

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nenad Kosanović

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Nenad Kosanović

Zagreb, 2013.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, Doc. dr. sc. Jerolimu Andriću na pruženoj pomoći i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima na prenesenom znanju i na profesionalnoj suradnji tijekom studija.

Zahvaljujem se kolegama koji su mi pružali stručnu pomoć kada je to bilo potrebno.

Zahvaljujem se svojim roditeljima bez čije bi financijske potpore period tijekom studija bio znatno teži.

Zahvaljujem se svojoj djevojci Maji Vuković na pruženoj potpori i ljubavi u najtežim trenucima tijekom studija.

Nenad Kosanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	6
POPIS OZNAKA	7
SAŽETAK.....	9
SUMMARY	10
1. UVOD.....	11
2. IDENTIFIKACIJA PROJEKTOG PROBLEMA.....	13
2.1. Analiza projekta	13
2.2. Opći plan razmještaja palubica	13
2.3. Odabrane palubice za daljnji proračun.....	13
2.4. Zahtjev brodovlasnika [5]	15
2.5. Projektna ograničenja.....	16
2.5.1. Funkcionalna projektna ograničenja	16
2.5.2. Tehnološka projektna ograničenja	17
2.5.3. Projektna ograničenja standardizacije.....	18
2.5.4. Propisana projektna ograničenja klasifikacijskog društva (DNV) [3].....	18
3. KONCEPTUALNA FAZA	20
3.1. Analiza prototipa.....	20
3.2. Projektiranje nove konstrukcije	21
3.3. Proračun strukture prema pravilima klasifikacijskog društva [3].....	22
3.3.1. Proračun strukture palubice P6	23
3.3.2. Proračun strukture palubice C10.....	30
3.4. Proračun strukture metodom konačnih elemenata (MAESTRO)	39
3.4.1. Opis postupka modeliranja.....	39
3.4.2. Definiranje projektnih rubnih uvjeta modela	42
3.4.3. Definiranje modela opterećenja	43
3.4.4. Analiza odziva palubice P6 (struktura prema pravilima).....	44
3.4.5. Analiza odziva palubice P6 (finalni model).....	47
3.4.6. Kontrola izvijanja palubice P6 (finalni model).....	51
3.4.7. Analiza odziva palubice C10 (struktura prema pravilima)	55
3.4.8. Analiza odziva palubice C10 (finalni model)	58
3.4.9. Kontrola izvijanja palubice C10 (finalni model)	62
3.5. Proračun finalnog modela u programu Nauticus 3D Beam	66
3.5.1. Opis postupka modeliranja.....	66
3.5.2. Definiranje projektnih rubnih uvjeta.....	67
3.5.3. Definiranje modela opterećenja	68
3.5.4. Analiza odziva palubice P6 (8x5 model)	70
3.5.5. Analiza odziva palubice C10 (6x12 model).....	71
4. ZAVRŠNA FAZA	73

4.1. Proračun strukture detaljnog MKE modela u programu FEMAP/NASTRAN.....	73
4.1.1. Opis postupka modeliranja.....	73
4.1.2. Definiranje rubnih uvjeta	74
4.1.3. Definiranje modela opterećenja	75
4.1.4. Analiza rezultata odziva palubice P6 za oba slučaja opterećenja	79
4.1.5. Kontrola izvijanja oplata palubice P6	84
4.1.6. Usporedba rezultata odziva palubice P6 (8x5 model) i prijedlog konačnog rješenja	86
4.1.7. Analiza rezultata odziva palubice C10 za oba slučaja opterećenja.....	87
4.1.8. Kontrola izvijanja oplata palubice C10.....	92
4.1.9. Usporedba rezultata odziva palubice C10 (12x6 model) i prijedlog konačnog rješenja	93
5. ZAKLJUČAK.....	95
LITERATURA.....	96
PRILOZI.....	97

POPIS SLIKA

Slika 1.	Radni položaji palubica [1]	12
Slika 2.	Kontura palubice P6 [2]	14
Slika 3.	Kontura palubice C10 [2]	15
Slika 4.	Svijetla visina prostora iznad i ispod palubice [2]	17
Slika 5.	Topologija palubice P6 za daljnji proračun.....	23
Slika 6.	Topologija palubice C10 za daljnji proračun	30
Slika 7.	Prikaz polovinskog 8x5 modela palubice P6 u programu MAESTRO.....	40
Slika 8.	Prikaz rasporeda materijala palubice P6	40
Slika 9.	Prikaz polovinskog 12x6 modela palubice C10 u programu MAESTRO	41
Slika 10.	Prikaz rasporeda materijala palubice C10	41
Slika 11.	Prikaz rubnih uvjeta polovinskog modela palubice P6	42
Slika 12.	Prikaz rubnih uvjeta polovinskog modela palubice C10.....	43
Slika 13.	Prikaz pomaka palubice P6	44
Slika 14.	Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice P6.....	44
Slika 15.	Prikaz podobnosti jakih nosača palubice P6	45
Slika 16.	Prikaz podobnosti oplate palubice P6	45
Slika 17.	Prikaz pomaka palubice P10 (finalni model)	47
Slika 18.	Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice P6 (finalni model).....	47
Slika 19.	Prikaz podobnosti jakih nosača palubice P6 (finalni model)	48
Slika 20.	Prikaz podobnosti oplate palubice P6 (finalni model)	48
Slika 21.	Prikaz pomaka palubice C10	55
Slika 22.	Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice C10	55
Slika 23.	Prikaz podobnosti jakih nosača palubice C10	56
Slika 24.	Prikaz podobnosti oplate palubice C10	56
Slika 25.	Prikaz pomaka palubice C10 (finalni model).....	58
Slika 26.	Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice C10 (finalni model)	58
Slika 27.	Prikaz podobnosti jakih nosača palubice C10 (finalni model).....	59
Slika 28.	Prikaz podobnosti oplate palubice C10 (finalni model).....	59
Slika 29.	3D Beam model palubice P6 sa definiranim rubnim uvjetima (8x5 model).....	67
Slika 30.	3D Beam model palubice C10 sa definiranim rubnim uvjetima (6x12 model)	68
Slika 31.	3D Beam prikaz projektnog opterećenja palubice P6 (8x5 model).....	69
Slika 32.	3D Beam prikaz projektnog opterećenja palubice C10 (6x12 model)	70
Slika 33.	3D Beam prikaz progibne linije palubice P6 (8x5 model).....	70
Slika 34.	3D Beam prikaz progibne linije palubice C10 (6x12 model)	71
Slika 35.	MKE model fine mreže palubice P6 (8x5 model).....	74
Slika 36.	MKE model fine mreže palubice C10 (6x12 model)	74
Slika 37.	Rubni uvjeti palubice P6 (8x5 model).....	75
Slika 38.	Rubni uvjeti palubice C10 (6x12 model)	75
Slika 39.	Distribuirano opterećenje (DO) palubice P6 (8x5 model)	76
Slika 40.	Distribuirano opterećenje (DO) palubice C10 (6x12 model).....	77
Slika 41.	Raspored osovinskog opterećenja (OO) palubice P6 (8x5 Model).....	78
Slika 42.	Raspored osovinskog opterećenja (OO) palubice C10 (6x12 Model)	78
Slika 43.	Prikaz pomaka palubice P6 (DO) (8x5 model)	79
Slika 44.	Raspodjela savojnih naprezanja palubice P6 u smjeru osi x (DO) (8x5 model) ...	79
Slika 45.	Raspodjela savojnih naprezanja palubice P6 u smjeru osi y (DO) (8x5 model) ...	80

Slika 46.	Raspodjela VonMisses naprezanja palubice P6 (DO) (8x5 model)	80
Slika 47.	Raspodjela smičnih naprezanja palubice P6 (DO) (8x5 model)	81
Slika 48.	Prikaz pomaka palubice P6 (OO) (8x5 model)	81
Slika 49.	Raspodjela savojnih naprezanja palubice P6 u smjeru osi x (OO) (8x5 model) ...	82
Slika 50.	Raspodjela savojnih naprezanja palubice P6 u smjeru osi y (OO) (8x5 model) ...	82
Slika 51.	Raspodjela VonMisses naprezanja palubice P6 (OO) (8x5 model)	83
Slika 52.	Raspodjela smičnih naprezanja palubice P6 (OO) (8x5 model)	83
Slika 53.	Numeracija polja palubice P6 ispitana na izvijanje.....	84
Slika 54.	Prikaz pomaka palubice C10 (DO) (6x12 model).....	87
Slika 55.	Raspodjela savojnih naprezanja palubice C10 u smjeru osi x (DO) (6x12 model)	87
Slika 56.	Raspodjela savojnih naprezanja palubice C10 u smjeru osi y (DO) (6x12 model)	88
Slika 57.	Raspodjela VonMisses naprezanja palubice C10 (DO) (6x12 model).....	88
Slika 58.	Raspodjela smičnih naprezanja palubice C10 (DO) (6x12 model).....	89
Slika 59.	Prikaz pomaka palubice C10 (OO) (6x12 model).....	89
Slika 60.	Raspodjela savojnih naprezanja u smjeru osi x palubice C10 (OO) (6x12 model)	90
Slika 61.	Raspodjela savojnih naprezanja u smjeru osi y palubice C10 (OO) (6x12 model)	90
Slika 62.	Raspodjela VonMisses naprezanja palubice C10 (OO) (6x12 model).....	91
Slika 63.	Raspodjela smičnih naprezanja palubice C10 (OO) (6x12 model).....	91
Slika 64.	Numeracija polja palubice C10 ispitana na izvijanje	92

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sažetak projektnih ograničenja	19
Tablica 2. Topologija projektnih modela palubice P6	21
Tablica 3. Topologija projektnih modela palubice C10	22
Tablica 4. Karakteristike vozila za određivanje opterećenja.....	27
Tablica 5. Pregled proračunate strukture palubice P6 prema pravilima.....	29
Tablica 6. Pregled proračunate strukture palubice C10 prema pravilima	38
Tablica 7. Karakteristike materijala	39
Tablica 8. Rubni uvjeti palubice P6	42
Tablica 9. Rubni uvjeti palubice C10.....	43
Tablica 10. Prikaz rezultata odziva palubice P6.....	46
Tablica 11. Pregled proračunate strukture palubice P6 (finalni model).....	49
Tablica 12. Prikaz rezultata odziva palubice C10	57
Tablica 13. Pregled proračunate strukture palubice C10 (finalni model)	60
Tablica 14. 3D Beam prikaz rubnih uvjeta palubice P6 (8x5 model)	67
Tablica 15. 3D Beam prikaz rubnih uvjeta palubice C10 (6x12 model).....	68
Tablica 16. Kontrola izvijanja oplata palubice P6	85
Tablica 17. Kontrola izvijanja oplata palubice P6 nakon izmjena	85
Tablica 18. Usporedba rezultata odziva palubice P6 (8x5 model).....	86
Tablica 19. Kontrola izvijanja oplata palubice C10	93
Tablica 20. Usporedba rezultata odziva palubice C10 (12x6 model)	93

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

21-57780	INTERFACE/LAYOUT
21-93089	STEEL STRUCTURE P6
21-93097	STEEL STRUCTURE C10

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
S_{UN}	mm	Razmak jakih uzdužnih nosača
S_{PN}	mm	Razmak jakih poprečnih nosača
S_{HP}	mm	Razmak ukrepa
p	N/m^2	Projektno opterećenje
q_c	t/m^2	Distribuirano opterećenje tereta
q_0	t/m^2	Distribuirano opterećenje zbog vlastite težine
a_v	m/s^2	Vertikalno ubrzanje
g	m/s^2	Ubrzanje sile teže
C_B		Blok koeficijent
Z	cm^3	Moment otpora nosača
I	cm^4	Moment tromosti nosača
b_e	mm	Sunosiva širina nosača
Q	t	Osovinsko opterećenje vozila
t_p	mm	Debljina oplata
l	mm	Razmatrana duljina ukrepe
t_k	mm	Razmatrana duljina ukrepe
E	N/mm^2	Young-ov modul elastičnosti
l	mm	Razmatrana duljina ukrepe
ν		Poissonov koeficijent
R_{eH}	N/mm^2	Minimalna nominalna granica razvlačenja
ρ	kg/m^3	Specifična gustoća materijala
$\bar{\delta}_{max}$	mm	Maksimalni progib panela
σ_{max}	N/mm^2	Maksimalno naprezanje strukture panela
σ_{dop}	N/mm^2	Maksimalno dopušteno naprezanje
σ_{ax}	N/mm^2	Naprezanje oplata u smjeru okomitom na ukrepe
σ_{ay}	N/mm^2	Naprezanje oplata u smjeru paralelnom s ukrepama
τ_{max}	N/mm^2	Maksimalno smično naprezanje strukture panela
τ_{dop}	N/mm^2	Maksimalno dopušteno smično naprezanje
I_T	cm^4	St. Vennantov moment tromosti profila

I_p	cm ⁴	Polarni moment tromosti profila
I_w	cm ⁶	Sektorski moment tromosti profila
h_w	mm	Visina struka profila
t_w	mm	Debljina struka profila
b_f	mm	Širina prirubnice profila
t_f	mm	Debljina prirubnice profila

Ostale oznake su definirane u tekstu

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je projektiranje konstrukcije pomičnih palubica broda za prijevoz 6700 automobila ($Loa=199.9$ m, $B=32.26$ m, $D=36.68$ m, $T=9.0$ m, tip: *PTCP-pure car truck carrier*) prema pravilima klasifikacijskog društva *Det Norske Veritas* (DNV). Potrebnu dokumentaciju za izradu projekta ustupila je tvrtka Marina Brod d.o.o. Projekt je morao zadovoljiti pravila klasifikacijskog društva kao i želje brodovlasnika da bi kao takav bio prihvaćen. U ovom radu pažnja je posvećena konstruiranju pomičnih palubica palube 2. U razmatranje su odabrane dvije pomične palubice, palubica P6 pravilnog četverokutnog oblika i palubica C10 nepravilnog oblika. Valja napomenuti da je za palubu 2 već postojao gotov proračun roštilja pomičnih palubica, te je u ovom radu jedan od ciljeva bio pronaći eventualno bolje rješenje.

U početnoj konceptualnoj fazi proveden je proračun prema pravilima klasifikacijskog društva, koji je služio kao osnova za daljnju analizu. U računalnom programu MAESTRO izrađeni su modeli palubica gdje su za modeliranje primarnog roštilja korišteni grubi gredni konačni elementi. Model koji je bio najpovoljniji u odnosu na masu strukture dodatno je izrađen u programu Nauticus 3D-beam te su uspoređeni rezultati sa rezultatima koje je dao MAESTRO. Na temelju odziva konstrukcije izvršena je analiza podobnosti konstrukcije prema strukturnim kriterijima (popuštanje, izvijanje), te je u slučaju nezadovoljenja predloženo strukturno rješenje koje zadovoljava razmatrane kriterije.

U završnoj fazi izrađen je detaljni MKE model u programskom paketu FEMAP/NASTRAN gdje su korišteni pločasti konačni elementi. Model fine mreže razmatran je sa dva oblika opterećenja. Prvi oblik obuhvaća distribuirano opterećenje po čitavoj oplati palubice, dok drugi oblik obuhvaća osovinsko opterećenje uslijed lokalnog pritiska kotača automobila na površinu oplata. Na temelju odziva konstrukcije izvršena je analiza podobnosti konstrukcije prema strukturnim kriterijima (popuštanje, izvijanje), te je u slučaju nezadovoljenja predloženo strukturno rješenje koje zadovoljava razmatrane kriterije.

Na temelju detaljnog modela fine mreže izrađena je tehnička dokumentacija čelične strukture palubica sa svim lokalnim pojačanjima strukture.

Ključne riječi:

pomična palubica, projektiranje konstrukcije, metoda konačnih elemenata, brod za prijevoz automobila

SUMMARY

The aim of the thesis was a structural design of hoistable decks of a car carrier ship 6700 (Loa=19,9 m, B=32,26 m, D=36,68 m, T=9,0 m, type: PTCP-*pure car truck carrier*) based on DNV (*Det Norske Veritas*) rules for classification of ships. The necessary documentation for the project development was commissioned by the company Marina Brod d.o.o. In order to be accepted as such, the project had to fulfill the rules for classification of ships, as well as the shipowner wishes. The paper focuses on the construction of hoistable decks. After careful consideration, two hoistable decks were selected - deck P6 (regular rectangular shape) and deck C10 (irregular shape). It should be noted that there already existed a complete grillage structure of hoistable deck P6, and one of the goals of the paper was to find a possibly better solution.

During the initial conceptual phase, the calculation based on the rules for classification of ships was made, which served as the basis for further analysis. The computer programme MAESTRO was used for the reconstruction of deck models, with the use of beam finite elements for the primary grillage structure. The most suitable model concerning the structural mass was additionally constructed in the programme Nauticus 3D Beam and the results were compared with the results given by MAESTRO. On the basis of a structure suitability response, an analysis was carried out according to structural criteria (yielding and buckling), and a structural solution which meets the considered criteria was proposed in the case of a possible failure.

In the final stage a detailed FEM model was constructed in the programme package FEMAP/NASTRAN in which plate finite elements were used. Fine mesh model was observed with two forms of load. The first form includes distributed load across the whole deck plate, whereas the other form includes wheel load due to local pressure of car wheel on the surface coating. On the basis of a structure suitability response, an analysis was carried out according to structural criteria (yielding, buckling), and a structural solution which meets the considered criteria was proposed in the case of a possible failure.

Based on a detailed model of fine mesh, technical documentation of steel structure decks was made, together with complete local structure reinforcement.

Key words:

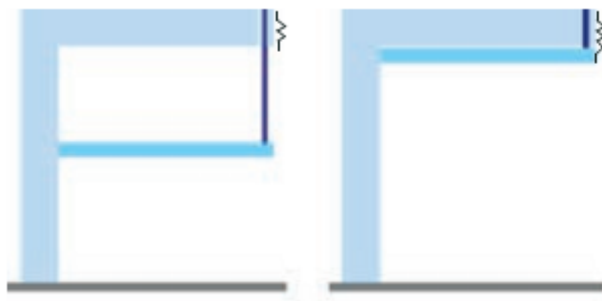
hoistable deck, structural design, finite element method, car carrier ship

1. UVOD

Pomične palubice su podsustav broda [1] koji svojom masom i cijenom izrade može bitno utjecati na ukupnu cijenu i težinu broda, kao i stupanj složenosti gotovog proizvoda. Konstrukcija same palubice može biti izvedena kao sendvič konstrukcija sa dvostrukim opločenjem ili kao klasično orebrena konstrukcija. Obje vrste konstrukcije moraju zadovoljiti projektne zahtjeve i ograničenja, te moraju zadovoljiti zahtjeve prema pravilima nadležnog klasifikacijskog društva.

Pomične palubice su zamišljene da olakšaju i ubrzaju utovar i istovar vozila te da povećaju stupanj iskoristivosti prostora za smještaj vozila. Svaka palubica ima zasebni sustav podizanja i spuštanja koji omogućuje različite radne položaje svake palubice. To je velika prednost takvog sustava, ali ima i višu početnu cijenu izrade. Podizni sustav može biti pomičan i nepomičan. Vozilo s podiznom platformom je primjer pomičnog podiznog sustava, dok je sustav s čeličnom užadi pogonjen hidraulikom ili elektromotorom primjer nepomičnog podiznog sustava.

Pomične palubice najčešće su građene za prijevoz osobnih automobila, dok fiksne palube prevoze i teške terete kao npr. kamione. Nedostatak pomičnih paluba je taj što su građene kao prekinute te one kao takve ne sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći broda, zbog čega uzdužnu čvrstoću moraju preuzeti fiksne palube. Pomične palube mogu biti smještene između dvije fiksne palube na jednoj ili dvije razine. Palubice mogu biti u donjem radnom položaju [Slika 1] koji omogućuje ukrcaj vozila ispod i na pomičnu palubicu, ili u gornjem radnom položaju koji omogućuje ukrcaj vozila veće visine ispod pomične palubice.



a) Jedna paluba-dva radna položaja



b) Jedna paluba-tri radna položaja



c) Dvije palube-tri radna položaja

Slika 1. Radni položaji palubica [1]

2. IDENTIFIKACIJA PROJEKTOG PROBLEMA

2.1. Analiza projekta

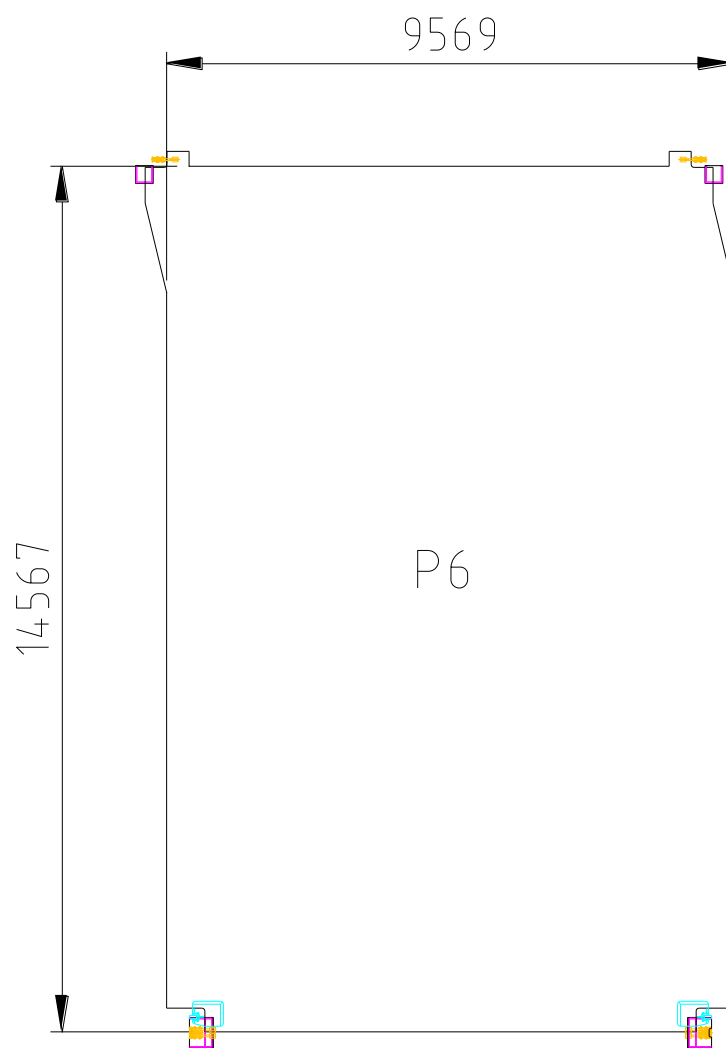
Brod za prijevoz automobila, koji se razmatra u ovom projektu, sastoji se od 13 paluba. Palube 2, 4, 6 i 8 su pomične, dok su ostale palube fiksne i sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći broda. Pomične palube se koriste za prijevoz osobnih automobila, a na fiksne se mogu krcati i teža vozila. Paluba 2, koja je razmatrana u ovom radu, sastoji se od 23 pomične palubice od kojih su dvije odabrane za proračun konstrukcije. Kada se palubice nalaze u donjem radnom položaju, moguće je i na njima i ispod njih krcati automobile. U donjem radnom položaju palubica nasjeda na fiksni oslonac koji je najčešće čvrsto vezan za strukturu broda ili za uporu ako se radi o osloncu pri C.L.-u. Kada je u gornjem radnom položaju, palubica nasjeda na pomični oslonac koji je znatno manje opterećen jer tada nema nakrcanih vozila.

2.2. Opći plan razmještaja palubica

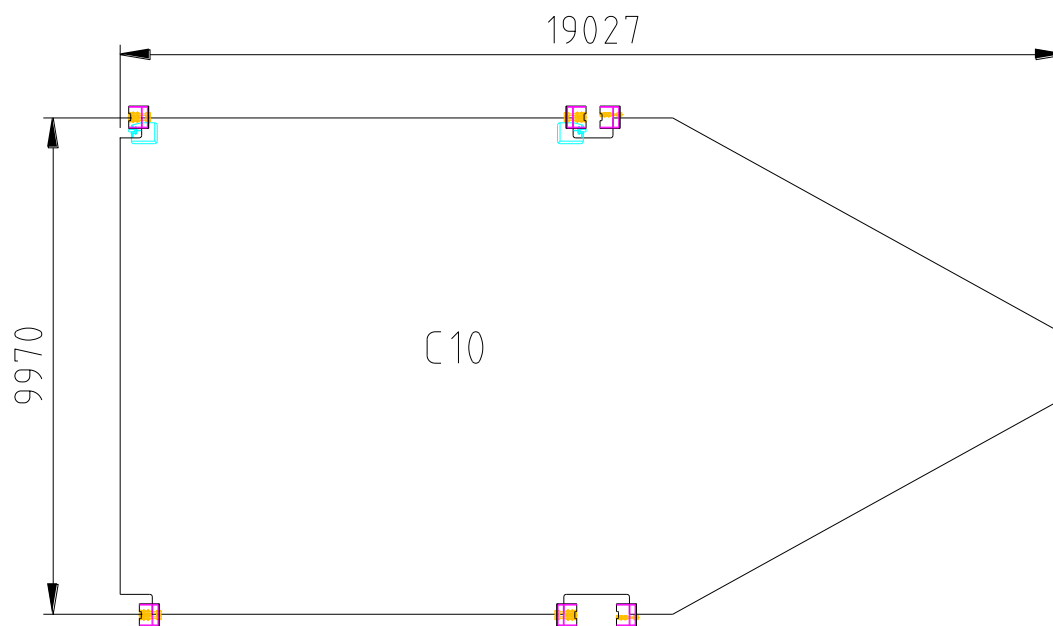
Prema dostupnoj projektnoj dokumentaciji [2], razmještaj palubica s pripadajućim osloncima na kojima se palubice oslanjaju u različitim radnim položajima prikazan je u općem planu. Čvrstoća samih oslonaca nije bila razmatrana u ovom radu.

2.3. Odabrane palubice za daljnji proračun

Prema obliku same konture palubica odabrane su dvije za koje će u daljnjem radu biti projektirana konstrukcija. To su palubica P6, [Slika 2] koja ima pravilan četverokutni oblik i C10, [Slika 3] koja je nepravilnog oblika.



Slika 2. Kontura palubice P6 [2]



Slika 3. Kontura palubice C10 [2]

2.4. Zahtjev brodovlasnika [5]

Paluba 2 je namijenjena transportu osobnih automobila pa je sukladno tome postavljeno opterećenje u samom proračunu. Na zahtjev brodovlasnika potrebno je koristiti što manje različitih debljina materijala, kao i maksimalno pojednostavljenje same konstrukcije. Na temelju prijašnjih iskustava brodovlasnik je u svrhu uštede vremena a tako i cijene koštanja projektiranja zahtijevao da opločenje bude od običnog brodograđevnog čelika ST24, a jaki nosači i ukrepe od čelika povišene čvrstoće AH36. Sendvič konstrukcija je za brodovlasnika bila neprihvatljiva u odnosu na cijenu koštanja klasične orebrene konstrukcije pa one u ovom radu nisu ni uzimane u obzir.

Sažetak zahtjeva brodovlasnika:

- Paluba 2 se koristi za transport osobnih vozila.
- Materijal opločenja je obični brodograđevni čelik ST24.
- Materijal jakih nosača i ukrepa je čelik povišene čvrstoće AH36.
- Maksimalni progib palubice 70 mm - poštivanje svjetle visine [Slika 4].
- Maksimalna visina strukture 380 mm - poštivanje svjetle visine [Slika 4].

2.5. Projektna ograničenja

Da bi se identificirala projektna ograničenja bilo je potrebno proučiti dostupnu tehničku dokumentaciju kao i propise nadležnog klasifikacijskog društva. Također je nužno poštivati zahtjeve brodovlasnika i naputke brodogradilišta u kojima je definiran stupanj razvijenosti tehnologije. Projektna ograničenja se mogu podijeliti na nekoliko podskupina:

- Funkcionalna projektna ograničenja.
- Tehnološka projektna ograničenja.
- Projektna ograničenja standardizacije.
- Propisana projektna ograničenja nadležnog klasifikacijskog društva.

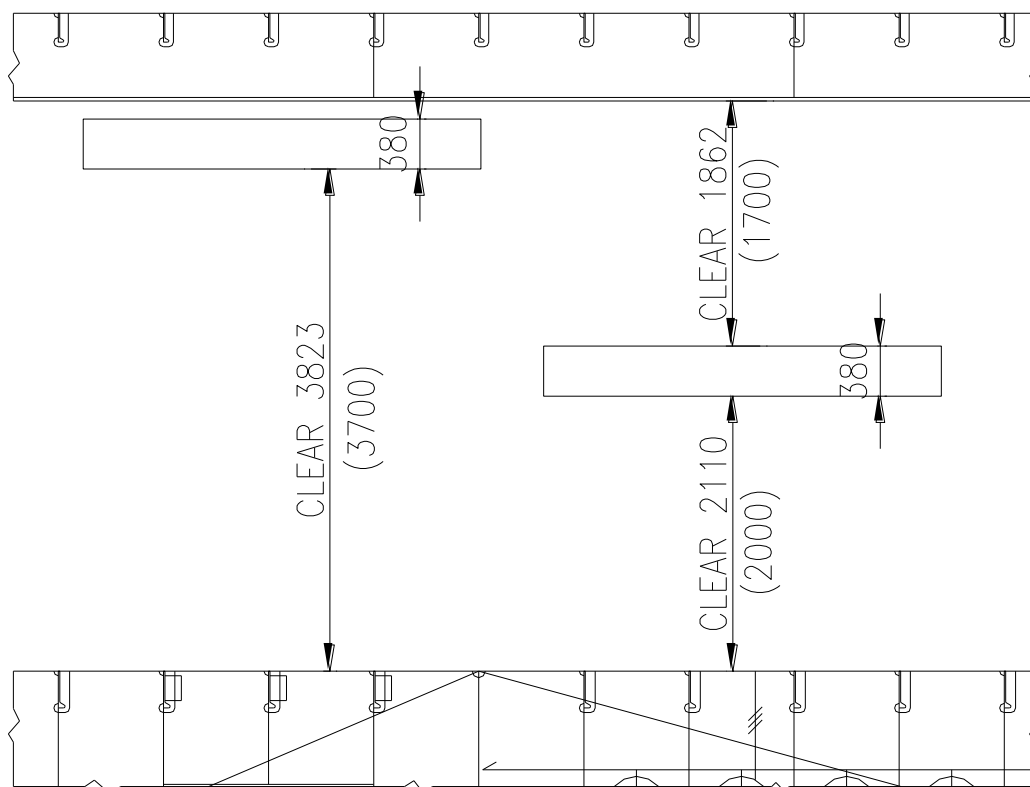
2.5.1. Funkcionalna projektna ograničenja

Osnovno funkcionalno ograničenje je poštivanje zadanih maksimalnih dimenzija konture palubica koje se ne smiju mijenjati tijekom izrade proračuna globalne čvrstoće strukture palubica. Razmak između kontura susjednih palubica je 30 mm pa bi svako povećanje dimenzija konture moglo uzrokovati sudaranje susjednih palubica što je nedopustivo.

Slijedeće projektno ograničenje je poštivanje svjetle visine [Slika 4] ispod i iznad palubice kada se ona nalazi u određenom radnom položaju. Vrijednosti u zgradama [Slika 4], određuju maksimalnu visinu vozila koji se smiju krcati tako da ne dođe do njihova oštećenja. U tu vrijednost uzet je u obzir maksimalni progib te izolacija koja se postavlja na gornju nepomičnu palubu.

Poštivanje svjetle visine definirano je:

- Maksimalna visina konstrukcije palubica je 380 mm.
- Maksimalni progib palubice je 70 mm.



Slika 4. Svijetla visina prostora iznad i ispod palubice [2]

2.5.2. Tehnološka projektna ograničenja

Tehnološka projektna ograničenja su definirana standardima tehnologije brodograđevne industrije kao i standardima projektnih ustanova te brodogradilišta u kojima se palubice proizvode. Projektant prije početka izrade projekta kao i za vrijeme izrade projekta treba u potpunosti biti upoznat za tehnološkim mogućnostima brodogradilišta.

Standardi brodograđevne industrije propisuju ograničenja u zavarivanju strukturnih elemenata na osnovu njihove debljine, vrste materijala i vrste spoja, pripremu elemenata na zavarivanje određenog tipa te eventualnu obradu zavara nakon zavarivanja. Svi ti propisi od strane brodograđevne industrije koji su u skladu sa tehnološkim propisima klasifikacijskog društva moraju se primjenjivati tijekom izrade projekta.

S obzirom da se konstrukcija otvorene palubice s donje strane smatra relativno jednostavnom, te da je materijal za izradu čelik, pretpostavka je da svako brodogradilište ima mogućnost osigurati minimalne tehnološke uvjete za proizvodnju ovakvog proizvoda. Zbog jednostavnosti izrade zahtjev je da nosači roštilja palubice budu jednake visine u poprečnom i uzdužnom smjeru.

2.5.3. Projektna ograničenja standardizacije

Projektant na početku izrade projekta mora biti upoznat za uvjetima koji vladaju na tržištu i mogućnosti nabave različitih vrsta materijala. Današnji trend je da se posebna oprema izrađuje u specijaliziranim brodogradilištima za takvu vrstu proizvoda. Jedan od ograničenja standardizacije je odabiranje cijelobrojnih vrijednosti debljina materijala. Ukoliko se koriste materijali nestandardnih dimenzija, to mora biti opravdano financijski ili uštedom na masi. Za nosače se najčešće koriste T ili L profili koji se izrađuju oblikovanjem ili zavarivanjem u brodogradilištu i HP standardni profili.

Radi većeg stupnja standardizacije potrebno je koristiti što manje različitih debljina i vrsta materijala.

2.5.4. Propisana projektna ograničenja klasifikacijskog društva (DNV) [3]

Propisi za projektiranje pomičnih palubica se nalaze u pravilima klasifikacijskog društva (DNV). U *Pt.3 Ch.1 Sec.4* [3] definirana su ubrzanja ovisna o položaju razmatrane palubice u odnosu na brod. Ubrzanja su relevantna u proračunu opterećenja jer utječu na povećanje opterećenja uslijed vlastite težine strukture i težine tereta koji krcamo. U *Pt.5 Ch.2 Sec.7* [3] su definirana projektna stanja opterećenja, te maksimalna dopuštena naprezanja i maksimalni dopušteni progib. U ovom području su također definirana pravila prema kojima se određuju minimalne vrijednosti momenata otpora i momenata tromosti nosača. U *Pt.3 Ch.1 Sec.12* definirana su pravila kontrole izvijanja.

Dopuštena maksimalna naprezanja, uvjeti otvorenog mora:

- Normalna naprezanja: $\sigma_{dop} = 160 \cdot f_1 = 222 \text{ MPa}$
- Posmična naprezanja: $\tau_{dop} = 90 \cdot f_1 = 125 \text{ MPa}$

Dopuštena maksimalna naprezanja, uvjeti unutar luka:

- Normalna naprezanja: $\sigma_{dop} = 180 \cdot f_1 = 250 \text{ MPa}$
- Posmična naprezanja: $\tau_{dop} = 100 \cdot f_1 = 139 \text{ MPa}$

$f_1 = 1.39$ za čelik povišene čvrstoće

Tablica 1. Sažetak projektnih ograničenja

Projektna ograničenja:	Opis
Funkcionalna:	
1.	Poštivanje maksimalnih dimenzija konture palubica.
2.	Razmak između susjednih palubica 30 mm.
3.	Poštivanje svjetle visine prostora ispod i iznad palubice.
4.	Ukupna visina strukture palubice je 380 mm.
5.	Maksimalno dopušteni progib palubice je 70 mm
Tehnološka:	
1.	Poštivanje standardizacije brodograđevne industrije.
2.	Nosači roštilja u poprečnom i uzdužnom smjeru jednakih visina.
Standardizacije:	
1.	Korištenje što manjeg broja različitih debljina materijala.
2.	Po mogućnosti koristiti cijelobrojne vrijednosti debljine materijala.
Propisi DNV-a:	
1.	Maksimalno dopuštena naprezanje na savijanje i smika.
2.	Minimani zahtjevani moment otpora nosača.
3.	Minimalni zahtjevani moment tromosti nosača.
4.	Zahtjevi za kontrolu izvijanja opločenja.

3. KONCEPTUALNA FAZA

Valja napomenuti da je za palubu 2 već postojao gotov proračun roštilja pomičnih palubica, te je u ovom radu jedan od ciljeva bio pronaći eventualno bolje rješenje. S obzirom na brojna ograničenja koja ne dopuštaju veliki broj varijabli kojima možemo utjecati na konačni ishod projekta u ovom radu pažnja je posvećena ispitivanju senzitivnosti konstrukcije promjenom broja jakih uzdužnih i poprečnih nosača. Kao osnovni model ispitivanja uzeta je topologija postojećih projekata.

3.1. Analiza prototipa

Prema postojećem projektu struktura palubice P6 sastoji se od:

- 9 jakih uzdužnih nosača razmaka 1750 mm
Vanjski nosači: 355x6/180x20
Unutarnji nosači: 355x6/50x20
- 6 jakih poprečnih nosača razmaka 1650 mm
Vanjski nosači: 355x6/160x20
Unutarnji nosači: 355x6/120x20
- 3 ukrepe između jakih poprečnih nosača
HP 120x6
- Opločenja s gornje strane panela, debljine 6 mm

Prema postojećem projektu struktura palubice C10 sastoji se od:

- 6 jakih uzdužnih nosača razmaka 1750 do 1925 mm
Vanjski nosači: 355x6/80x20
Unutarnji nosači: 355x6/50x20
- 12 jakih poprečnih nosača razmaka 1650 mm
Vanjski nosači: 355x6/80x20
Unutarnji nosači: 355x6/70x20

- 3 ukrepe između jakih poprečnih nosača
HP 120x6
- Opločenja s gornje strane panela, debljine 6 mm

3.2. Projektiranje nove konstrukcije

Kao što je već spomenuto zbog brojnih ograničenja broj varijabli koje mogu utjecati na ishod projekta je vrlo mali. Krenuvši od topologije osnovnog modela, za svaku palubicu načinjeno je devet različitih modela [Tablica 2] i [Tablica 3], za koje je bilo potrebno provesti proračun prema pravilima klasifikacijskog društva te proračun u jednom od računalnih programa metodom konačnih elemenata. Devet različitih modela dobiveno je na osnovu početnog na način da je u uzdužnom i poprečnom smjeru dodan i oduzet po jedan jaki nosač.

Tablica 2. Topologija projektnih modela palubice P6

Model	S_{UN} , mm	S_{PN} , mm	S_{HP} , mm
8x5	2072	2378	594
8x6	2072	1902	475
8x7	2072	1585	528
9x5	1813	2378	594
9x6	1813	1902	475
9x7	1813	1585	528
10x5	1612	2378	594
10x6	1612	1902	475
10x7	1612	1585	528

8x5 – model koji se sastoji od 8 jakih uzdužnih nosača i 5 jakih poprečnih nosača

S_{UN} – razmak jakih uzdužnih nosača

S_{PN} – razmak jakih poprečnih nosača

S_{HP} – razmak ukrepa

Tablica 3. Topologija projektnih modela palubice C10

Model	S _{UN} , mm	S _{PN} , mm	S _{HP} , mm
5x11	2477	1897	474
5x12	2477	1724	431
5x13	2477	1581	527
6x11	1982	1897	474
6x12	1982	1724	431
6x13	1982	1581	527
7x11	1652	1897	474
7x12	1652	1724	431
7x13	1652	1581	527

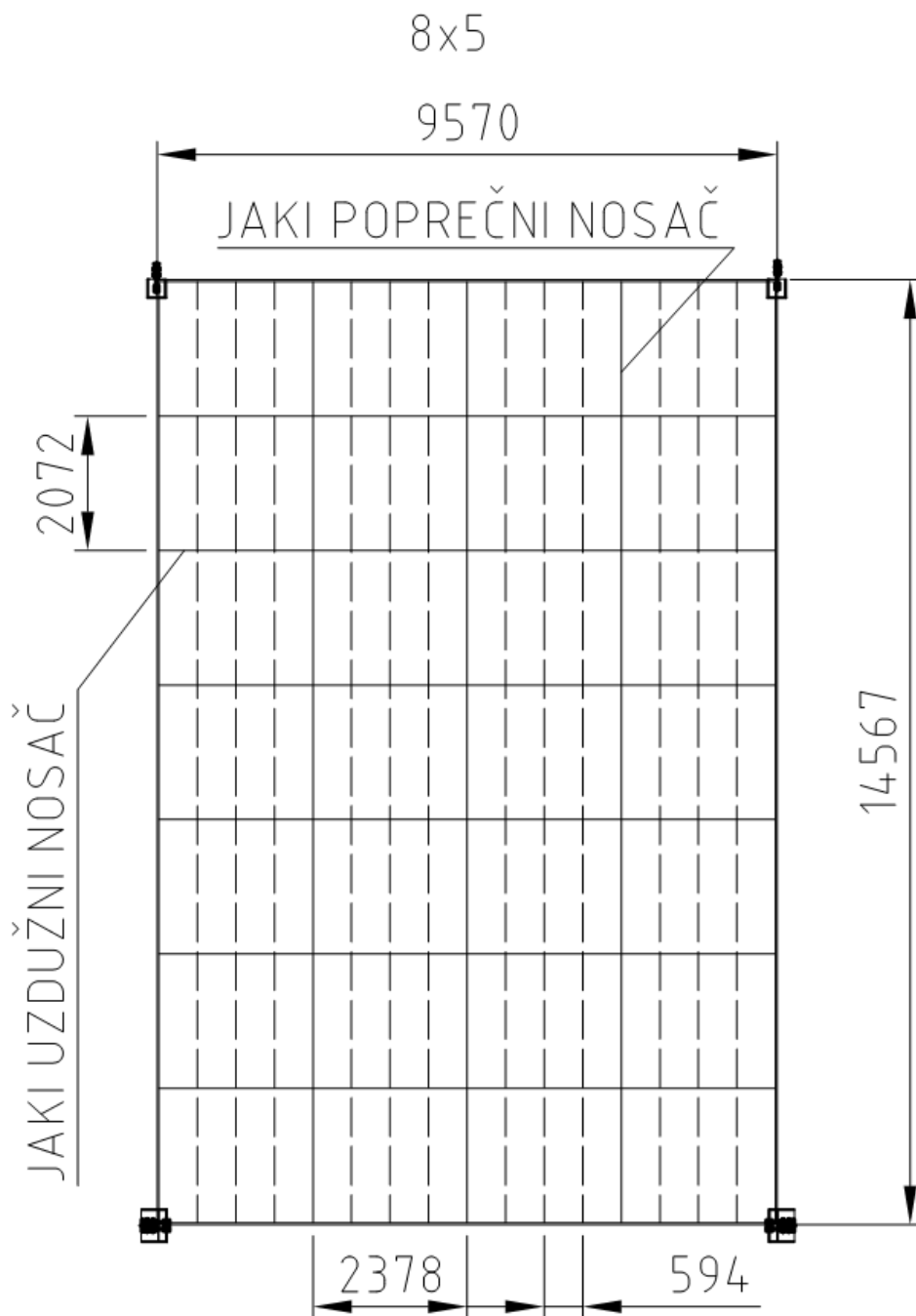
3.3. Proračun strukture prema pravilima klasifikacijskog društva [3]

Za svaki od devet modela proveden je proračun strukture prema pravilima klasifikacijskog društva (DNV). U ovoj točki je prikazan samo proračun modela najmanje mase, koji će nadalje biti odabran i kao najpovoljnije rješenje.

Za proračun strukture relevantna su slijedeća poglavlja:

- *Pt.3 Ch.1 Sec.4* – definirana su ubrzanja ovisna o položaju panela u odnosu na brod
- *Pt.5 Ch.2 Sec.7* – definirana su projektna stanja opterećenja, te minimalni zahtijevani momenti otpora i momenti tromosti jakih nosača te ukrepa

3.3.1. Proračun strukture palubice P6



Slika 5. Topologija palubice P6 za daljnji proračun

Model se sastoji od:

- 8 jakih uzdužnih nosača
- 5 jakih poprečnih nosača
- 3 ukrepe između dva jaka poprečna nosača

Duljina jakog uzdužnog nosača: 9 510 mm
 Razmak jakih uzdužnih nosača: 2 072 mm
 Duljina jakog poprečnog nosača: 14 507 mm
 Razmak jakih poprečnih nosača: 2 378 mm
 Razmak ukrepa: 594 mm

Projektno opterećenje uslijed težine same strukture i nakrcanog tereta:

$$p = (q_c + q_0)(9.81 + 0.5a_v) = 4.88 \text{ kN/m}^2$$

$q_c = 0.3 \text{ t/m}^2$ – distribuirano opterećenje uslijed tereta

$q_0 = 0.095 \text{ t/m}^2$ – distribuirano opterećenje uslijed vlastite težine panela

Vertikalna akceleracija ovisna o položaju panela u odnosu na brod:

$$a_v = \frac{k_v g_0 a_0}{C_B} = 5.09 \text{ m/s}^2$$

$k_v = 0.7$ – koeficijent ovisan o položaju panela u odnosu na brod (vrijednost očitana iz dijagrama)

$a_0 = 0.43$ – parametar ovisan o brzini i duljini broda (vrijednost očitana iz dijagrama)

$C_B = 0.58$ – blok koeficijent

Zahitjevani moment otpora poprečnog jakog nosača računa se prema:

$$Z = \frac{6.25 S^2 b p}{m f_1} = 1372.78 \text{ cm}^3$$

$S = 14.507 \text{ m}$ – raspon poprečnog jakog nosača

$b = 2.378 \text{ m}$ – širina pojasa opterećenja koja ulazi u proračunski dio

$m = 8$ – parametar ovisan o vrsti oslonca krajeva greda (zglobni oslonac)

$f_1 = 1.39$ – za čelik povišene čvrstoće

Minimalna površina poprečnog presijeka struka poprečnog nosača:

$$A = \frac{0.06Sbp}{f_1} = 7.27 \text{ cm}^2$$

Na sredini raspona površina poprečnog presijeka struka ne smije biti manji od 0.5A

Zahtijevani moment tromosti poprečnog nosača:

$$I = C_1 Z f_1 S = 30450 \text{ cm}^4$$

$C_1 = 1.1$ – za čelik

$Z = 1\,372.78 \text{ cm}^3$ – moment otpora poprečnog nosača

$S = 14.507 \text{ m}$ – raspon jakog poprečnog nosača

Pomoću pomoćnog alata (proračunska tablica za izračunavanje zahtijevanih vrijednosti nosača) odabran je slijedeći poprečni nosač:

T 355x6/170x20

Nosač ima slijedeće karakteristike:

Moment tromosti: $41\,722.8 \text{ cm}^4$

Moment otpora presjeka: $1\,412.5 \text{ cm}^3$

Površina struka: 21.3 cm^2

Zahtijevani moment otpora uzdužnog jakog nosača:

$$Z = \frac{6.25S^2bp}{mf_1} = 5014.03 \text{ cm}^3$$

$S = 9.51 \text{ m}$ – raspon poprečnog jakog nosača

$b = 2.072 \text{ m}$ – širina pojasa opterećenja koja ulazi u proračunski dio

$m = 8$ – parametar ovisan o vrsti oslonca krajeva greda (zglobni oslonac)

$f_1 = 1.39$ – za čelik povišene čvrstoće

Sunosiva širina oplate jakog uzdužnog nosača:

$$b_e = Cb = 1.97 \text{ m}$$

$b = 2.072 \text{ m}$ – razmak dvaju nosača

$C = 0.95$ – koeficijent prema DNV Pt.3 Ch.1 Sec.3, Table C2

Sunosiva širina oplate se računa ukoliko je:

$$\frac{S}{b} \leq 7$$

$$\frac{S}{b} = 4.59$$

Minimalna površina poprečnog presjeka struka jakog uzdužnog nosača:

$$A = \frac{0.06Sbp}{f_1} = 4.15 \text{ cm}^2$$

Na sredini raspona nosača površina poprečnog presjeka nosača ne smije biti manja od $0.5A$.

Minimalni moment tromosti jakog uzdužnog nosača:

$$I = C_1 Z f_1 S = 7474.33 \text{ cm}^4$$

$C_1 = 1.1$ za čelik

$Z = 514.03 \text{ cm}^3$ – moment otpora uzdužnog jakog nosača

$S = 9.51 \text{ m}$ – raspon uzdužnog jakog nosača

Pomoću pomoćnog alata (proračunska tablica za izračunavanje zahtijevanih vrijednosti nosača) odabran je slijedeći uzdužni nosač:

T 355x6/50x20

Nosač ima slijedeće karakteristike:

Moment tromosti: $18\,936.1 \text{ cm}^4$

Moment otpora presjeka: 578 cm^3

Površina struka: 21.3 cm^2

Određivanje debljine oplata palubice P6:

Za određivanje debljine oplata relevantno je osovinsko opterećenje. Na palubu 2 krcamo osobna vozila slijedećih karakteristika [Tablica 4]:

Tablica 4. Karakteristike vozila za određivanje opterećenja

Automobil	Osovinsko opterećenje (t)		Međuosovinski razmak (mm)	Razmak kotača (mm)	Otisak pritiska kotača (mm)				
					Duljina otiska		Širina otiska		
	Prednje	Stražnje			Prednji	Stražnji	Prednji	Stražnji	
	1.64	1.26	3165	1410	1420	144	127	275	275

Opterećenje dobiveno uslijed osovinskog pritiska na površinu opločenja.

$$p = \frac{Q}{n_0 ab} (9.81 + 0.5a_v) = 249.61 \frac{kN}{m^2}$$

$Q = 1.6 \text{ t}$ – maksimalno osovinsko opterećenje

$n_0 = 2$ – broj površina po osovini koje opterećuju površinu (broj kotača)

$a = 0.275 \text{ m}$ – širina otiska kotača

$b = 0.144 \text{ m}$ – duljina otiska kotača

$a_v = 5.07 \text{ m/s}^2$ – vertikalna akceleracija

Debljina opločenja ne smije biti manja od:

$$t = \frac{77.4k_a\sqrt{k_w csp}}{\sqrt{m\sigma}} + t_k = 5.38 \text{ mm}$$

$$k_a = 1.1 - 0.25 \frac{s}{l} = 1.03$$

$t_k = 0 \text{ mm}$ – dodatak uslijed korozije ne uzima se u obzir u ovom proračunu

$s = 0.594 \text{ m}$ – razmak ukrepa

$l = 2.072 \text{ m}$ – razmatrana duljina ukrepa

$$k_w = 1.3 - \frac{4.2}{\left(\frac{a}{s} + 1.8\right)^2} = 0.48$$

$c=b$ za $b < s \rightarrow c=0.144 \text{ m}$

$$m = \frac{38}{\left(\frac{b}{s}\right)^2 - 4.7 \frac{b}{s} + 6.5} \quad \text{za} \quad \frac{b}{s} \leq 1.0$$

$$\frac{b}{s} = 0.24$$

$$m = 7.01$$

$$\sigma = 320f_1 = 320 \text{ N/mm}^2$$

Prema zahtijevu brodovlasnika oplata je od običnog brodograđevnog čelika .

$$f_1 = 1$$

Određivanje ukrepe:

Moment otpora ukrepe ne smije biti manji od:

$$Z = \frac{1000k_z l c d p w_k}{m \sigma} = 18.7 \text{ cm}^3$$

$$k_z = 1.0 \quad \text{za} \quad b/s < 0.6 \quad \text{i} \quad b/s > 3.4$$

$$b/s = 0.24$$

$$d = a \quad \text{za} \quad a < l \quad \rightarrow \quad d = 0.275$$

$$\sigma = 160 f_1 = 222.4 \text{ N/mm}^2 - \text{ za uvjete otvorenog mora}$$

$$\sigma = 180 f_1 = 250.2 \text{ N/mm}^2 - \text{ za uvjete unutar luka}$$

$$f_1 = 1.39 - \text{ za čelik povišene čvrstoće}$$

$$w_k = 1.0 - \text{ korozijski faktor (za tankove } w_k \neq 1.0)$$

$$m = \frac{r}{\left(\frac{a}{l}\right)^2 - 4.7 \frac{a}{l} + 6.5} \quad \text{za} \quad \frac{a}{l} \leq 1.0$$

$$\frac{a}{l} = 0.133$$

$$m = 4.92$$

$r = 29$ – faktor ovisan o krutosti spoja sa jakim nosačima

Odabrani profil ukrepe:

HP 80x5

$$Z = 20.8 \text{ cm}^3 - \text{ moment otpora odabranog profila}$$

Tablica 5. Pregled proračunate strukture palubice P6 prema pravilima

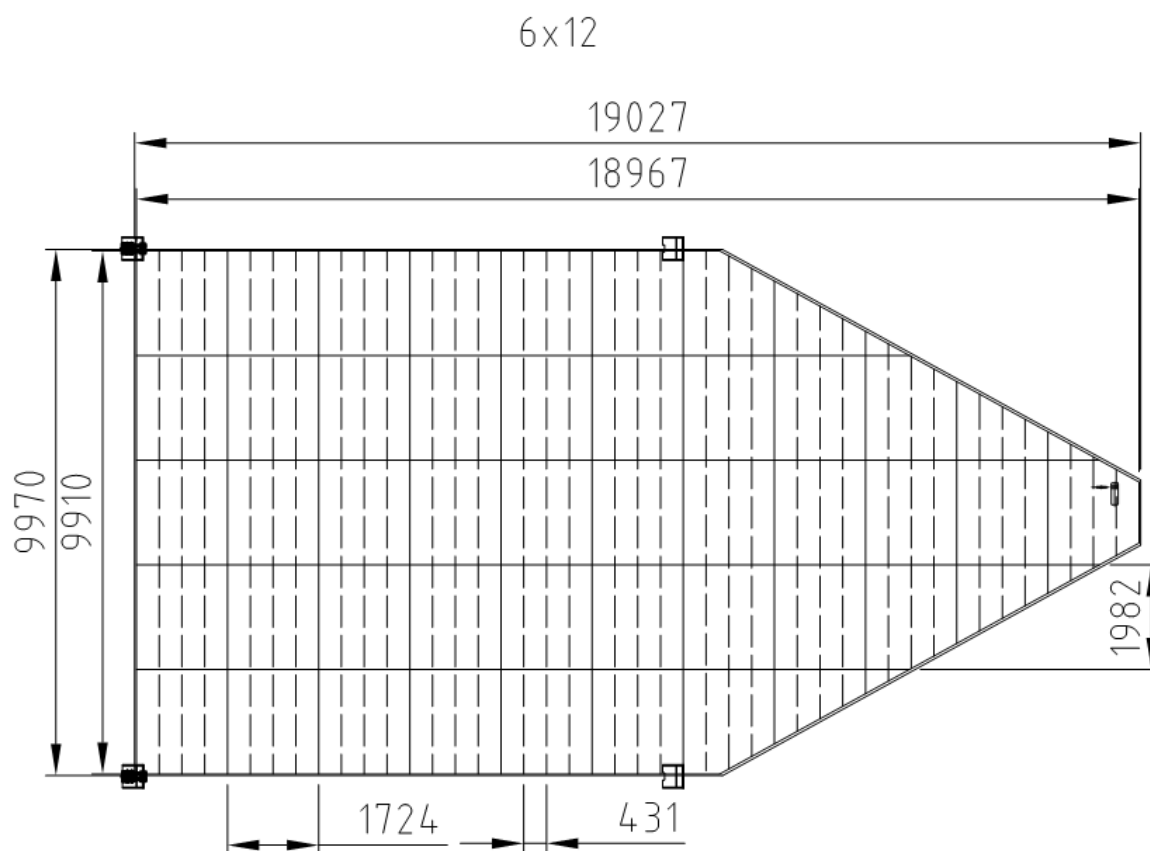
Model	t_p , mm	UZDUŽNI NOSAČ			POPREČNI NOSAČ			UKREPA		
		Z, cm ³	I, cm ⁴	TIP	Z, cm ³	I, cm ⁴	TIP	Z, cm ³	TIP	
8x5	5.38	514	7474		1373	30450		18.7		Min zahtijevano
	5.50	578	18936	T 355x6/50x20	1413	41723	T 355x6/170x20	20,8	HP80x5	Odabrano
8x6	5.13	514	7474		1098	24355		18.7		Min zahtijevano
	5.50	578	18936	T 355x6/50x20	1128	33254	T 355x6/130x20	20,8	HP80x5	Odabrano
8x7	5.26	514	7474		915	20296		18.7		Min zahtijevano
	5.50	578	18936	T 355x6/50x20	983	28678	T 355x6/110x20	20,8	HP80x5	Odabrano
9x5	5.32	450	6540		1373	30450		16.1		Min zahtijevano
	5.50	575	18520	T 355x6/50x20	1413	41723	T 355x6/170x20	20,8	HP80x5	Odabrano
9x6	5.09	450	6540		1098	24355		16.1		Min zahtijevano
	5.50	575	18520	T 355x6/50x20	1128	33254	T 355x6/130x20	20,8	HP80x5	Odabrano
9x7	5.21	450	6540		915	20296		16.1		Min zahtijevano
	5.50	575	18520	T 355x6/50x20	983	28678	T 355x6/110x20	20,8	HP80x5	Odabrano
10x5	5.27	400	5815		1373	30450		14.1		Min zahtijevano
	5.50	572	18129	T 355x6/50x20	1413	41723	T 355x6/170x20	20,8	HP80x5	Odabrano
10x6	5.05	400	5815		1098	24355		14.1		Min zahtijevano
	5.50	572	18129	T 355x6/50x20	1128	33254	T 355x6/130x20	20,8	HP80x5	Odabrano
10x7	5.17	400	5815		915	20296		14.1		Min zahtijevano
	5.50	572	18129	T 355x6/50x20	983	28678	T 355x6/110x20	20,8	HP80x5	Odabrano

t_p – debljina opločenja

Z – moment otpora nosača

I – moment tromosti nosača

3.3.2. Proračun strukture palubice C10



Slika 6. Topologija palubice C10 za daljnji proračun

Model se sastoji od:

- 6 jakih uzdužnih nosača
- 12 jakih poprečnih nosača
- 3 ukrepe između dva jaka poprečna nosača

Duljina jakog uzdužnog nosača: 18 219 mm

Razmak jakih uzdužnih nosača: 1 982 mm

Duljina jakog poprečnog nosača: 9 910 mm

Razmak jakih poprečnih nosača: 1 724 mm

Razmak ukrepa: 431 mm

Projektno opterećenje uslijed težine same strukture i nakrcanog tereta:

$$p = (q_c + q_0)(9.81 + 0.5a_v) = 4.88 \text{ kN/m}^2$$

$q_c = 0.3 \text{ t/m}^2$ – distribuirano opterećenje uslijed tereta

$q_0 = 0.095 \text{ t/m}^2$ – distribuirano opterećenje uslijed vlastite težine panela

Vertikalna akceleracija ovisna o položaju panela u odnosu na brod:

$$a_v = \frac{k_v g_0 a_0}{C_B} = 5.09 \text{ m/s}^2$$

$k_v = 0.7$ – koeficijent ovisan o položaju panela u odnosu na brod (vrijednost očitana iz dijagrama)

$a_0 = 0.43$ – parametar ovisan o brzini i duljini broda (vrijednost očitana iz dijagrama)

$C_B = 0.58$ – blok koeficijent

Zahtijevani moment otpora poprečnog jakog nosača računa se prema:

$$Z = \frac{6.25S^2bp}{mf_1} = 464.43 \text{ cm}^3$$

$S = 9.91 \text{ m}$ – raspon poprečnog jakog nosača

$b = 1.724 \text{ m}$ – širina pojasa opterećenja koja ulazi u proračunski dio

$m = 8$ – parametar ovisan o vrsti oslonca krajeva greda (zglobni oslonac)

$f_1 = 1.39$ – za čelik povišene čvrstoće

Minimalna površina poprečnog presijeka struka poprečnog nosača:

$$A = \frac{0.06Sbp}{f_1} = 3.6 \text{ cm}^2$$

Na sredini raspona površina poprečnog presijeka struka ne smije biti manji od $0.5A$

Zahtijevani moment tromosti poprečnog nosača:

$$I = C_1 Z f_1 S = 7037.19 \text{ cm}^4$$

$C_1 = 1.1$ – za čelik

$Z = 464.43 \text{ cm}^3$ – moment otpora poprečnog nosača

$S = 9.91 \text{ m}$ – raspon jakog poprečnog nosača

Sunosiva širina oplata jakog poprečnog nosača:

$$b_e = C b = 1.64 \text{ m}$$

$b = 1.724 \text{ m}$ – razmak dvaju nosača

$C = 0.95$ – koeficijent prema DNV Pt.3 Ch.1 Sec.3, Table C2

Sunosiva širina oplata se računa ukoliko je:

$$\frac{S}{b} \leq 7$$

$$\frac{S}{b} = 5.7$$

Pomoću pomoćnog alata (proračunska tablica za izračunavanje zahtijevanih vrijednosti nosača) odabran je slijedeći poprečni nosač:

T 355x6/40x20

Nosač ima slijedeće karakteristike:

Moment tromosti: $16\,403.4 \text{ cm}^4$

Moment otpora presjeka: 505.1 cm^3

Površina struka: 21.3 cm^2

Zahtijevani moment otpora jakog uzdužnog središnjeg nosača:

$$Z = \frac{6.25 S^2 b p}{m f_1} = 1804.62 \text{ cm}^3$$

$S = 18.219$ m – raspon poprečnog jakog nosača

$b = 1.982$ m – širina pojasa opterećenja koja ulazi u proračunski dio

$m = 8$ – parametar ovisan o vrsti oslonca krajeva greda (zglobni oslonac)

$f_1 = 1.39$ – za čelik povišene čvrstoće

Sunosiva širina oplata jakog uzdužnog središnjeg nosača:

$$b_e = b = 1.982 \text{ m}$$

$b = 1.982$ m – razmak dvaju nosača

$C = 0.95$ – koeficijent prema DNV Pt.3 Ch.1 Sec.3, Table C2

Sunosiva širina oplata se računa ukoliko je:

$$\frac{S}{b} \leq 7$$

$$\frac{S}{b} = 9.2$$

Minimalna površina poprečnog presjeka struka jakog uzdužnog nosača:

$$A = \frac{0.06Sbp}{f_1} = 7.61 \text{ cm}^2$$

Na sredini raspona nosača površina poprečnog presjeka nosača ne smije biti manja od $0.5A$.

Minimalni moment tromosti jakog uzdužnog središnjeg nosača:

$$I = C_1 Z f_1 S = 50271.09 \text{ cm}^4$$

$C_1 = 1.1$ za čelik

$Z = 1804.62 \text{ cm}^3$ – moment otpora uzdužnog jakog nosača

$S = 18.219$ m – raspon uzdužnog jakog nosača

Pomoću pomoćnog alata (proračunska tablica za izračunavanje zahtijevanih vrijednosti nosača) odabran je slijedeći uzdužni središnji nosač:

T 355x6/250x20

Nosač ima slijedeće karakteristike:

Moment tromosti: $50\,895.5 \text{ cm}^4$

Moment otpora presjeka: $1\,949.6\text{ cm}^3$

Površina struka: 21.3 cm^2

Zahtijevani moment otpora jakog uzdužnog bočnog nosača:

$$Z = \frac{6.25S^2bp}{mf_1} = 1163.34\text{ cm}^3$$

$S = 14.628\text{ m}$ – raspon poprečnog jakog nosača

$b = 1.982\text{ m}$ – širina pojasa opterećenja koja ulazi u proračunski dio

$m = 8$ – parametar ovisan o vrsti oslonca krajeva greda (zglobni oslonac)

$f_1 = 1.39$ – za čelik povišene čvrstoće

Sunosiva širina oplata jakog uzdužnog bočnog nosača:

$$b_e = b = 1.982\text{ m}$$

$b = 1.982\text{ m}$ – razmak dvaju nosača

$C = 0.95$ – koeficijent prema DNV Pt.3 Ch.1 Sec.3, Table C2

Sunosiva širina oplata se računa ukoliko je:

$$\frac{S}{b} \leq 7$$

$$\frac{S}{b} = 7.4$$

Minimalna površina poprečnog presjeka struka jakog uzdužnog nosača:

$$A = \frac{0.06Sbp}{f_1} = 6.11\text{ cm}^2$$

Na sredini raspona nosača površina poprečnog presjeka nosača ne smije biti manja od $0.5A$.

Minimalni moment tromosti jakog bočnog nosača:

$$I = C_1 Z f_1 S = 26019.54\text{ cm}^4$$

$C_1 = 1.1$ za čelik

$Z = 1\,163.34\text{ cm}^3$ – moment otpora uzdužnog jakog nosača

$S = 14.628 \text{ m}$ – raspon uzdužnog jakog nosača

Pomoću pomoćnog alata (proračunska tablica za izračunavanje zahtijevanih vrijednosti nosača) odabran je slijedeći uzdužni bočni nosač:

T 355x6/140x20

Nosač ima slijedeće karakteristike:

Moment tromosti: $35\,208 \text{ cm}^4$

Moment otpora presjeka: $1\,198 \text{ cm}^3$

Površina struka: 21.3 cm^2

Određivanje debljine oplata palubice C10:

Opterećenje relevantna za određivanje debljine opločenja je kao i kod palubice P6 opterećenje uslijed osovinskog pritiska na opločenje. Karakteristike vozila su identične kao one kod proračuna palubice P6.

Opterećenje dobiveno uslijed osovinskog pritiska na površinu opločenja:

$$p = \frac{Q}{n_0 ab} (9.81 + 0.5a_v) = 249.61 \frac{kN}{m^2}$$

$Q = 1.6 \text{ t}$ – maksimalno osovinsko opterećenje

$n_0 = 2$ – broj površina po osovini koje opterećuju površinu (broj kotača)

$a = 0.275 \text{ m}$ – širina otiska kotača

$b = 0.144 \text{ m}$ – duljina otiska kotača

$a_v = 5.07 \text{ m/s}^2$ – vertikalna akceleracija

Debljina opločenja ne smije biti manja od:

$$t = \frac{77.4k_a\sqrt{k_w csp}}{\sqrt{m\sigma}} + t_k = 5.0 \text{ mm}$$

$$k_a = 1.1 - 0.25 \frac{s}{l} = 1.05$$

$t_k = 0$ mm – dodatak uslijed korozije ne uzima se u obzir u ovom proračunu

$s = 0.431$ m – razmak ukrepa

$l = 1.982$ m – razmatrana duljina ukrepa

$$k_w = 1.3 - \frac{4.2}{\left(\frac{a}{s} + 1.8\right)^2} = 0.59$$

$c = b$ za $b < s \rightarrow c = 0.144$ m

$$m = \frac{38}{\left(\frac{b}{s}\right)^2 - 4.7 \frac{b}{s} + 6.5} \quad \text{za} \quad \frac{b}{s} \leq 1.0$$

$$\frac{b}{s} = 0.33$$

$$m = 7.54$$

$$\sigma = 320 f_1 = 320 \text{ N/mm}^2$$

Prema zahtijevu brodovlasnika oplata je od običnog brodograđevnog čelika.

$$f_1 = 1$$

Određivanje ukrepe:

Moment otpora ukrepe ne smije biti manji od:

$$Z = \frac{1000 k_z l c d p w_k}{m \sigma} = 17.8 \text{ cm}^3$$

$$k_z = 1.0 \quad \text{za} \quad b/s < 0.6 \quad \text{i} \quad b/s > 3.4$$

$$b/s = 0.24$$

$$d = a \quad \text{za} \quad a < 1 \rightarrow d = 0.275$$

$$\sigma = 160 f_1 = 222.4 \text{ N/mm}^2 - \text{za uvjete otvorenog mora}$$

$$\sigma = 180 f_1 = 250.2 \text{ N/mm}^2 - \text{za uvjete unutar luka}$$

$$f_1 = 1.39 - \text{za čelik povišene čvrstoće}$$

$$w_k = 1.0 - \text{korozijski faktor (za tankove } w_k \neq 1.0)$$

$$m = \frac{r}{\left(\frac{a}{l}\right)^2 - 4.7\frac{a}{l} + 6.5} \quad \text{za} \quad \frac{a}{l} \leq 1.0$$

$$\frac{a}{l} = 0.139$$

$$m = 4.94$$

$r = 29$ – faktor ovisan o krutosti spoja sa jakim nosačima

Odabrani profil ukrepe:

HP 80x5

$Z=20.8 \text{ cm}^3$ – moment otpora odabranog profila

Tablica 6. Pregled proračunate strukture palubice C10 prema pravilima

Model	t_p , mm	UZDUŽNI SREDIŠNJI NOSAČ			UZDUŽNI BOČNI NOSAČ			POPREČNI NOSAČ			UKREPA	
		Z, cm ³	I, cm ⁴	TIP	Z, cm ³	I, cm ⁴	TIP	Z, cm ³	I, cm ⁴	TIP	Z, cm ³	TIP
5x11	5.18	2444	70886		1638	38882		511	7743		22.7	
	5.50	2855	70975	T 355x6/380x20	1687	47856	T 355x6/210x20	576	18665	T 355x6/50x20	23.4	HP80x6
5x12	5.05	2444	70886		1638	38882		464	7037		22.7	
	5.50	2855	70975	T 355x6/380x20	1687	47856	T 355x6/210x20	505	16403	T 355x6/40x20	32.4	HP80x6
5x13	5.31	2444	70886		1648	39133		426	6453		22.7	
	5.50	2855	70975	T 355x6/380x20	1687	47856	T 355x6/210x20	503	16157	T 355x6/40x20	23.4	HP80x6
6x11	5.12	1805	50271		1163	26020		511	7743		17.8	
	5.50	1950	50895	T 355x6/250x20	1198	35208	T 355x6/140x20	576	18665	T 355x6/50x20	20.8	HP80x5
6x12	5.00	1805	50271		1163	26020		464	7037		17.8	
	5.00	1950	50895	T 355x6/250x20	1198	35208	T 355x6/140x20	505	16403	T 355x6/40x20	20.8	HP80x5
6x13	5.24	1805	50271		1163	26020		426	6453		17.8	
	5.50	1950	50895	T 355x6/250x20	1198	35208	T 355x6/140x20	503	16157	T 355x6/40x20	20.8	HP80x5
7x11	5.06	1630	47277		1313	34173		511	7743		14.5	
	5.50	1934	47873	T 355x6/250x20	1325	36517	T 355x6/160x20	576	18665	T 355x6/50x20	20.8	HP80x5
7x12	4.94	1630	47277		1313	34173		464	7037		14.5	
	5.00	1934	47873	T 355x6/250x20	1325	36517	T 355x6/160x20	505	16403	T 355x6/40x20	20.8	HP80x5
7x13	5.17	1630	47277		1313	34173		426	6453		14.5	
	5.50	1934	47873	T 355x6/250x20	1325	36517	T 355x6/160x20	503	16157	T 355x6/40x20	20.8	HP80x5

t_p – debljina opločenja, (mm)

Z – moment otpora nosača, (cm³)

I – moment tromosti nosača, (cm⁴)

3.4. Proračun strukture metodom konačnih elemenata (MAESTRO)

U ovoj točki postupak modeliranja je opisan za obje vrste panela, tj. za palubicu P6, pravilnog oblika i za palubicu C10, nepravilnog oblika. Proračunata struktura prema pravilima [Tablica 5] i [Tablica 6] poslužila je kao osnova za izradu modela grubim grednim konačnim elementima u programu MAESTRO gdje su dobiveni rezultati u obliku maksimalnih progiba i naprezanja uspoređeni s onima iz projektnih ograničenja. U konceptualnoj fazi rješavanja problema program MAESTRO omogućuje vrlo brzo definiranje proračunskog modela. Primarni roštilj konstrukcije modeliran je grubim grednim konačnim elementima. Postupak modeliranja ponovljen je za svaki model [Tablica 5] i [Tablica 6], ukupno 18 modela od kojih je postupak prikazan samo za one koji su bili najpovoljniji u odnosu na vlastitu masu.

3.4.1. Opis postupka modeliranja

Modeliranje započinje definiranjem materijala od kojih se konstrukcija sastoji. Prema zahtjevu oplata je izrađena od običnog brodograđevnog čelika ST24, a struktura nosača i ukrepa od čelika povišene čvrstoće AH 36.

Tablica 7. Karakteristike materijala

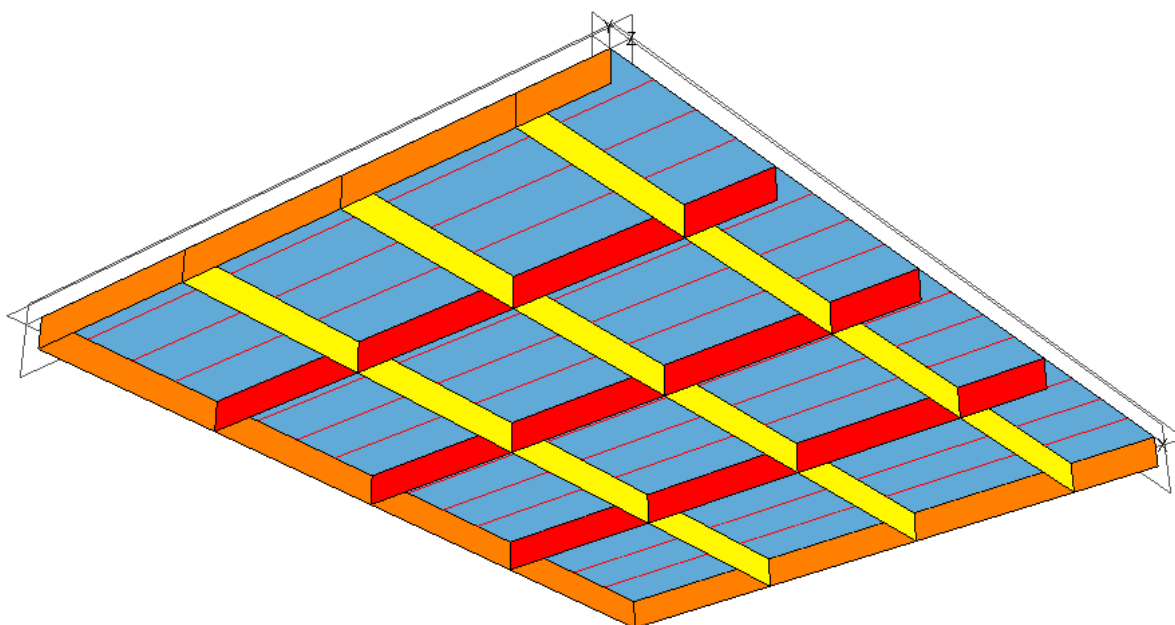
Materijal	E (N/mm ²)	ν	R _{eH} (N/mm ²)	ρ (t/m ³)
ST 24	204000	0.3	235	7.85
AH 36	204000	0.3	355	7.85

E - Youngov modul elastičnosti, (N/mm²)

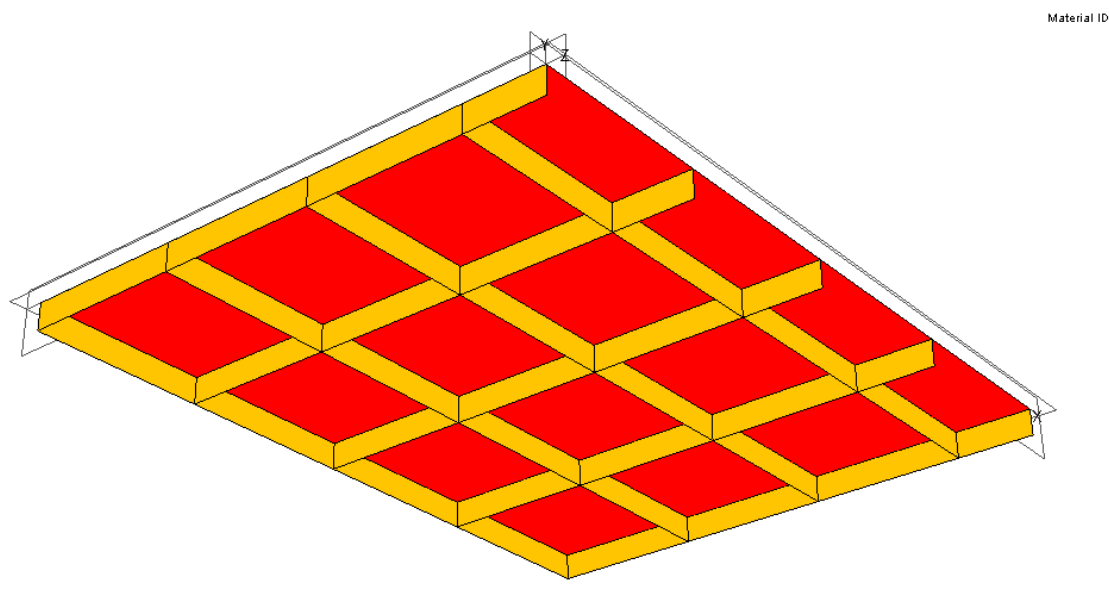
ν – Poissonov koeficijent

R_{eH} – minimalna nominalna granica razvlačenja čelika, (N/mm²)

Nakon toga je potrebno definirati svojstva elemenata, tj. svakom elementu pridružiti geometrijske i materijalne karakteristike. Model je definiran kao više „strake“ elemenata kojemu su pridružena svojstva opločenja i strukturnih nosača. Model je izrađen kao polovinski model s obzirom na njegovu simetričnost. Problem modeliranja ukrepa opločenja je riješen opcijom „stiffener layout“ koja oplati automatski pridružuje definiranu ukrepu.



Slika 7. Prikaz polovinskog 8x5 modela palubice P6 u programu MAESTRO

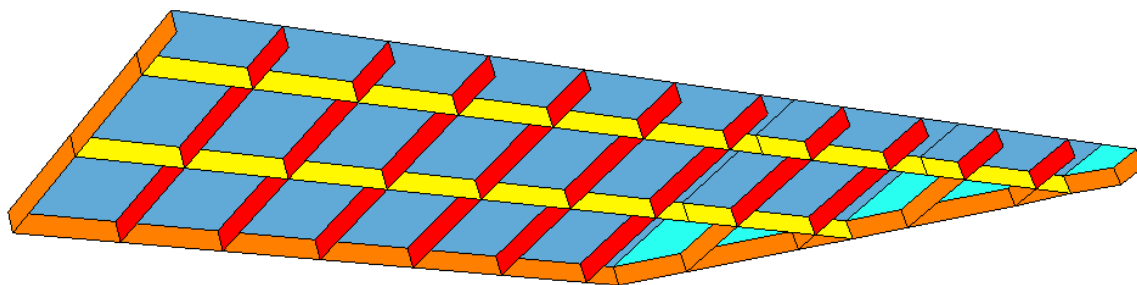


Slika 8. Prikaz rasporeda materijala palubice P6

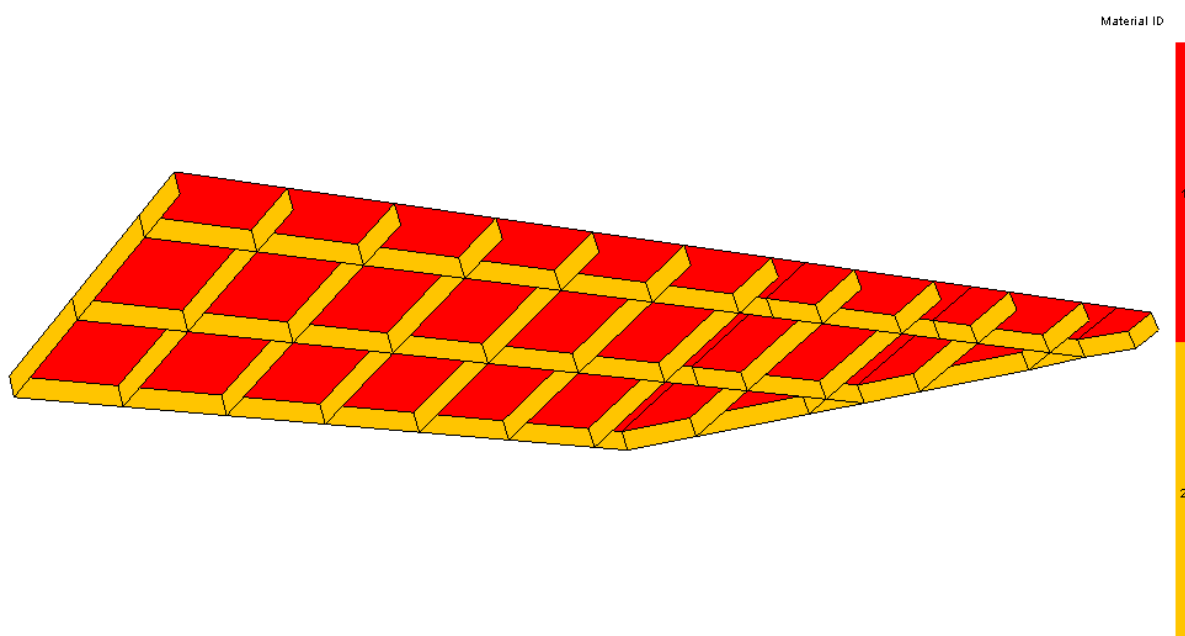
Legenda [Slika 8] prikazuje da su kod modeliranja korištene dvije vrste materijala kao što je to projektnim ograničenjima definirano.

Raspored materijala je slijedeći:

1. Obični brodograđevni čelik, ST 24
2. Čelik povišene čvrstoće, AH 36



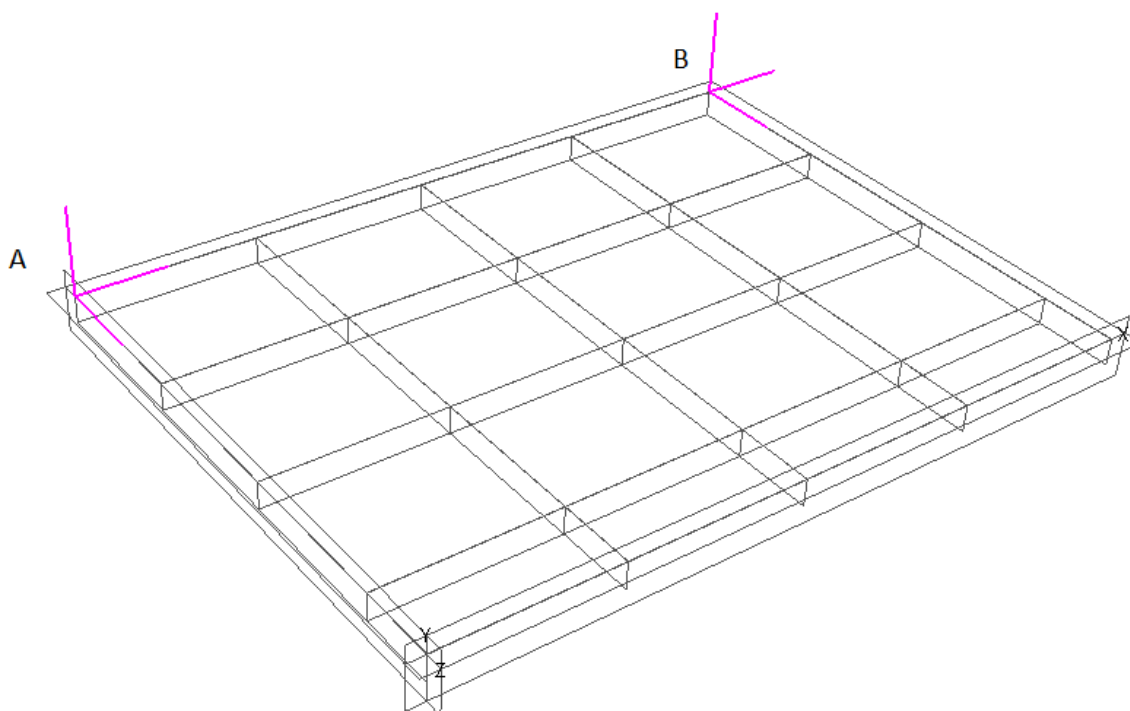
Slika 9. Prikaz polovinskog 12x6 modela palubice C10 u programu MAESTRO



Slika 10. Prikaz rasporeda materijala palubice C10

3.4.2. Definiranje projektnih rubnih uvjeta modela

Na osnovu dostupne projektne dokumentacije definirani su rubni uvjeti. Rubni uvjeti prikazani na slijedećim slikama prikazani su oznakama koje rabi program MAESTRO. Te oznake simboliziraju spriječene pomake određenog čvora u smjeru one globalne osi u kojem smjeru su oznake i ucrtane.



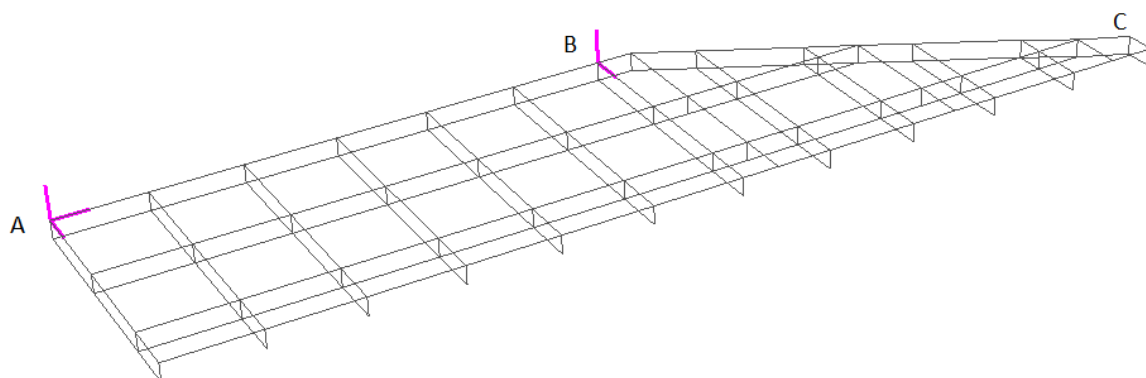
Slika 11. Prikaz rubnih uvjeta polovinskog modela palubice P6

Rubni uvjeti [Slika 11] pokazuju da su pomaci spriječeni u smjeru osi x,y i z, dok su rotacije oko globalnih osi dopuštene. Razlog tomu su vodilice koje se nalaze na tim pozicijima što je vidljivo na nacrtima projektne tehničke dokumentacije [2].

Tablica 8. Rubni uvjeti palubice P6

Čvor	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A	1	1	1	0	0	0
B	1	1	1	0	0	0

0 - dozvoljeno
1 - spriječeno



Slika 12. Prikaz rubnih uvjeta polovinskog modela palubice C10

Tablica 9. Rubni uvjeti palubice C10

Čvor	T _x	T _y	T _z	R _x	R _y	R _z
A	1	1	1	0	0	0
B	0	1	1	0	0	0
C	0	0	1	0	0	0

0 - dozvoljeno

1 - spriječeno

3.4.3. Definiranje modela opterećenja

Struktura palubica je ispitivana na jednom slučaju opterećenja, a to je uniformni slučaj opterećenja propisan od strane klasifikacijskog društva (DNV). Takvo opterećenje se sastoji od:

- Uniformnog opterećenja 2.94 kN/m^2 po površini opločenja
- Opterećenja uslijed vlastite težine strukture

Oba ova opterećenja uvećana su zbog vertikalne akceleracije prema izrazu:

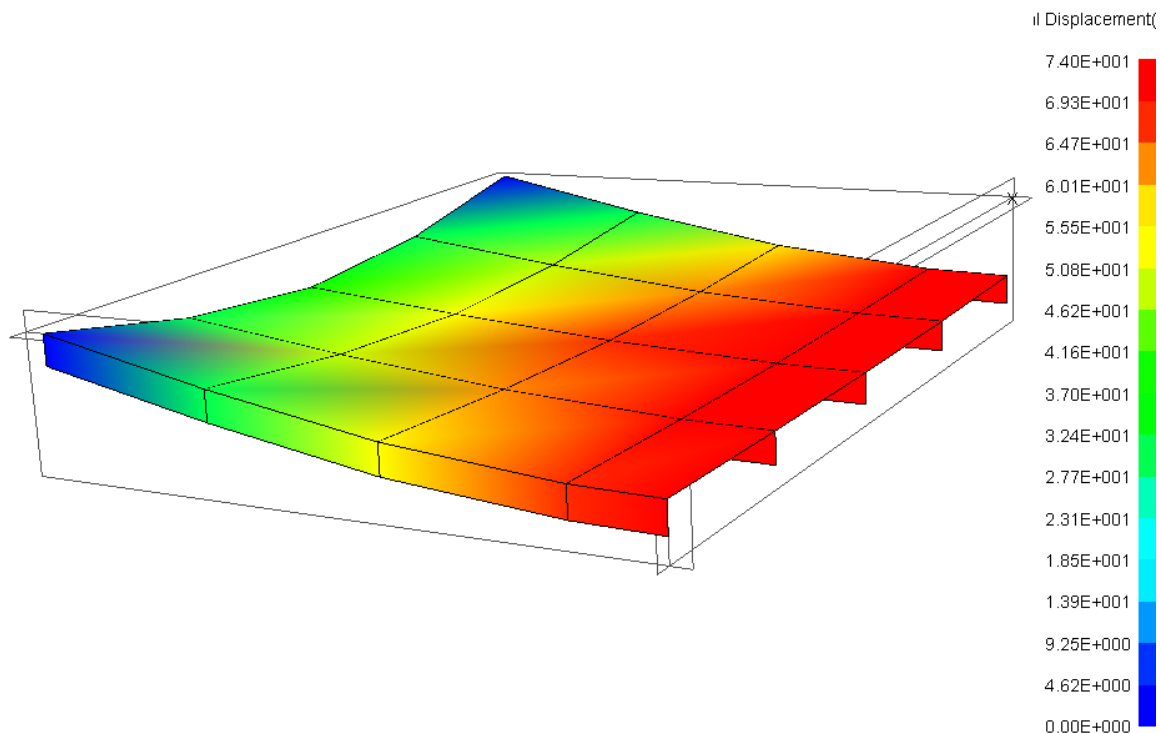
$$p = (q_c + q_0)(9.81 + 0.5a_v), \quad \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right)$$

q_c , t/m^2 – distribuirano opterećenje uslijed težine tereta

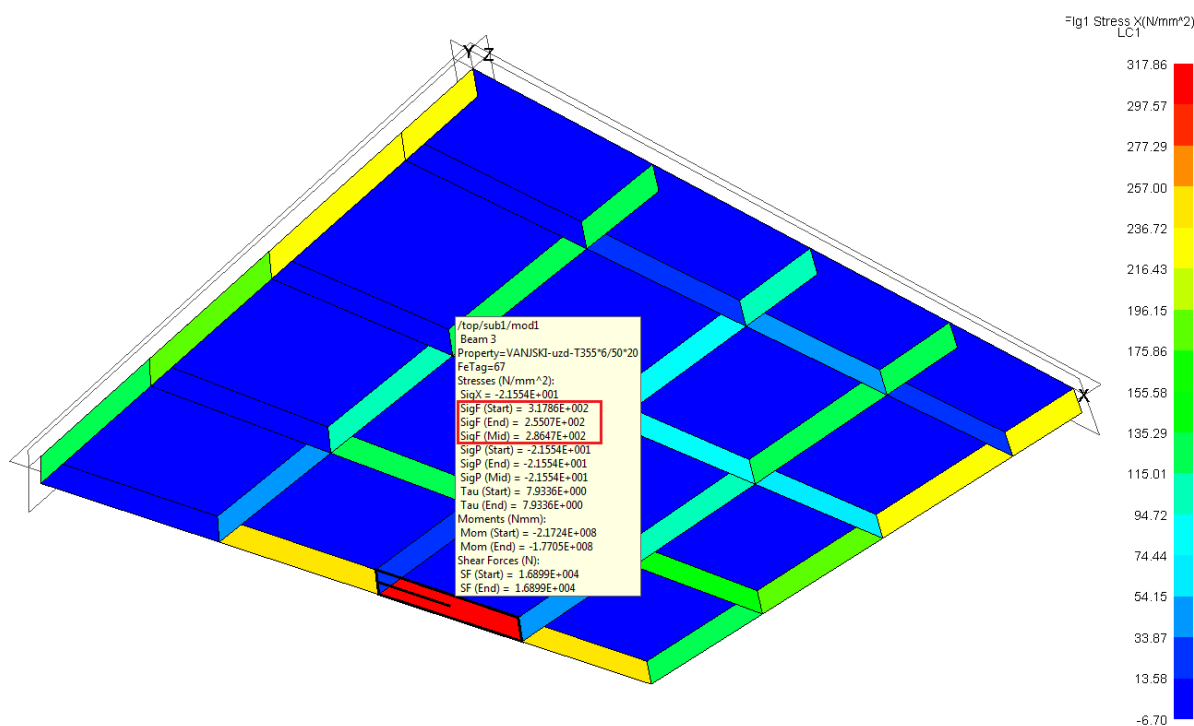
q_0 , t/m^2 – distribuirano opterećenje uslijed vlastite težine panela

a_v , m/s^2 – vertikalna akceleracija

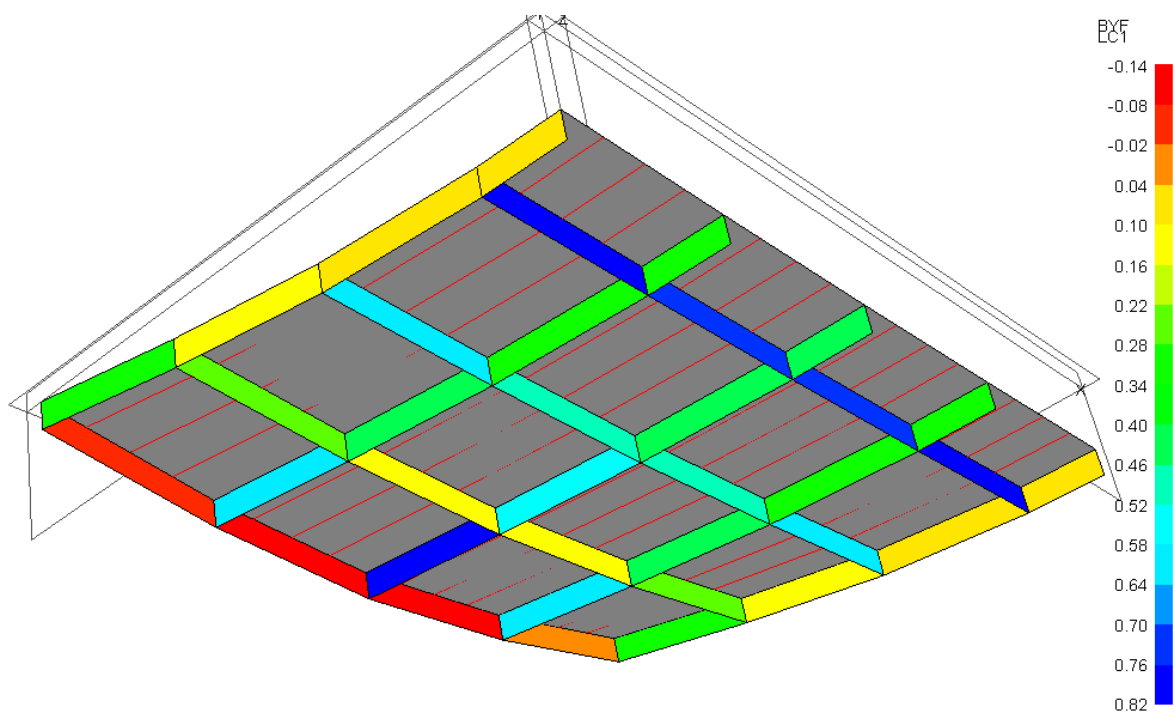
3.4.4. Analiza odziva palubice P6 (struktura prema pravilima)



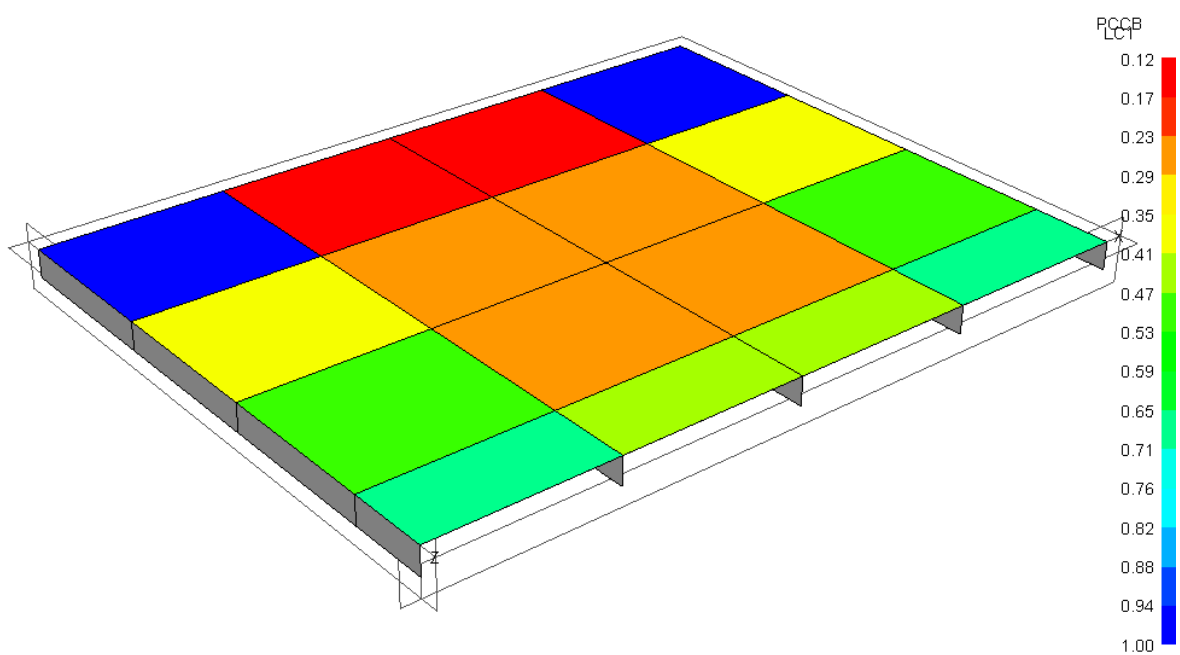
Slika 13. Prikaz pomaka palubice P6



Slika 14. Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice P6



Slika 15. Prikaz podobnosti jakih nosača palubice P6



Slika 16. Prikaz podobnosti oplata palubice P6

Tablica 10. Prikaz rezultata odziva palubice P6

Model	δ_{\max} mm	σ_{\max} N/mm ²	g_{\min}	Status
8x5	74	287	-0.14	NOT OK
8x6	78.4	326	-0.14	NOT OK
8x7	79.6	329	-0.17	NOT OK
9x5	72.5	275	-0.11	NOT OK
9x6	77.2	310	-0.12	NOT OK
9x7	78.7	316	-0.15	NOT OK
10x5	72	263	-0.09	NOT OK
10x6	76.9	298	-0.1	NOT OK
10x7	78.7	302	-0.13	NOT OK

δ_{\max} , [mm] – maksimalni progib

σ_{\max} , [N/mm²] – maksimalna naprezanja (savojna + aksijalna) u prirubnici nosača

Faktor podobnosti:

$$g_{\min} = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D}$$

C – izdržljivost (eng. capability)

D – zahtijev (eng. demand)

γ – faktor sigurnosti

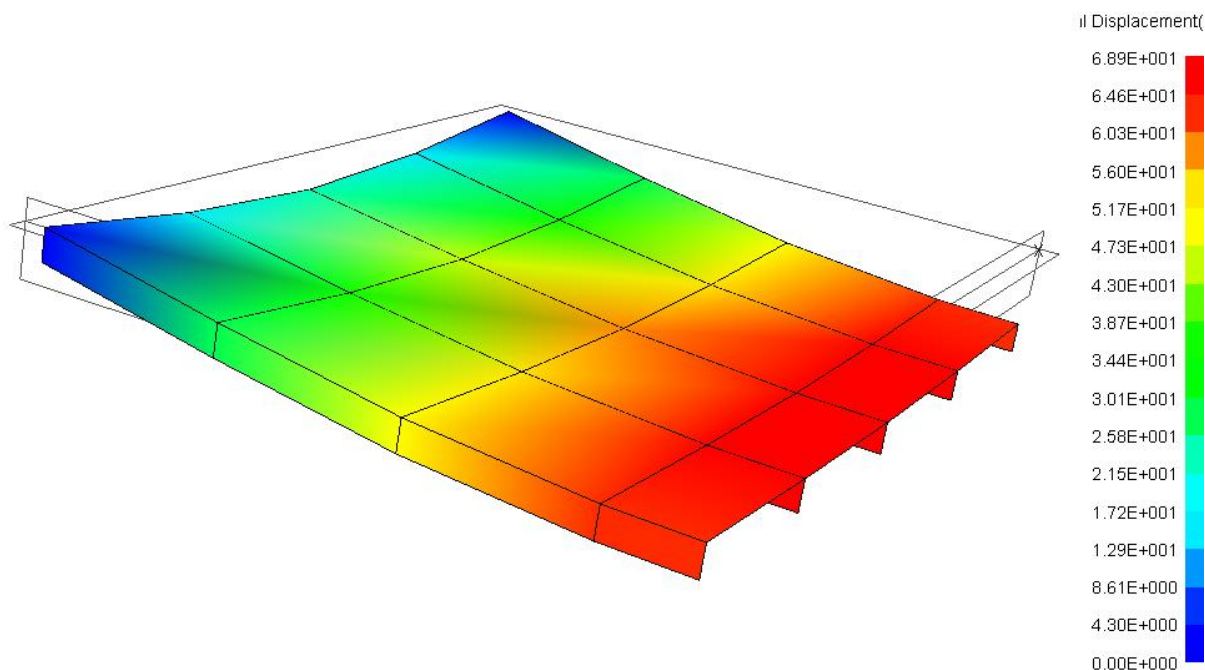
Prema točki 2.6. dopušteno je slijedeće:

- $\delta_{\text{dop}} = 70$ mm
- $\sigma_{\text{dop}} = 222$ N/mm²

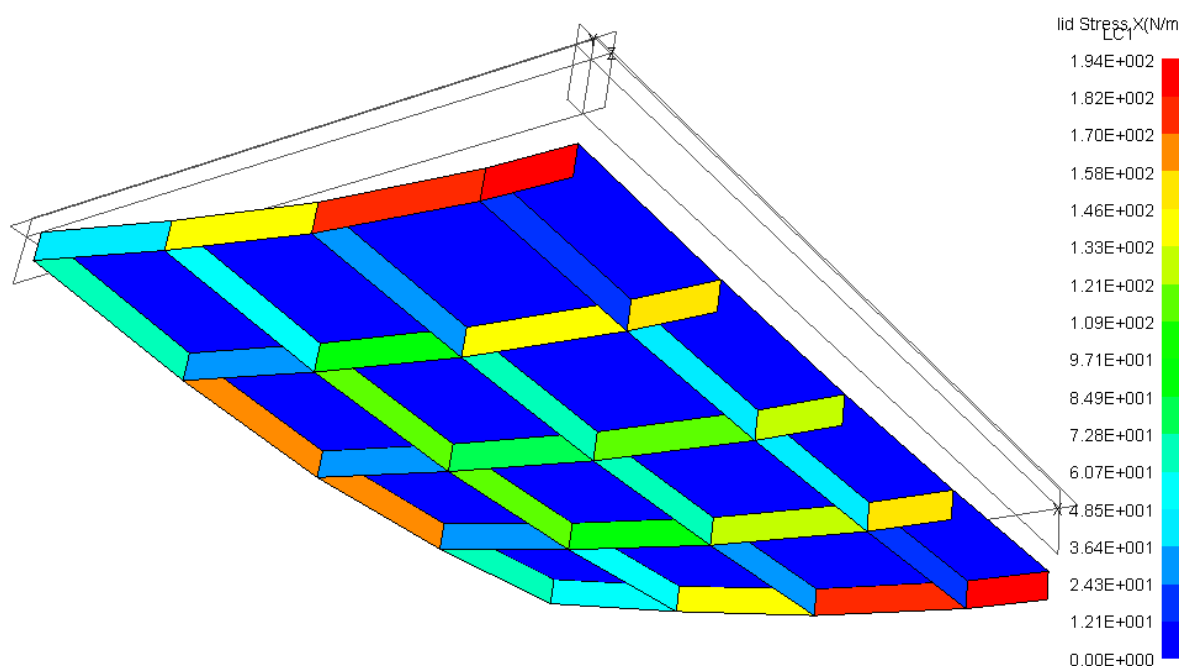
Rezultati odziva [Tablica 10] pokazuju da niti jedan model ne zadovoljava zadane uvjete. Maksimalna naprezanja su ustanovljena kod prirubnica nosača [Slika 14] što znači da su one i najopterećenije te u ovom slučaju nisu dovoljnih dimenzija.

3.4.5. Analiza odziva palubice P6 (finalni model)

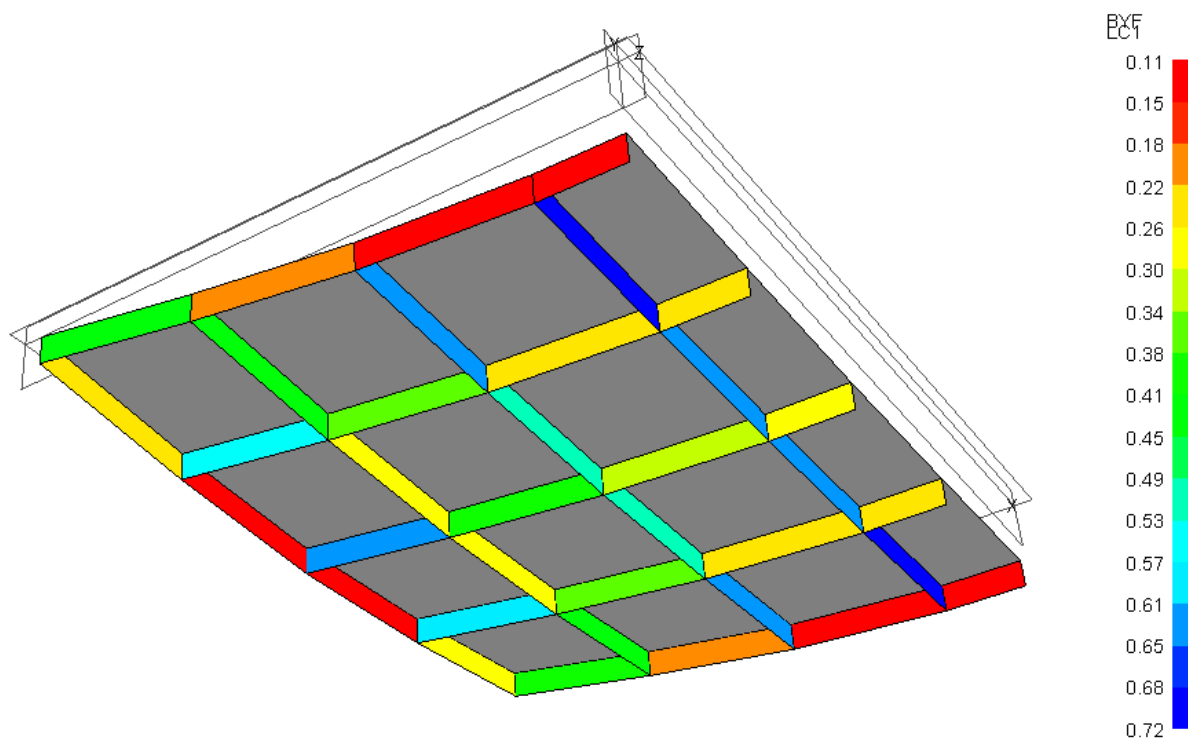
S obzirom da rezultati odziva [Tablica 10] pokazuju da niti jedan model ne zadovoljava početne uvjete, potrebno je pristupiti redimenzioniranju nepodobnih elemenata, što je i učinjeno u proračunu finalnih modela.



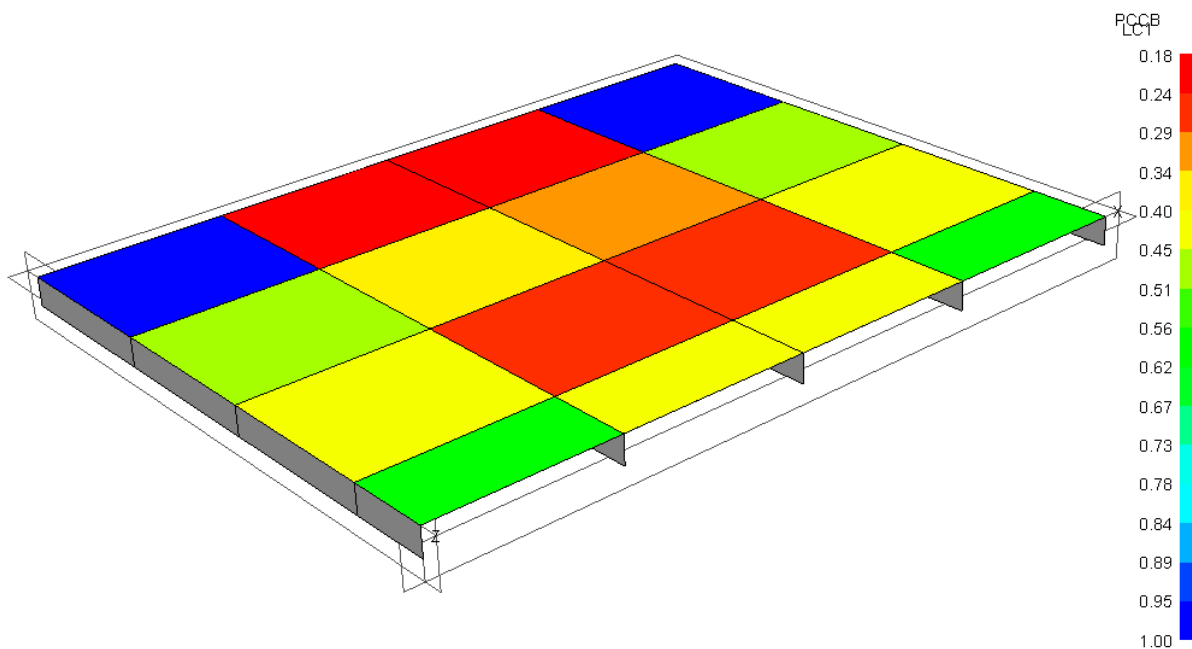
Slika 17. Prikaz pomaka palubice P10 (finalni model)



Slika 18. Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice P6 (finalni model)



Slika 19. Prikaz podobnosti jakih nosača palubice P6 (finalni model)



Slika 20. Prikaz podobnosti oplata palubice P6 (finalni model)

Tablica 11. Pregled proračunate strukture palubice P6 (finalni model)

Model	t _p , mm	Uzdužni nosač	Poprečni nosač	Masa, t					σ_{\max} N/mm ²	δ_{\max} mm	g _{min}		Status
				Oplata	Uzdužni	Poprečni	Ukrepna	Total					
8x5	5.50	T 355X6/130X20	T 355X6/200X20	5.96	0.71	1.40	0.74	11.82	194	68.9	0.11	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/130X20		1.40	1.62						unutarnji	
8x6	5.50	T 355X6/150X20	T 355X6/170X20	5.96	0.77	1.26	0.92	12.28	198	68.3	0.1	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/110X20		1.40	1.97						unutarnji	
8x7	5.50	T 355X6/150X20	T 355x6/170x20	5.96	0.77	1.26	0.74	12.36	192	67.2	0.11	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355x6/90x20		1.40	2.24						unutarnji	
9x5	5.50	T 355X6/130X20	T 355X6/190X20	5.96	0.71	1.35	0.74	12.00	197	69.1	0.09	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/130X20		1.64	1.62						unutarnji	
9x6	5.50	T 355x6/150x20	T 355x6/160x20	5.96	0.77	1.21	0.92	12.47	201	68.9	0.08	vanjski	OK
		T 355x6/50x20	T 355x6/110x20		1.64	1.97						unutarnji	
9x7	5.50	T 355x6/130x20	T 355x6/160x20	5.96	0.71	1.21	0.74	12.49	196	68.2	0.09	vanjski	OK
		T 355x6/50x20	T 355x6/90x20		1.64	2.24						unutarnji	
10x5	5.50	T 355x6/120x20	T 355x6/190x20	5.96	0.68	1.35	0.74	12.28	199	68.1	0.09	vanjski	OK
		T 355x6/50x20	T 355X6/140X20		1.87	1.68						unutarnji	
10x6	5.50	T 355x6/130x20	T 355x6/190x20	5.96	0.71	1.35	0.92	12.78	191	65.8	0.12	vanjski	OK
		T 355x6/50x20	T 355x6/110x20		1.87	1.97						unutarnji	
10x7	5.50	T 355x6/130x20	T 355X6/170X20	5.96	0.71	1.26	0.74	12.77	195	66.9	0.11	vanjski	OK
		T 355x6/50x20	T 355X6/90X20		1.87	2.24						unutarnji	
9x6 PROTOTIP	6.00	T 355x6/180x20	T 355x6/160x20	6.50	0.86	1.21	1.59	13.86				vanjski	
		T 355x6/50x20	T 355x6/120x20		1.64	2.06						unutarnji	

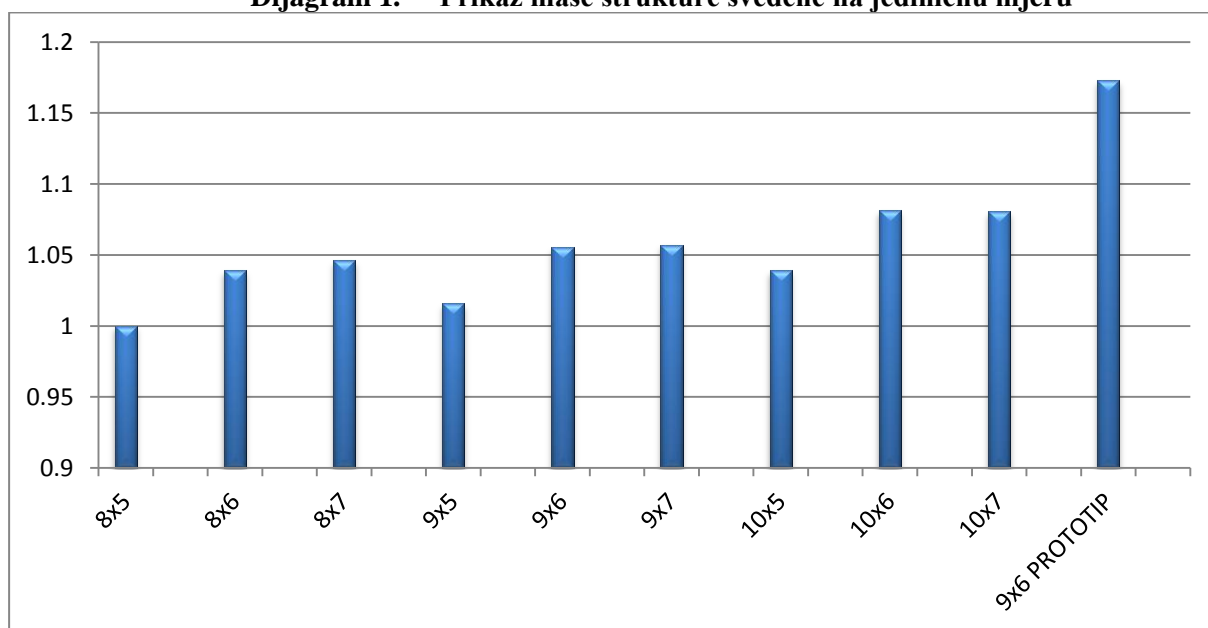
Sve ukrepe su profili HP 80x5

Rezultati odziva finalnog modela [Tablica 11] pokazuju da svi modeli zadovoljavaju zadane uvjetete. Vidljivo je da niti kod jednog modela maksimalna naprežanja ne prelaze ona dopuštena od 222 N/mm^2 , te da maksimalni progib ne prelazi dopušteni od 70 mm. Također svi modeli zadovoljavaju kriterije izvijanja u programu MAESTRO.

S obzirom da ekonomska analiza nije provedena u ovom projektu, za cilj je uzeta minimizacija mase, na temelju čega će biti izabran najpovoljniji model kao konačna verzija za analizu grubim modelom u programu 3D Beam i finom MKE mrežom u programu FEMAP/NASTRAN. Utvrđeno je da je po najmanjoj masi panela najpovoljniji model 8x5.

Svedemo li masu strukture na jediničnu mjeru [Dijagram 1] vidljivo je da je moguće znatno uštedjeti na masi u odnosu na prototip.

Dijagram 1. Prikaz mase strukture svedene na jediničnu mjeru



Ušteda mase u odnosu na prototip [Dijagram 1] cca 17% \approx 2 t.

Za točnu uštedu mase potrebno je napraviti proračun globalne čvrstoće za svaku palubicu te izračunati ukupnu masu svih palubica na brodu, što nije tema ovog rada.

Model za daljnju analizu bit će 8x5 model.

3.4.6. Kontrola izvijanja palubice P6 (finalni model)

Dodatna kontrola izvijanja po pravilima DNV provedena je za odabrani panel.

Kontrola izvijanja oplata (biaksialno):

Za kontrolu izvijanja oplata najutjecajnija su naprezanja u smjeru osi x (okomita na ukrepe). Najveće tlačno naprezanje u smjeru osi x se nalazi u označenom polju [Slika 20] te će se to polje i razmotriti u kontroli izvijanja.

$s = 594 \text{ mm}$ - kraća strana polja izvijanja (djeluje σ_{ax})

$l = 2072 \text{ mm}$ - dulja strana polja izvijanja (djeluje σ_{ay})

$t = 5.5 \text{ mm}$ - debljina oplata

$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right)^n \leq 1$$

$$0.844 \leq 1 - \text{izvijanje oplata OK}$$

$\sigma_{ax} = -14.7 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u uzdužnom smjeru (okomito na ukrepe)

$\sigma_{ay} = -9.5 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u poprečnom smjeru

σ_{cx} – kritično naprezanje u uzdužnom smjeru

σ_{cy} – kritično naprezanje u poprečnom smjeru

$$\eta_x, \eta_y = 0.85$$

$$K = c\beta^a = 0.842$$

$c = 0.8$ – faktor prema Pt 3. Ch 1. Sec 13., Table 1 [3]

$a = 0.04$ – faktor prema Pt 3. Ch 1. Sec 13., Table 1 [3]

$n = 1.2$ – faktor prema Pt 3. Ch 1. Sec 13., Table 1 [3]

$$\beta = 1000 \frac{s}{t - t_k} \sqrt{\frac{\sigma_f}{E}} = 3.65$$

$$\sigma_c = \sigma_e \quad \text{ako je} \quad \sigma_e < \frac{\sigma_f}{2}$$

σ_{el} , (N/mm^2) – elastično naprezanje

$\sigma_f = 235 \text{ N/mm}^2$ – minimalna nominalna granica razvlačenja

$$(\sigma_{el})_x = 0.9kE \left(\frac{t - t_k}{1000s} \right)^2 = 20.48 \text{ N/mm}^2$$

$$k = k_s = c \left[1 + \left(\frac{s}{l} \right)^2 \right]^2 \frac{2.1}{\psi + 1.1} = 1.288$$

$\psi = 1$ – omjer između manjeg i većeg napreznja razmatranog polja

$$\sigma_{cx} = (\sigma_{el})_x = 20.48 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_{el})_y = 0.9kE \left(\frac{t - t_k}{1000s} \right)^2 = 63.68 \text{ N/mm}^2$$

$$k = k_l = \frac{8.4}{\psi + 1.1} = 4$$

$\psi = 0.99$ – omjer između manjeg i većeg tlačnog napreznja razmatranog polja

$$\sigma_{cy} = (\sigma_{el})_y = 63.68 \text{ N/mm}^2$$

Kontrola izvijanja oplate (biaksialno) sa uključenim smičnim napreznjima oplate:

$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right)^n \leq 1$$

$0.857 \leq 1$ – izvijanje oplate OK

$$q = 1 - \left(\frac{\tau_a}{\tau_c} \right)^2 = 0.984$$

$\tau_a = 10.6 \text{ N/mm}^2$ – smična napreznja oplate u uzdužnom smjeru

$\eta = 0.85$

$$\tau_c \geq \frac{\tau_a}{\eta}$$

$$\tau_c = \tau_f \left(1 - \frac{\tau_f}{4\tau_{el}} \right) \text{ ako je } \tau_{el} > \frac{\tau_f}{2}$$

$$\tau_c = 84.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_f}{\sqrt{3}} = 135.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{el} = 0.9k_t E \left(\frac{t - t_k}{1000s} \right)^2 = 90.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$k_t = 5.34 + 4 \left(\frac{s}{l} \right)^2 = 5.67$$

Kontrola izvijanja ukrepa, bez rotacije porečnih presjeka (torzije) uzduž osi

$$\sigma_c = \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_{el}} \right) \quad \text{ako je} \quad \sigma_{el} > \frac{\sigma_f}{2}$$

$$\sigma_c = 200.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{el} = 0.001E \frac{I_A}{Al^2} = 403.8 \frac{N}{mm^2}$$

$I_A = 126 \text{ cm}^4$ – moment tromosti ukrepe (excel sheet)

$A = 15 \text{ cm}^2$ – površina poprečnog presjeka ukrepe

$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_a}{\eta}$$

$200.8 > 11.2$ – **izvijanje ukrepe OK**

$\sigma_a = 9.5 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje u smjeru ukrepa

$\eta = 0.85$

Kontrola izvijanja ukrepa, s rotacijom porečnih presjeka (torzijom) uzduž osi

$$\sigma_{el} = \frac{\pi^2 E I_w}{10^4 I_p l^2} \left(m^2 + \frac{K}{m^2} \right) + 0.385 E \frac{I_T}{I_p} = 1088.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$K = \frac{C l^4}{\pi^4 E I_w 10^6} = 200$$

	$0 < K \leq 4$	$4 < K \leq 36$	$36 < K \leq 144$	$K > 144$
m	1	2	3	4

$m = 4$ – broj polu valova prema gornjoj tablici

Torzijski moment tromosti, profila bez opločenja:

$$I_T = \frac{1}{3} \left[h_w t_w^3 + b_f t_f^3 \left(1 - 0.63 \frac{t_f}{b_f} \right) \right] 10^{-4} = 0.78 \text{ cm}^4$$

Polarni moment tromosti, profila oko spoja ukrepe s limom:

$$I_P = \left(\frac{h_w^3 t_w}{3} + h_w^2 b_f t_f \right) 10^{-4} = 146.5 \text{ cm}^4$$

Moment tromosti, presječni oko spoja profila s oploćenjem:

$$I_W = \frac{b_f^3 h_w^2}{12(b_f + h_w)^2} [t_f(b_f^2 + 2b_f h_w + 4h_w^2) + 3t_w b_f h_w] 10^{-6} = 72.1 \text{ cm}^6$$

h_w , [mm] – visina struka

t_w , [mm] – debljina struka

b_f , [mm] – širina prirubnice

t_f , [mm] – bebljina prirubnice

t_p , [mm] – debljina oplata

l , [mm] – duljina ukrepe

s , [mm] – razmak ukrepe

$$\sigma_c = \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_{el}} \right) \quad \text{ako je} \quad \sigma_{el} > \frac{\sigma_f}{2}$$

$$\sigma_c = 326.1 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

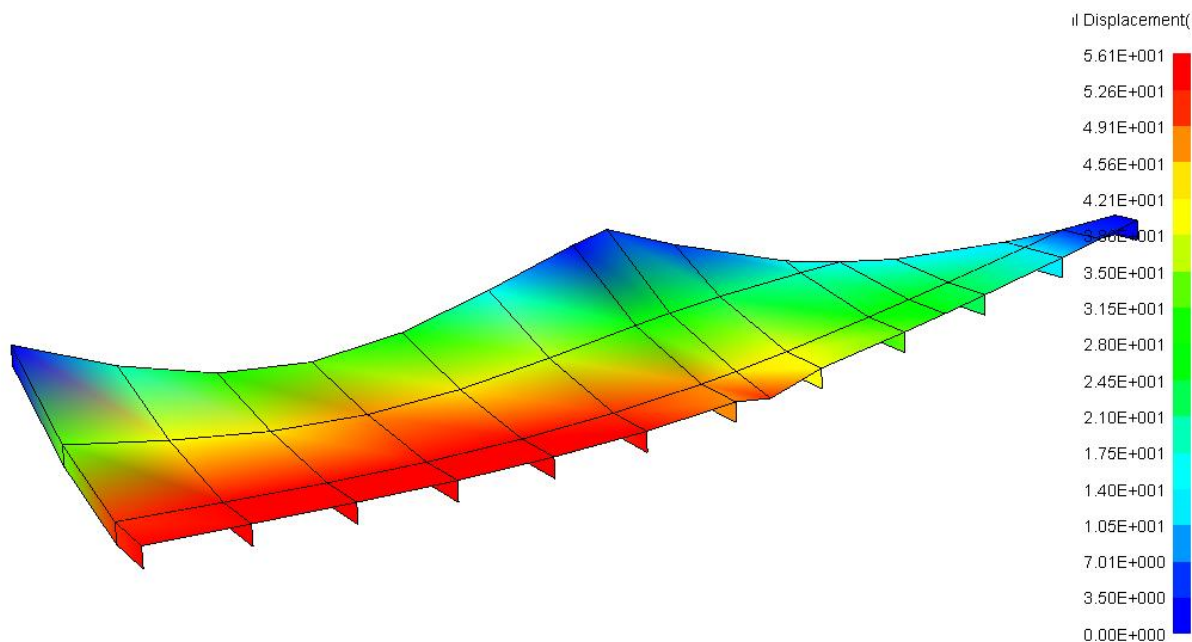
$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_a}{\eta}$$

$221.5 > 11.2$ – **izvijanje ukrepe OK**

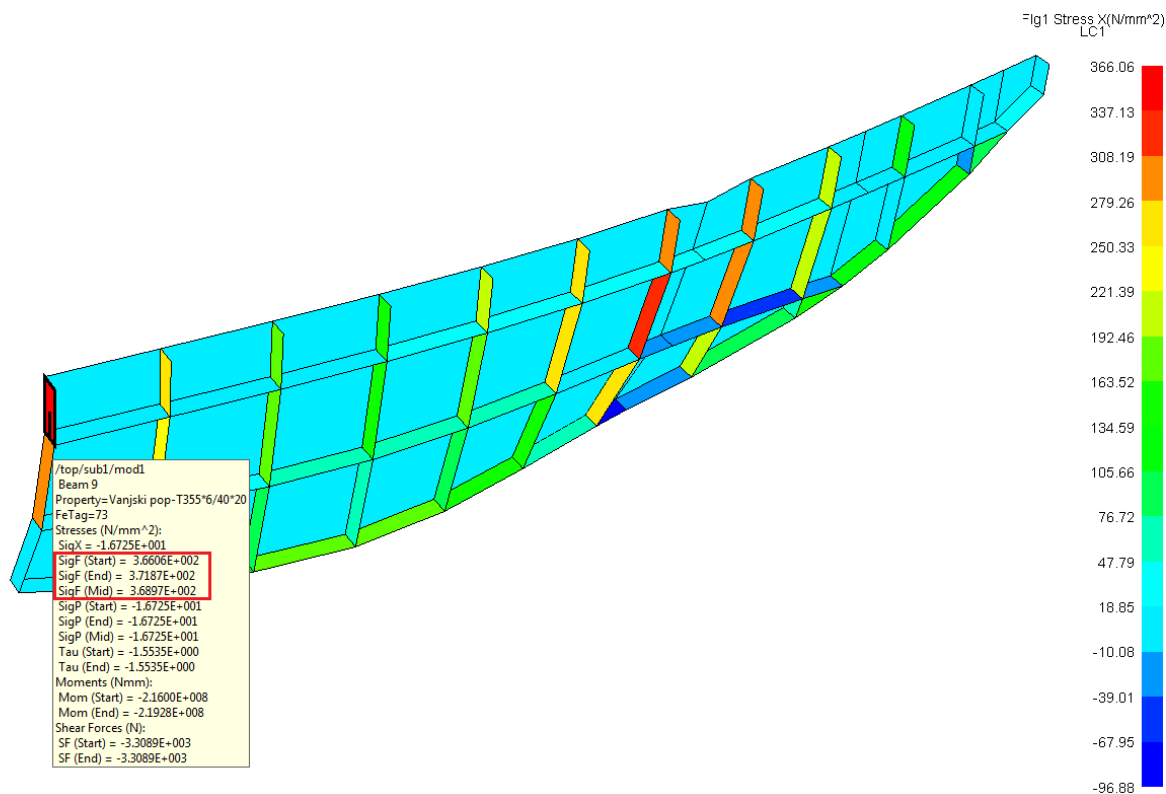
$\sigma_a = 9.5 \text{ N/mm}^2$ – relevantno naprezanje, u smjeru ukrepa

$\eta = 0.85$

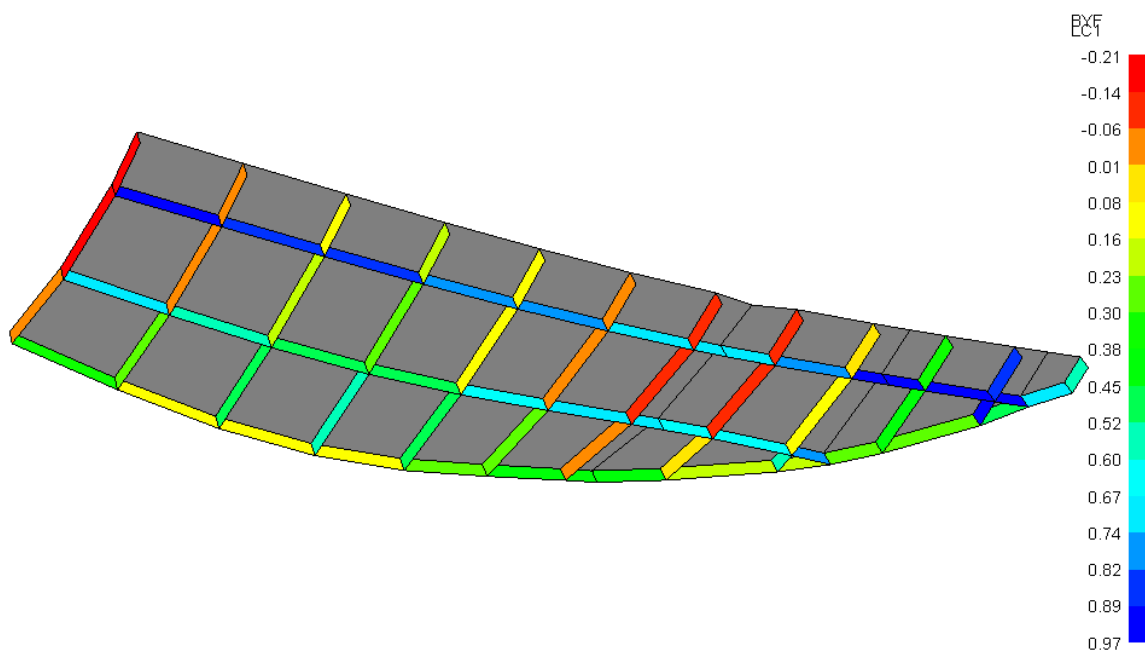
3.4.7. Analiza odziva palubice C10 (struktura prema pravilima)



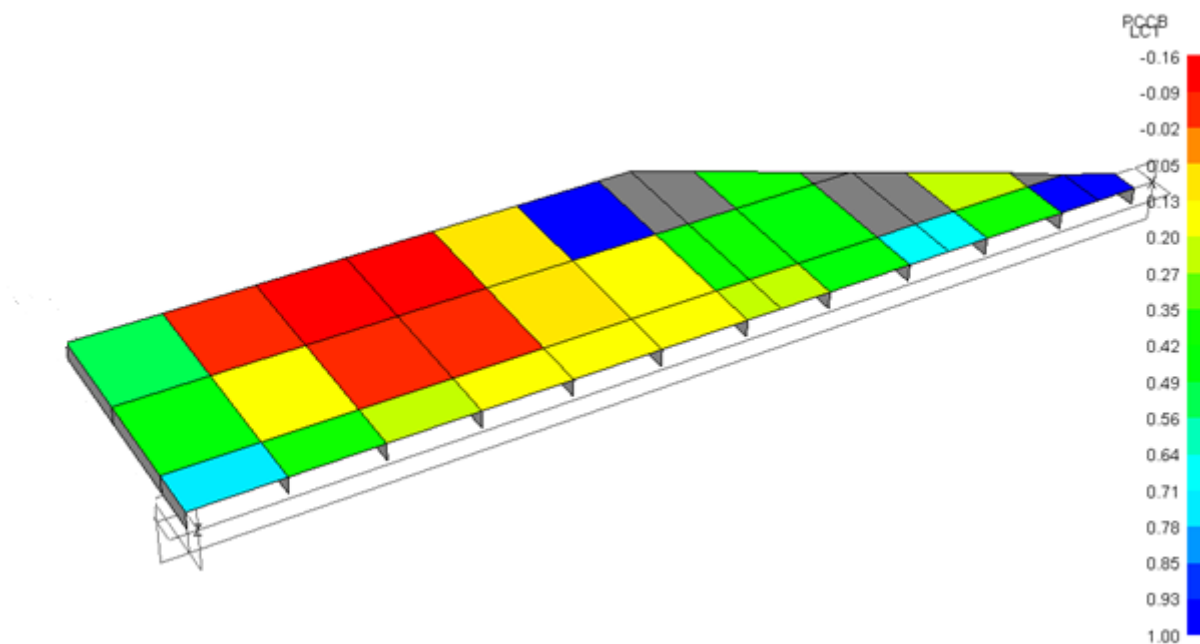
Slika 21. Prikaz pomaka palubice C10



Slika 22. Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice C10



Slika 23. Prikaz podobnosti jakih nosača palubice C10



Slika 24. Prikaz podobnosti oplata palubice C10

Tablica 12. Prikaz rezultata odziva palubice C10

Model	δ_{\max} mm	σ_{\max} N/mm ²	g_{\min}	Status
5x11	55.5	351	-0.22	NOT OK
5x12	51.3	334	-0.2	NOT OK
5x13	55.4	350	-0.33	NOT OK
6x11	60.8	392	-0.24	NOT OK
6x12	56.1	369	-0.21	NOT OK
6x13	46.7	311.4	-0.13	NOT OK
7x11	59.2	370.5	-0.23	NOT OK
7x12	54.2	357	-0.21	NOT OK
7x13	57.5	373.5	-0.23	NOT OK

δ_{\max} , [mm] – maksimalni progib

σ_{\max} , [N/mm²] – maksimalna naprezanja (savojna + aksijalna) u prirubnici nosača

Faktor podobnosti:

$$g_{\min} = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D}$$

C – izdržljivost (eng. capability)

D – zahtijev (eng. demand)

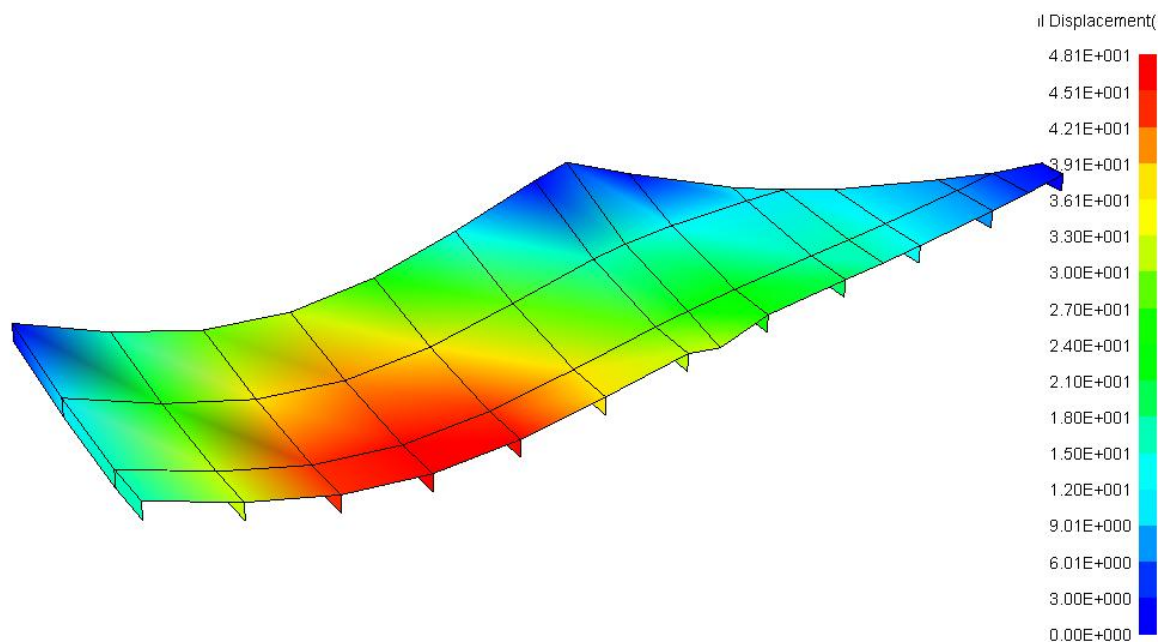
γ – faktor sigurnosti

Prema točki 2.6. dopušteno je slijedeće:

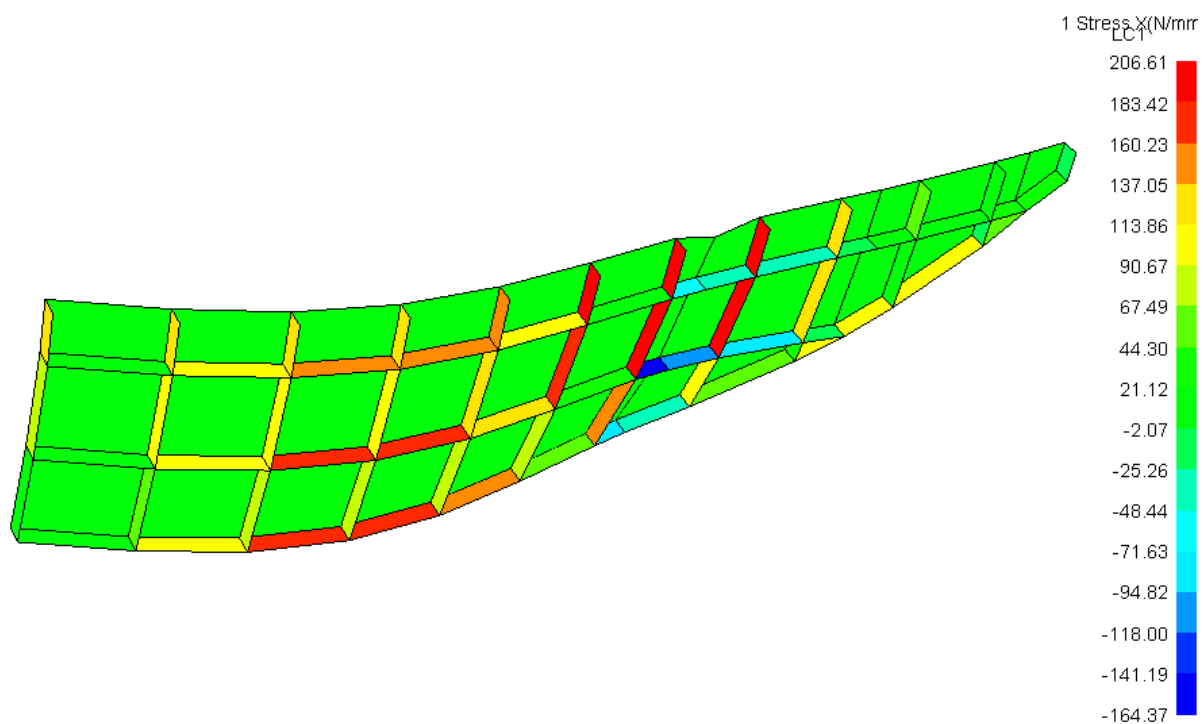
- $\delta_{\max} = 70$ mm
- $\sigma_{\max} = 222$ N/mm²

U [Tablica 11] rezultati odziva pokazuju da niti jedan model ne zadovoljava zadane uvjete. Maksimalni progib je unutar dopuštenih granica. Maksimalna naprezanja su ustanovljena kod prirubnica nosača [Slika 19] što znači da su one i najopterećenije te u ovom slučaju nisu dovoljnih dimenzija.

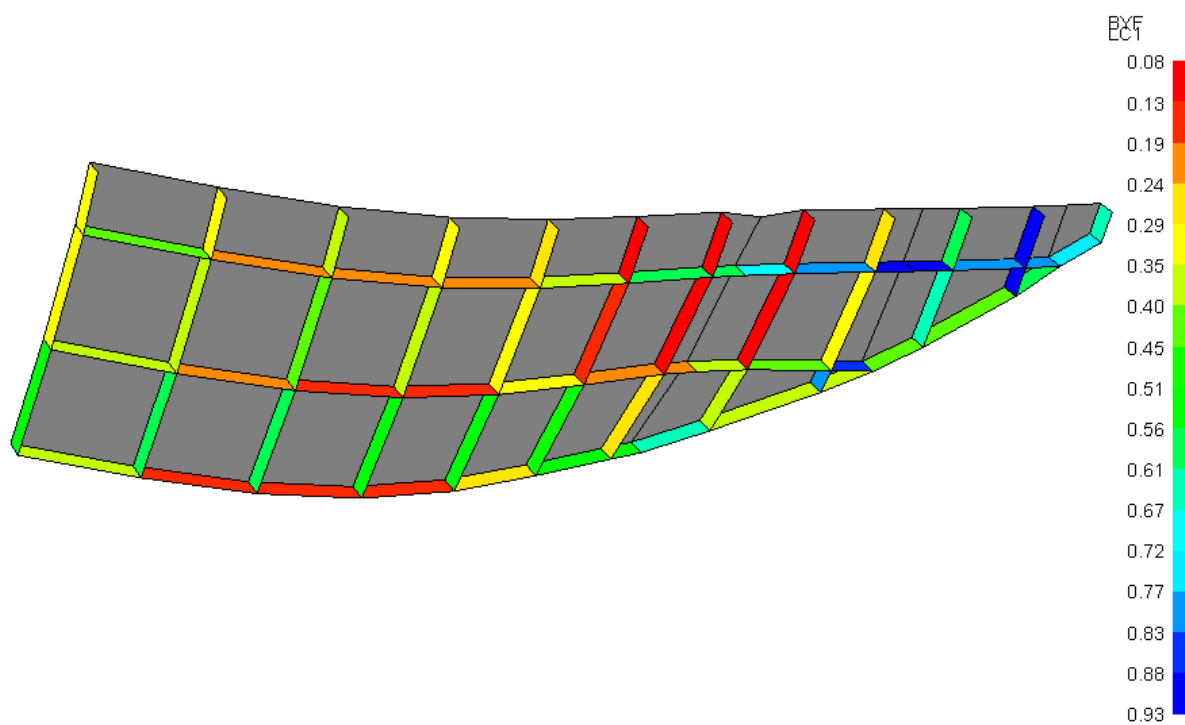
3.4.8. Analiza odziva palubice C10 (finalni model)



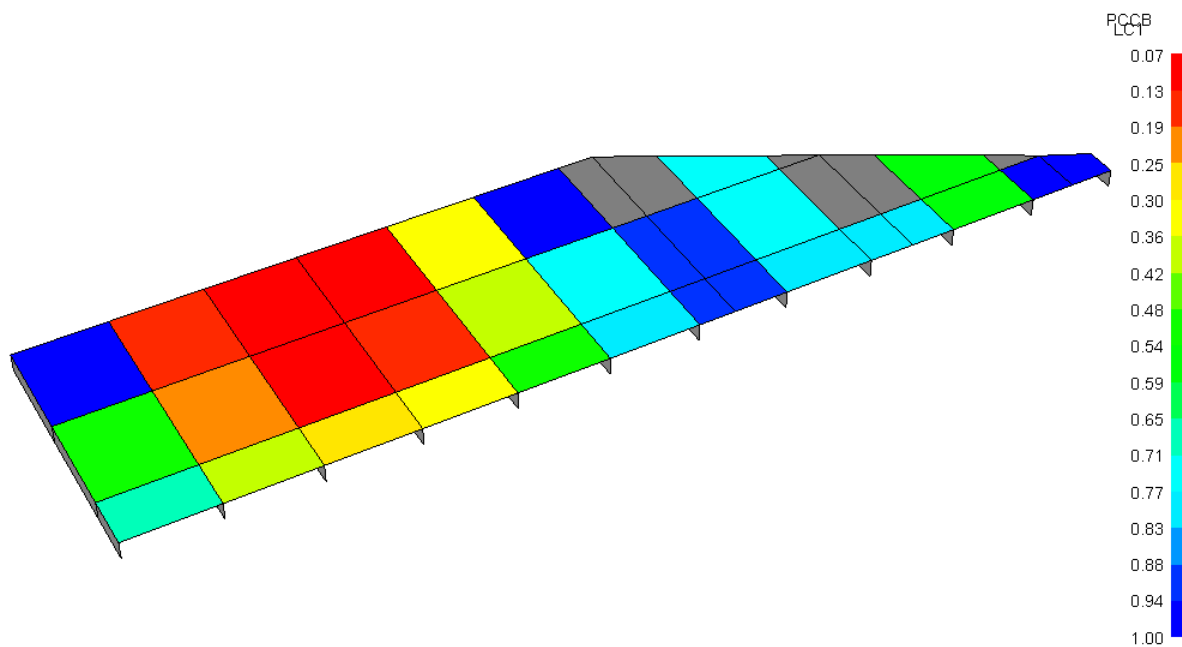
Slika 25. Prikaz pomaka palubice C10 (finalni model)



Slika 26. Maksimalna naprezanja prirubnica nosača palubice C10 (finalni model)



Slika 27. Prikaz podobnosti jakih nosača palubice C10 (finalni model)



Slika 28. Prikaz podobnosti oplata palubice C10 (finalni model)

Tablica 13. Pregled proračunate strukture palubice C10 (finalni model)

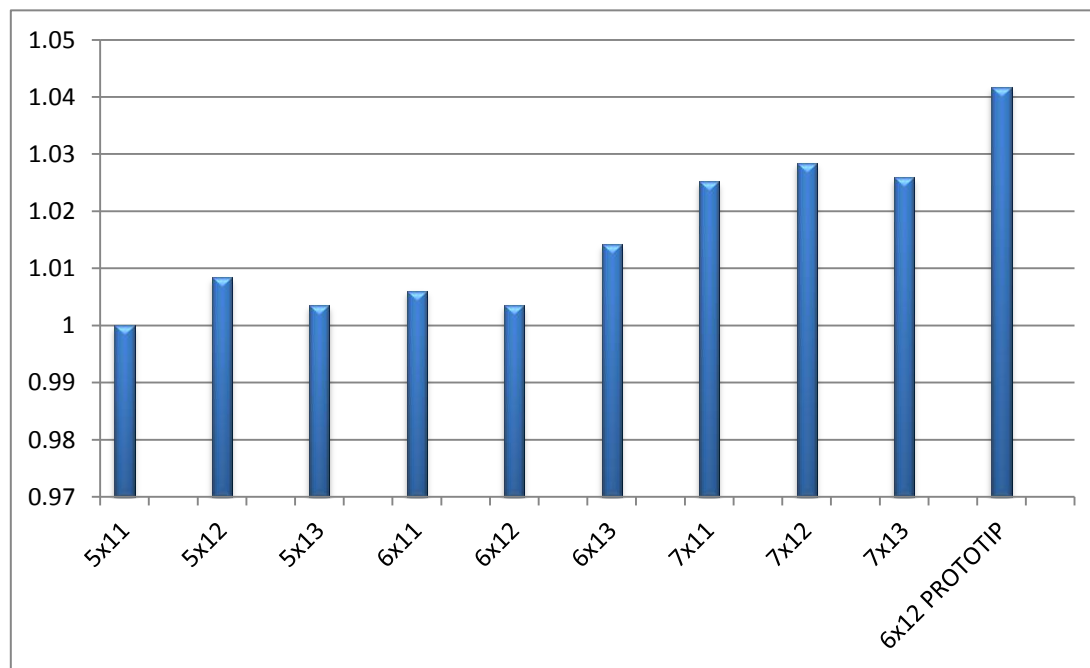
Model	t _p , mm	Uzdužni nosač	Poprečni nosač	Masa, t					σ _{max} N/mm ²	δ _{max} mm	g _{min}		Status
				Oplata	Uzdužni	Poprečni	HP	Total					
5x11	6.0	T 355X6/160X20	T 355X6/250X20	7.31	1.68	1.11	1.21	14.07	202	62	0.03	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/40X20		1.23	1.54						unutarnji	
5x12	6.0	T 355X6/160X20	T 355X6/210X20	7.31	1.68	0.98	1.28	14.19	205	49	0.05	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/40X20		1.23	1.71						unutarnji	
5x13	6.0	T 355X6/160X20	T 355X6/210X20	7.31	1.68	0.98	1.02	14.12	203	57	0.04	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/40X20		1.23	1.90						unutarnji	
6x11	6.0	T 355X6/140X20	T 355X6/270X20	7.31	1.56	0.98	1.05	14.16	203	57	0.07	vanjski	OK
		T 355X6/50X20	T 355X6/50X20		1.61	1.64						unutarnji	
6x12	6.0	T 355x6/130x20	T 355x6/270x20	7.31	1.49	0.98	1.11	14.12	205	48	0.08	vanjski	OK
		T 355x6/40x20	T 355x6/40x20		1.51	1.71						unutarnji	
6x13	6.0	T 355x6/130x20	T 355x6/270x20	7.31	1.49	1.17	0.89	14.27	202	56	0.09	vanjski	OK
		T 355x6/40x20	T 355x6/40x20		1.51	1.90						unutarnji	
7x11	6.0	T 355x6/130x20	T 355x6/270x20	7.31	1.49	1.17	1.05	14.43	205	58	0.05	vanjski	OK
		T 355x6/40x20	T 355X6/40X20		1.86	1.54						unutarnji	
7x12	6.0	T 355x6/100x20	T 355x6/270x20	7.31	1.30	1.17	1.11	14.47	206	46	0.05	vanjski	OK
		T 355x6/40x20	T 355x6/40x20		1.86	1.71						unutarnji	
7x13	6.0	T 355x6/100x20	T 355x6/270x20	7.31	1.30	1.17	0.89	14.44	204	54	0.07	vanjski	OK
		T 355x6/40x20	T 355X6/40X20		1.86	1.90						unutarnji	
6x12 PROTOTIP	6.0	T 355x6/80x20	T 355x6/80x20	7.31	1.18	0.58	1.92	14.66				vanjski	
		T 355x6/50x20	T 355x6/70x20		1.61	2.06						unutarnji	

Rezultati odziva finalnog modela [Tablica 13] pokazuju da svi modeli zadovoljavaju zadane uvjete. Vidljivo je da niti kod jednog modela naprezanja ne prelaze ona dopuštena od 222 N/mm^2 , te da maksimalni progib ne prelazi dopušteni od 70 mm.

S obzirom da ekonomska analiza nije provedena u ovom projektu, za cilj je uzeta minimizacija mase, na temelju čega će biti izabran najpovoljniji model kao konačna verzija za analizu grubim modelom u programu 3D Beam i finom MKE mrežom u programu FEMAP/NASTRAN. Utvrđeno je da je po najmanjoj masi panela najpovoljniji model 5x11, koji nije zadovoljio kriterij izvijanja. Kada se oplata 5x11 modela poveća na debljinu od 6.5 mm radi zadovoljenja kriterija na izvijanje, panel nema najmanju masu, pa će za najpovoljniji model biti izabran model 6x12.

Svedemo li masu konstrukcije na jediničnu mjeru [Dijagram 1] vidljivo je da je moguće znatno uštedjeti na masi u odnosu na prototip.

Dijagram 2. Prikaz mase konstrukcije svedene na jediničnu mjeru



Ušteda mase u odnosu na prototip [Dijagram 2] cca 4% $\approx 0.5 \text{ t}$.

Za točnu uštedu mase potrebno je napraviti proračun globalne čvrstoće za svaku palubicu te izračunati ukupnu masu svih palubica na brodu, što nije tema ovog rada.

Sumiranjem uštede mase pravilnog modela (8x5) i nepravilnog modela (6x12) dobijemo uštedu od 2.5 t. Model za daljnju analizu bit će 6x12 model.

3.4.9. Kontrola izvijanja palubice C10 (finalni model)

Kontrola izvijanja oplata (biaksialno):

Za kontrolu izvijanja oplata najutjecajnija su naprezanja u smjeru osi x (okomita na ukrepe). Najveće tlačno naprezanje u smjeru osi x se nalazi u označenom polju [Slika 30] te će se to polje i razmotriti u kontroli izvijanja.

$s = 431 \text{ mm}$ - kraća strana polja izvijanja (djeluje σ_{ax})

$l = 1982 \text{ mm}$ - dulja strana polja izvijanja (djeluje σ_{ay})

$t = 6 \text{ mm}$ - debljina oplata

$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right)^n \leq 1$$

$$0.94 \leq 1 - \text{izvijanje oplata OK}$$

$\sigma_{ax} = -36 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u uzdužnom smjeru (okomito na ukrepe)

$\sigma_{ay} = -27 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u poprečnom smjeru

σ_{cx} – kritično naprezanje u uzdužnom smjeru

σ_{cy} – kritično naprezanje u poprečnom smjeru

$$\eta_x, \eta_y = 0.85$$

$$K = c\beta^a = 0.829$$

$c = 0.8$ – faktor prema Pt 3. Ch 1. Sec 13., Table 1 [3]

$a = 0.04$ – faktor prema Pt 3. Ch 1. Sec 13., Table 1 [3]

$n = 1.2$ – faktor prema Pt 3. Ch 1. Sec 13., Table 1 [3]

$$\beta = 1000 \frac{s}{t - t_k} \sqrt{\frac{\sigma_f}{E}} = 2.43$$

$$\sigma_c = \sigma_e \quad \text{ako je} \quad \sigma_e < \frac{\sigma_f}{2}$$

σ_{el} , (N/mm^2) – elastično naprezanje

$\sigma_f = 235 \text{ N/mm}^2$ – minimalna nominalna granica razvlačenja

$$(\sigma_{el})_x = 0.9kE \left(\frac{t - t_k}{1000s} \right)^2 = 44.53 \text{ N/mm}^2$$

$$k = k_s = c \left[1 + \left(\frac{S}{l} \right)^2 \right]^2 \frac{2.1}{\psi + 1.1} = 1.24$$

$\psi = 0.94$ – omjer između manjeg i većeg napreznja razmatranog polja

$$\sigma_{cx} = (\sigma_{el})_x = 44.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$(\sigma_{el})_y = 0.9kE \left(\frac{t - t_k}{1000s} \right)^2 = 158.21 \text{ N/mm}^2$$

$$k = k_l = \frac{8.4}{\psi + 1.1} = 4.4$$

$\psi = 0.99$ – omjer između manjeg i većeg tlačnog napreznja razmatranog polja

$$\sigma_{cy} = (\sigma_{el})_y = 147.7 \text{ N/mm}^2$$

Kontrola izvijanja oplate (biaksialno) sa uključenim smičnim napreznjima oplate:

$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right)^n \leq 1$$

$$0.948 \leq 1 - \text{izvijanje oplate OK}$$

$$q = 1 - \left(\frac{\tau_a}{\tau_c} \right)^2 = 0.99$$

$\tau_a = 10.3 \text{ N/mm}^2$ – smična napreznja oplate u uzdužnom smjeru

$$\eta = 0.85$$

$$\tau_c \geq \frac{\tau_a}{\eta}$$

$$\tau_c = \tau_f \left(1 - \frac{\tau_f}{4\tau_{el}} \right) \text{ ako je } \tau_{el} > \frac{\tau_f}{2}$$

$$\tau_c = 112.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_f}{\sqrt{3}} = 135.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{el} = 0.9k_t E \left(\frac{t - t_k}{1000s} \right)^2 = 198.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$k_t = 5.34 + 4 \left(\frac{S}{l} \right)^2 = 5.53$$

Kontrola izvijanja ukrepa, bez rotacije porečnih presjeka (torzije) uzduž osi

$$\sigma_c = \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_{el}} \right) \quad \text{ako je} \quad \sigma_{el} > \frac{\sigma_f}{2}$$

$$\sigma_c = 208.15 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{el} = 0.001E \frac{I_A}{Al^2} = 514.3 \frac{N}{mm^2}$$

$I_A = 72 \text{ cm}^4$ – moment tromosti ukrepe (excel sheet)

$A = 7.3 \text{ cm}^2$ – površina poprečnog presjeka ukrepe

$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_a}{\eta}$$

$208.2 > 31.8$ – **izvijanje ukrepe OK**

$\sigma_a = 27 \text{ N/mm}^2$ – naprezanje u smjeru ukrepa

$\eta = 0.85$

Kontrola izvijanja ukrepa, s rotacijom porečnih presjeka (torzijom) uzduž osi

$$\sigma_{el} = \frac{\pi^2 EI_w}{10^4 I_p l^2} \left(m^2 + \frac{K}{m^2} \right) + 0.385E \frac{I_T}{I_p} = 1205.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$K = \frac{Cl^4}{\pi^4 EI_w 10^6} = 263$$

	$0 < K \leq 4$	$4 < K \leq 36$	$36 < K \leq 144$	$K > 144$
m	1	2	3	4

$m = 4$ – broj polu valova prema gornjoj tablici

Torzijski moment tromosti, profila bez opločenja:

$$I_T = \frac{1}{3} \left[h_w t_w^3 + b_f t_f^3 \left(1 - 0.63 \frac{t_f}{b_f} \right) \right] 10^{-4} = 0.78 \text{ cm}^4$$

Polarni moment tromosti, profila oko spoja ukrepe s limom:

$$I_P = \left(\frac{h_w^3 t_w}{3} + h_w^2 b_f t_f \right) 10^{-4} = 146.5 \text{ cm}^4$$

Moment tromosti, presječni oko spoja profila s oploćenjem:

$$I_W = \frac{b_f^3 h_w^2}{12(b_f + h_w)^2} [t_f(b_f^2 + 2b_f h_w + 4h_w^2) + 3t_w b_f h_w] 10^{-6} = 72.1 \text{ cm}^6$$

h_w , [mm] – visina struka

t_w , [mm] – debljina struka

b_f , [mm] – širina prirubnice

t_f , [mm] – bebljina prirubnice

t_p , [mm] – debljina oplate

l , [mm] – duljina ukrepe

s , [mm] – razmak ukrepe

$$\sigma_c = \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_{el}} \right) \quad \text{ako je} \quad \sigma_{el} > \frac{\sigma_f}{2}$$

$$\sigma_c = 329.8 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_c \geq \frac{\sigma_a}{\eta}$$

$329.8 > 11.2$ – **izvijanje ukrepe OK**

$\sigma_a = 9.5 \text{ N/mm}^2$ – relevantno naprezanje, u smjeru ukrepa

$$\eta = 0.85$$

3.5. Proračun finalnog modela u programu Nauticus 3D Beam

Program Nauticus 3D Beam ustupila je tvrtka Cargotec d.o.o. S obzirom na nedostatak vremena nije bilo moguće provesti proračun svih 18 modela za palubice P6 i C10, pa će u ovoj točki biti analiziran samo najpovoljniji model u odnosu na masu za te dvije palubice.

Na temelju proračunate strukture finalnog modela u programu MAESTRO, izmodelirana je struktura u programu 3D Beam pomoću grubih grednih konačnih elemenata. Dodatni razlog provedbe proračuna u programu 3D Beam bio je upoznavanje osnova rada u tom programu, te usporedba rezultata sa rezultatima iz programa MAESTRO, u kojem su također korišteni grubi gredni konačni elementi, zajedno sa makro-elementima orebrene ploče.

3.5.1. Opis postupka modeliranja

Struktura se modelira kao 2D mreža konačnih grednih elemenata koji su predočeni linijama [Slika 33] i [Slika 34]. Sam postupak kreće od definiranja proizvoljne linije na kojoj se automatski generiraju krajnji čvorovi, kojima se pridružuju koordinate u skladu sa topologijom najpovoljnijeg modela iz točke 3.4. Raznim pomoćnim operacijama (kopiranje, zrcaljenje i sl.) gradi se mreža konačnih elemenata. Gotovoj mreži tada se pridružuju karakteristike za svaki pojedini element.

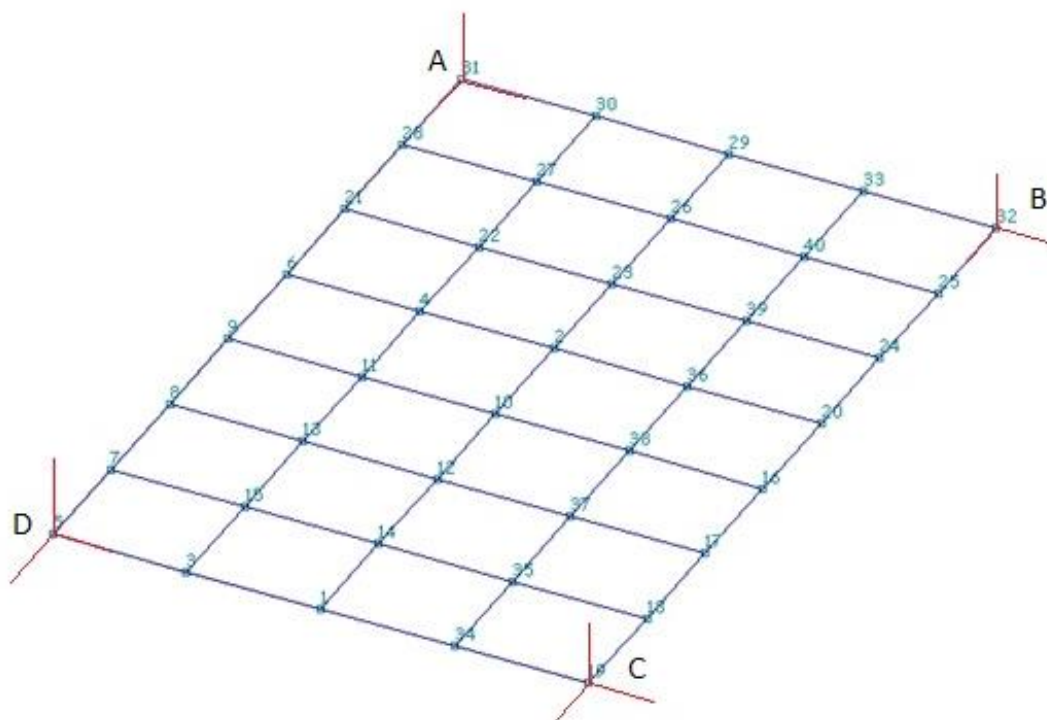
U daljnjem proračunu razmotrit će se slijedeći modeli:

- 8x5 model za palubicu P6 (najpovoljniji u odnosu na masu)
- 6x12 model za palubicu C10 (najpovoljniji u odnosu na masu)

Konstrukcija je klasično orebrenog tipa, pa se svakom elementu pridružuje odgovarajuća sunosiva širina s gornje strane, te je na taj način pokriveno i modeliranje oplata. S obzirom da se u ovoj točki vrši proračun roštiljne konstrukcije glavnih nosača, ukrepe se u ovom postupku ne modeliraju pa se mogu i očekivati nešto veći progibi nego kod proračuna u programu MAESTRO

3.5.2. Definiranje projektnih rubnih uvjeta

Rubni uvjeti su definirani u skladu s rubnim uvjetima iz točke 3.4.2.



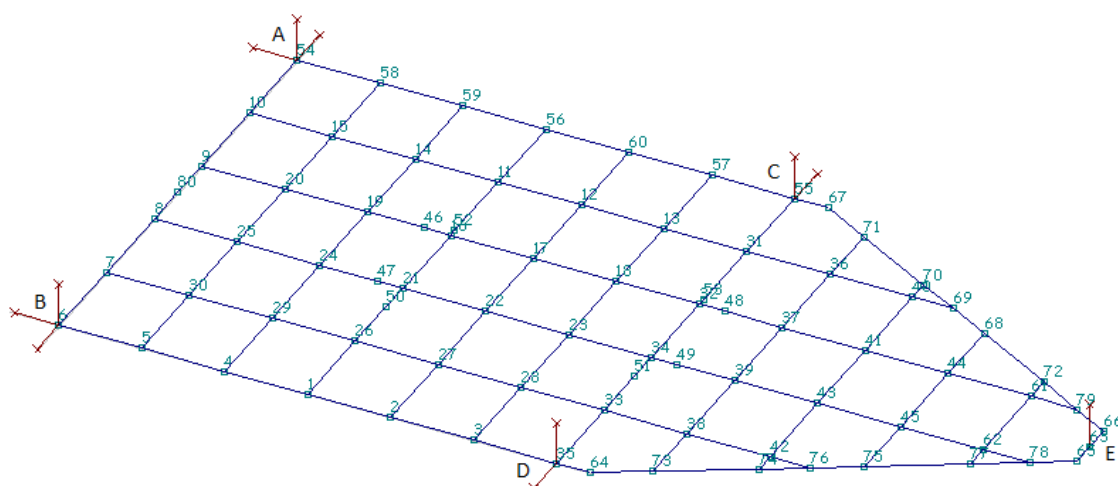
Slika 29. 3D Beam model palubice P6 sa definiranim rubnim uvjetima (8x5 model)

Tablica 14. 3D Beam prikaz rubnih uvjeta palubice P6 (8x5 model)

Čvor	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A	1	1	1	0	0	0
B	1	1	1	0	0	0
C	1	1	1	0	0	0
D	1	1	1	0	0	0

0 - dozvoljeno

1 - spriječeno



Slika 30. 3D Beam model palubice C10 sa definiranim rubnim uvjetima (6x12 model)

Tablica 15. 3D Beam prikaz rubnih uvjeta palubice C10 (6x12 model)

Čvor	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A	1	1	1	0	0	0
B	1	1	1	0	0	0
C	0	1	1	0	0	0
D	0	1	1	0	0	0
E	0	0	1	0	0	0

0 - dozvoljeno

1 - spriječeno

3.5.3. Definiranje modela opterećenja

Struktura palubica je ispitivana na jednom slučaju opterećenja, a to je uniformni slučaj opterećenja propisan od strane klasifikacijskog društva (DNV). Takvo opterećenje se sastoji od:

- Uniformnog opterećenja 2.94 kN/m^2 po površini opločenja
- Opterećenja uslijed vlastite težine strukture

Oba ova opterećenja uvećana su zbog vertikalne akceleracije prema izrazu:

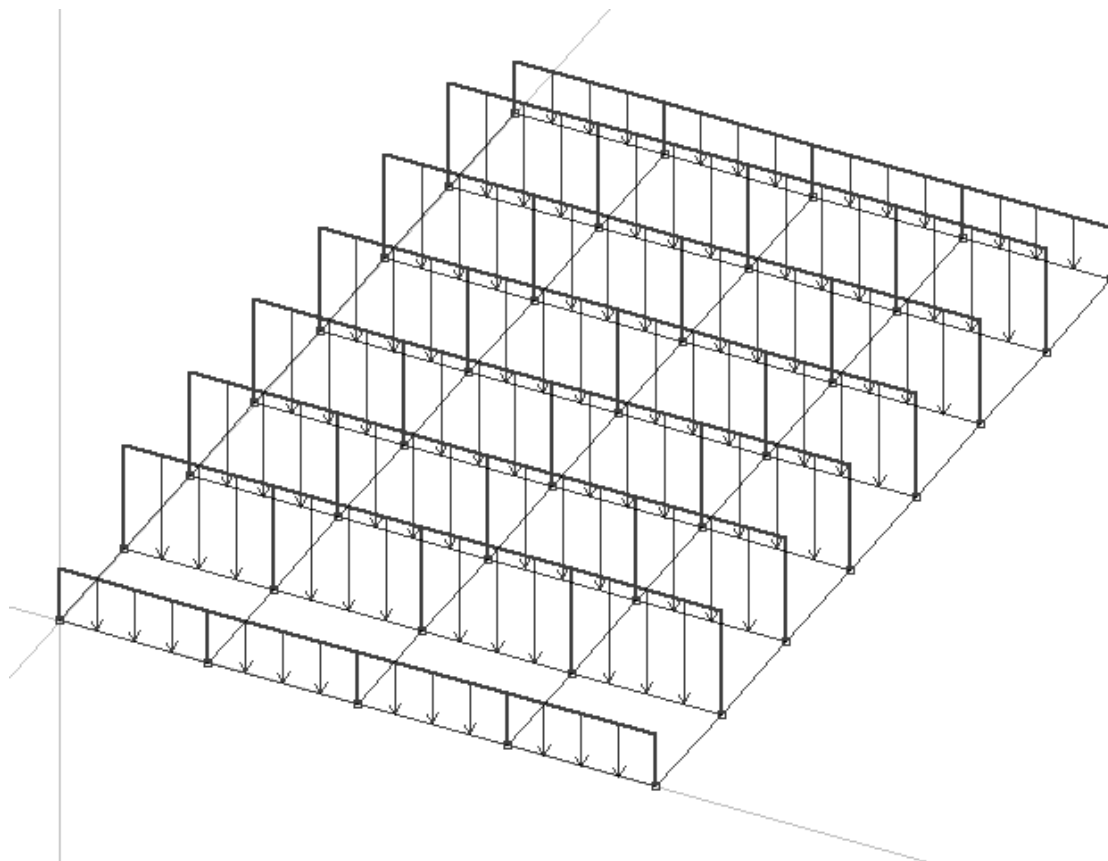
$$p = (q_c + q_0)(9.81 + 0.5a_v), \quad \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right)$$

q_c , t/m^2 – distribuirano opterećenje uslijed težine tereta

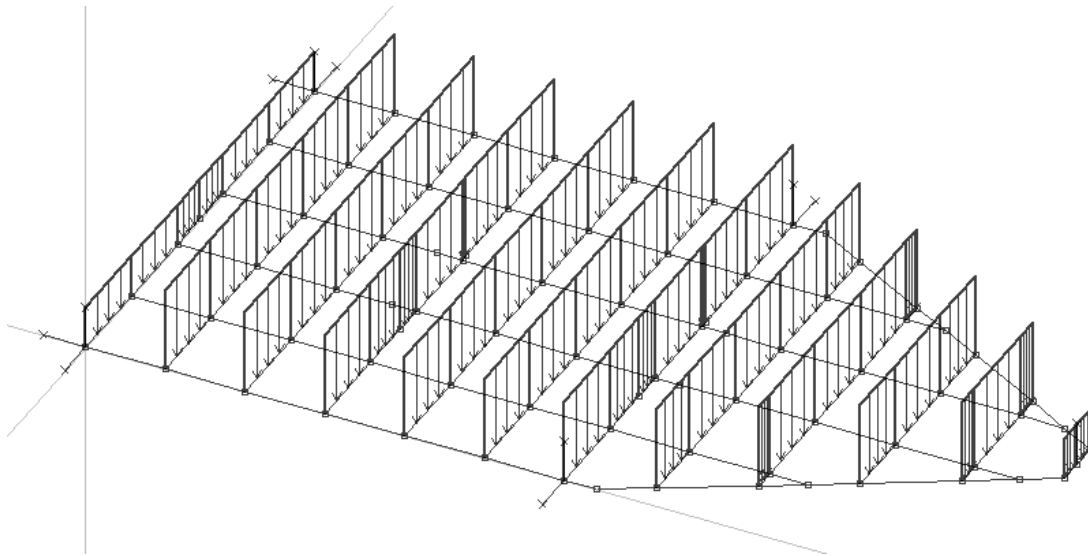
q_0 , t/m^2 – distribuirano opterećenje uslijed vlastite težine panela

a_v , m/s^2 – vertikalna akceleracija

Uniformno opterećenje modelirano je tako da su na uzdužne nosače u pravokutnoj raspodjeli [Slika 35] i [Slika 36] nanesene vrijednosti distribuiranih opterećenja čije je suma jednaka sili kojom zadano opterećenje djeluje na površinu pokrova palubice. Ovakav model opterećenja usvojen je radi jednostavnosti proračuna. Realniji model opterećenja bio bi definiranje trapezne razdiobe opterećenja na uzdužnim nosačima te trokutaste raspodjele na poprečnim nosačima. Međutim, u praksi se zbog utroška vremena koristi pravokutna raspodjela opterećenja, koja daje dovoljnu točnost izlaznih podataka.

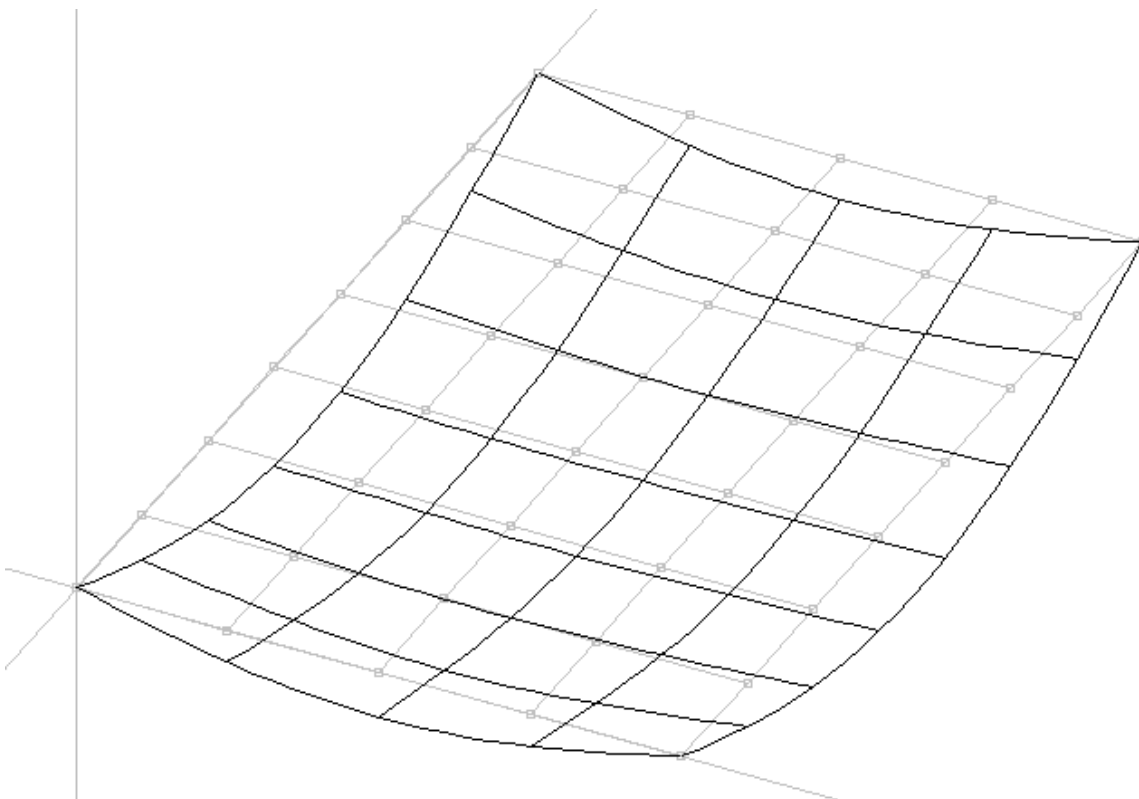


Slika 31. 3D Beam prikaz projektnog opterećenja palubice P6 (8x5 model)



Slika 32. 3D Beam prikaz projektne opterećenja palubice C10 (6x12 model)

3.5.4. Analiza odziva palubice P6 (8x5 model)



Slika 33. 3D Beam prikaz progibne linije palubice P6 (8x5 model)

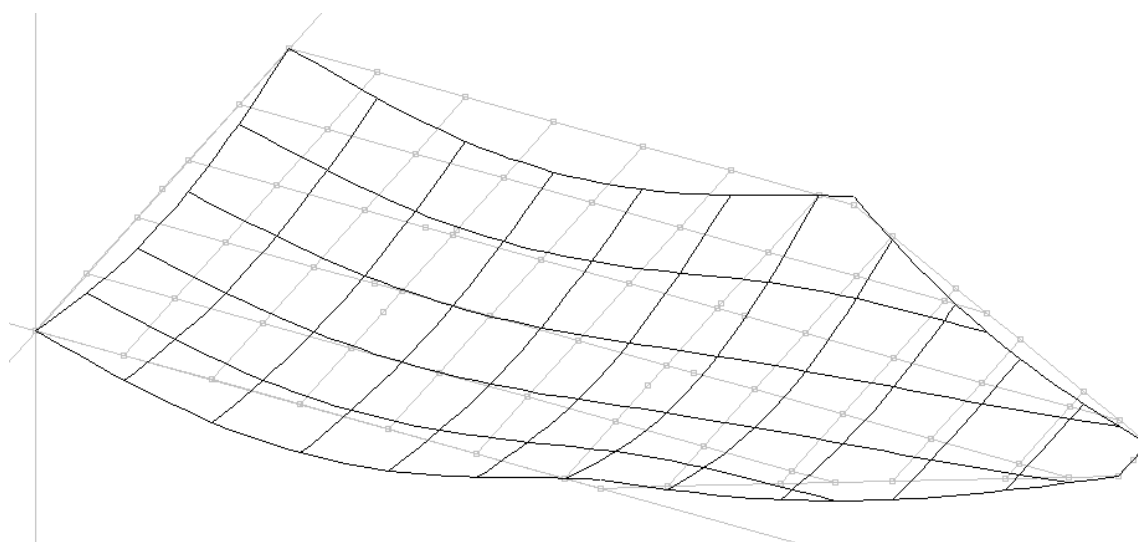
Program Nauticus 3D Beam u izlaznim datotekama daje maksimalne vrijednosti naprezanja po pojedinim grednim elementima. U ovoj točki razmotrit će se samo ukupno maksimalno naprezanje. Maksimalno naprezanje savijanja i aksijalna naprezanja mogu se očekivati u prirubnicama jakih nosača, kao što je to bio slučaj i kod proračuna u programu MAESTRO.

Prema proračunu pomoću programa Nauticus 3D Beam dobivene su slijedeće maksimalne vrijednosti 8x5 modela palubice P6:

- $\sigma_{\max} = 176 \text{ N/mm}^2$
- $\delta_{\max} = 75 \text{ mm}$
- $\tau_{\max} = 33 \text{ N/mm}^2$

Izlazni rezultati pokazuju da su maksimalne vrijednosti progiba veće od dopuštenih, te da maksimalna naprezanja ne prelaze dopuštena.

3.5.5. Analiza odziva palubice C10 (6x12 model)



Slika 34. 3D Beam prikaz progibne linije palubice C10 (6x12 model)

Prema proračunu pomoću programa Nauticus 3D Beam dobivene su slijedeće maksimalne vrijednosti 6x12 modela palubice C10:

- $\sigma_{\max} = 176 \text{ N/mm}^2$

- $\delta_{\max} = 47 \text{ mm}$
- $\tau_{\max} = 50 \text{ N/mm}^2$

Analiza odziva prema 3D Beamu pokazuje da su naprezanja za palubicu P6 ispod dopuštenih vrijednosti, ali da maksimalni progib premašuje dopuštenu od 70 mm. S obzirom da u programu 3D Beam nisu modelirane ukrepe opločenja, prekoračenje progiba od 5 mm smatrat će se prihvatljivom vrijednošću. Analiza odziva palubice C10 pokazuje da su izlazne vrijednosti znatno niže od granice dopuštenih vrijednosti. Za oba modela provest će se proračun detaljnog modela pomoću fine mreže pločastih konačnih elemenata.

Detaljna usporedba rezultata prikazana je u poglavlju 4.1.6. za palubicu P6 i 4.1.9. za palubicu C10.

4. ZAVRŠNA FAZA

U završnoj fazi ovoga rada potrebno je izvršiti analizu detaljnog modela fine mreže pločastih konačnih elemenata u programu FEMAP/NASTRAN, te na temelju izlaznih rezultata napraviti kontrolu izvijanja. Na kraju je potrebno dati konačno strukturno rješenje za palubice P6 i C10.

4.1. Proračun strukture detaljnog MKE modela u programu FEMAP/NASTRAN

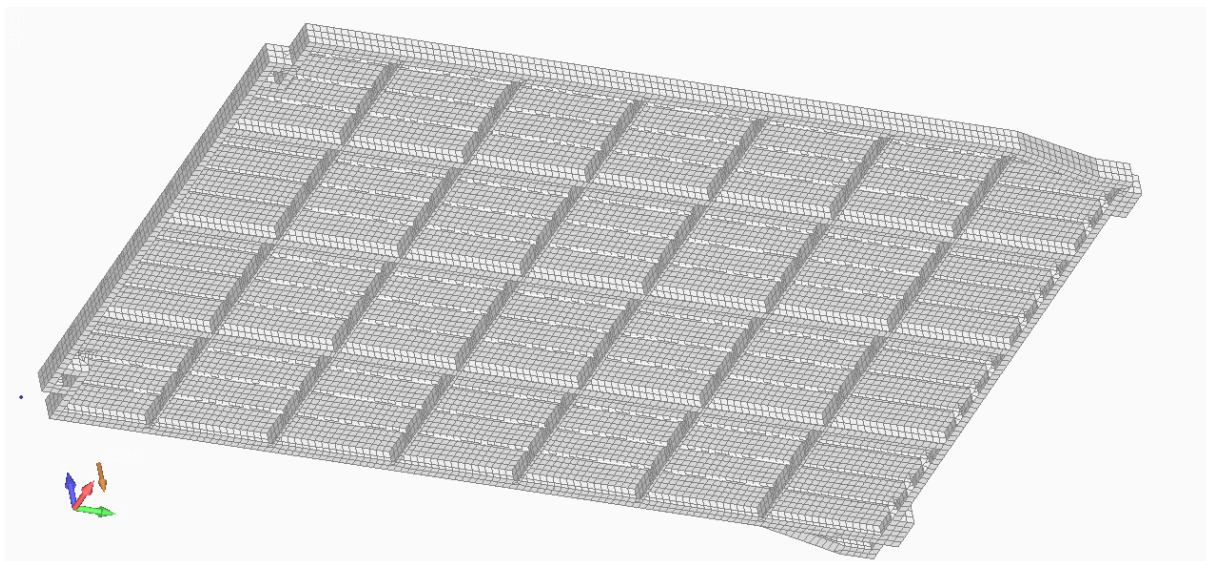
4.1.1. Opis postupka modeliranja

U ovoj točki načinjen je detaljan model [Slika 39] i [Slika 40] korištenjem pločastih konačnih elementata sukladno pravilima za direktne kalkulacije [7].

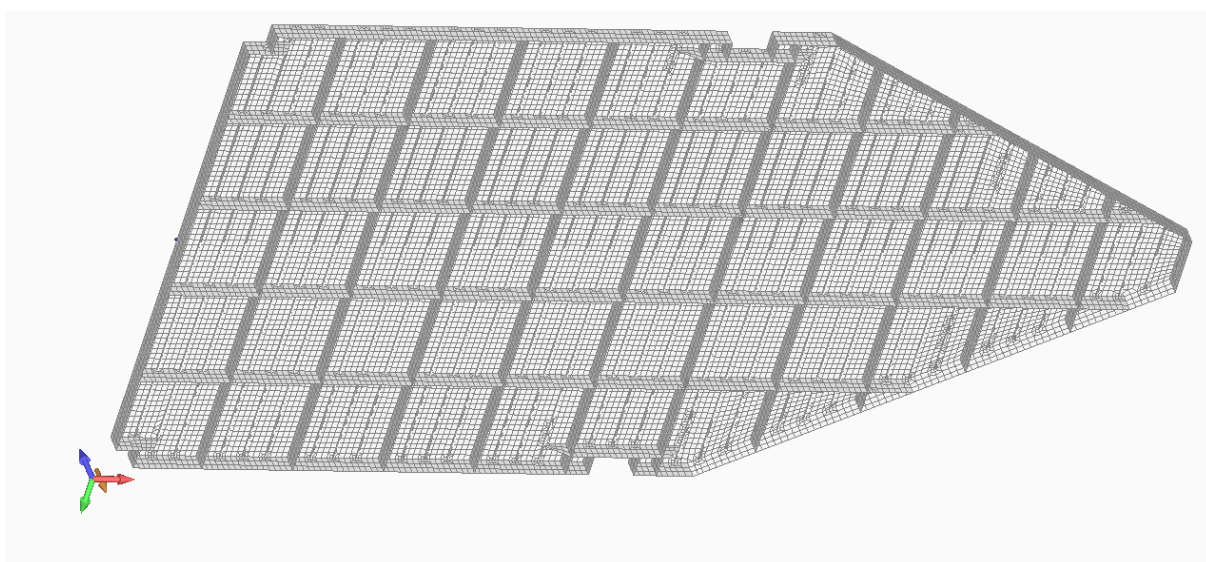
Modeliranje detaljnog modela podijeljeno je u nekoliko faza:

- Definiranje geometrije panela
- Definiranje korištenih materijala
- Definiranje svojstava pojedinih elemenata
- Pridruživanje mreže konačnih elemenata geometriji panela
- Definiranje rubnih uvjeta
- Definiranje opterećenja
- Analiza i postprocesiranje rezultata

Oplata, strukovi i prirubnice jakih nosača, te strukovi ukrepa i sva koljena modelirani su pločastim konačnim elementima, dok su prirubnice ukrepa modelirane grednim konačnim elementima.



Slika 35. MKE model fine mreže palubice P6 (8x5 model)

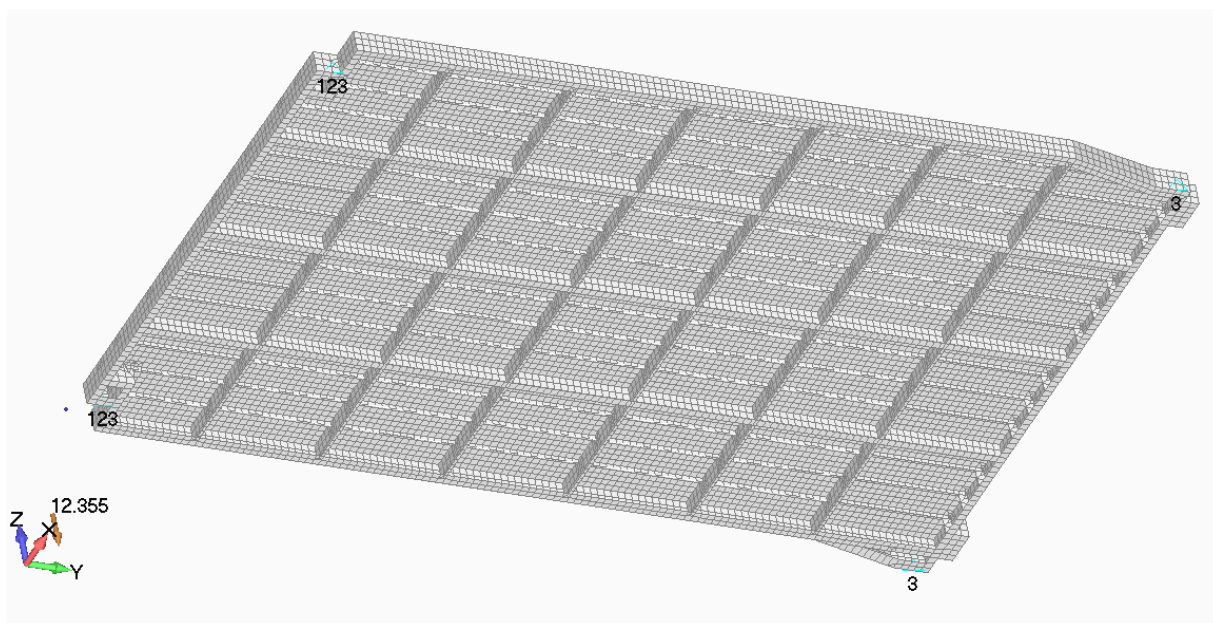


Slika 36. MKE model fine mreže palubice C10 (6x12 model)

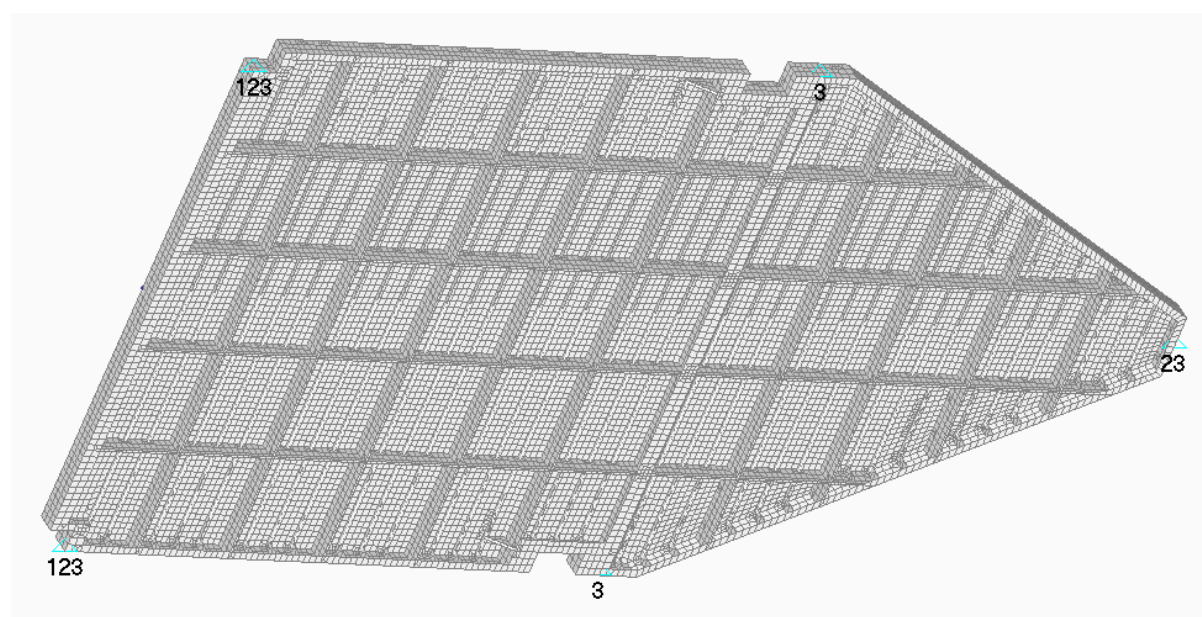
4.1.2. Definiranje rubnih uvjeta

Rubni uvjeti u programu FEMAP/NASTRAN definirani su u četiri pozicije [Slika 41] i [Slika 42] u čvorovima, a sadrže sljedeće rubne uvjete:

- 1 – spriječen pomak u smjeru osi x
- 2 – spriječen pomak u smjeru osi y
- 3 – spriječen pomak u smjeru osi z



Slika 37. Rubni uvjeti palubice P6 (8x5 model)



Slika 38. Rubni uvjeti palubice C10 (6x12 model)

4.1.3. Definiranje modela opterećenja

Proračun globalne čvrstoće palubice pomoću fine mreže provest će se za dva slučaja opterećenja:

- Distribuirano opterećenje (DO) po čitavoj oplati koje uključuje vlastitu težinu strukture

- Osovinsko opterećenje (OO) vozila uz uključivanje vlastite težine palubice

Oba slučaja opterećenja uvećana su za vertikalne akceleracije koje se javljaju uslijed gibanja broda, prema pravilima.

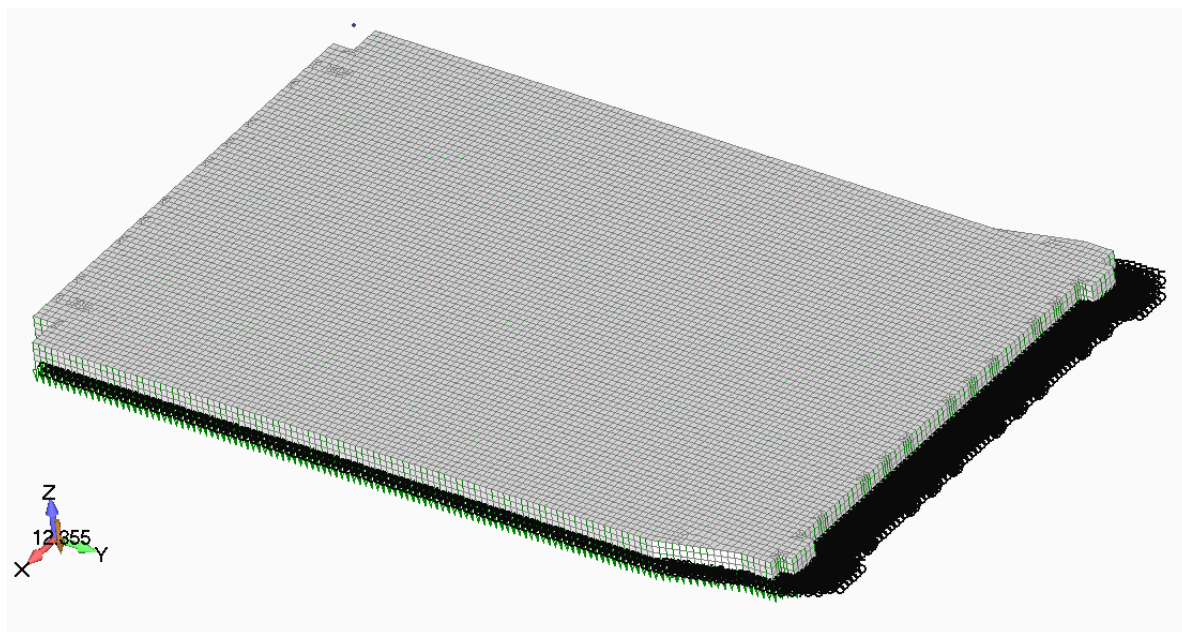
Distribuirano opterećenje palubice P6.

Prema pravilima distribuirano opterećenje uslijed tereta iznosi 300 kg/m^2 .

Ukupna sila koja djeluje na površinu oplata uslijed tereta iznosi $405\,856 \text{ N}$.

Oplata se sastoji od $10\,420$ čvora.

$$\text{sila po čvoru} = \frac{\text{ukupna sila}}{\text{broj čvorova}} = 38.95 \text{ N} \quad - \quad \text{u smjeru negativne osi z}$$



Slika 39. Distribuirano opterećenje (DO) palubice P6 (8x5 model)

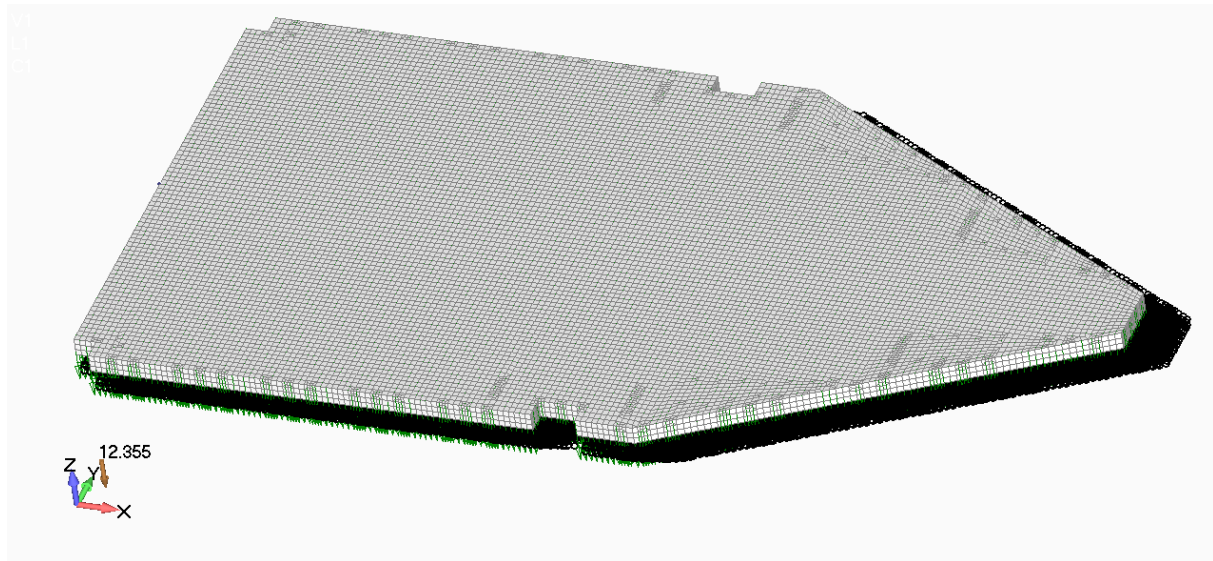
Distribuirano opterećenje palubice C10.

Prema pravilima distribuirano opterećenje uslijed tereta iznosi 300 kg/m^2 .

Ukupna sila koja djeluje na površinu oplata uslijed tereta iznosi $760\,800 \text{ N}$.

Oplata se sastoji od $12\,845$ čvora.

$$\text{sila po čvoru} = \frac{\text{ukupna sila}}{\text{broj čvorova}} = 59.23 \text{ N} \quad - \quad \text{u smjeru negativne osi z}$$



Slika 40. Distribuirano opterećenje (DO) palubice C10 (6x12 model)

Osovinsko opterećenje palubice P6 i C10.

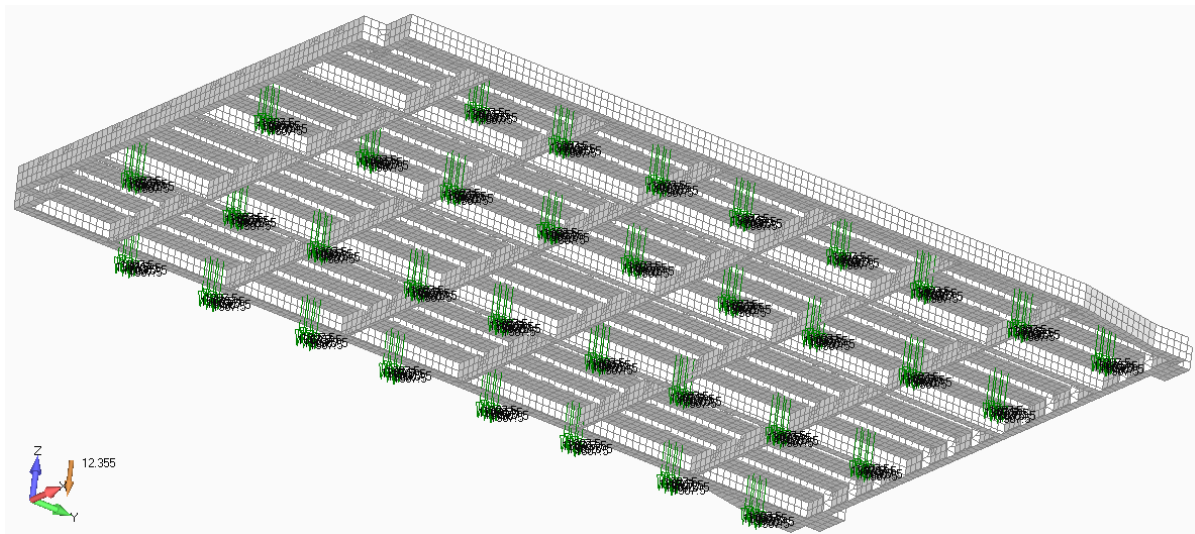
Prema karakteristikama vozila iz točke 3.3.1. utvrđen je raspored koncentriranih sila uslijed osovinskog opterećenja [Slika 45] i [Slika 46]

Osovinsko opterećenje vozila se uzima kao 1.6 t/osovini.

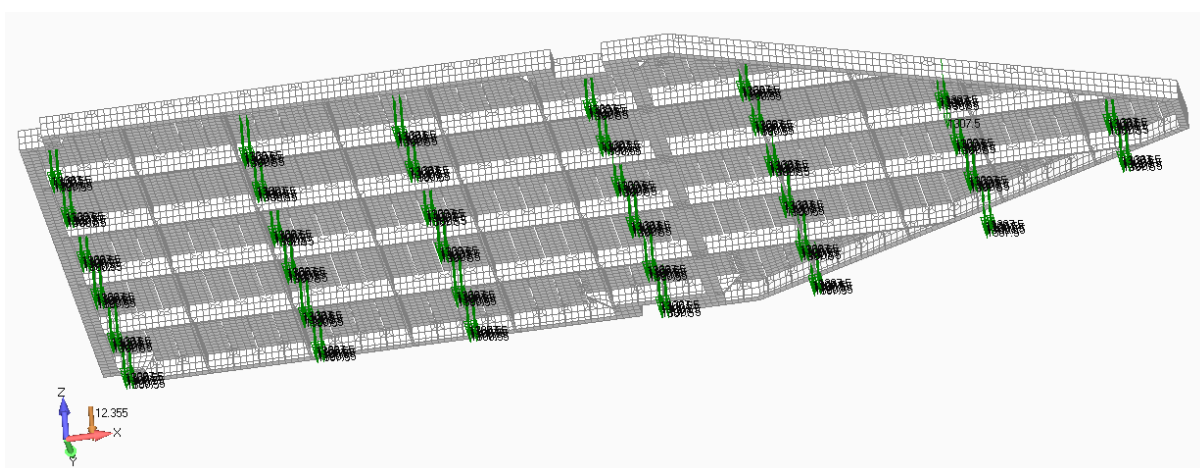
Sila opterećenja po otisku kotača tada iznosi 7 845 N.

Veličina otiska kotača obuhvaća 6 čvora na palubici, pa je utvrđeno slijedeće opterećenje:

$$\text{silu po čvoru} = \frac{\text{silu po otisku}}{6} = 1307.5 \text{ N} \quad - \quad \text{u smjeru negativne osi z}$$

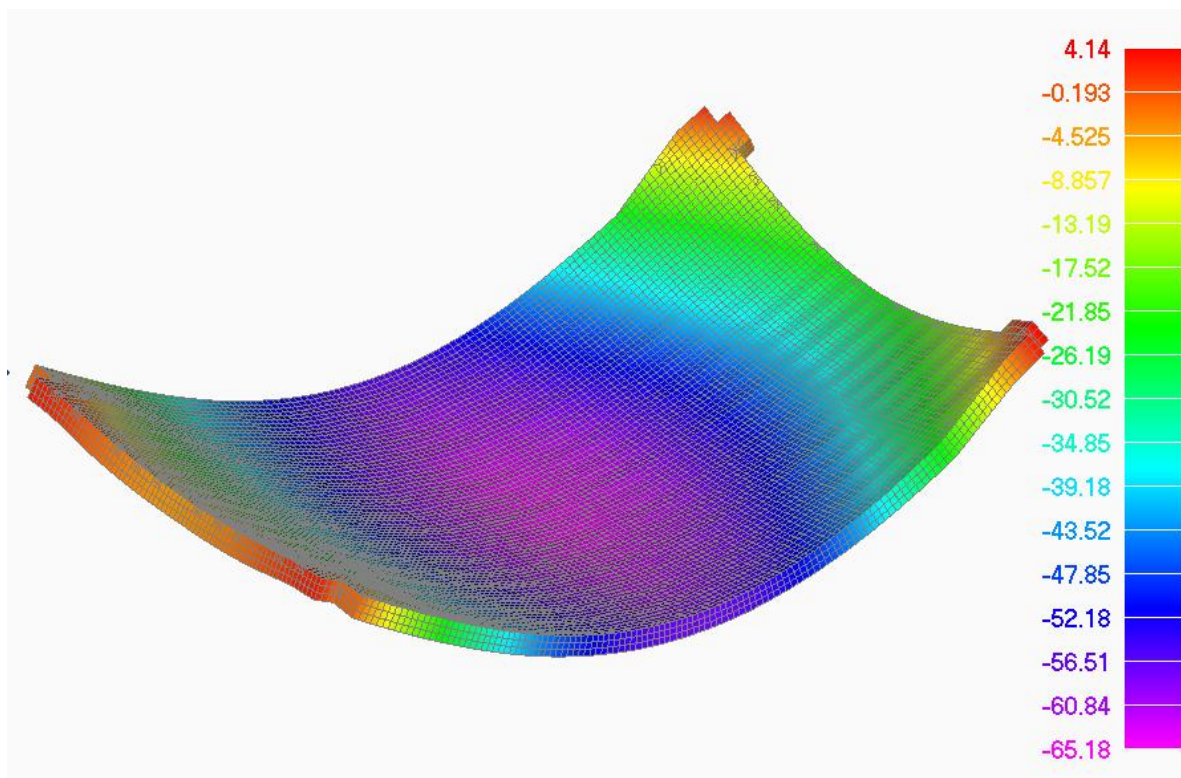


Slika 41. Raspored osovinskog opterećenja (OO) palubice P6 (8x5 Model)

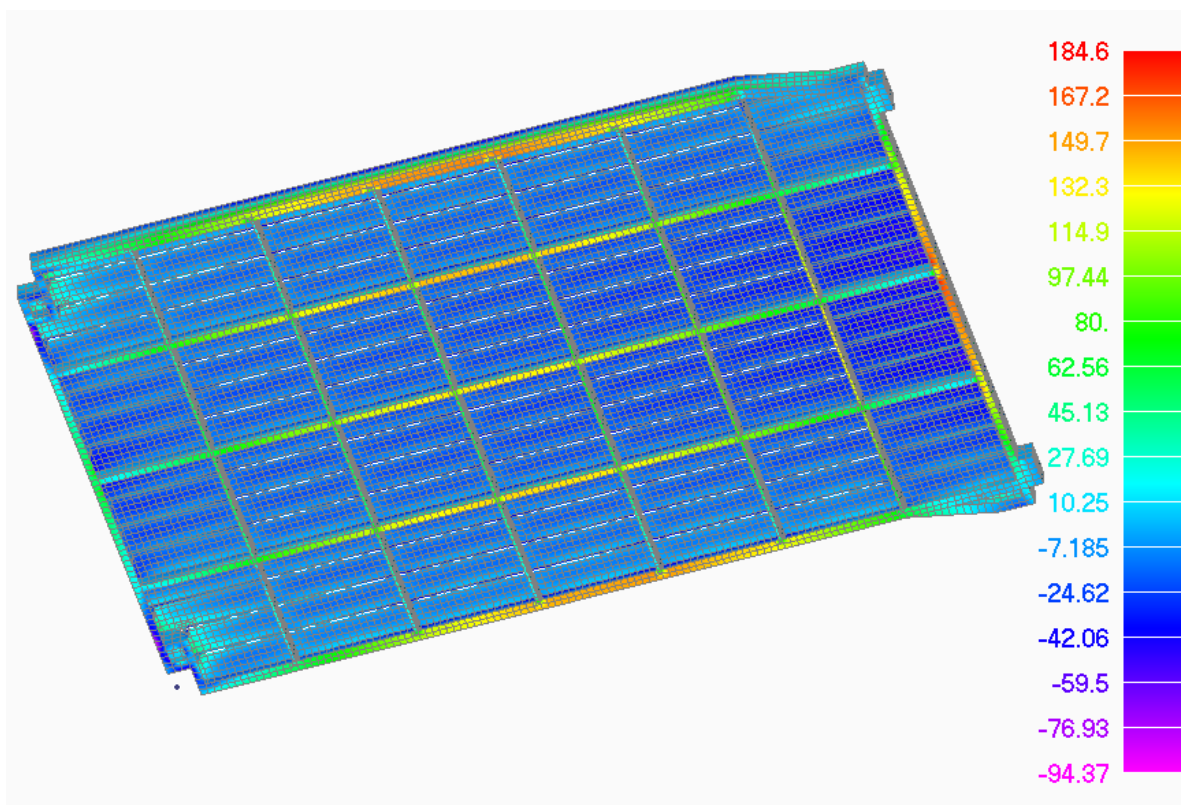


Slika 42. Raspored osovinskog opterećenja (OO) palubice C10 (6x12 Model)

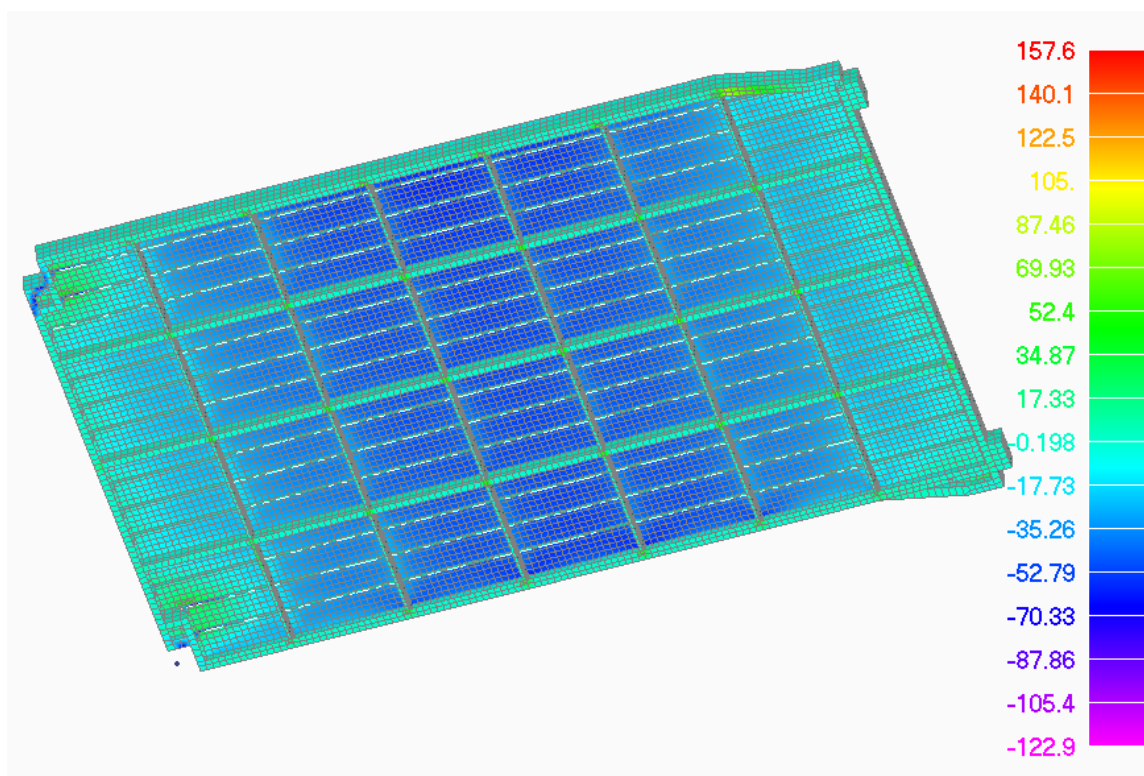
4.1.4. Analiza rezultata odziva palubice P6 za oba slučaja opterećenja



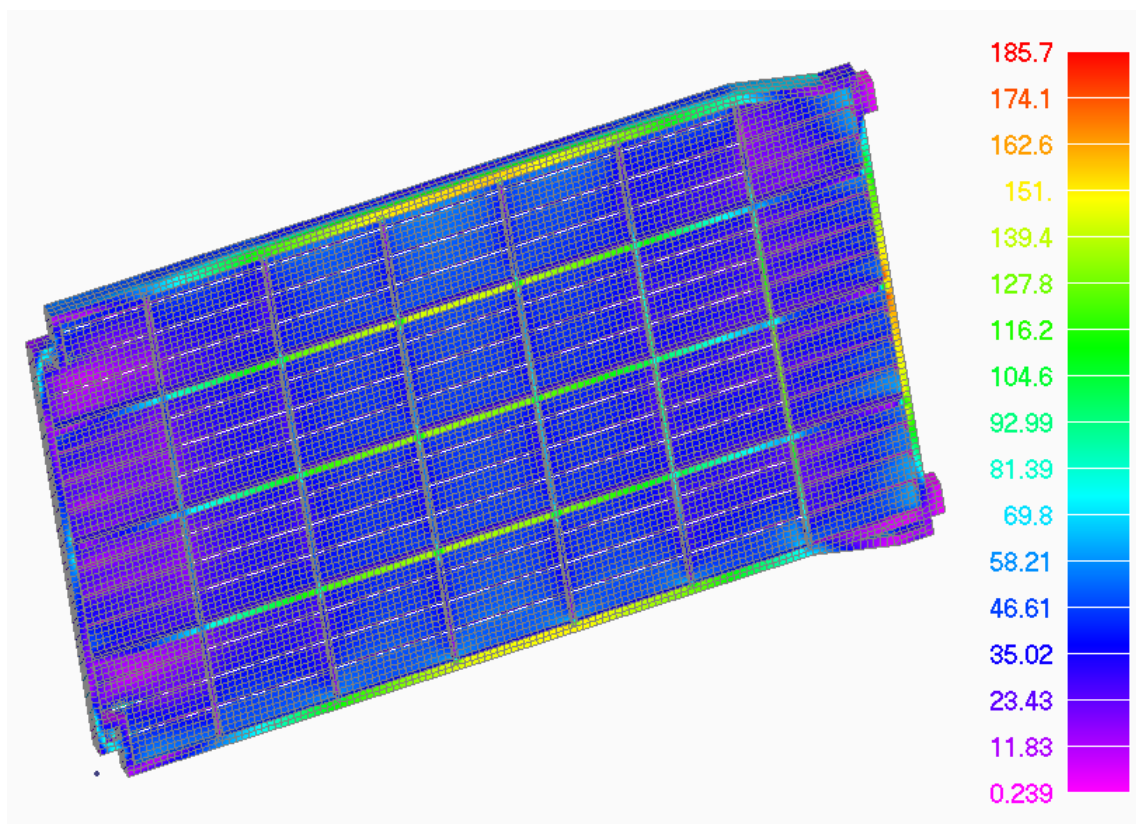
Slika 43. Prikaz pomaka palubice P6 (DO) (8x5 model)



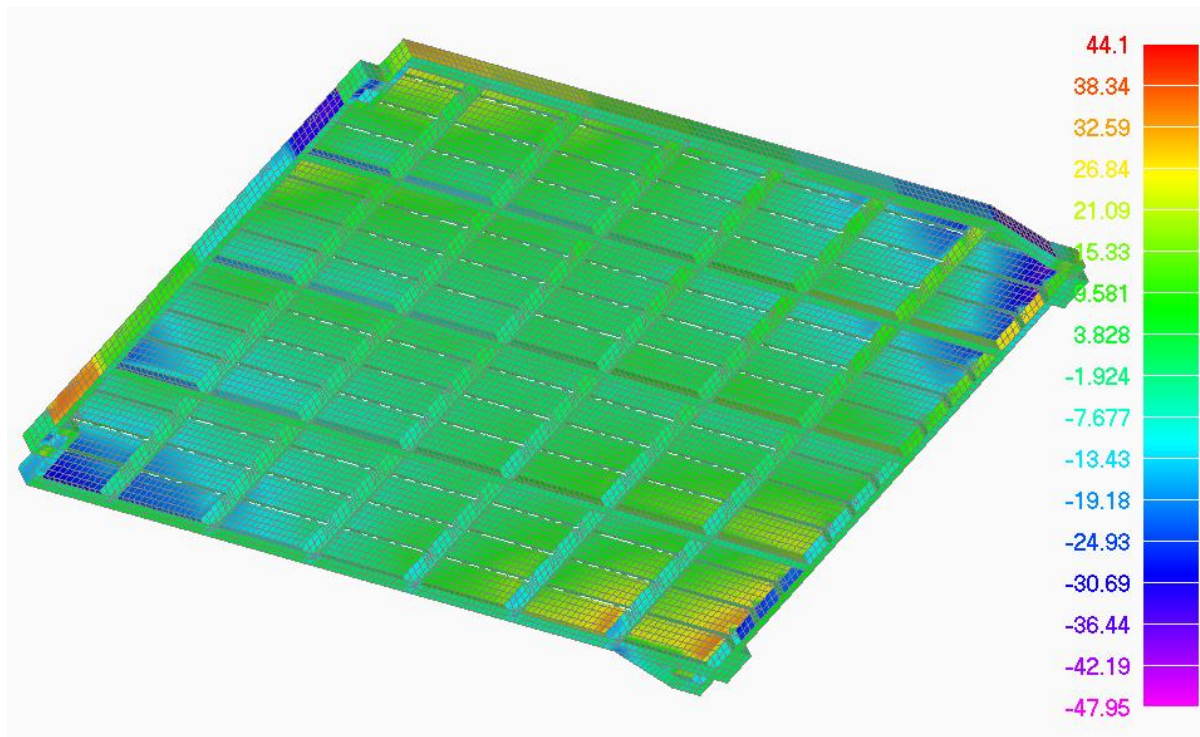
Slika 44. Raspodjela savojnih napreznja palubice P6 u smjeru osi x (DO) (8x5 model)



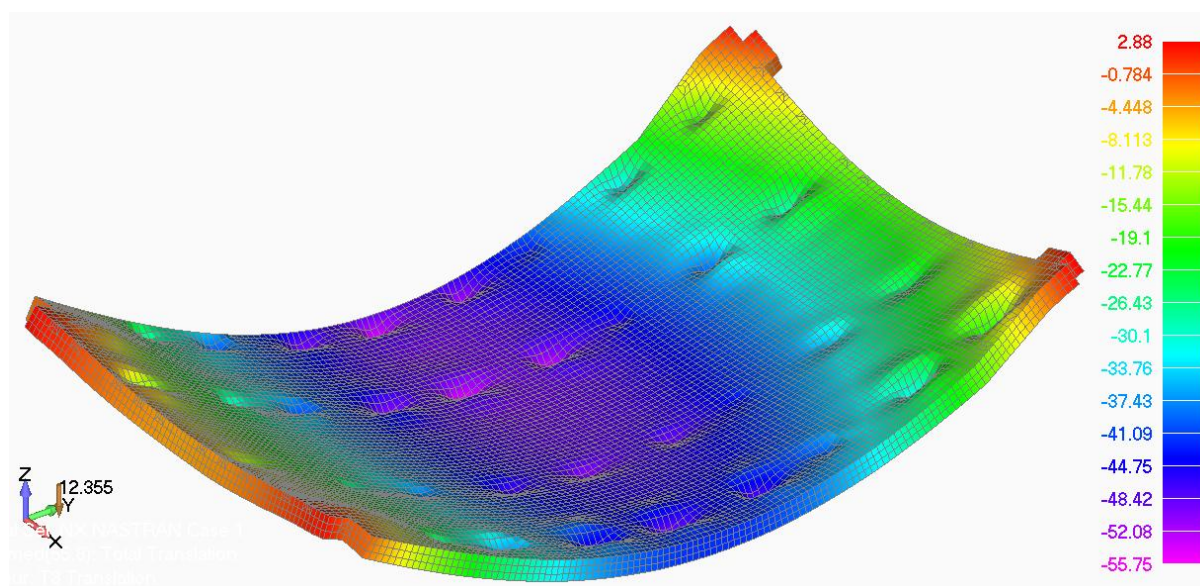
Slika 45. Raspodjela savojnih napreznanja palubice P6 u smjeru osi y (DO) (8x5 model)



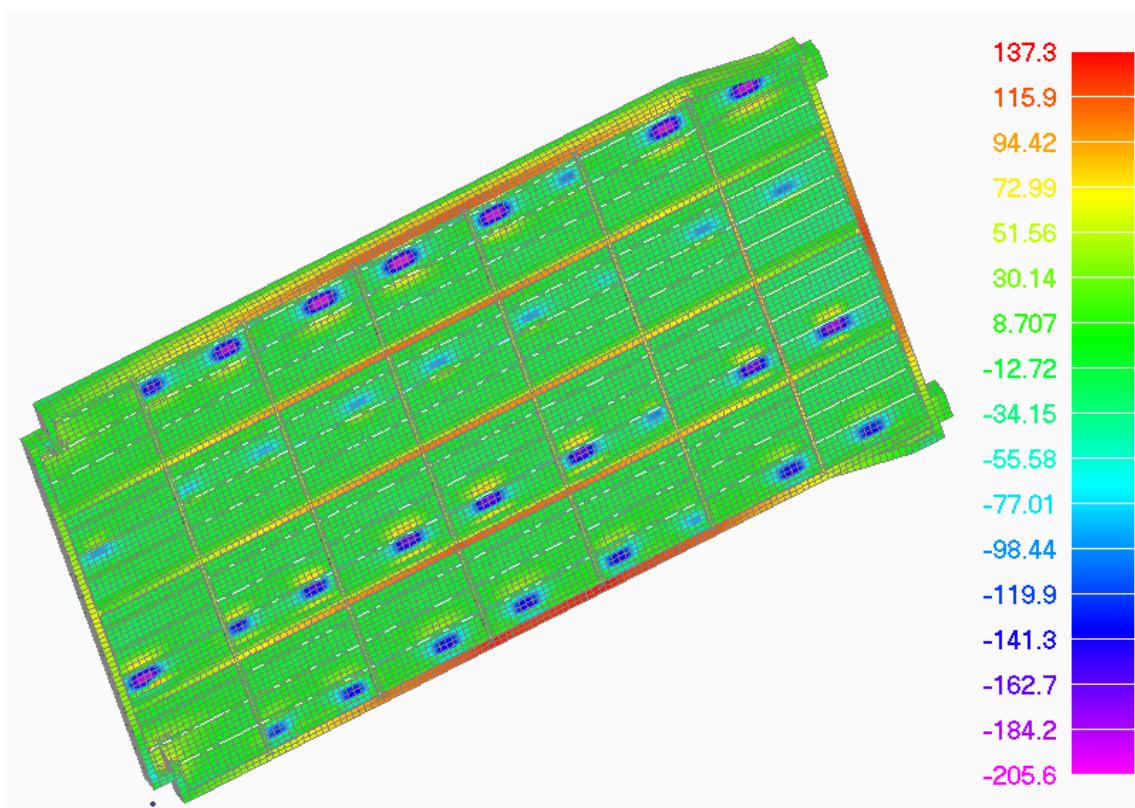
Slika 46. Raspodjela VonMisses napreznanja palubice P6 (DO) (8x5 model)



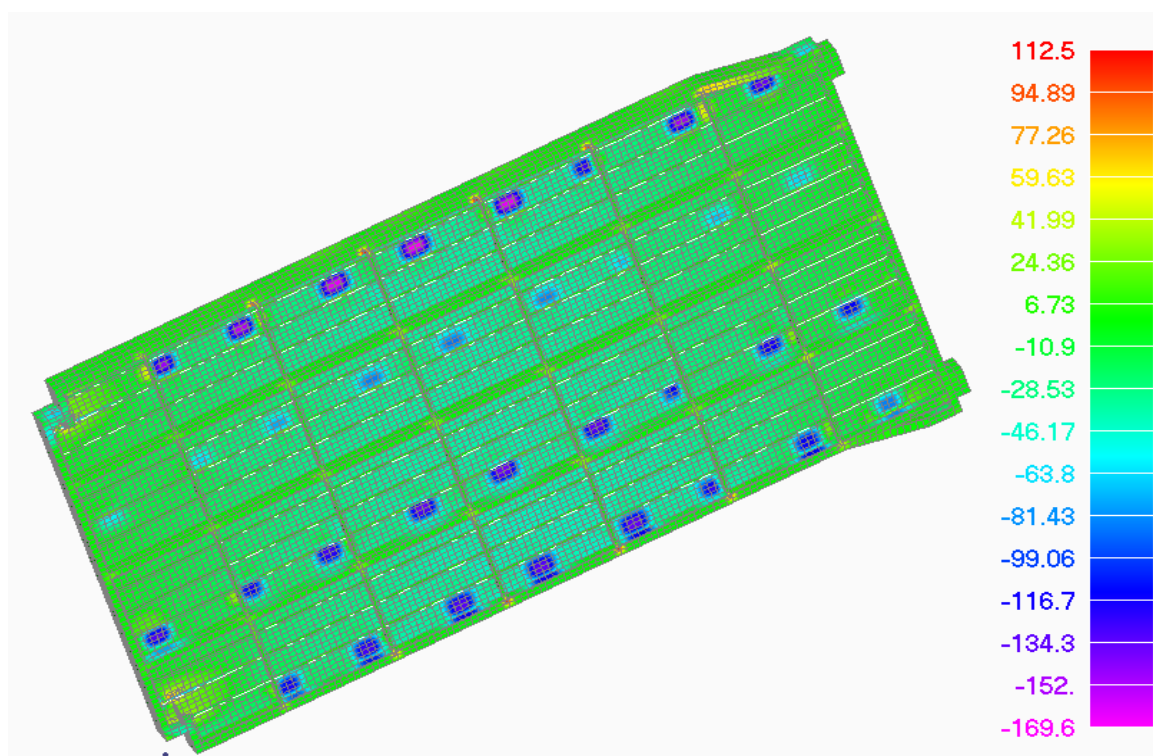
Slika 47. Raspodjela smičnih napreznja palubice P6 (DO) (8x5 model)



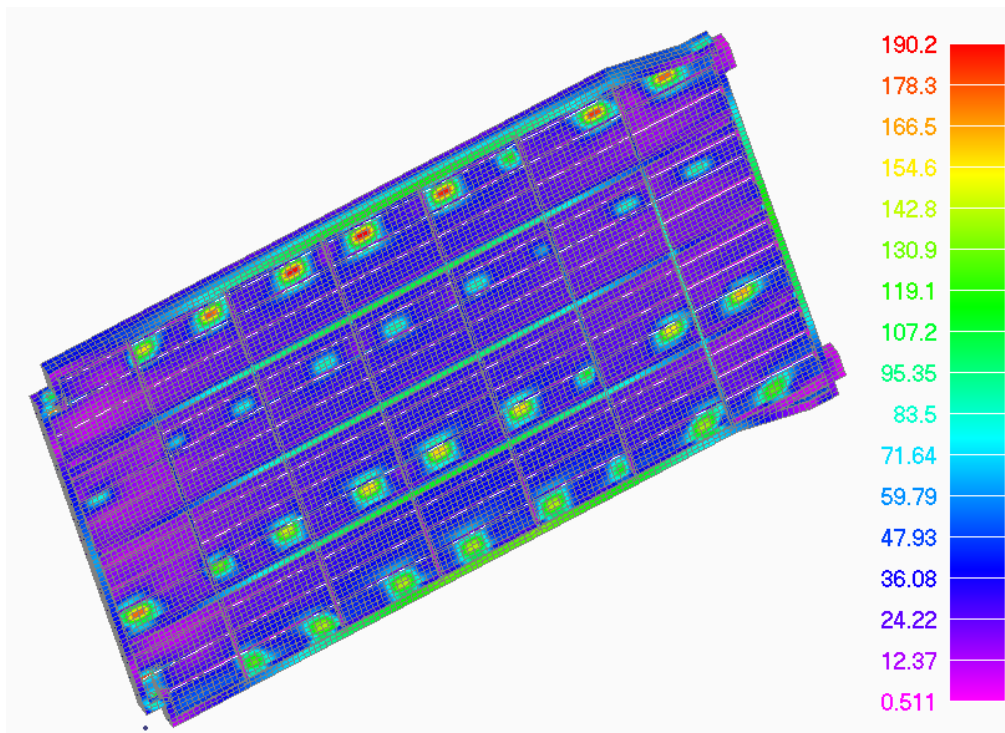
Slika 48. Prikaz pomaka palubice P6 (OO) (8x5 model)



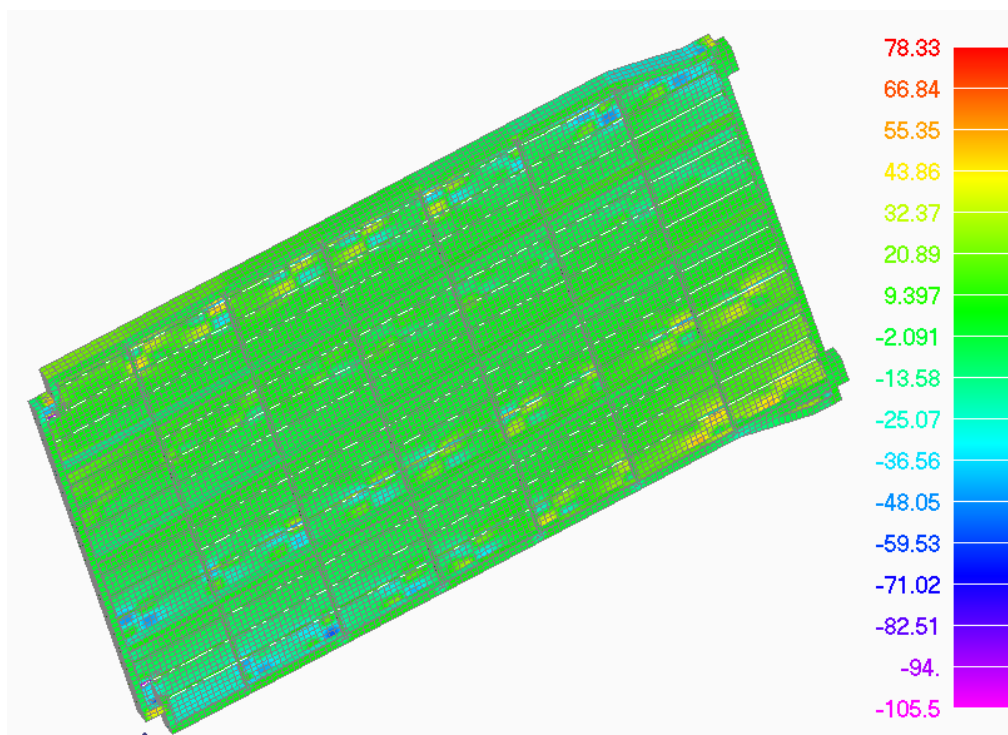
Slika 49. Raspodjela savojnih napreznanja palubice P6 u smjeru osi x (OO) (8x5 model)



Slika 50. Raspodjela savojnih napreznanja palubice P6 u smjeru osi y (OO) (8x5 model)



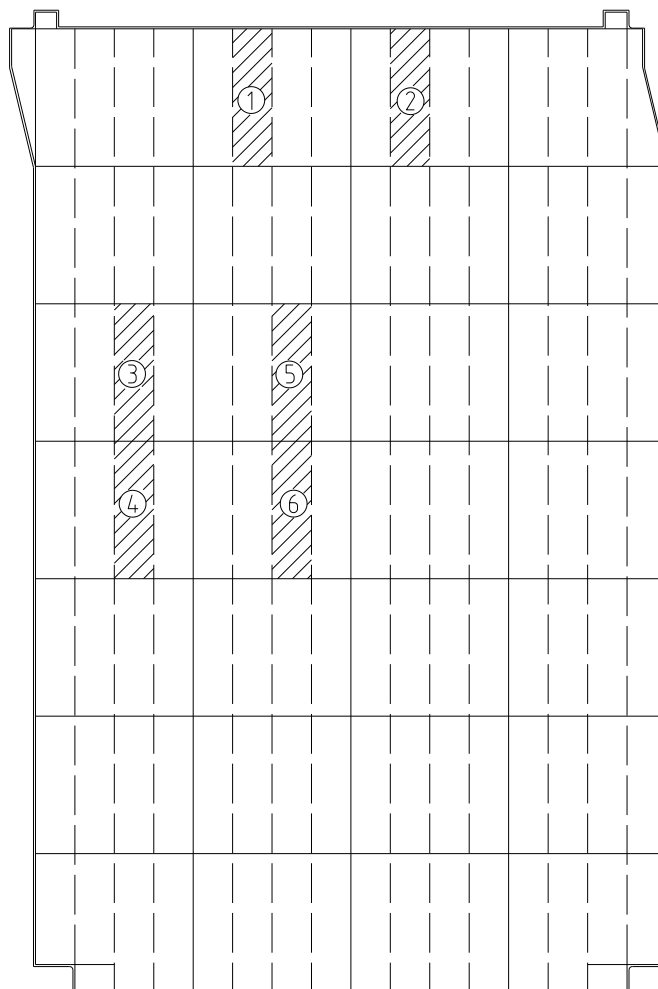
Slika 51. Raspodjela VonMises naprezanja palubice P6 (OO) (8x5 model)



Slika 52. Raspodjela smičnih naprezanja palubice P6 (OO) (8x5 model)

4.1.5. Kontrola izvijanja oplata palubice P6

Proračun izvijanja napravljen je pomoću excel tablice za proračun izvijanja za označena polja [Slika 57]. Proračun je prikazan za Polje 1, te se isti princip primjenjuje na sva ostala polja.



Slika 53. Numeracija polja palubice P6 ispitana na izvijanje

Polje 1:

$s = 594 \text{ mm}$ - kraća strana polja izvijanja (djeluje σ_{ax})

$l = 2072 \text{ mm}$ - dulja strana polja izvijanja (djeluje σ_{ay})

$t = 5.5 \text{ mm}$ - debljina oplata

Faktor izvijanja:

$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right)^n \leq 1$$

$2.246 \leq 1$ – izvijanje oplata **NOT OK**

$\sigma_{ax} = -47 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u uzdužnom smjeru (okomito na ukrepe)

$\sigma_{ay} = -17 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u poprečnom smjeru

Tablica 16. Kontrola izvijanja oplata palubice P6

Polje	s (mm)	l (mm)	t (mm)	σ_{ax} (N/mm ²)	σ_{ay} (N/mm ²)	Faktor izvijanja	Zadovoljenje kriterija
1	594	2072	5.5	-47	-17	2.246	Ne
2	594	2072	5.5	-48	-18	2.273	Ne
3	594	2072	5.5	-24	-55	1.099	Ne
4	594	2072	5.5	-23	-57	1.158	Ne
5	594	2072	5.5	-32	-50	1.311	Ne
6	594	2072	5.5	-29	-54	1.237	Ne

Kontrola izvijanja [Tablica 16] pokazala je da u niti jednom polju nije zadovoljen kriterij za izvijanje.

Potrebne izmjene radi zadovoljenja kriterija za izvijanje:

- Povećanje debljine oplata na 6 mm.
- Promjena smjera orebrenja u području polja 1 i 2 s poprečnog u uzdužni smjer

Tablica 17. Kontrola izvijanja oplata palubice P6 nakon izmjena

Polje	s (mm)	l (mm)	t (mm)	σ_{ax} (N/mm ²)	σ_{ay} (N/mm ²)	Faktor izvijanja	Zadovoljenje kriterija
1	518	2377	6	-17	-42	0.689	DA
2	518	2377	6	-17	-44	0.7	DA
3	594	2072	6	-21	-50	0.917	DA
4	594	2072	6	-19	-54	0.968	DA
5	594	2072	6	-29	-46	0.970	DA
6	594	2072	6	-26	-51	0.942	DA

Kontrola izvijanja [Tablica 17] pokazala je da su sva polja zadovoljila kriterij izvijanja.

4.1.6. Usporedba rezultata odziva palubice P6 (8x5 model) i prijedlog konačnog rješenja

Tablica 18. Usporedba rezultata odziva palubice P6 (8x5 model)

Model	MAESTRO		3DB			FEMAP DO			FEMAP OO		
	σ_{\max} N/mm ²	δ mm	σ_{\max} N/mm ²	δ mm	τ_{\max} N/mm ²	σ_{\max} N/mm ²	δ mm	τ_{\max} N/mm ²	σ_{\max} N/mm ²	δ mm	τ_{\max} N/mm ²
8x5	194	68.9	176	75	33	171	65	38	127	56	29

Rezultati analize odziva [Tablica 16] pokazuju da maksimalna naprezanja ne prelaze dopuštena, te da maksimalni progib, osim u proračunu pomoću programa 3D Beam, ne prelazi maksimalno dopušteni. MAESTRO je dao rezultate koji su na granici dopuštenih, a kao što je bilo i očekivano 3D Beam je dao veće rezultate zbog ne uzimanja u obzir ukrepa oplata i pojednostavljenog pristupa raspodjeli opterećenja. Također je vidljivo da je model fine mreže dao naprezanja i maksimalni progib niži od proračuna pomoću grednih konačnih elemenata, pa možemo zaključiti da proračun pomoću grednih konačnih elemenata ide na stranu sigurnosti.

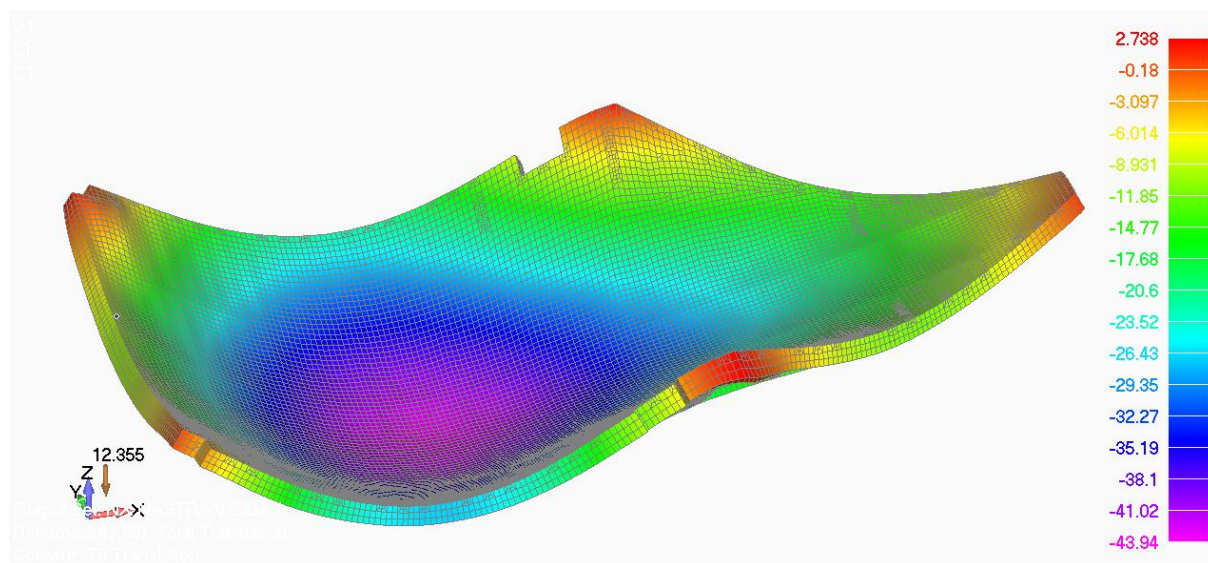
Konačno rješenje palubice P6 [Prilog, Steel structure]:

- Jaki nosači definirani u tablici 11
- Oplata palubice debljine 6 mm
- Ukrepe u području polja 1 i 2 okrenuti u uzdužni smjer
- Lokalno pojačanje strukova jakih nosača prema krajevima pločama debljine 20 mm

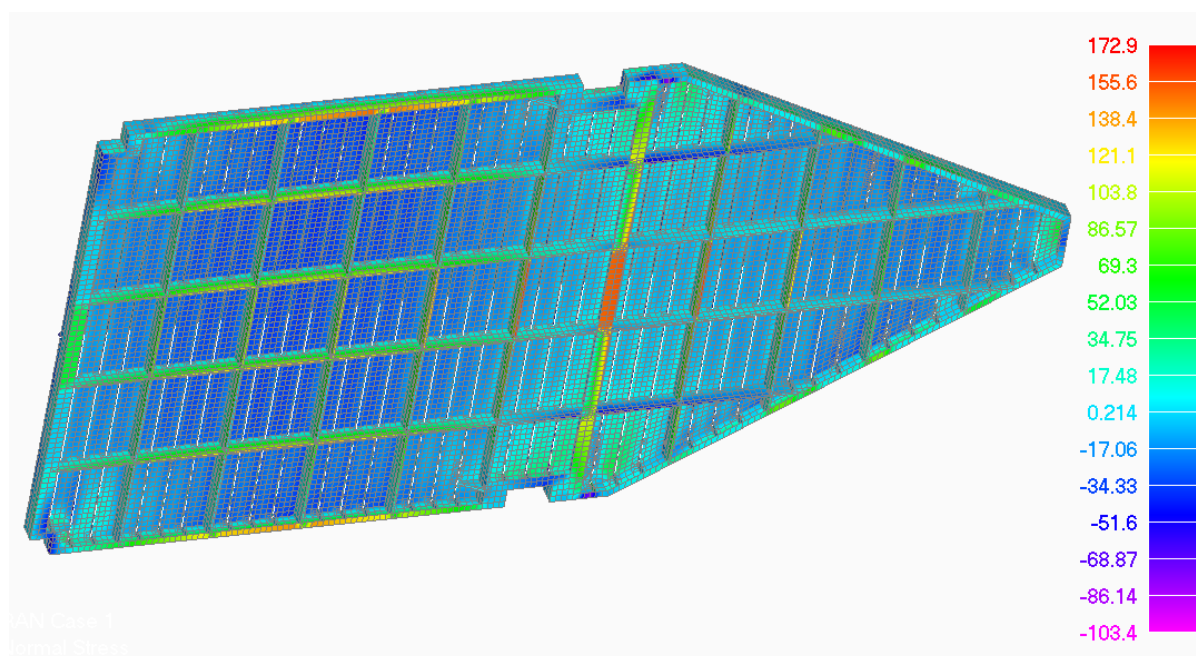
Povećanje debljine oplata palubice P6 na 6 mm uzrokovalo je i povećanje ukupne mase konstrukcije koja iznosi 12.36 t.

Ušteda mase konačnog (8x5) modela u odnosu na prototip je 1.5 t, odnosno 12 %.

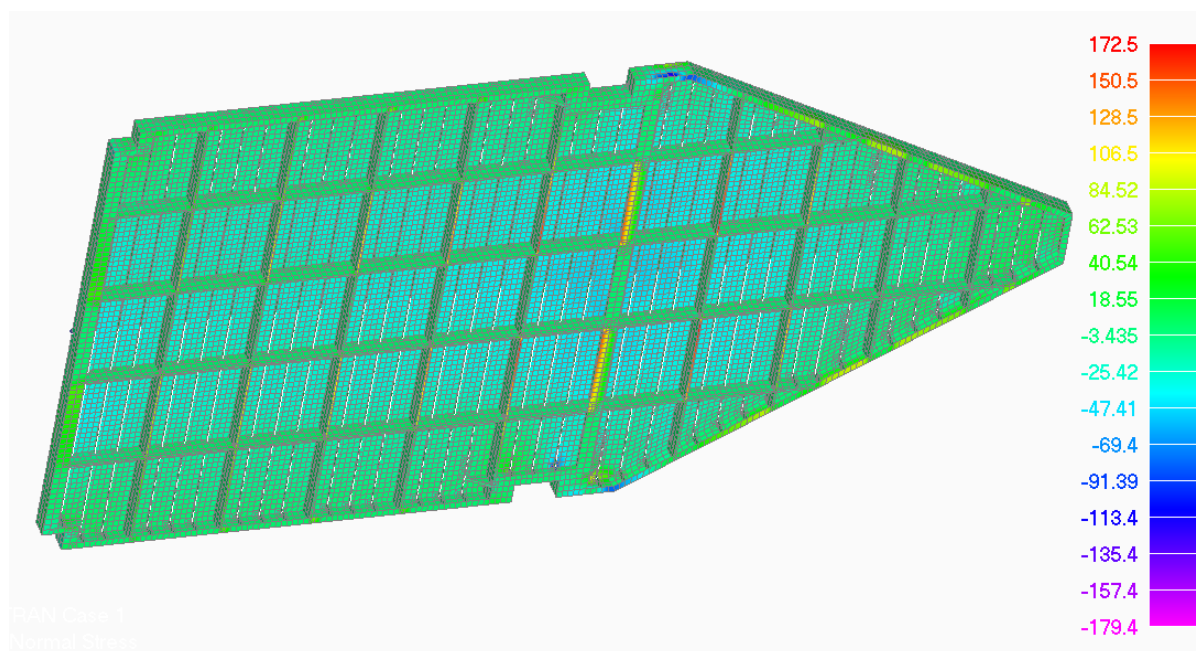
4.1.7. Analiza rezultata odziva palubice C10 za oba slučaja opterećenja



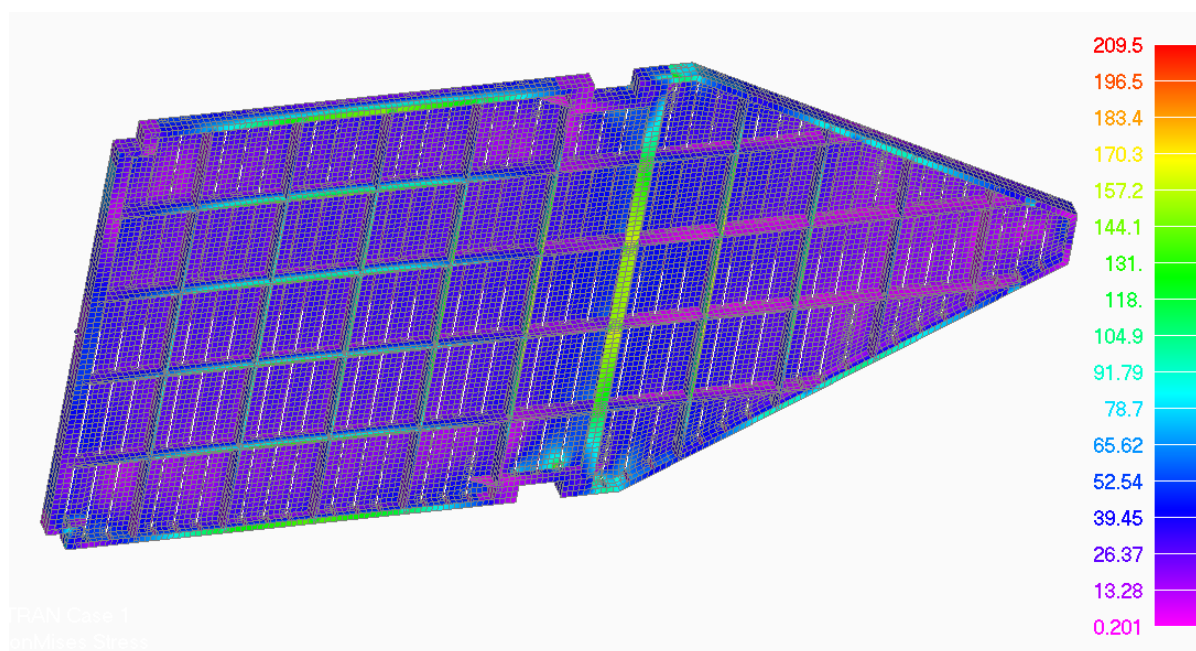
Slika 54. Prikaz pomaka palubice C10 (DO) (6x12 model)



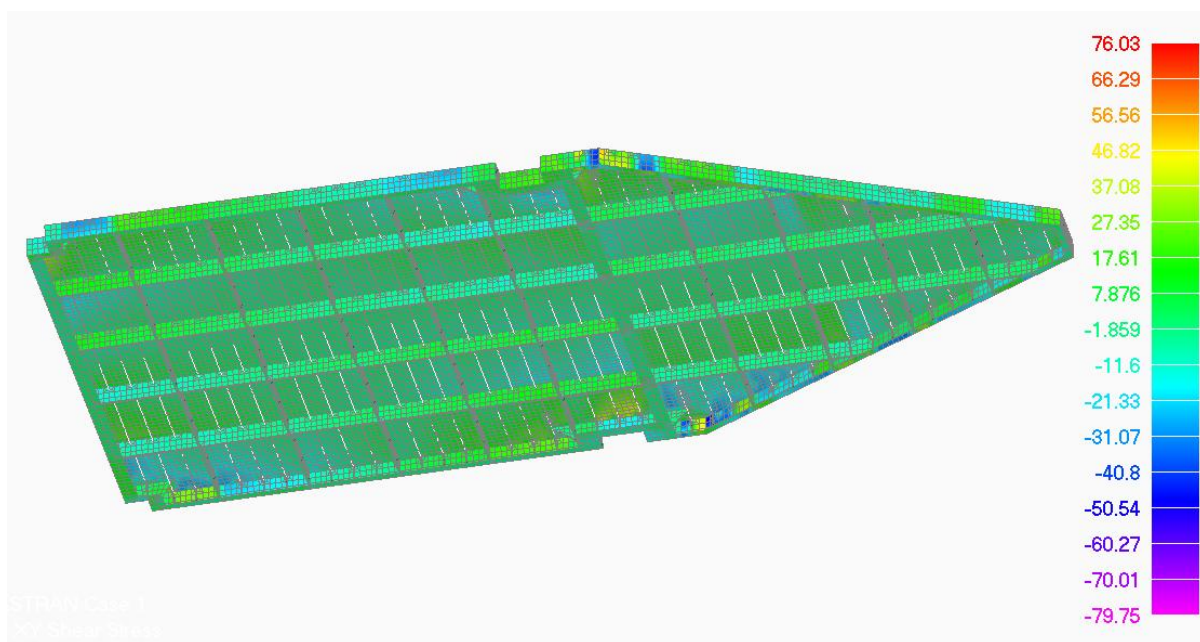
Slika 55. Raspodjela savojnih naprezanja palubice C10 u smjeru osi x (DO) (6x12 model)



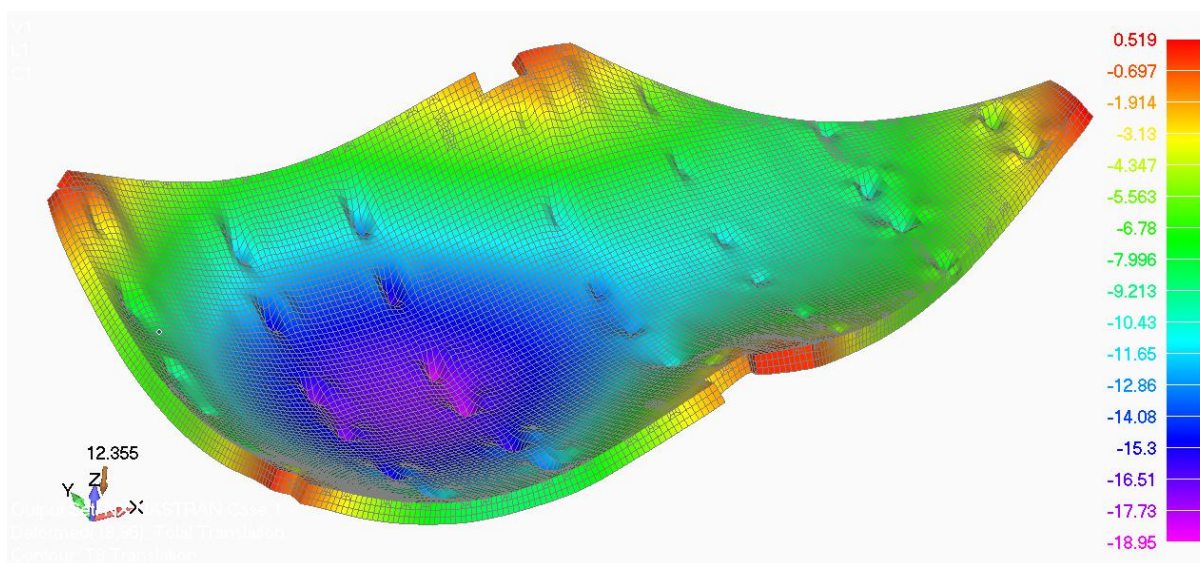
Slika 56. Raspodjela savojnih naprezanja palubice C10 u smjeru osi y (DO) (6x12 model)



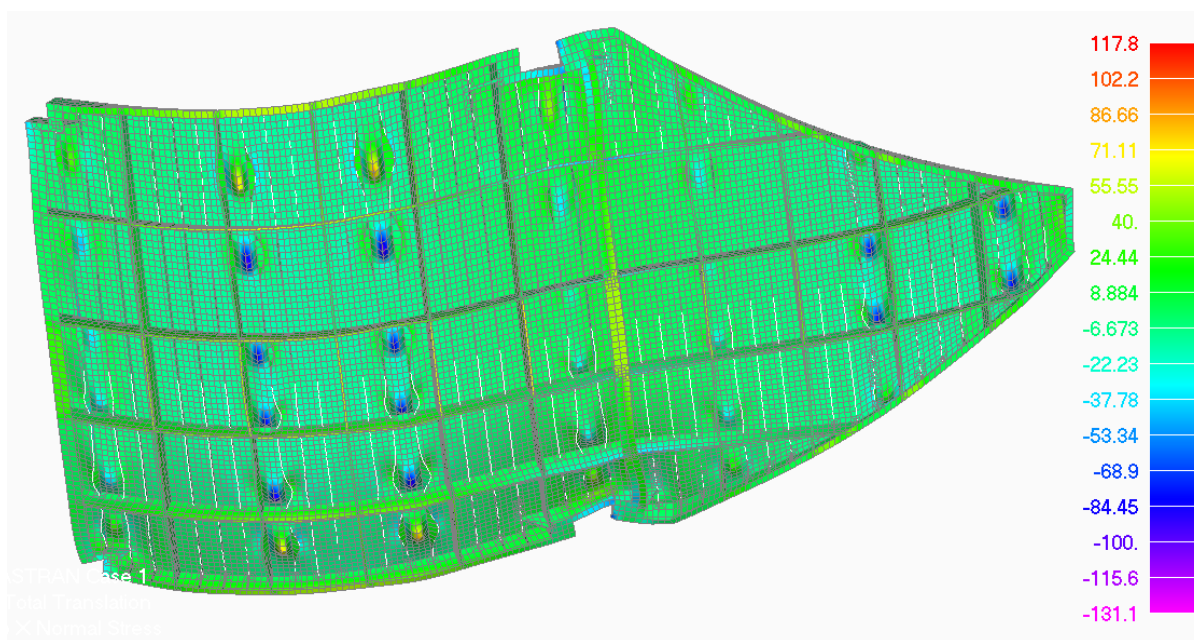
Slika 57. Raspodjela VonMises naprezanja palubice C10 (DO) (6x12 model)



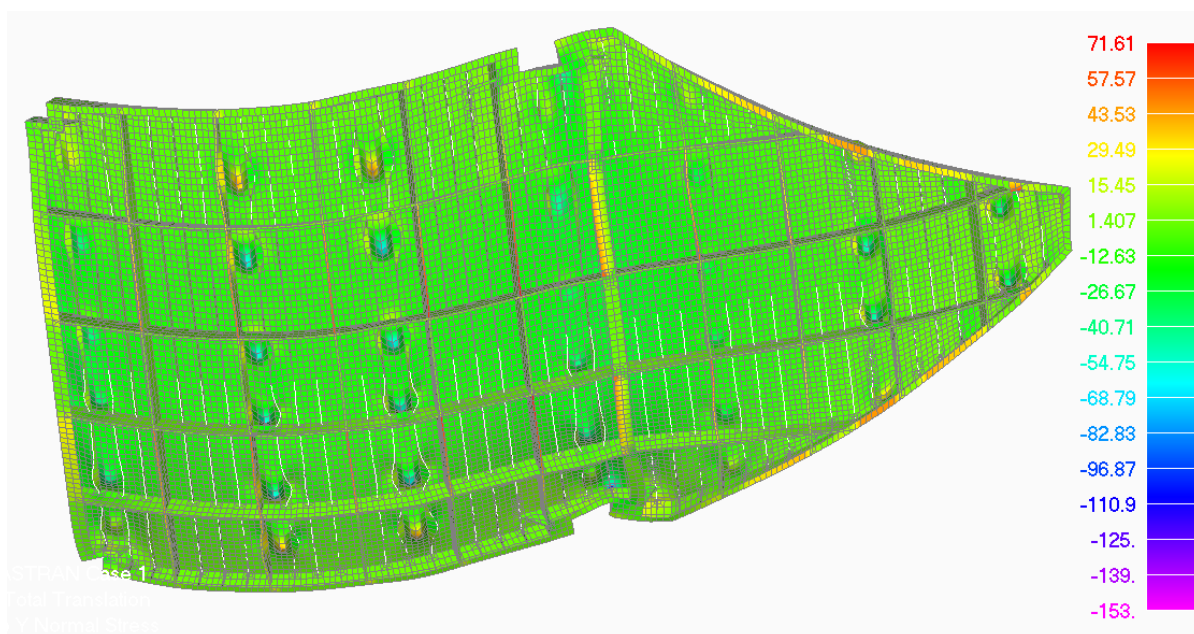
Slika 58. Raspodjela smičnih naprezanja palubice C10 (DO) (6x12 model)



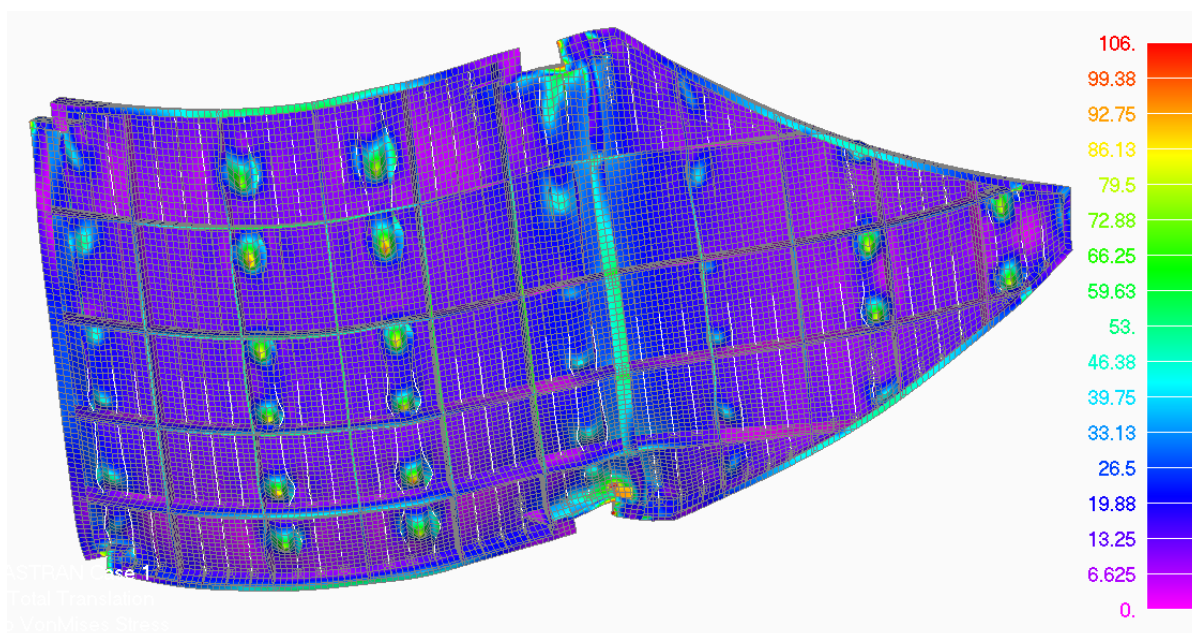
Slika 59. Prikaz pomaka palubice C10 (OO) (6x12 model)



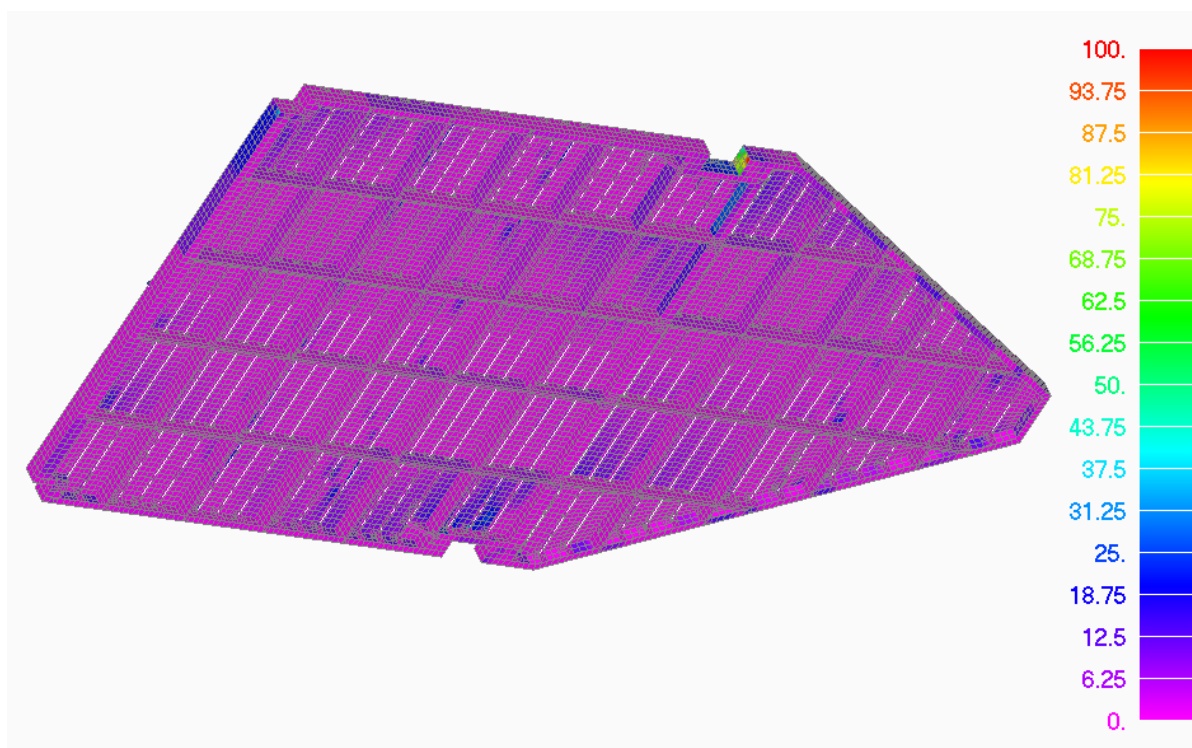
Slika 60. Raspodjela savojnih naprezanja u smjeru osi x palubice C10 (OO) (6x12 model)



Slika 61. Raspodjela savojnih naprezanja u smjeru osi y palubice C10 (OO) (6x12 model)



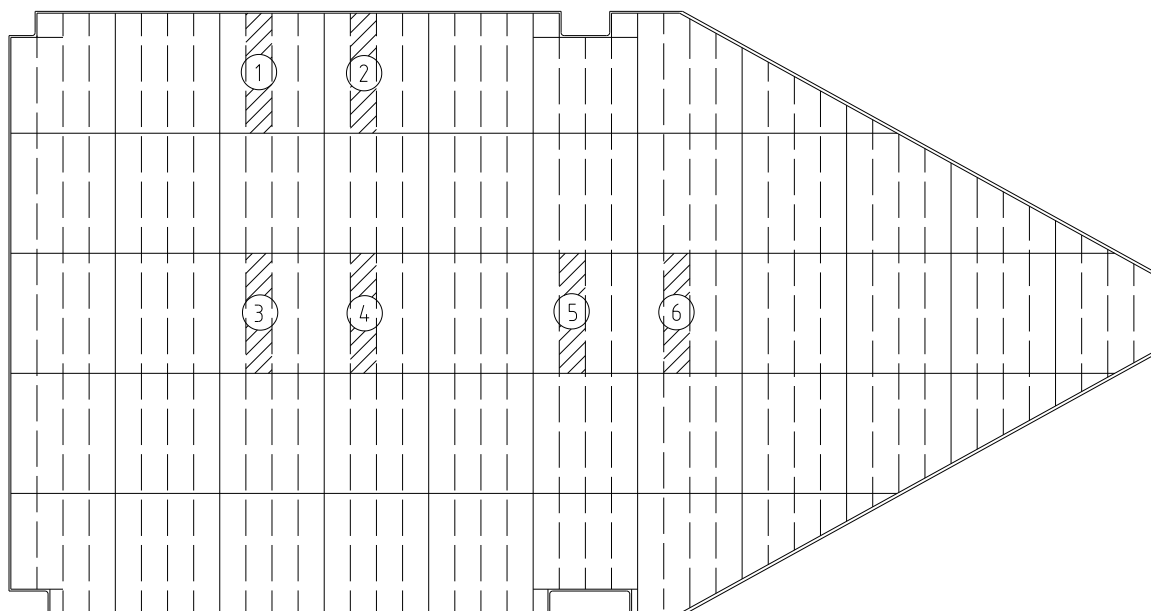
Slika 62. Raspodjela VonMisses naprezanja palubice C10 (OO) (6x12 model)



Slika 63. Raspodjela smičnih naprezanja palubice C10 (OO) (6x12 model)

4.1.8. Kontrola izvijanja oplata palubice C10

Proračun izvijanja napravljen je pomoću excel tablice za proračun izvijanja za označena polja [Slika 68].



Slika 64. Numeracija polja palubice C10 ispitana na izvijanje

Polje 1:

$s = 431 \text{ mm}$ - kraća strana polja izvijanja (djeluje σ_{ax})

$l = 1.982 \text{ mm}$ - dulja strana polja izvijanja (djeluje σ_{ay})

$t = 6 \text{ mm}$ - debljina oplata

$$\frac{\sigma_{ax}}{\eta_x \sigma_{cx}} - K \frac{\sigma_{ax} \sigma_{ay}}{\eta_x \eta_y \sigma_{cx} \sigma_{cy}} + \left(\frac{\sigma_{ay}}{\eta_y \sigma_{cy}} \right)^n \leq 1$$

$$0.787 \leq 1 - \text{izvijanje oplata OK}$$

$\sigma_{ax} = -30 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u uzdužnom smjeru (okomito na ukrepe)

$\sigma_{ay} = -6 \text{ N/mm}^2$ – tlačno naprezanje u poprečnom smjeru

Tablica 19. Kontrola izvijanja oplata palubice C10

Polje	s(mm)	l(mm)	t(mm)	σ_{ax}	σ_{ay}	Faktor izvijanja	Zadovoljenje kriterija
1	431	1982	6	-30	-6	0.787	DA
2	431	1982	6	-27	-7	0.785	DA
3	431	1982	6	-35	-33	0.908	DA
4	431	1982	6	-37	-36	0.972	DA
5	431	1982	6	-23	-46	0.677	DA
6	431	1982	6	-11	-46	0.489	DA

4.1.9. Usporedba rezultata odziva palubice C10 (12x6 model) i prijedlog konačnog rješenja

Tablica 20. Usporedba rezultata odziva palubice C10 (12x6 model)

Model	MAESTRO		3DB			FEMAP DO			FEMAP OO		
	σ_{max} N/mm ²	δ mm	σ_{max} N/mm ²	δ mm	τ_{max} N/mm ²	σ_{max} N/mm ²	δ mm	τ_{max} N/mm ²	σ_{max} N/mm ²	δ mm	τ_{max} N/mm ²
12x6	202	62	176	47	50	172	44	46	65	19	59

Rezultati analize odziva [Tablica 20] pokazuju da maksimalna naprezanja ne prelaze dopuštena, te da maksimalni progib ne prelazi maksimalno dopušteni. I u ovom slučaju je model fine mreže dao naprezanja i maksimalni progib niži od proračuna pomoću grednih konačnih elemenata kao i kod usporedbe za palubicu P6 [Tablica 16], što potvrđuje da je proračun grubim grednim konačnim elementima na strani sigurnosti.

Konačno rješenje palubice C10 [Prilog, Steel structure]:

- Jaki nosači i oplata definirani u tablici 13.

Lokalno pojačanje strukova jakih nosača prema krajevima pločama debljine 20 mm zbog smičnih naprezanja većih od dopuštenih.

Ušteda mase konačnog (6x12) modela palubice C10 je 0.54 t, odnosno 3.8 % u odnosu na prototip.

Prema gruboj procjeni na razmatranom brodu nalazi se osamdesetak palubica pravilnog oblika i četrdesetak palubica nepravilnog oblika. Pretpostavimo li da je za svaku pravilnu palubicu moguća ušteda 1.5 t [Točka 4.1.6.], a za svaku nepravilnu 0.54 t, dolazimo do ukupne uštede od 140 t odnosno 9 %.

Usporedivši rezultate odziva finog modela za slučajeve distribuiranog i osovinskog opterećenja došlo se do slijedećeg zaključka:

- Globalni odzivi (progib, naprezanja u jakim nosačima), znatno je veći kod distribuiranog opterećenja → bitno za dimenzioniranje jakih nosača i proračun izvijanja oplata.
- Lokalna naprezanja su znatno viša kod osovinskog opterećenja → bitno za lokalno dimenzioniranje oplata uslijed savijanja.

Razlog tome leži u činjenici da je sila kod osovinskog opterećenja koncentrirana u nekoliko čvorova, ali i da je ukupna sila koja djeluje na strukturu palubica znatno manja od one distribuirane. To ukazuje na rezervu sigurnosti s obzirom na dimenzioniranje jakih nosača roštilja i izvijanje oplata.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je projektiranje pomičnih palubica broda za prijevoz automobila. Uobičajna projektna praksa uglavnom polazi od topologije definirane prema iskustvu sa prethodnih projekata. Kroz ovaj rad nastojalo se proširiti standardnu projektnu proceduru s istraživanjem utjecaja topologije primarnih nosača (promjena broja uzdužnih i poprečnih jakih nosača) u cilju pronalaženja efikasnijeg projekta sa stanovišta mase. U konceptualnoj fazi su pomoću pravila klasifikacijskog društva DNV proračunate strukturne dimenzije glavnih nosača, oplate i ukrepa za različite topološke varijante. Na temelju tog izračuna pomoću programa *MAESTRO* izrađeno je ukupno 18 MKE modela (9 modela palubice P6 i 9 modela palubice C10) pomoću *grubih* makroelementa (orebrena ploča i greda). Najveća prednost analize grubom mrežom je upravo brzina kojom se dolazi do krajnjeg rješenja uz zadovoljavajuće rezultate. Najpovoljniji model u odnosu na masu za obje palubice dodatno je analiziran programom *Nauticus 3D Beam*.

U završnoj fazi ovog rada u programu *FEMAP/NASTRAN* finom mrežom pločastih konačnih elemenata izrađeni su odabrani modeli (iz konceptualne faze) te su dodatno analizirani za slučaj distribuiranog opterećenja po čitavoj oplati i za slučaj osovinskog opterećenja. Rezultati odziva svih triju analiza pokazali su određena odstupanja, koja su bila u skladu s očekivanjima. Naime, izlazni rezultati koje je dala analiza finom mrežom (*FEMAP/NASTRAN*) su nešto niži od onih grubim grednim konačnim elementima (*MAESTRO* i *3D Beam*). Ta činjenica pokazuje da su grubi modeli korisni u konceptualnoj fazi zbog same brzine izrade modela, te da daju rezultate na strani sigurnosti. Razlog takvih rezultata je i veća detaljnost modela fine mreže, koljena, lokalna pojačanja sl., što kod modeliranja grubim grednim konačnim elementima nije moguće primijeniti.

Provedenim postupkom došlo se do rješenja za obje palubice kojima je smanjena ukupna masa za 2.1 t (što iznosi 7.5%) u odnosu na prototip. Najveći doprinos smanjenju mase dalo je smanjenje dimenzija ukrepa, kao i smanjenje broja jakih nosača. Time je potvrđena polazna pretpostavaka o dobivanju efikasnijeg projekta uslijed racionalnijeg razmatranja topologije palubice.

LITERATURA

- [1] MacGregor: „Technical information, hoistable decks“; September 2010
- [2] Projektna dokumentacija pomičnih palubica broda Jinling NB 412-413
- [3] DNV Rules for classification of ships, July 2013
- [4] 4110447-Design Approach_130703-AHA-prel
- [5] MCG 4110447 Technical specification rev R2
- [6] Det Norske Veritas: „Nauticus 3D Beam 7.0“; Korisnički priručnik, 2000.
- [7] Loyd`s Register: „Assessment of steel hatch covers using finite element analysis“; July 2007

PRILOZI

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