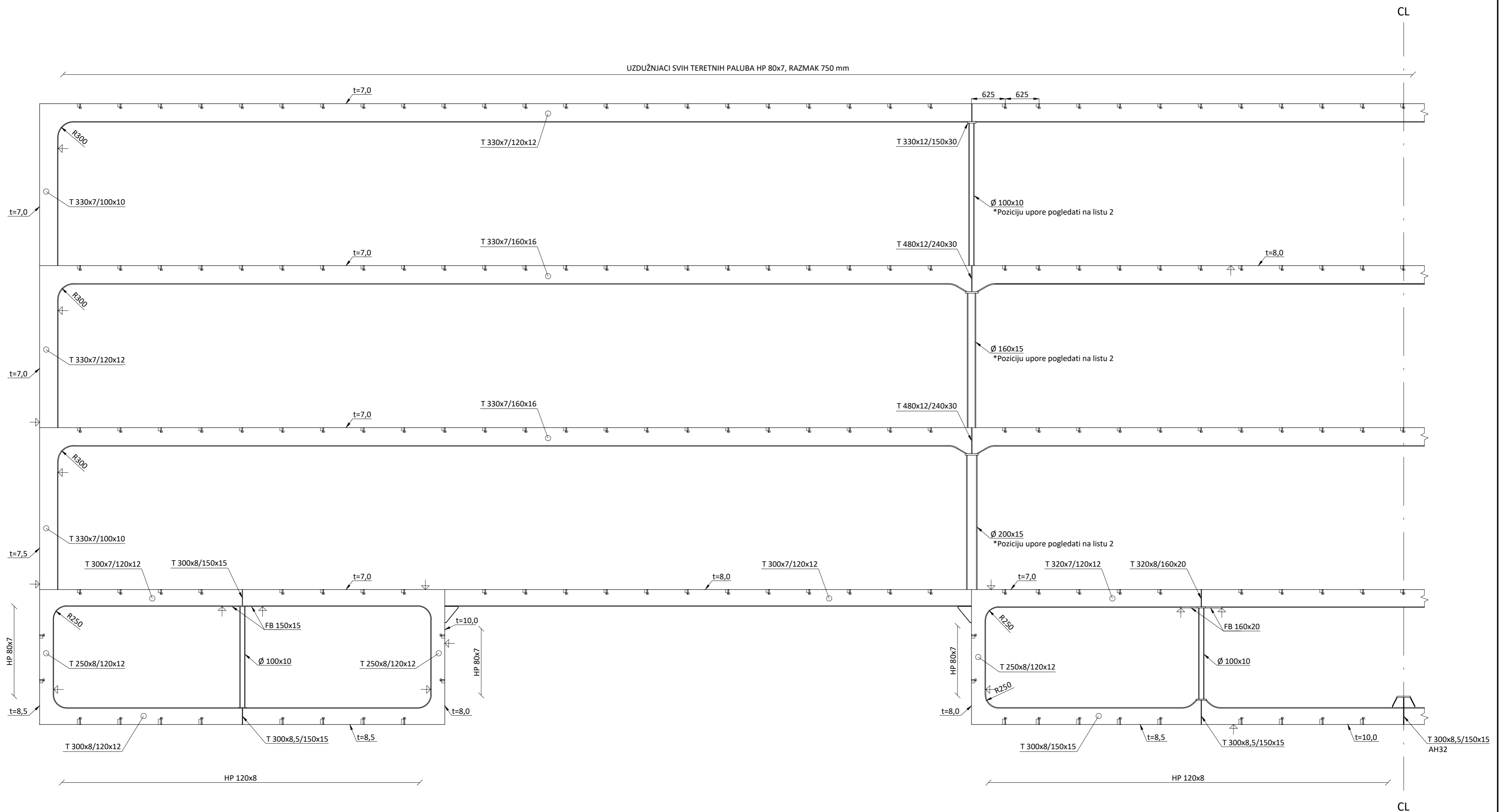
LITERATURA

- [1] Večernji list: Arhitektonsko čudo: Pula dobiva plutajuću rivu, <https://www.vecernji.hr/vijesti/arhitektonsko-cudo-pula-dobiva-plutajucu-rivu-319647>, 19.08.2011
- [2] Net.hr: Projekt „plutajuća garaža“, <https://net.hr/danas/projekt-plutajuca-garaza-ddf47b8a-b1ce-11eb-a697-0242ac15002a>, 15.08.2000
- [3] MTP: River parking - A floating solution, <https://mtpparking.com/wp-content/uploads/2016/08/Floating-Garage.pdf>
- [4] Brčić D., Šoštarić M.: Parkiranje i garaže, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012.
- [5] Erhardt L.: Diplomski rad – Projekt plutajuće garaže, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [6] Det Norske Veritas: Rules for Classification of Ships, Part 3 Hull, 2021.
- [7] MAESTRO Version 11.13.1. <http://www.maestromarine.com>, 2020
- [8] Det Norske Veritas: Rules for Classification of Ships, Part 3 Ch.1 Sec.12 Direct strength calculation, 2016.
- [9] Det Norske Veritas: Class guideline, DNV-CG-0128, 2021.
- [10] Det Norske Veritas: Classification notes No. 31.2., Strength analysis of hull structure in roll on/roll off ships and car carriers, 2011.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

UZDUŽNJACI SVIH TERETNIH PALUBA HP 80x7, RAZMAK 750 mm



NAPOMENE:
 1. RAZMAK OKVIRA IZNOSI 2500 mm
 2. POZICIJE UPORA NA TERETNIM PALUBAMA SU NA R.5, 11, 17, I 23

GLAVNE ZNAČAJKE:
 DULJINA 70,5 m
 ŠIRINA 50,5 m
 VISINA 11,5 m
 GAZ 1,16 m

Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio	10.01.2022	Iva Klara Lajtner		
Crtao	10.01.2022	Iva Klara Lajtner		
Pregledao		Jerolim Andrić		
Objekt:		Plutajuća garaža		Objekt broj: 1
				R. N. broj: 1
Napomena:				Kopija
Materijal:	ST24	Masa:	1570,6 t	
Mjerilo originala	1:50	Naziv:	Glavno rebro	Pozicija: A2
Crtež broj: 1			Format: A2	
			Listova: 2	
			List: 1	