

Projektiranje konstrukcije pomičnih palubica izrađenih od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela

Šarić, Božidar

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:461654>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Božidar Šarić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Pero Prebeg

Student:

Božidar Šarić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Jerolimu Andriću, te svom mentoru dr. sc. Peri Prebegu, za svu pruženu pomoć, strpljenje, uloženi trud i susretljivost, te stručno vodstvo tijekom izrade ovog rada.

Posebno hvala prof. dr. sc. Borisu Ljubenkovu na nesebičnoj i velikodušnoj podršci za vrijeme mojeg studiranja.

Konačno, neizmjernu zahvalnost želim izraziti svojim roditeljima koji su mi omogućili sve što sam do sada postigao.

Božidar Šarić



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Božidar Šarić** Mat. br.: 0023089976

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJE POMIČNIH PALUBICA IZRAĐENIH OD KOMBINACIJE ČELIČNOG ROŠTILJA I KOMPOZITNIH PANELA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL DESIGN OF LIFTABLE DECKS MADE OF STEEL GRILLAGE AND COMPOSITE PANELS**

Opis zadatka:

Brodovi za prijevoz automobila važan su proizvod hrvatske brodograđevne industrije. U smislu poboljšanja kvalitete projekta (veća nosivost, smanjenje potrošnje goriva, smanjenje mase trupa, itd.) istražuju se razni koncepti koji uključuju i uporabu alternativnih materijala (stakloplastični kompoziti, aluminij, itd.) za izradu konstrukcije trupa i podiznih palubica. Kroz ovaj rad cilj je istražiti i ocijeniti mogućnost primjene novog koncepta podiznih palubica uporabom kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnog sendvič panela (stakloplastika + PVC). Za potrebe izračuna odziva konstrukcije (pomaci i naprezanja) potrebno je koristiti metodu konačnih elemenata (MKE).

Zadatak obuhvaća sljedeće:

- upoznavanje s konstrukcijskim značajkama podiznih palubica brodova za prijevoz automobila
- upoznavanje s pravilima klasifikacijskih društava za projektiranje konstrukcije podiznih palubica
- odabir kriterija za ocjenu kvalitete konstrukcije podiznih palubica
- izradu MKE modela roštilja i MKE modela standardnog panela od orebrenog čeličnog lima
- izradu MKE modela roštilja i MKE modela kompozitnog sendvič panela nekoliko mogućih topološko-geometrijskih varijanti konstrukcije
- promjenu dimenzija svih topološko-geometrijskih varijanti s ciljem zadovoljenja svih kriterija podobnosti konstrukcije roštilja i kompozitnog sendvič panela
- usporednu analizu kriterija kvalitete razmatranih varijanti konstrukcije te usporedbu s klasičnom konstrukcijom kod koje je konstrukcija podiznih palubica u potpunosti izrađena od čelika.

U radu treba navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

3. svibnja 2018.

Datum predaje rada:

5. srpnja 2018.

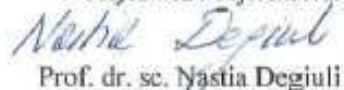
Predvideni datumi obrane:

11., 12. i 13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Peto Prebeg

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Konstrukcijske značajke podiznih palubica brodova za prijevoz vozila	1
1.2. Cilj rada.....	4
2. KRITERIJI ZA PROJEKTIRANJE PODIZNIH PALUBICA.....	6
2.1. Operacijski kriteriji	6
2.2. Pravila i kriteriji klasifikacijskih društava	7
2.2.1. Pravila za projektiranje konstrukcije čeličnih elemenata palubica	7
2.2.1.1. Dozvoljena naprezanja elemenata konstrukcije palubica	7
2.2.1.2. Kontrola izvijanja oplata čelične palubice	8
2.2.2. Pravila za projektiranje konstrukcije kompozitnih panela.....	8
2.3. Opterećenja	10
2.3.1. Opterećenja na roštilj	10
2.3.2. Opterećenja na kompozitne panele	10
2.4. Kriteriji za ocjenu kvalitete konstrukcije	12
3. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE PROTOTIPNIH PALUBICA.....	13
3.1. Analiza projekta	13
3.1.1. Podizna palubica klasične konstrukcije	14
3.1.2. Podizne palubice kompozitne konstrukcije	15
3.1.2.1. Čelični roštilj podizne palubice kompozitne konstrukcije.....	15
3.1.2.2. Kompozitni paneli podizne palubice kompozitne konstrukcije.....	17
4. MODELI ZA PRORAČUN PALUBICE METODOM KONAČNIH ELEMENATA.....	20
4.1. Modeli za proračun palubnog roštilja metodom konačnih elemenata (MKE).....	20
4.1.1. Generiranje mreže konačnih elemenata	20
4.1.2. Rubni uvjeti.....	22
4.1.3. Opterećenja	23
4.1.4. Analiza senzitivnosti mreže konačnih elemenata	24
4.1.5. Rezultati analize modela	26
4.1.5.1. Kontrola dozvoljenih naprezanja i progiba roštilja.....	26
4.1.5.2. Model za analizu izvijanja oplata čelične palubice.....	27
4.2. Modeli za analizu kompozitnih palubica konačnim elementima.....	30
4.2.1. Generiranje mreže konačnih elemenata	30
4.2.2. Rubni uvjeti.....	30
4.2.3. Opterećenja	31
4.2.4. Rezultati	32

5. REPROJEKTIRANJE PODIZNIH PALUBICA	37
5.1. Reprojektiranje palubica izrađenih od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela	37
5.1.1. Reprojektiranje roštilja čelično kompozitnih palubica	37
5.1.2. Reprojektiranje kompozitnih panela	42
5.2. Reprojektiranje čelične palubice	48
5.3. Usporedna analiza kriterija kvalitete razmatranih varijanti konstrukcije	52
5.3.1. Usporedba različitih varijanti palubica izrađenih od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela	52
5.3.2. Usporedba čelično kompozitnih palubica sa klasičnom palubicom u potpunosti izgrađenom od čelika	54
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57
PRILOZI.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1 .	Položaji podizne palubice [2]	1
Slika 2.	Podizne (<i>hoistable</i>) palubice (lijevo) i podizne (<i>liftable</i>) palubice (desno) [2]	2
Slika 3.	Oslonci za podizne palubice [3]	2
Slika 4.	Mobilni škarasti lift [3].....	3
Slika 5.	Konstrukcija podizne palubice čelične izvedbe [7].....	5
Slika 6.	Konstrukcija kompozitne podizne palubice V1 [7].....	5
Slika 7.	Zadano opterećenje od kotača automobila na kompozitnim panelima paluba.....	11
Slika 8.	Slučaj opterećenja LC2 za panele V1 (lijevo) i V2 (desno).....	11
Slika 9.	Slučaj opterećenja LC2 za panele V1 (lijevo) i V2 (desno).....	12
Slika 10.	Podizne palubice na palubi 6 [7]	13
Slika 11.	Kontura podizne palubice 6D183C [7]	13
Slika 12.	Elementi roštilja palubice klasične konstrukcije [7]	14
Slika 13.	Elementi roštilja palubice V1 [7]	15
Slika 14.	Elementi roštilja palubice V2 [7]	16
Slika 15.	dimenzije kompozitnih panela V1 i V2.....	17
Slika 16.	Laminat plan kompozitnih panela [12]	18
Slika 17.	Položaj i dimenzije rupa na panelu V1.....	19
Slika 18.	položaji i dimenzije rupa na panelima V2.....	19
Slika 19.	Gredno - ljuskasti model čelične palube	21
Slika 20.	Gredni model roštilja kompozitne palube V1	22
Slika 21.	Rubni uvjeti na grednom modelu palubice V1.....	22
Slika 22.	Raspodjela vanjskog opterećenja na elemente roštilja V1	24
Slika 23.	Promjena vrijednosti izmjerenih progiba promjenom dimenzija mreže	25
Slika 24.	Ljuskasti model roštilja kompozitne palube V1.....	26
Slika 25.	Model za analizu sa rezultatima naprezanja (u Pa) u smjeru x osi.....	28
Slika 26.	Primjer unošenja podataka u program Buckling-DNV	28
Slika 27.	Reprezentativna polja odabrana za analizu	29
Slika 28.	Način na koji je panel oslonjen na roštilj	31
Slika 29.	Rubni uvjeti na MKE modelu panela V1	31
Slika 30.	Slučaj opterećenja LP1 za panele V1 i V2.....	32
Slika 31.	Slučaj opterećenja LP2 za panele V1 i V2.....	32
Slika 32.	Momenati savijanja (u Nm) prototipa (iznad) i reprojektiranog roštilja (ispod)...	38
Slika 33.	Raspodjela naprezanja (u Pa) u prirubnici nosača prije optimizacije	41
Slika 34.	Raspodjela naprezanja (u Pa) u prirubnici nosača nakon optimizacije.....	41
Slika 35.	Naprezanja (u Pa) u smjeru x-osi u prvom sloju laminata panela V1 prije lokalnog podebljanja	42
Slika 36.	Područje u kojem je postavljeno lokalno podebljanje.....	43
Slika 37.	Naprezanja (u Pa) u smjeru x-osi u prvom sloju laminata panela V1 nakon lokalnog podebljanja	44
Slika 38.	Lokacije na panelu na kojima su postavljene ukrepe protiv izvijanja.....	49
Slika 39.	Naprezanja (u Pa) u smjeru y-osi prije i nakon reprojektiranja	50
Slika 40.	Naprezanja (u Pa) u smjeru x-osi prije i nakon reprojektiranja	51
Slika 41.	Vertikalni pomaci (u m) u kompozitnom panelu V2 sa dva reda rupa	53
Slika 42.	Vertikalni pomaci (u m) u kompozitnom panelu V2 sa tri reda rupa.....	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Izračunate vrijednosti izdržljivosti panela.....	10
Tablica 2. Dimenzije konstrukcijskih elemenata	14
Tablica 3. Svojstva čelika AH36.....	15
Tablica 4. Dimenzije konstrukcijskih elemenata	16
Tablica 5. Dimenzije konstrukcijskih elemenata	17
Tablica 6. Svojstva materijala kompozitnog panela.....	18
Tablica 7. Vrijednosti zadanih vanjskih opterećenja na roštilj palubica.....	23
Tablica 8. Analiza senzitivnosti mreže grednih konačnih elemenata	24
Tablica 9. Usporedba grednog i ljuskastog modela	26
Tablica 10. Rezultati analize prototipnih roštilja	27
Tablica 11. Rezultati analize izvijanja prototipne palubice	29
Tablica 12. Rezultati dobiveni za analizirane izvedbe panela.....	33
Tablica 13. Maksimalna dozvoljena naprezanja	34
Tablica 14. Vrijednosti naprezanja za prototipne kompozitne panele	34
Tablica 15. Ostvareni faktori sigurnosti za prototipne panele.....	35
Tablica 16. Omjer između ostvarenog i zahtjevanog faktora sigurnosti.....	35
Tablica 17. Momenti tromosti glavnih nosača prije i nakon reprojekiranja	38
Tablica 18. Dozvoljeni omjeri dimenzija profila	39
Tablica 19. Dimenzije konstrukcijskih elemenata roštilja V1	40
Tablica 20. Dimenzije konstrukcijskih elemenata roštilja V2	40
Tablica 21. Rezultati analize reprojektiranih roštilja V1 i V2	40
Tablica 22. Vrijednosti naprezanja za reprojektirane kompozitne panele	45
Tablica 23. Ostvareni faktori sigurnosti za reprojektirane panele.....	46
Tablica 24. Razlika između ostvarenog i zahtjevanog faktora sigurnosti.....	47
Tablica 25. Rezultati analize izvijanja reprojektirane palubice	48
Tablica 26. Usporedba izvedbi kompozitnih palubica	52
Tablica 27. Usporedba različitih koncepata podiznih palubica.....	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m^3	Gustoća
ν	-	Poissonov koeficijent
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti
G	N/mm^2	Modul smika
V	%	Volumni udio materijala
σ_x, σ_y	N/mm^2	Normalna naprezanja
τ_{xy}	N/mm^2	Smična naprezanja
σ_e	N/mm^2	Ekvivalentna naprezanja
σ_{ax}	N/mm^2	Normalna tlačna naprezanja uzduž duže stranice polja
σ_{ay}	N/mm^2	Normalna tlačna naprezanja uzduž kraće stranice polja
Ψ_x	-	Omjer između maksimalnog i minimalnog naprezanja uzduž duže stranice polja
Ψ_y	-	Omjer između maksimalnog i minimalnog naprezanja uzduž kraće stranice polja
t	mm	Debljina lima
l	mm	Dužina razmatranog pojasa lima
s	mm	Širina razmatranog pojasa lima
SF	-	Faktor sigurnosti
C	-	Izdržljivost
σ_{brt}	N/mm^2	Normalna vlačna teoretska prekidna naprezanja laminata
σ_{brc}	N/mm^2	Normalna tlačna teoretska prekidna naprezanja laminata
τ_{br}	N/mm^2	Smična teoretska prekidna naprezanja laminata
σ_{1t}, σ_{2t}	N/mm^2	Normalna vlačna naprezanja u kompozitnom panelu
σ_{1c}, σ_{2c}	N/mm^2	Normalna tlačna naprezanja u kompozitnom panelu
$\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$	N/mm^2	Smična naprezanja u kompozitnom panelu
σ_{3c}	N/mm^2	Normalna tlačna naprezanja u jezgri kompozitnog panela
g	m/s^2	Ubrzanje gravitacijskog polja zemlje
a_v	-	Faktor povećanja ubrzanja uslijed dinamičke komponente
BF	mm	Širina prirubnice nosača
TF	mm	Debljina prirubnice nosača
BW	mm	Širina struka nosača
TW	mm	Debljina struka nosača
T_x, T_y, T_z	-	Translacijski stupnjevi slobode konačnog elementa u smjeru koordinatnih osi
R_x, R_y, R_z	-	Rotacijski stupnjevi slobode konačnog elementa oko koordinatnih osi

SAŽETAK

U ovom radu provedena je usporedba konstrukcijskih značajki klasičnog koncepta čeličnih podiznih palubica sa novim konceptom podiznih palubica koje su izrađene od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela. Podizne palubice koriste se na brodovima za prijevoz automobila i vozila (PCTC), te se na njih parkiraju manja osobna vozila. Kompozitni paneli koriste se kao zamjena za lim i ukrepe oplata te preuzimaju lokalna opterećenja od vozila i ne sudjeluju u globalnoj čvrstoći palubice. Usporedba je provedena na zadanom primjeru s obzirom na ukupnu masu pojedine izvedbe podizne palubice. Kako bi se mogle usporediti različite izvedbe podiznih palubica izrađeni su MKE modeli u programskom paketu FEMAP/NX NASTRAN. Kako bi usporedba različitih konceptata podiznih palubica bila konzistentna, dimenzije konstrukcijskih elemenata reprojektirane su kako bi se zadovoljila sva zadana ograničenja/zahtjevi. Pri tome je kod svih konceptata reprojektiranje provedeno s ciljem minimizacije ukupne mase podizne palubice. Na kraju rada dan je usporedni prikaz karakteristika svih varijanti te ocjena racionalnosti primjene novog koncepta podiznih palubica.

Ključne riječi: podizna palubica, brod za prijevoz automobila, kompozitni materijali, metoda konačnih elemenata

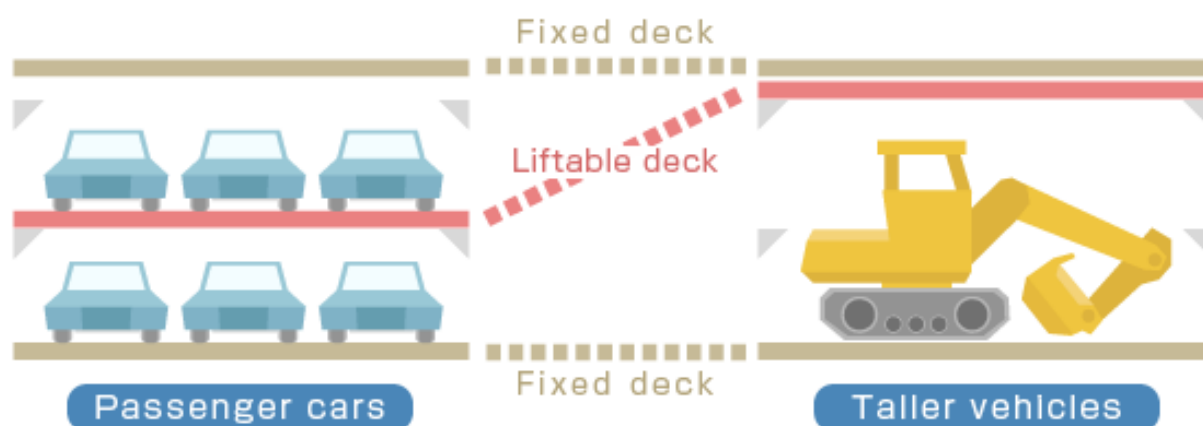
SUMMARY

In this thesis, a comparison of the design features between classical design of liftable decks made of steel and a new concept of liftable decks made of steel grillage and composite panels was conducted. Liftable decks are being used on Pure Car and Truck Carrier (PCTC), as a car deck for smaller passenger cars. Composite panels are used as a replacement for stiffened plate in a classical steel ramp concept. They are loaded only with a local loads from vehicles and do not participate in a global strength of a deck structure. The comparison was carried out on the given example with respect to the total weight of an individual liftable deck. In order to compare the different concepts of liftable decks, FEM models were created in the software package FEMAP/NX NASTRAN. The dimensions of the structural elements were redesigned to meet all given constraints/requirements, in order to compare the different concepts of liftable decks consistently. Minimization of the total weight of liftable deck was used as the objective for the redesign of all liftable deck variants. A comparative overview of the characteristics of all concepts followed by the discussion on the rationality of the application of the new concept of liftable decks has been given at the end of the thesis.

Key words: liftable deck, car carrier ship, composite materials, finite element method

1. UVOD

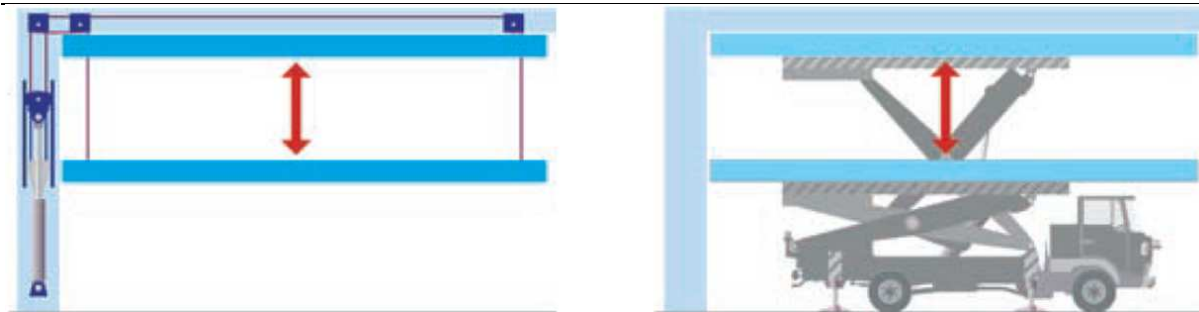
Brodovi za prijevoz automobila (*PCC - Pure Car Carrier*) su brodovi posebno projektirani za prijevoz osobnih automobila. Prvi PCC sagrađen je sredinom 1960-ih godina, a krajem 2000-ih godina oko tristo PCC-a plovilo je na međunarodnim rutama. Opći plan PCC-a optimiziran je za efikasan ukrcaj i iskrcaj automobila, te za maksimizaciju broja ukrcanih automobila. Glavna vrsta tereta su obiteljski osobni automobili srednje veličine. Međutim, sve veća potražnja za višim i težim vozilima poput terenaca i SUV automobila, kao i potreba za prijevozom kamiona, autobusa i bagera dovela je do povećanja potražnje za drugim tipom broda, *PCTC/LCTC (Pure/Large Car Truck Carrier)*. Jedna od važnijih konstrukcijskih značajki PCTC brodova je ta da imaju nekoliko paluba opremljenih podiznim palubicama koje omogućuju smještaj vozila različite visine, promjenom podizne palubice na unaprijed određene visine [1]. Time je omogućeno fleksibilno krcanje tereta (vozila) različitih visina na podiznu palubicu ili palubu ispod nje (Slika 1).



Slika 1. Položaji podizne palubice [2]

1.1. Konstrukcijske značajke podiznih palubica brodova za prijevoz vozila

Podizne palubice su lagane palube ugrađene u trajekte PCTC i Ro-Ro brodove. Postoje tri tipa podiznih paluba i platformi za vozila; podizne (*hoistable*) palubice, podizne (*liftable*) palubice i zakretne (*sidepivoting*) palubice (Slika 2.).



Slika 2. Podizne (*hoistable*) palubice (lijevo) i podizne (*liftable*) palubice (desno) [2]

- podizne (*hoistable*) palubice – ove palubice sastoje se od više odvojenih podiznih panela koji su oslonjeni na čvrste elemente brodske konstrukcije (Slika 3.). Podižu se sajlama koje pokreće hidraulički ili električni pogon, te mogu biti skladištene neposredno ispod palube ispod koje se nalaze.



Slika 3. Oslonci za podizne palubice [3]

- podizne (*liftable*) palubice – ovaj tip palubica nema ugrađeni podizni mehanizam već se podize upotrebom mobilnog škarastog lifta (Slika 4.). Lift se parkira ispod pojedine palubice i podize ju na zahtjevani položaj. U uobičajenom razmještaju s podiznim palubicama u srednjem položaju svjetla visina iznosi 1,7 m iznad i 2,4 m ispod. U donjem položaju svjetle visine su 2,0 m iznad i 2,1 m ispod. Kada nisu potrebne, palubice se skladište u neposrednoj blizini gornje palube i fiksiraju u odloženom položaju uz pomoć polu-automatskih uređaja za fiksiranje.

Razlog odabira između ova dva tipa podiznih palubica obično je vrijeme koje je na raspolaganju za podizanje palubica, pa se tako podizne (*hoistable*) palubice koriste kada je potrebna brza manipulacija palubicama (npr. Ro-Ro i putnički brodovi), a podizne (*liftable*) palubice se kao jeftinije rješenje koriste kod teretnih brodova poput PCTC i PCC [2].

U ovom radu riječ je o podiznim palubicama *liftable* tipa, koje se podižu uz pomoć škarastog lifta. Time je određena jedna konstrukcijska značajka ovih palubica, naime kako bi bile pogodne za prihvat škarastim liftom, nužno je da blizu sredine rampe postoje jaki uzdužni i poprečni elementi, čija udaljenost od osi simetrije treba biti manja od maksimalnih dimenzija podizača škarastog lifta (Slika 4.).



Slika 4. Mobilni škarasti lift [3]

Kako bi se izbjegli preveliki progibi, podizne palubice su obično ograničene na dimenzije od oko 14 m x 14 m. Ako su potrebna dva nivoa podiznih palubica, dimenzije panela mogu biti dodatno ograničene iz razloga jer je ukupni podizni kapacitet mobilnog škarastog lifta oko 40 tona [2].

Podizne palubice trebale bi biti projektirane uzimajući u obzir preciznost izrade, svijetlu visinu nakon podizanja i za vrijeme plovidbe kada je palubica pod opterećenjem, kao i masu palubice [3].

Materijal koji se najčešće koristi pri konstrukciji podiznih palubica je brodograđevni čelik, ali se u posljednje vrijeme iz potrebe za smanjenjem mase i potrošnje goriva brodova razmatraju

i drugi konstrukcijski materijali. Neki od tih materijala su aluminij [4], zatim kompozitne palubice sa panelima izrađenim od kombinacije jezgre od iverice ili balze te stakloplastike [5], kao i kompozitni paneli sa jezgrom izrađenom od umjetnih materijala poput polivinilklorida (PVC) i poliuretana (PUR) [6].

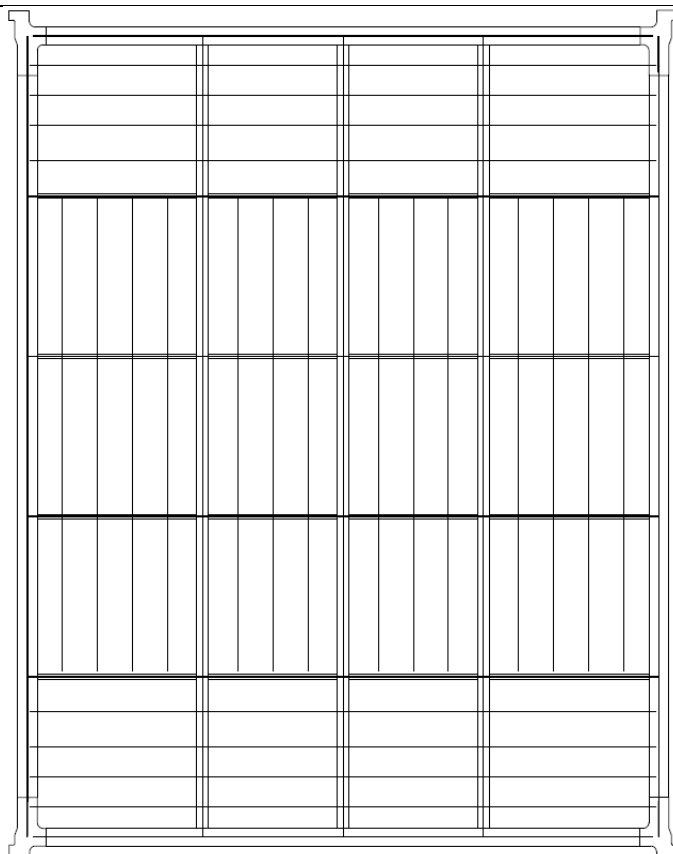
1.2. Cilj rada

Glavni cilj ovog rada je procjena izvedivosti zamjene današnjih konvencionalnih čeličnih podiznih palubica sa alternativnom izvedbom koja upotrebljava kombinaciju čelika i kompozitnih materijala radi smanjenja mase palubica, čime se postiže i snižavanje mase čelične konstrukcije broda, kao i smanjena potreba za krcanjem balasta zbog sniženog težišta broda i poboljšanje značajki stabiliteta broda [6].

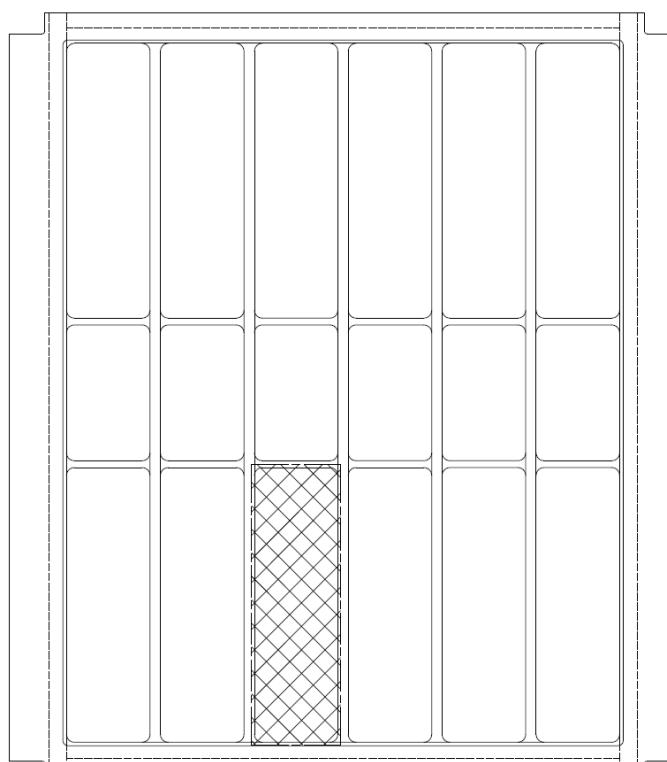
Uspoređene su tri topološko i konstrukcijski različite varijante podiznih palubica, po kriteriju ukupne mase i uspjehu u zadovoljenju projektnih zahtjeva. Topologije sve tri izvedbe palubice (dimenzije palubice, broj i položaj glavnih nosača) zadane su u dogovoru s tvrtkom MacGregor kao poznatim proizvođačem ovakvih tipova palubica [7].

Prva topološko konstrukcijska izvedba je palubica konstruirana kao klasični čelični roštilj sa panelima od orebrenog čeličnog lima (Slika 5.).

Uz čeličnu palubicu usporediti će se i dvije različite topološke varijante novog koncepta podiznih palubica konstruiranih uporabom kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih sendvič panela (Slika 6.). Ove dvije topološke varijante razlikuju se u broju poprečnih nosača u čeličnom roštilju, a time i u dimenzijama kompozitnih panela, te su označene kao kompozitna palubica V1 i kompozitna palubica V2. Kompozitni paneli postavljaju se na čelični roštilj, i zatvaraju otvore na roštilju, te ne sudjeluju u globalnoj čvrstoći palubice, tj. u savijanju roštilja jakih nosača palubice, već samo prenose lokalna opterećenja na čelični roštilj [6].



Slika 5. Konstrukcija podizne palubice čelične izvedbe [7]



Slika 6. Konstrukcija kompozitne podizne palubice V1 [7]

2. KRITERIJI ZA PROJEKTIRANJE PODIZNIH PALUBICA

2.1. Operacijski kriteriji

Prilikom projektiranja palubice mora se zadovoljiti i slijedeći skup kriterija:

- Čelična konstrukcija projektira se po pravilima *DNV-GL Pt.6 Ch.4 Sec.5* [8].
- Kompozitni paneli projektiraju se po pravilima *BV Note NR 546* [9].
- Maksimalna visina konstrukcijskih elemenata palubice, uključujući njen progib, iznosi 473 mm.
- Maksimalni progib rubova palubice iznosi 50 mm (zahtjev za nesmetani prolaz automobila s jedne na drugu palubicu).
- Analizira se samo čvrstoća palubice (kriteriji popuštanja i izvijanja), dok su ostali kriteriji poput zamora i vibracija zanemareni.
- Analiza je ograničena samo na konceptualnu fazu, tako da konstrukcijski detalji nisu uzeti u obzir.
- Projekt rupa za privez automobila (*lashing holes*) preuzet je iz [6], te nije analiziran niti mijenjan.
- Globalna čvrstoća roštilja evaluirana je koristeći jednoliko raspodjeljeno opterećenje, dok je lokalna čvrstoća panela analizirana opterećenjem od kotača vozila.

Korištenje pravila klasifikacijskog društva DNV-GL za projektiranje konstrukcije preporučeno je od strane MacGregora. Iz razloga što su pravila za projektiranje konstrukcijskih elemenata podiznih palubica izrađenih od kompozitnih materijala nisu dana u [8], odlučeno je da će se za analizu kompozita koristiti pravila klasifikacijskog društva BV (*Bureau Veritas*) [9].

Kriterij maksimalne visine palubice postoji iz razloga što se time omogućava postojanje potrebne svijetle visine za krcanje vozila na palubu ispod. Progib koji se uzima u obzir pri određivanju maksimalne visine je onaj dobiven u analizi bez dinamičkih efekata. Razlog tomu je što se smatra da će za vrijeme plovidbe sve palube biti nakrcane te će se progib gornje palube kompenzirati progibom palube ispod, što nije nužno slučaj za vrijeme dok je brod u luci i u njega se krcaju vozila. Kriterij maksimalnog progiba rubova palubice postoji iz razloga jer je važno da se za vrijeme krcanja automobila rub jedne palubice ne progne relativno na rub susjedne palubice kako nebi došlo do zapinjanja i oštećenja automobila. Iz

tog razloga i ovdje je relevantan progib za slučaj opterećenja bez dinamičkih efekata, jer se radi o periodu dok je brod u luci.

2.2. Pravila i kriteriji klasifikacijskih društava

Zahtjevi i pravila klasifikacijskih društava koje je potrebno zadovoljiti pri projektiranju podiznih palubica su [6]:

- Projekt konstrukcijskih elemenata
 - projektiranje konstrukcije čeličnog roštilja
 - projektiranje konstrukcije kompozitnih panela
- Protupožarni sustav i sustav za otkrivanje požara
- Projekt opreme
 - Projektiranje rupa za privez tereta na kompozitnim panelima

U ovom radu razmatran je samo projekt konstrukcije podiznih palubica, protupožarna svojstva materijala su istražena u [6], a projekt rupa za privez tereta također je preuzet iz [6].

2.2.1. Pravila za projektiranje konstrukcije čeličnih elemenata palubica

2.2.1.1. Dozvoljena naprezanja elemenata konstrukcije palubica

Maksimalna dozvoljena naprezanja čeličnog roštilja za kompozitne palubice V1 i V2, kao i maksimalna dozvoljena naprezanja svih konstrukcijskih elemenata potpuno čelične palubice određena su prema *DNV-GL Pt.6 Ch.4 Sec.5* [8]. Prema ovim pravilima mogu se dimenzionirati samo palubice izrađene od čelika ili aluminija, a za projektiranje kompozitnih panela korištena su pravila *BV Note NR 546* [9].

Dozvoljena naprezanja u elementima konstrukcije, za korišteni čelik AH36, iznose:

- Normalna naprezanja (vlačna, tlačna): $\sigma = 0,85 \cdot R_{eH} = 302 \text{ N/mm}^2$
- Smična naprezanja: $\tau = 0,85 \cdot \tau_{eH} = 174 \text{ N/mm}^2$
- Ekvivalentna naprezanja: $\sigma_e = 0,9 \cdot R_{eH} = 320 \text{ N/mm}^2$

gdje je:

R_{eH} = zadana minimalna granica razvlačenja, u N/mm^2

τ_{eH} = zadana minimalna smična granica razvlačenja, u N/mm^2 . [8]

Izvijanje je potrebno provjeriti prema DNV [10].

2.2.1.2. Kontrola izvijanja oplata čelične palubice

Osim na popuštanje, lim oplata čelične palubice potrebno je provjeriti i na kriterij izvijanja. Kontrola izvijanja palubice provodi se prema pravilima klasifikacijskog društva DNV [10]. Slučaj opterećenja koji je relevantan za provjeru izvijanja je LC2. Kontrola se provodi za biaksialno izvijanje polja oplata između konstrukcijskih elemenata (nosača i uzdušnjaka). Formula po kojoj se provjerava biaksialno izvijanje glasi:

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

Potrebni ulazni podaci, osim svojstava materijala, su naprezanja u smjeru duže stranice polja σ_{ax} , naprezanje u smjeru kraće stranice polja σ_{ay} , te posmično naprezanje τ_{xy} . Također je potrebno za pojedino polje zadati debljinu lima t , duljinu kraće stranice s , duljinu duže stranice l , te omjer između maksimalnog i minimalnog naprezanja u polju za smjer x i y , ψ_x i ψ_y .

2.2.2. Pravila za projektiranje konstrukcije kompozitnih panela

Da bi se stvarna naprezanja usporedila sa onim teoretskim, potrebno je izračunati omjere teoretskih i stvarnih naprezanja, tj. faktore sigurnosti SF (*safety factor*), i umnoške parcijalnih faktora sigurnosti, odnosno izdržljivost C (*capability*) [11].

Da bi konstrukcija zadovoljila zahtjeve, mora biti općenito:

$$SF \geq C$$

i to u dva slučaja:

1. Glavna naprezanja, gdje su:

$$C = C_V \cdot C_R \cdot C_F \cdot C_I \quad (2)$$

$$SF = \frac{\sigma_{br}}{\sigma}$$

$$SF = \frac{\tau_{br}}{\tau}$$

2. Kombinirana naprezanja, gdje su:

$$C(CS) = C_V \cdot C_{CS} \cdot C_F \cdot C_I \quad (3)$$

$$SF(CS) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2a}$$

pri čemu su:

$$a = \frac{\sigma_1^2}{|\sigma_{brc1} \cdot \sigma_{brt1}|} + \frac{\sigma_2^2}{|\sigma_{brc2} \cdot \sigma_{brt2}|} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{|\sigma_{brc1} \cdot \sigma_{brt1}|} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{br12}^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sigma_1 \cdot (|\sigma_{brc1}| - |\sigma_{brt1}|)}{|\sigma_{brc1} \cdot \sigma_{brt1}|} + \frac{\sigma_2 \cdot (|\sigma_{brc2}| - |\sigma_{brt2}|)}{|\sigma_{brc2} \cdot \sigma_{brt2}|} \quad (5)$$

Za oba slučaja parcijalni faktori sigurnosti su [13]:

C_V - koeficijent koji uzima u obzir efekt starenja kompozitnog materijala. Jednak je:

- 1,2 za laminat,
- 1,1 za jezgru.

C_F - koeficijent koji uzima u obzir efekt procesa proizvodnje sendvič panela. Direktno je povezan sa mehaničkim svojstvima materijala i uzima se:

- 1,3 za za infuzijsko-vakuumski proces proizvodnje.

C_R - koeficijent koji uzima u obzir tip naprezanja u vlaknima i jezgri panela. Uzima se:

- 2,6 za laminat kod normalnih tlačnih/vlačnih naprezanja koja su paralelna sa ravninom vlakana,
- 2,0 za laminat kod smičnih naprezanja koja su paralelna sa ravninom vlakana,
- 2,0 za jezgru kod normalnih tlačnih/vlačnih naprezanja,
- 2,5 za jezgru kod smičnih naprezanja.

Budući da se parcijalni koeficijent C_R uzima s obzirom na naprezanje koje je prisutno u konstrukciji, izdržljivost C se računa za svaki tip naprezanja koje je prisutno u razmatranoj konstrukciji, što je vidljivo u tablici 1.

C_I - koeficijent koji uzima u obzir tip opterećenja. Jednak je:

- 1,0 za hidrodinamičko opterećenje mora (tlak) i koncentrirane sile.

C_{CS} - koeficijent za kombinirana naprezanja, ovisno o načinu proračuna. Uzima se:

- 1,6 za proračun metodom konačnih elemenata.

Tablica 1. Izračunate vrijednosti izdržljivosti panela

	JEZGRA	LAMINAT
C(CS)	1.76	2.5
C(σ_1)	2.2	4.06
C(σ_2)	2.2	4.06
C(τ_{12})	2.75	3.12
C(τ_{13})	2.75	3.12
C(τ_{23})	2.75	3.12

2.3. Opterećenja

Dimenzije konstrukcijskih elemenata trebale bi biti određene na temelju kritičnog opterećenja s obzirom na momente savijanja i smične sile, kao i najveće dozvoljene progibe konstrukcije.

2.3.1. Opterećenja na roštilj

Kao opterećenje na roštiljnu konstrukciju zadaje se tlak jednoliko raspodijeljen po gornjoj površini palubice. Jednoliko raspodijeljeno opterećenje od tereta najčešće je zadano od strane naručitelja, te je u ovom radu korištena vrijednost od 300 kg/m^2 , a prema pravilima DNV-a ono ne smije biti manje od 250 kg/m^2 . Ukupno opterećenje sastoji se od jednoliko raspodijeljenog opterećenja i vlastite mase konstrukcije palubice. To opterećenje kod određivanja naprezanja potrebno je uvećati za iznos maksimalnih vertikalnih ubrzanja broda na položaju na kojemu se nalazi palubica, a_v . To ubrzanje je također zadano od strane tvrtke MacGregor kao ulazni podatak i iznosi $1,46 \cdot g$. Naravno vertikalno ubrzanje je moguće odrediti ovisno o poziciji palubice duž broda i prema Pravilima.

Za dimenzioniranje konstrukcije roštilja relevantna su dva slučaja opterećenja:

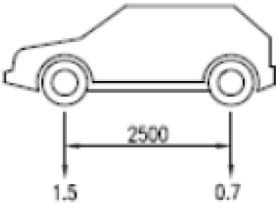
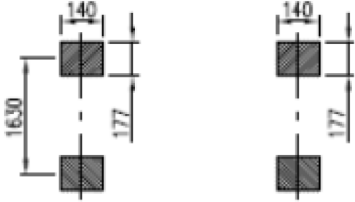
1. Opterećenje za vrijeme boravka broda u luci, LC1
2. Opterećenje za vrijeme plovidbe broda, LC2

Slučaj opterećenja LC1 mjerodavan je za određivanje progiba palubice, dok se po slučaju opterećenja LC2 određuju maksimalna naprezanja u roštiljima palubica te kontrolira izvijanje za varijantu s čeličnom oplatom.

2.3.2. Opterećenja na kompozitne panele

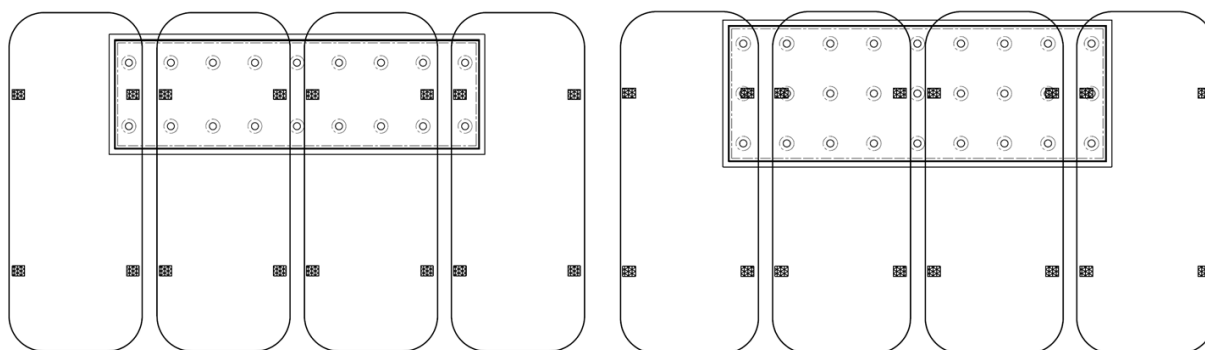
Kompozitni paneli opterećeni su osovinskim opterećenjem vozila uslijed lokalnog pritiska kotača na površinu panela. Ovaj tip opterećenja moguće je na kompozitni panel zadati

isključivo preko direktnog proračuna, jer Pravila pokrivaju opterećenje kotača samo na ukrepljene panele. Kako konkretne vrijednosti opterećenja kotača nisu zadane od strane tvrtke MacGregor, kao zadano opterećenje preuzeto je dopušteno projektno opterećenje vozila iz [12]. Opterećenje se modelira simulirajući najnepovoljniji slučaj krcanja automobila zadanih dimenzija i osovinskih opterećenja (Slika 7.), na kompozitni panel.

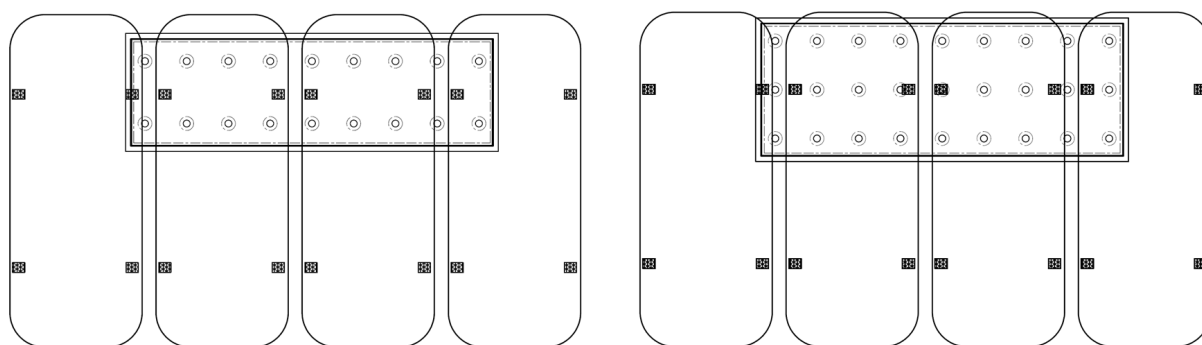
NAME	LOAD AT	AXLE LOAD (t)	TYRE PRINT (mm)
PRIVATE CAR	SEA	<p>L=4.8 m B=1.9 m</p> 	

Slika 7. Zadano opterećenje od kotača automobila na kompozitnim panelima paluba

Kao dva najrepresentativnija slučaja opterećenja na kompozitni panel odabrani su LP1 i LP2. U oba slučaja vozila su težom, prednjom osovinom oslonjena na polovici širine kompozitnog panela. Razmak između dva susjedna vozila iznosi 200 mm, što je u pravilu najmanji razmak na koji se parkiraju vozila u PCC. Za razliku od slučajeva opterećenja u [12], ovdje nisu analizirani slučajevi kada su vozila parkirana uzduž duže stranice panela, iz jednostavnog razloga što su svi paneli na palubicama orjentirani na način da im se kraća stranica poklapa sa x -osi broda, a vozila se u PCC parkiraju isključivo uzduž x -osi broda. Dva odabrana slučaja opterećenja razlikuju se samo po tome što su u slučaju opterećenja LP1 automobili parkirani simetrično s obzirom na y -os panela (Slika 8.), dok su u slučaju opterećenja LP2 automobili parkirani na način da kotač prvog automobila pada na rub kompozitnog panela (Slika 9.).



Slika 8. Slučaj opterećenja LC2 za panele V1 (lijevo) i V2 (desno)



Slika 9. Slučaj opterećenja LC2 za panele V1 (lijevo) i V2 (desno)

2.4. Kriteriji za ocjenu kvalitete konstrukcije

Kao najvažniji kriteriji za ocjenu kvalitete konstrukcije podiznih palubica, osim prethodno navedenih operacijskih kriterija koje palubice moraju zadovoljiti, u pravilu se koriste cijena i ukupna masa konstrukcije palubice. Cijenu palubice određuju cijena materijala i cijena proizvodnje palubice, čime je određeno potrebno vrijeme za povrat investicije. Ostali kriteriji mogu biti jednostavno rukovanje teretom, koje je određeno brojem rupa za privez automobila, te mali rizik od oštećenja palubice pri korištenju. Posebni kriteriji koji se ponekad mogu razmatrati su ekološka prihvatljivost proizvoda, kao i jednostavno rukovanje podiznom palubicom [4].

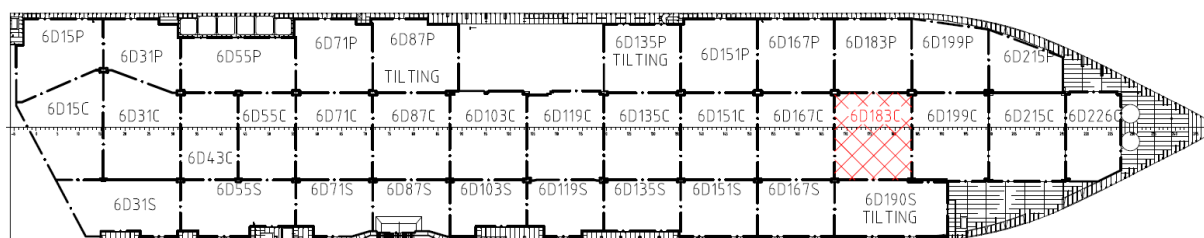
Kao kriterij za ocjenu kvalitete konstrukcije podiznih palubica u ovom radu odabrana je ukupna masa jedne podizne palubice. Masa palubice posebno je važan kriterij iz razloga što se smanjenjem mase palubice postiže smanjenje ukupne mase broda kao i snižavanje težišta broda čime se postižu dodatne uštede u proizvodnji i eksploataciji broda (smanjena masa konstrukcije broda, smanjena potreba za krcanjem balasta, niža potrošnja goriva).

Cijena palubice nije korištena kao kriterij za ocjenu kvalitete konstrukcije zbog problema nedostupnosti podataka o cijenama pojedinih materijala (jezgre kompozita, staklenih vlakana), kao i posebno problematičnog određivanja cijene izrade jednog kompozitnog panela.

3. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE PROTOTIPNIH PALUBICA

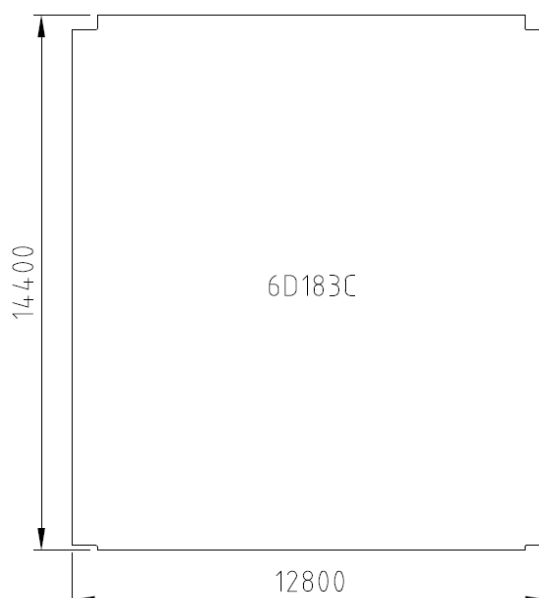
3.1. Analiza projekta

Za brod koji se razmatra u ovom projektu nisu dostupne osnovne značajke, ali se iz dobivenih nacрта može se vidjeti da je riječ o PCTC brodu sa dva reda upora po dužini broda. Na tim uporama, kao i na rebrima po boku broda, nalaze se fiksni oslonci čvrsto vezani za konstrukciju broda, na koje se oslanjaju podizne palubice. Paluba 6, koja se razmatra u ovom radu, sastavljena je od 36 podiznih palubica, a za proračun konstrukcije odabrana je palubica 6D18C, kao što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Podizne palubice na palubi 6 [7]

Razmatrana podizna palubica ima dimenzije 12 800 mm duž x osi i 14 400 mm duž y osi (Slika 11.).

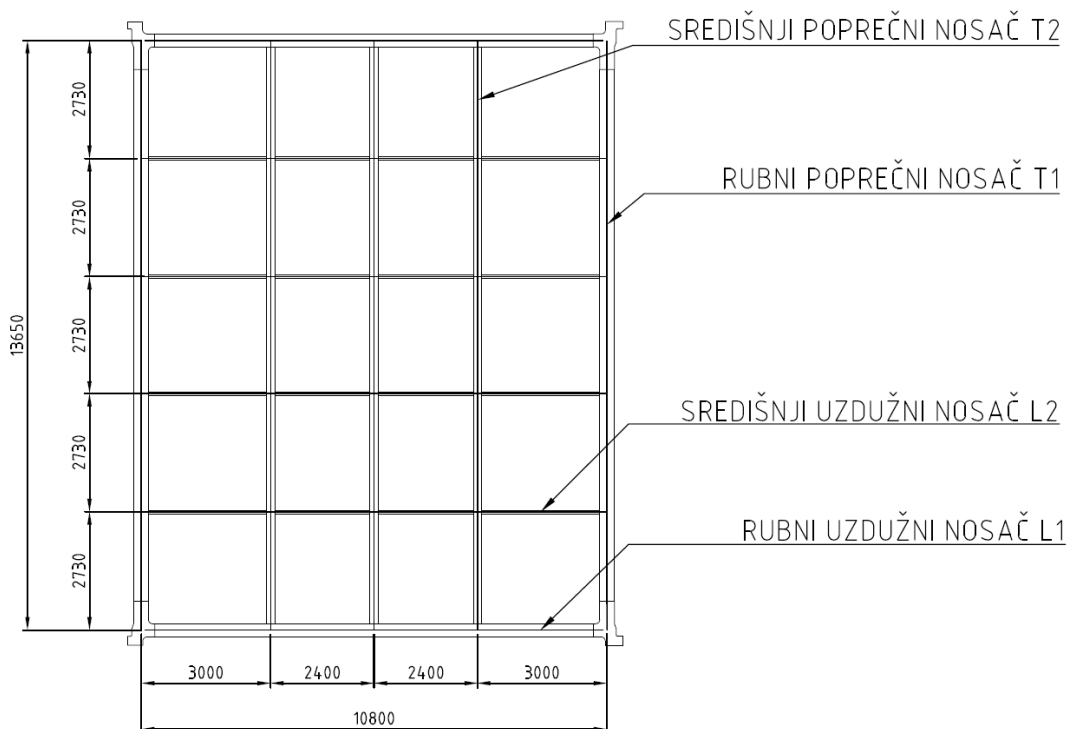


Slika 11. Kontura podizne palubice 6D183C [7]

Konstruktivske značajke za tri različite topološko-geometrijske varijante palubice dane su od strane tvrtke MacGregor [7].

3.1.1. Podizna palubica klasične konstrukcije

Konstrukcija palubice u potpunosti izrađene od čelika sastoji se od 6 uzdužnih i 5 poprečnih greda. Konstrukcija je simetrična oko x i y osi, a korištena su ukupno četiri različita tipa T profila, postavljenih kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Elementi roštilja palubice klasične konstrukcije [7]

Dimenzije konstrukcijskih elemenata dobivene su od strane tvrtke MacGregor, a prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Dimenzije konstrukcijskih elemenata

Element	Dimenzije (mm) HWxTW + BFxTF	Tip
Oplata	6	lim
L1	379x6 + 300x15	T profil
L2	379x6 + 80x15	T profil
T1	379x6 + 340x15	T profil
T2	379x6 + 200x15	T profil
Ukrepe	100x6	Bulb profil

Lim je orebren sa bulb profilima postavljenima na način prikazan na slici 5. Materijal korišten za konstrukciju je čelik povišene čvrstoće AH36, svojstava prikazanih u tablici 3.

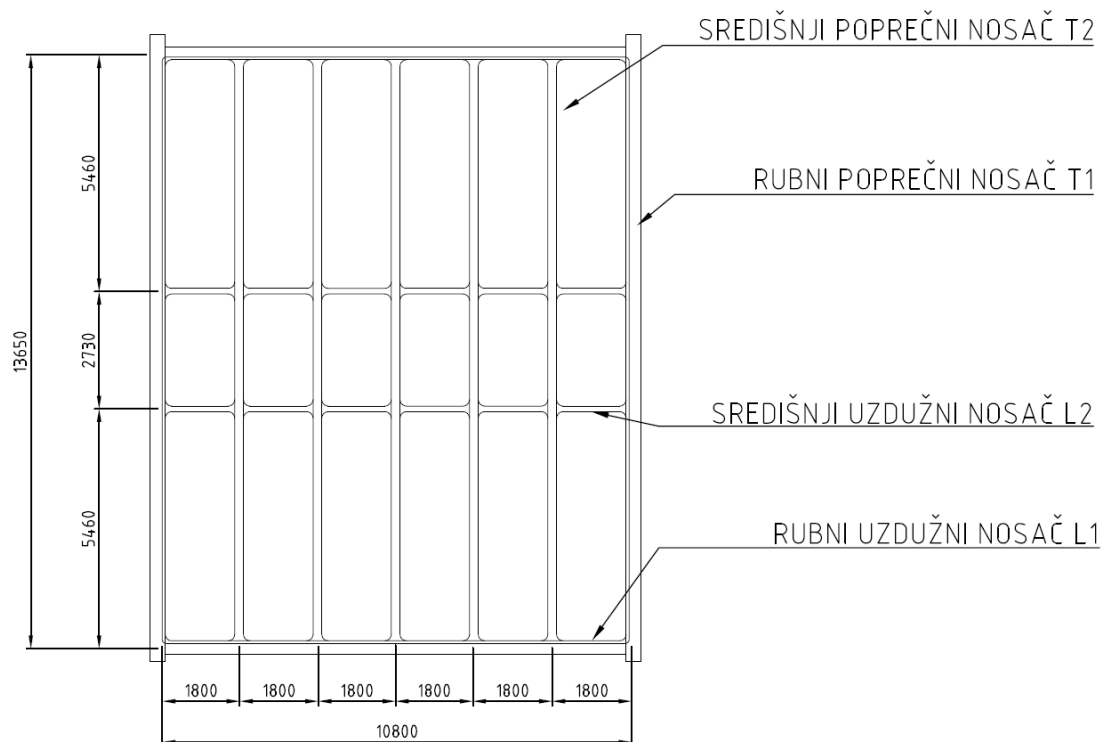
Tablica 3. Svojstva čelika AH36

Gustoća	7850	kg/m ³
Modul elastičnosti	210	GPa
Poissonov omjer	0.3	
Granica razvlačenja	355	MPa

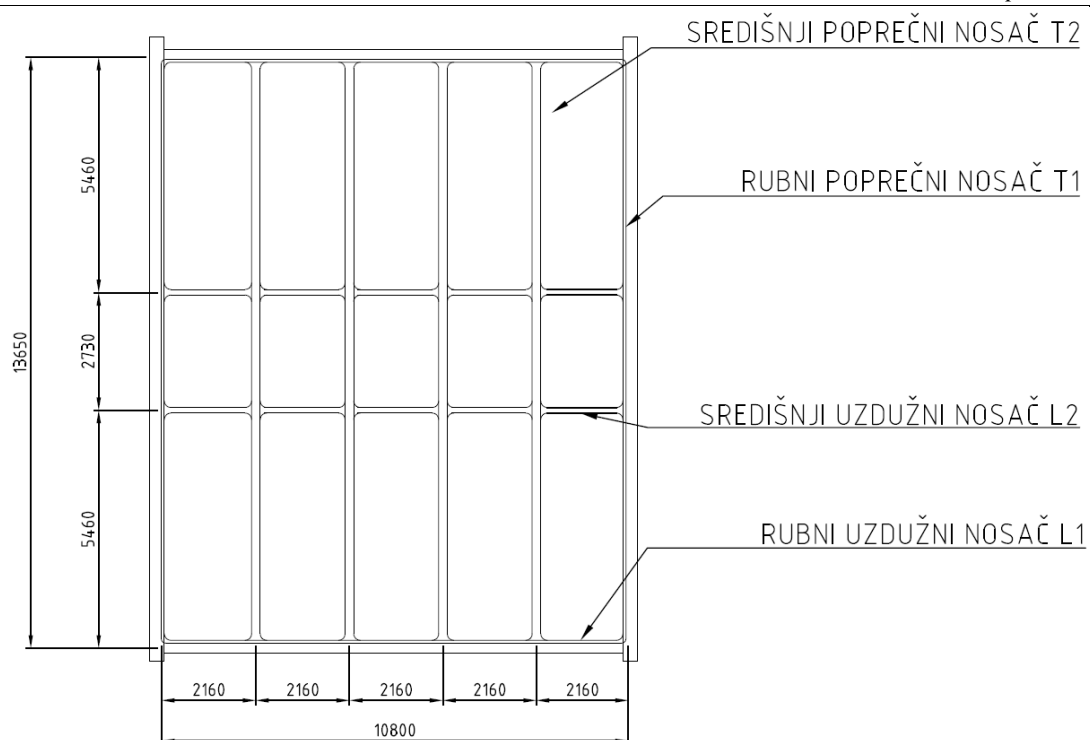
3.1.2. Podizne palubice kompozitne konstrukcije

3.1.2.1. Čelični roštilj podizne palubice kompozitne konstrukcije

Roštilj ovih palubica projektiran je na način da se na njega mogu postaviti kompozitni sendvič paneli. Brojem središnjih poprečnih nosača određena je širina panela, dok se dva središnja uzdužna nosača moraju postaviti na zadanim položajima iz razloga da se omogući prihvat i podizanje palubice uz pomoć škarastog lifta. Time je uvelike ograničena sloboda u izboru dimenzija kompozitnog panela, te jedina varijabla koja se može mijenjati ostaje širina kompozitnog panela, tj. broj središnjih poprečnih nosača. Elementi roštilja V1 prikazani su na slici 13., a elementi roštilja V2 na slici 14.



Slika 13. Elementi roštilja palubice V1 [7]



Slika 14. Elementi roštilja palubice V2 [7]

Dimenzije konstrukcijskih elemenata roštilja zadane su od strane tvrtke MacGregor te su navedene u tablici 4. i tablici 5.

Tablica 4 Dimenzije konstrukcijskih elemenata

KOMPOZITNA PALUBICA V1		
Element	Dimenzije (mm) BFxTF + HWxTW + BFxTF	Tip
L1	300x15 + 364x6 + 300x15	I profil
L2	130x15 + 364x6 + 80x15	I profil
T1	340x15 + 364x6 + 340x20	I profil
T2	200x15 + 364x6 + 200x15	I profil

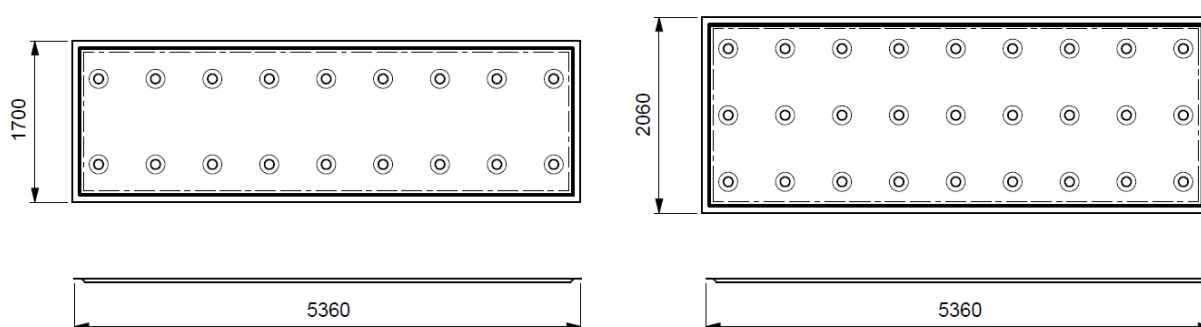
Tablica 5. Dimenzije konstrukcijskih elemenata

KOMPOZITNA PALUBICA V2		
Element	Dimenzije (mm)	
	BFxTF + HWxTW + BFxTF	
L1	300x15 + 364x6 + 300x15	
L2	130x15 + 364x6 + 80x15	
T1	340x15 + 364x6 + 340x20	
T2	200x15 + 364x6 + 200x15	

Materijal od kojeg je izrađen roštilj je čelik povišene čvrstoće AH36, sa svojstvima prikazanima u tablici 3.

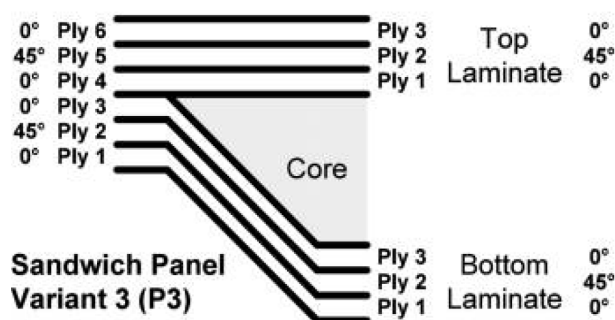
3.1.2.2. Kompozitni paneli podizne palubice kompozitne konstrukcije

Dužina i širina kompozitnog panela određene su dimenzijama roštilja (Slika 15.). Konstrukcija sendvič panela preuzeta je iz [12]. Sendvič panel, načinjen je od dviju kora (gornje i donje prirubnice), koje su sastavljene od 3 sloja laminata, svaki debljine 1 mm, sa ojačanjem - vlaknima od stakloplastike (tip E-staklo) i matricom od poliesterske smole. Između kora nalazi se jezgra od polivinilklorida (PVC-a), debljine 40 mm. Sveukupno panel ima 7 slojeva.



Slika 15. dimenzije kompozitnih panela V1 i V2

Orijentacije laminata su preuzete iz [12] (Slika 16.). U ovom radu ojačanje je načinjeno od križanih vlakana (*woven rovings*), u kojem su vlakna međusobno isprepletana u dva okomita pravca. To znači da orijentacija vlakana 0° označava da su vlakna jednog sloja laminata orijentirana uzduž x i y osi, a vlakna orijentacije 45° su zakrenuta za 45° u odnosu na osi x i y .



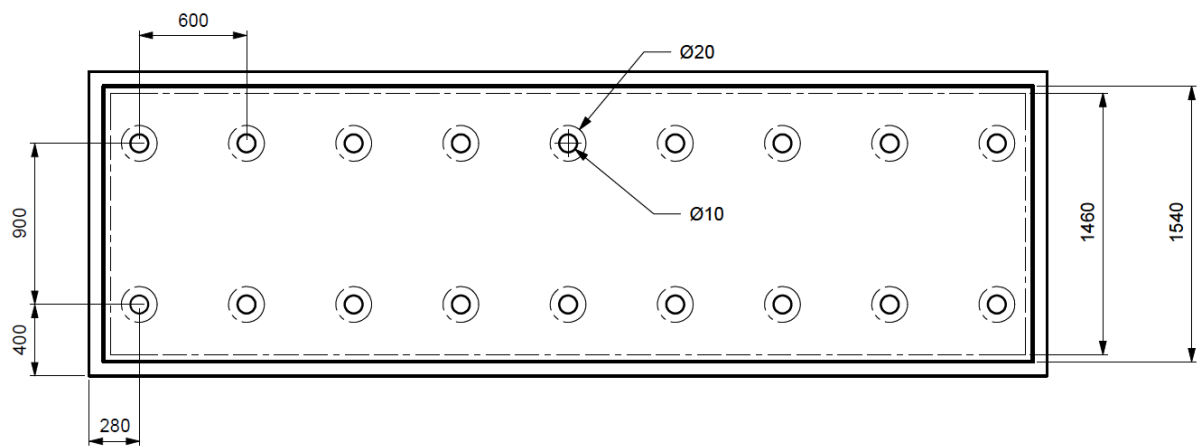
Slika 16. Laminat plan kompozitnih panela [12]

Tehnologija gradnje ovih panela je vakumska infuzija. Udio vlakana u odnosu na udio smole važna konstrukcijska značajka panela, jer su time određena mehanička svojstva materijala. Prema podacima iz [6], ostvareni udio vlakana iznosio je $V_f = 74,2\%$, te je ta vrijednost korištena u ovom radu. U ovom radu promatrao se sendvič panel izrađen od izotropne jezgre, od polivinilklorida, gustoće 100 kg/m^3 (PVC100). Svojstva materijala preuzeta su iz [9,11] te su prikazana u tablici 6.

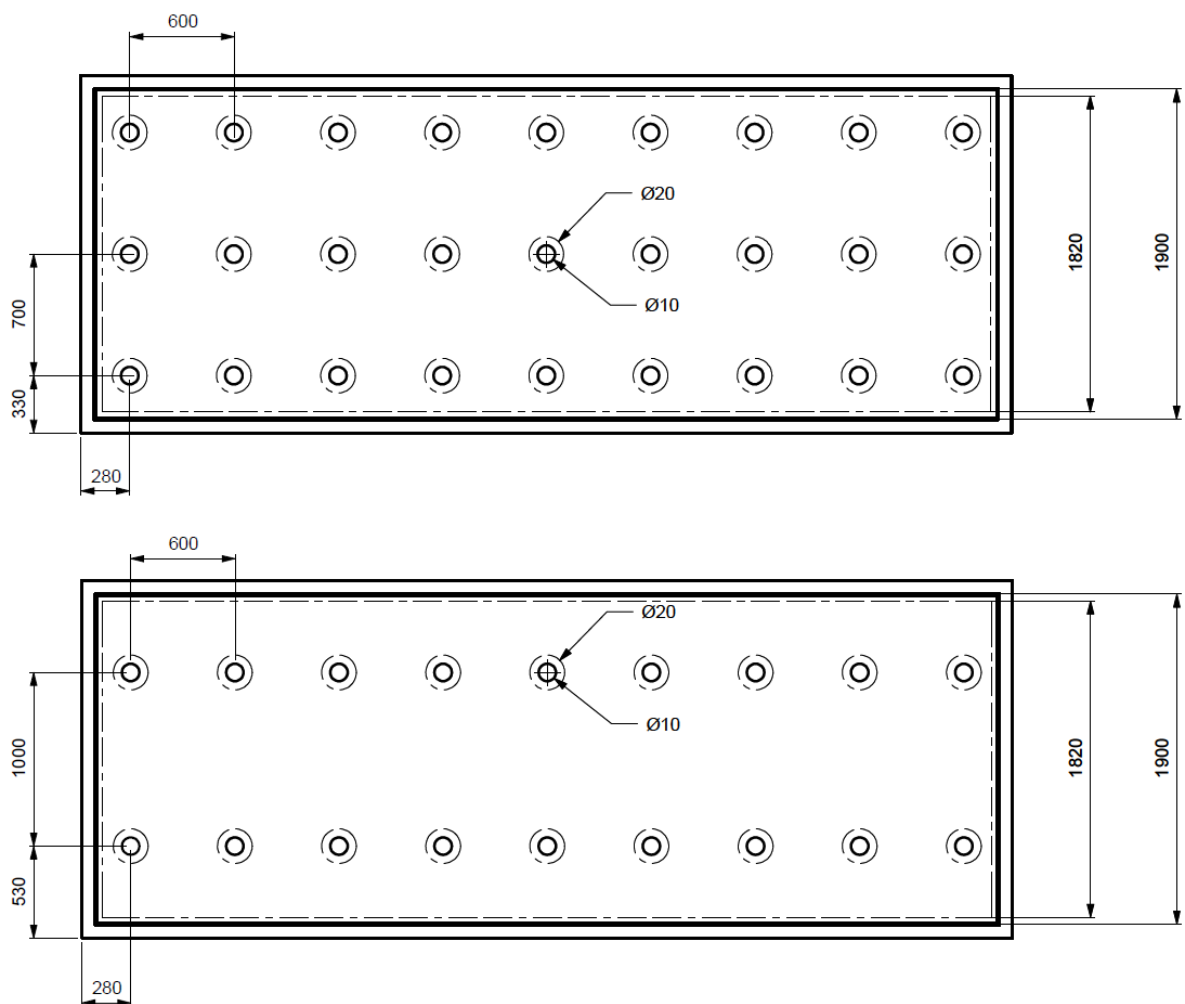
Tablica 6. Svojstva materijala kompozitnog panela

LAMINAT		JEZGRA	
E-staklena vlakna	Poliesterska smola	PVC pjena	
$\rho_f = 2570$	$\rho_r = 1200$	$\rho = 100$	kg/m^3
$v_f = 0.238$	$v_r = 0.38$	$v = 0.3$	
$E_f = 73100$	$E_r = 3550$	$E = 95$	MPa
$G_f = 30000$	$G_r = 1350$	$G = 36.5$	MPa
$V_f = 74.2$	$V_r = 25.8$	-	%

Važan detalj konstrukcije kompozitnog panela su rupe za privezivanje automobila. Kako u projektom zahtjevu nisu izričito definirani broj i razmaci rupa za privez, na panelu V1 broj i razmještaj rupa projektiran je prema Uljanikovom panelu [6], iz razloga što su dimenzije panela (Slika 17.) vrlo slične Uljanikovom. Kako panel V2 ima veću širinu od panela V1, postavljanje 2 reda rupa po širini panela dovodi do 17% manje rupa na jednom roštilju, a postavljanje 3 reda rupa po širini panela dovodi do 25% više rupa po panelu. Stoga su modelirane dvije verzije panela, sa 2 i sa 3 reda rupa (Slika 18.).



Slika 17. Položaj i dimenzije rupa na panelu V1



Slika 18. položaji i dimenzije rupa na panelima V2

4. MODELI ZA PRORAČUN PALUBICE METODOM KONAČNIH ELEMENATA

4.1. Modeli za proračun palubnog roštilja metodom konačnih elemenata (MKE)

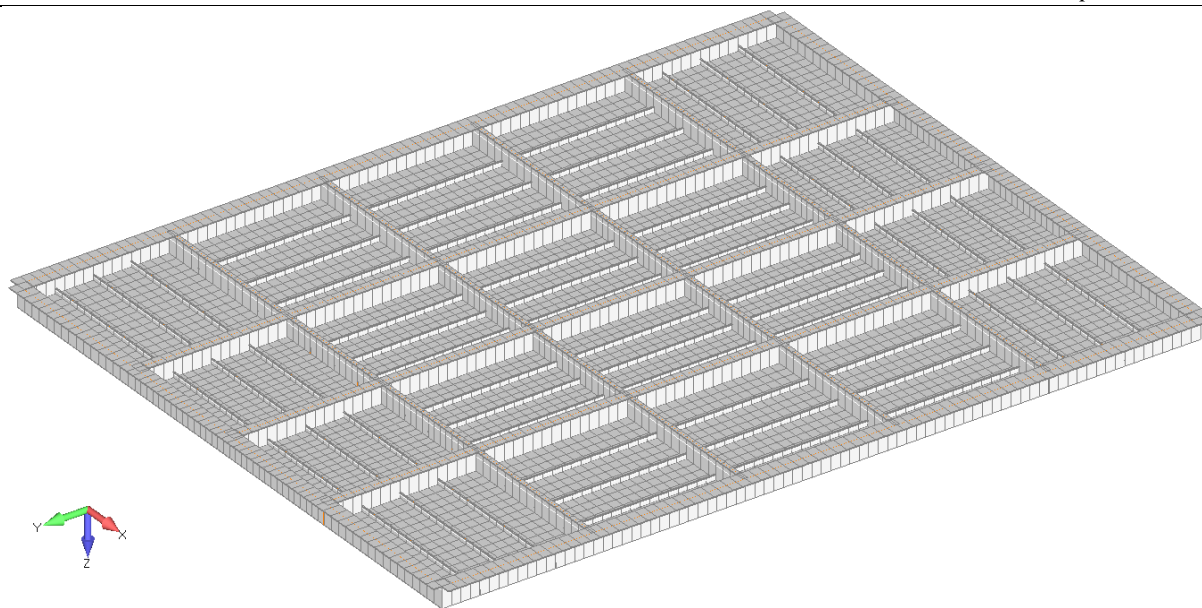
Za početnu usporedbu različitih konceptualnih izvedbi izrađena su tri MKE modela u programskom paketu Siemens NX/FEMAP:

1. Gredno - ljuskasti model čelične palube.
2. Gredni model roštilja kompozitne palube V1.
3. Gredni model roštilja kompozitne palube V2.

Modeli su generirani prema nacrtima dobivenima iz predloška dostavljenog od strane tvrtke MacGregor. Gredni modeli korišteni su iz razloga što je u programskom paketu NX/FEMAP generiranje ovih modela puno brže i jednostavnije nego generiranje ljuskastih modela, posebice ukoliko je potrebno varirati geometrijske karakteristike nosača. U slučaju korištenja ljuskastih modela tada je najčešće potrebno izraditi potpuno novi model, dok je u grednom modelu dovoljno promijeniti dimenzije u svojstvima odabrane grede. Razlog korištenja kombinacije grednih i ljuskastih elemenata u izradi modela čelične palube, umjesto samo grednih, je taj jer se time izbjegava dodatan proračun ekvivalentnih dimenzija greda roštilja (zbog dodatnih ukrepa i sunosive širine gornjeg pojasa), uz minimalan dodatan utrošak vremena za generiranje i proračun modela.

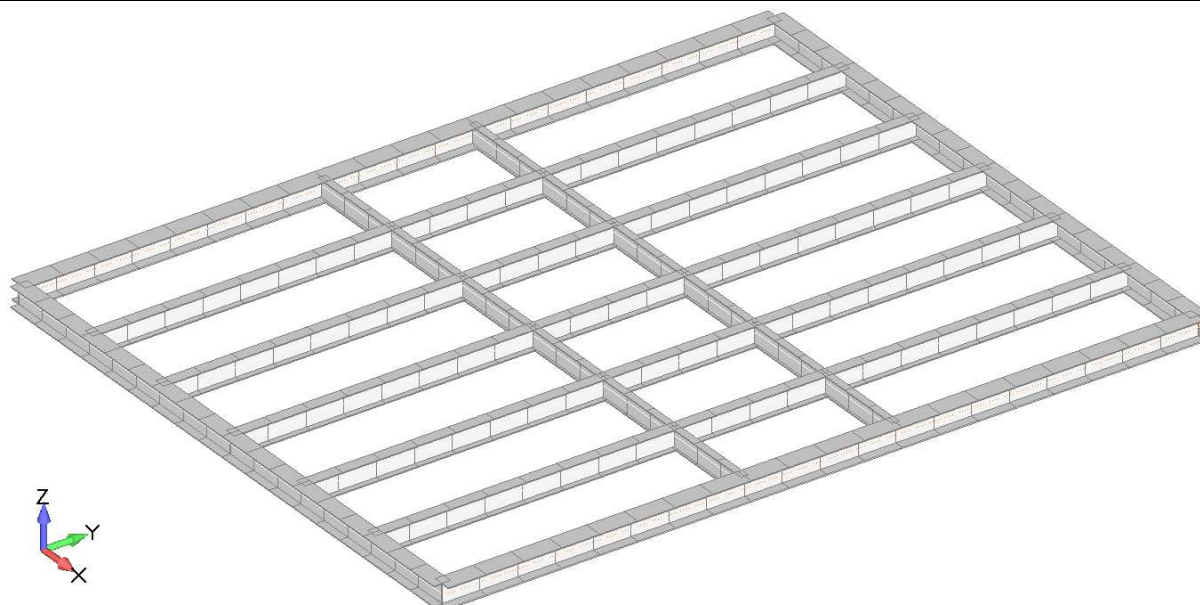
4.1.1. Generiranje mreže konačnih elemenata

Gredno ljuskasti model čelične palube (Slika 19.) generiran je na način da su nosači i ukrepe modelirani sa 1872 1D gredna konačna elementa zadanog poprečnog presjeka, a oplata je modelirana sa 5120 2D ljuskastih konačnih elemenata zadane debljine. Dimenzije grednih elemenata ovisile su o rasponu između nosača, te je svaki gredni element imao duljinu 1/16 raspona između dviju greda koje spaja. To znači da su svi gredni elementi bili između 170 mm i 190 mm duljine, te su dimenzije ljuskastih konačnih elemenata u pravilu iznosile između 170 x 170 mm i 190 x 190 mm.



Slika 19. Gredno - ljuskasti model čelične palube

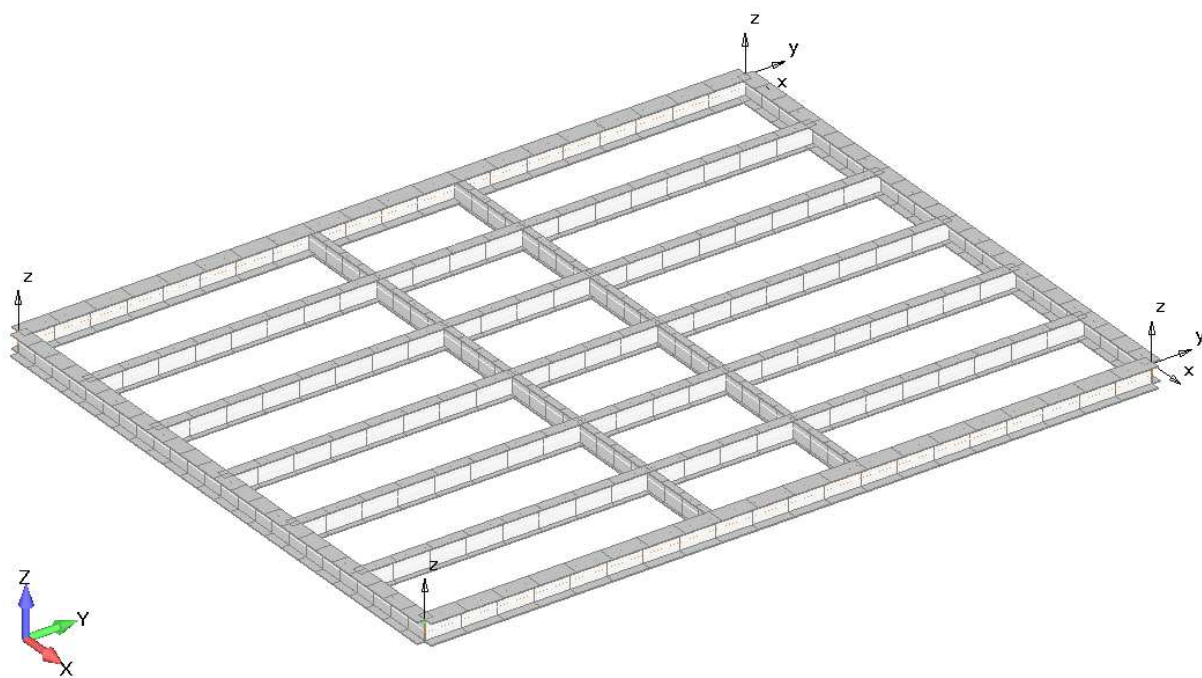
Gredni modeli roštilja kompozitne palube V1 i V2 modelirani su na način da su nosači modelirani kao 1D gredni konačni elementi čija je duljina bila jednaka rasponu između dva urkižana elementa. Time je duljina elemenata bila različita, ali je broj elemenata između pojedinih ukrižanih čvorova bio konstantan. Takav jednostavni model imao je samo 29 elemenata u slučaju V1 i 24 elementa u slučaju V2. Dimenzije na taj način modeliranih uzdužnih grednih elemenata (L_1 , L_2) iznosile su između 1800 mm za V1 i 2160 mm za V2, a poprečnih (T_1 , T_2) iznosile su između 2730 mm i 5460 mm. Za ovako modeliranu mrežu konačnih elemenata provedena je i analiza senzitivnosti mreže i to na način da je u svakom slijedećem koraku prepolovljena duljina svih grednih konačnih elemenata. Na taj način određene su dimenzije grednih elemenata koje će se koristiti u daljnjim proračunima. Za verifikaciju rezultata grednih modela također je izrađen i fini model roštilja kompozitne palube V1 isključivo sa ljuskastim konačnim elementima (Slika 24).



Slika 20. Gredni model roštilja kompozitne palube V1

4.1.2. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti simulirali su roštilj oslonjen na četiri oslonca za podizne palubice, te su stoga u četiri rubna čvora svakog modela fiksirani pomaci u vertikalnom smjeru (T_z). Također, kako bi se izbjegao pomak rampe kao krutog tijela, u dva ruba rampe spriječen je pomak u smjeru x i y osi (T_x i T_y). Na ovaj način je istodobno spriječena i rotacija rampe oko z osi (Slika 21.).



Slika 21. Rubni uvjeti na grednom modelu palubice V1

4.1.3. Opterećenja

Za analizu modela roštiljne konstrukcije palubice korištena su dva slučaja opterećenja:

- Slučaj opterećenja 1 (LC1): jednoliko raspodijeljeno opterećenje od 300 kg/m^2 + vlastita masa palubice
- Slučaj opterećenja 2 (LC2): jednoliko raspodijeljeno opterećenje od 300 kg/m^2 + vlastita masa palubice + dinamička komponenta uslijed ubrzanja broda na valovima

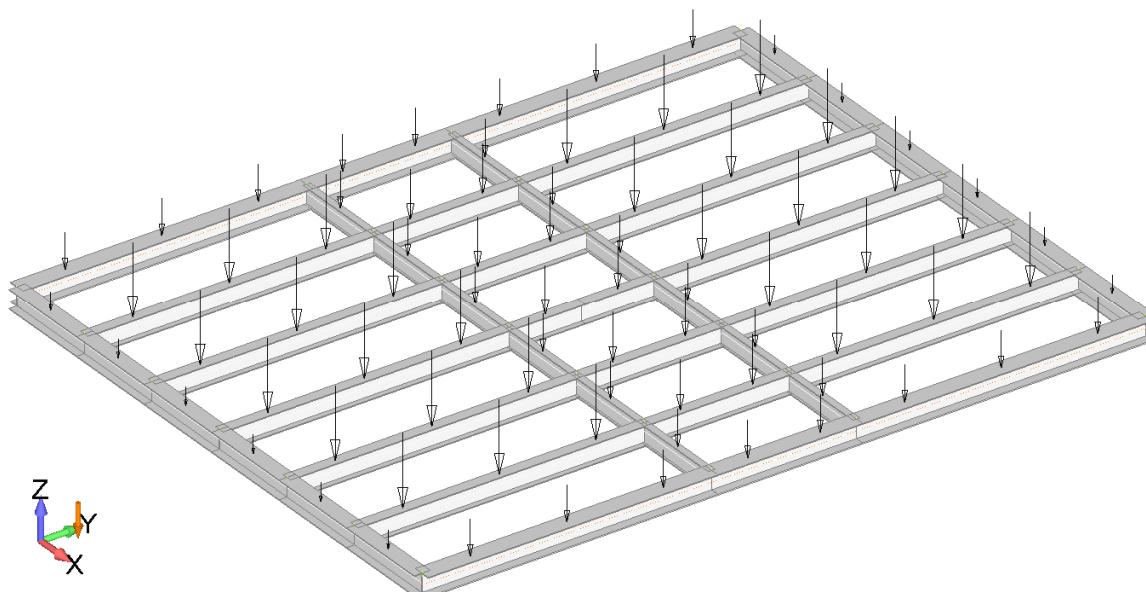
S obzirom da su dimenzije palubica preko svega $12,77 \text{ m} \times 14,43 \text{ m}$, ukupna površina iznosi $184,27 \text{ m}^2$. Tome odgovara ukupno opterećenje na roštilj u iznosu od $300 \text{ kg/m}^2 \cdot 184,27 \text{ m}^2 = 55281 \text{ kg}$. Tom opterećenju je potrebno dodati vlastitu masu konstrukcije palubice koja je različita za svaku izvedbu palubice, kako je prikazano u tablici 7. Masa kompozitnog panela u ovom slučaju procijenjena je prema masi panela za Uljanik NB513 [6] na 15 kg/m^2 , te je u analizi roštilja V1 i V2 pribrojana ukupnom opterećenju.

Opterećenje na uzdužne i poprečne nosače roštilja palubica V1 i V2 je raspodijeljeno prema pravilima opisanima u [14], kao što je prikazano na slici 22. Na taj način osigurana je realna raspodjela jednolikog opterećenja na elemente roštilja. U slučaju čeličnog roštilja, opterećenje je zadano kao jednoliko raspodijeljeni tlak na elemente lima oplata.

Vlastita masa palubice u MKE modelu čelične palubice zadana je kao ubrzanje vlastite mase elemenata modela u smjeru osi z , dok je u modelima V1 i V2 vlastita masa konstrukcije roštilja također zadana kao ubrzanje u smjeru osi z , dok je masa kompozitnih panela pribrojana masi jednoliko raspodijeljenog opterećenja i zadana kao vanjsko opterećenje. Ubrzanje u smjeru osi z , koje se zadaje modelu iznosilo je za slučaj opterećenja LC1 $9,81 \text{ m/s}^2$, a za LC2 $14,3226 \text{ m/s}^2$.

Tablica 7. Vrijednosti zadanih vanjskih opterećenja na roštilj palubica

TIP PALUBICE	ČELIČNA	V1	V2
Površina (m^2)	184.27		
Jednoliko raspodijeljeno opterećenje (kg/m^2)	300		
Vlastita masa kompozitnih panela (kg)	-	2500	2500
LC1 - ukupno opterećenje (kN)	542.307	566.832	566.832
a_v	1.46g		
LC2 - ukupno opterećenje (kN)	791.768	827.574	827.574



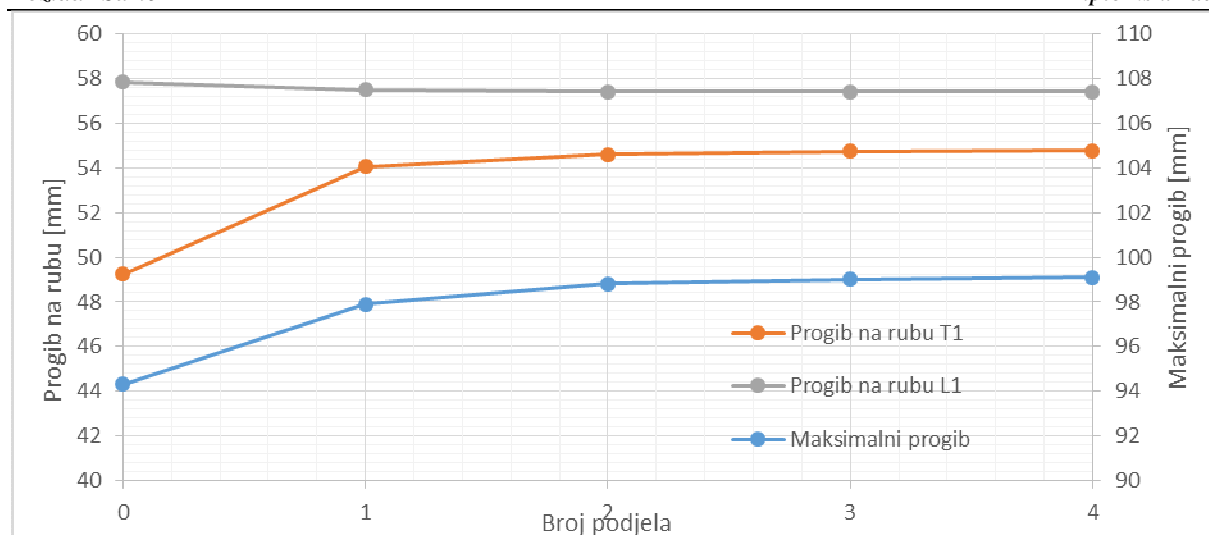
Slika 22. Raspodjela vanjskog opterećenja na elemente roštilja V1

4.1.4. Analiza senzitivnosti mreže konačnih elemenata

Kako bi se odredile potrebne dimenzije grednih konačnih elemenata provedena je analiza senzitivnosti rezultata proračuna na dimenzije mreže. To je urađeno na način da su u svakom slijedećem ponavljanju analize dimenzije svih grednih elemenata smanjivane na pola. Na taj način se implicitno svakim korakom broj grednih elemenata povećavao za 100%. Početne dimenzije elemenata iznosile su onoliko koliko je bio raspon između susjednih elemenata. Rezultati analize za model roštilja kompozitne palubice V1 i slučaj opterećenja LC1 prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Analiza senzitivnosti mreže grednih konačnih elemenata

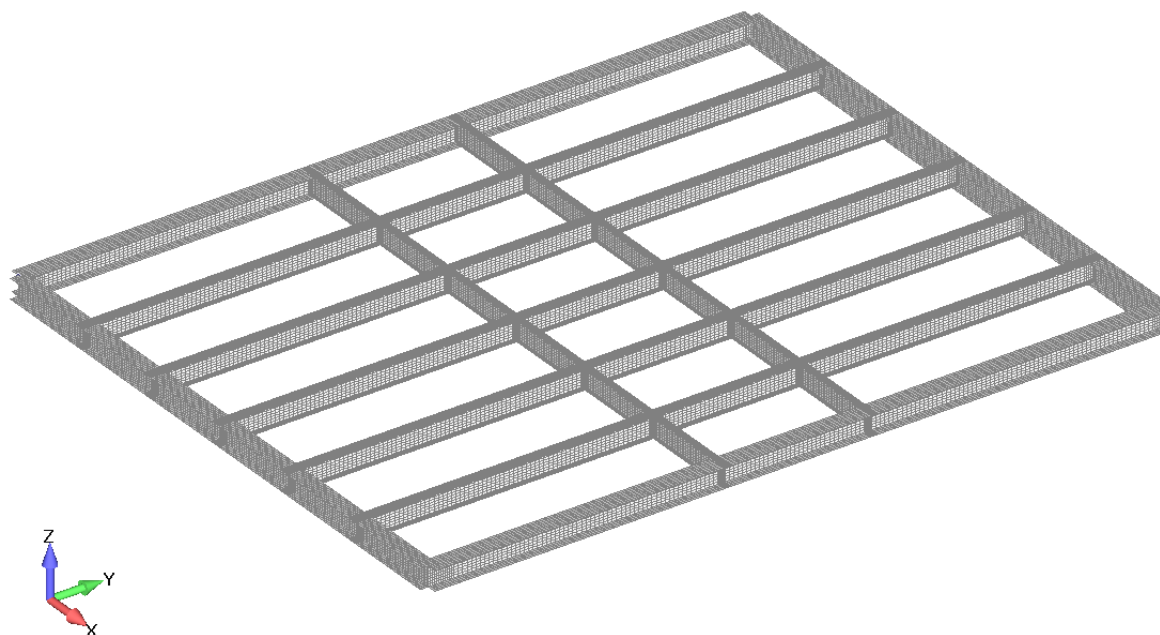
BROJ PODJELA	0	1	2	3	4
Maksimalni progib (mm)	94.33	97.90	98.82	99.01	99.10
Progib na rubu T1 (mm)	49.25	54.04	54.60	54.73	54.77
Progib na rubu L1 (mm)	57.83	57.50	57.42	57.39	57.39
σ_Y T1 (N/mm ²)	104.04	107.01	107.55	107.68	107.71
σ_X L1 (N/mm ²)	194.39	193.16	192.82	192.74	192.72



Slika 23. Promjena vrijednosti izmjerenih progiba promjenom dimenzija mreže

Iz priloženih rezultata vidljivo je da mreža prilično brzo konvergira već nakon prve podijele, te je odstupanje svih izmjerenih vrijednosti u odnosu na one koje su izmjerene kod maksimalnog broja podjela manje su od 2 %. Također se može vidjeti da čak i najgrublji gredni model daje relativno dobre rezultate, te su odstupanja unutar 5 %. Nakon treće podijele mreže (kada su dimenzije elemenata iznosile 1/8 početnih dimenzija) uočeno je da rezultati odstupaju manje od 0,5 %, te je taj broj podjela odabran kao referentni broj koji će se koristiti u ostalim proračunima. Nakon četvrte podijele razlike u rezultatima bile su manje od 0,1 %, te je tu zaustavljena analiza konvergencije mreže. Razlog ovakvim rezultatima je činjenica da sama formulacija korištenog grednog konačnog elementa, kao polinoma trećeg reda, savršeno opisuje progibnu liniju grede te su razlike u rezultatima isključivo posljedica činjenice da je s povećanjem broja podjela zadano opterećenje raspodjeljeno na više čvorova, čime se mijenja oblik zadanog opterećenja na gredu. U daljnjim proračunima korišten je gredni model čije su dimenzije elemenata iznosile za uzdužne grede (L1, L2) 600 mm, a za poprečne (T1, T2) 682,5 mm.

Zbog provjere rezultati su uspoređeni sa ljuskastim modelom, koji je izrađen samo radi ove usporedbe (Slika 24.), pa je pri izgradnji modela korištena fina mreža, bez posebne analize senzitivnosti za ljuskasti model sam po sebi. Opterećenja u ovom modelu zadana su na isti način kao i kod grednih modela roštilja palubica V1 i V2.



Slika 24. Ljuskasti model roštilja kompozitne palube V1

Rezultati analize za model roštilja kompozitne palube V1 i slučaj opterećenja LC1 su prikazani u tablici 9.

Tablica 9. Usporedba grednog i ljuskastog modela

	GREJNI MODEL	LJUSKASTI MODEL	RAZLIKA	RAZLIKA %
Maksimalni progib (mm)	96.75	92.69	4.06	4.19
Progib na rubu T1 (mm)	55.10	56.51	-1.41	-2.56
Progib na rubu L1 (mm)	56.62	56.17	0.45	0.80
σ_Y T1 (N/mm ²)	107.71	109.42	-1.71	-1.59
σ_X L1 (N/mm ²)	192.72	178.29	14.43	7.49

Iz priloženih rezultata vidljivo je da su sva odstupanja u rezultatima između grednog i ljuskastog modela unutar 4%, što je relativno zadovoljavajuće. Vidljivo je i da su rezultati iz grednog modela u pravilu malo konzervativniji (veća naprezanja i veći maksimalni progib), nego u ljuskastom modelu.

4.1.5. Rezultati analize modela

4.1.5.1. Kontrola dozvoljenih naprezanja i progiba roštilja

Rezultati analize modela za slučaj opterećenja LC1 i LC2 prikazani su u tablici 10. S obzirom da su maksimalna naprezanja u rubnim gredama u pravilu bila 50% veća od maksimalnih naprezanja u središnjim gredama, u tablici su prikazani rezultati naprezanja samo za rubne grede L1 i T1.

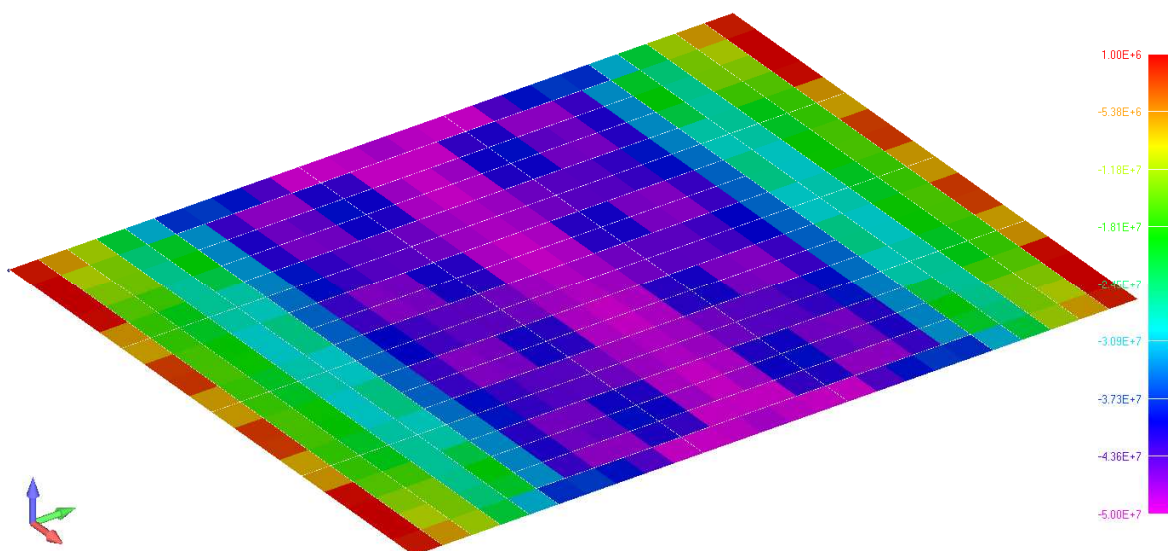
Tablica 10. Rezultati analize prototipnih roštilja

PRORAČUN POMAKA LC1				
Tip palubice	Čelična	V1	V2	kriterij
Maksimalni progib (mm)	72.40	96.75	100.16	73.00
Ukupna visina (nosač + progib) (mm)	477.40	501.75	505.16	473.00
Progib na rubu T1 (mm)	50.47	54.77	59.03	50.00
Progib na rubu L1 (mm)	35.50	57.39	54.81	50.00
PRORAČUN NAPREZANJA LC2				
Tip palubice	Čelična	V1	V2	kriterij
σ_Y T1 (N/mm ²)	237.09	-194.87	-207.38	302.00
σ_X L1 (N/mm ²)	248.82	-277.14	260.70	302.00
τ_{XY} T1 (N/mm ²)	118.55	97.44	103.69	174.00
τ_{XY} L1 (N/mm ²)	124.41	138.57	130.35	174.00
σ_e T1 (N/mm ²)	237.09	194.87	207.38	320.00
σ_e L1 (N/mm ²)	248.82	277.14	260.70	320.00

Može se vidjeti kako čelična palubica zadovoljava sve zadane kriterije za progibe, za razliku od roštilja kompozitnih palubica V1 i V2. Kriteriji maksimalno dozvoljenih napreznja zadovoljeni su za sve tri verzije palubice, iz čega se može zaključiti su za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata roštilja najbitniji kriterij dozvoljeni progibi. Također se vidi da progibi koji ne zadovoljavaju kriterije u čeličnom roštilju za 1% veći od dozvoljenih, dok su u slučaju kompozitnih palubica oni i preko 40% veći od dozvoljenih.

4.1.5.2. Model za analizu izvijanja oplata čelične palubice

Kako bi se mogle očitati potrebne ulazne vrijednosti napreznja napravljen je gredno ljuskasti model čelične palubice sa dimenzijama ljuskastih elemenata oplata jednakima širini polja lima između dva uzdušnjaka ili između uzdušnjaka i jakog nosača (Slika 25.). Takav model potreban je kako bi se mogle izravno dobiti potrebne ulazne vrijednosti napreznja.



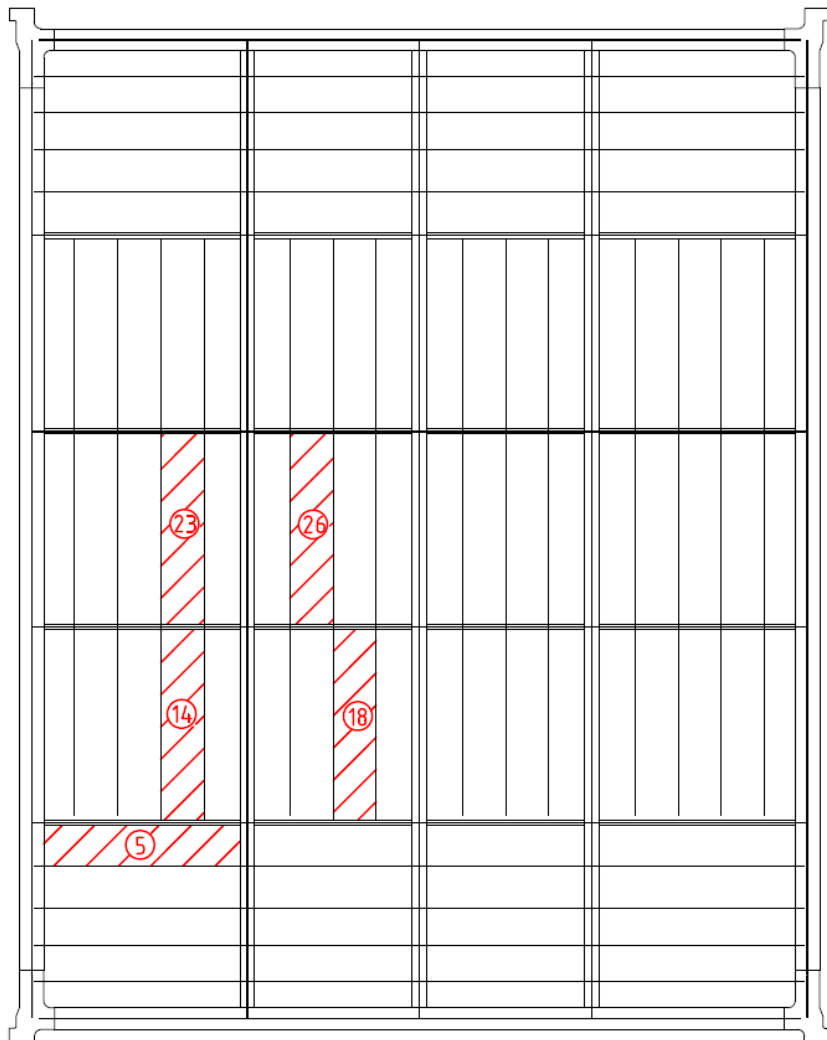
Slika 25. Model za analizu sa rezultatima naprezanja (u Pa) u smjeru x osi

Nakon toga ulazne vrijednosti unesene su u excel program za proračun izvijanja kojeg je izradio DNV (Slika 26.).

<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%;"> <tr><td>$t - t_k =$</td><td style="text-align: center;">6.0</td><td>mm</td></tr> <tr><td>$l =$</td><td style="text-align: center;">2730</td><td>mm</td></tr> <tr><td>$s =$</td><td style="text-align: center;">600</td><td>mm</td></tr> <tr><td>$a =$</td><td style="text-align: center;">0</td><td>mm</td></tr> <tr><td>$b =$</td><td style="text-align: center;">0</td><td>mm</td></tr> <tr><td>$\sigma_{ax} =$</td><td style="text-align: center;">67.197</td><td>N/mm²</td></tr> <tr><td>$\sigma_{ay} =$</td><td style="text-align: center;">33.529</td><td>N/mm²</td></tr> <tr><td>$\tau_{xy} =$</td><td style="text-align: center;">16.432</td><td>N/mm²</td></tr> <tr><td>$\Psi_x =$</td><td style="text-align: center;">1.24</td><td>(-)</td></tr> <tr><td>$\Psi_y =$</td><td style="text-align: center;">1.13</td><td>(-)</td></tr> <tr><td>Id text:</td><td>Polje 14</td><td>location</td></tr> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">Plate Description...</p>	$t - t_k =$	6.0	mm	$l =$	2730	mm	$s =$	600	mm	$a =$	0	mm	$b =$	0	mm	$\sigma_{ax} =$	67.197	N/mm ²	$\sigma_{ay} =$	33.529	N/mm ²	$\tau_{xy} =$	16.432	N/mm ²	$\Psi_x =$	1.24	(-)	$\Psi_y =$	1.13	(-)	Id text:	Polje 14	location	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 35%;">Critical buckling stress [N/mm²]</th> <th style="width: 50%;">Usage factors</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\sigma_{cx} =$</td> <td style="text-align: center;">67 NOT OK</td> <td>$\sigma_{ax} / \eta \sigma_{cx} =$ 1.01</td> </tr> <tr> <td>$\sigma_{cy} =$</td> <td style="text-align: center;">21 NOT OK</td> <td>$\sigma_{ay} / \eta \sigma_{cy} =$ 1.59</td> </tr> <tr> <td>$\tau_c =$</td> <td style="text-align: center;">103 OK</td> <td>$\tau_{xy} / \eta \tau_c =$ 0.19</td> </tr> <tr> <td>$f_{biax1} =$</td> <td style="text-align: center;">1.39 NOT OK</td> <td rowspan="2">Bi-axial check, if $f_{biax} < 1.0 \Rightarrow$ OK</td> </tr> <tr> <td>$f_{biax2} =$</td> <td style="text-align: center;">1.44 NOT OK</td> </tr> </tbody> </table>		Critical buckling stress [N/mm ²]	Usage factors	$\sigma_{cx} =$	67 NOT OK	$\sigma_{ax} / \eta \sigma_{cx} =$ 1.01	$\sigma_{cy} =$	21 NOT OK	$\sigma_{ay} / \eta \sigma_{cy} =$ 1.59	$\tau_c =$	103 OK	$\tau_{xy} / \eta \tau_c =$ 0.19	$f_{biax1} =$	1.39 NOT OK	Bi-axial check, if $f_{biax} < 1.0 \Rightarrow$ OK	$f_{biax2} =$	1.44 NOT OK	
$t - t_k =$	6.0	mm																																																		
$l =$	2730	mm																																																		
$s =$	600	mm																																																		
$a =$	0	mm																																																		
$b =$	0	mm																																																		
$\sigma_{ax} =$	67.197	N/mm ²																																																		
$\sigma_{ay} =$	33.529	N/mm ²																																																		
$\tau_{xy} =$	16.432	N/mm ²																																																		
$\Psi_x =$	1.24	(-)																																																		
$\Psi_y =$	1.13	(-)																																																		
Id text:	Polje 14	location																																																		
	Critical buckling stress [N/mm ²]	Usage factors																																																		
$\sigma_{cx} =$	67 NOT OK	$\sigma_{ax} / \eta \sigma_{cx} =$ 1.01																																																		
$\sigma_{cy} =$	21 NOT OK	$\sigma_{ay} / \eta \sigma_{cy} =$ 1.59																																																		
$\tau_c =$	103 OK	$\tau_{xy} / \eta \tau_c =$ 0.19																																																		
$f_{biax1} =$	1.39 NOT OK	Bi-axial check, if $f_{biax} < 1.0 \Rightarrow$ OK																																																		
$f_{biax2} =$	1.44 NOT OK																																																			

Slika 26. Primjer unošenja podataka u program Buckling-DNV

Oplata prototipne palubice sastoji se od 94 polja, no kako je konstrukcija palubice simetrična oko x i y osi dovoljno je analizirati samo 28 različitih polja. Na slici 27. označeno je pet reprezentativnih polja, za koja su u tablici 11. prikazani ulazni podaci i ostvarene vrijednosti faktora izvijanja.



Slika 27. Reprezentativna polja odabrana za analizu

Tablica 11. Rezultati analize izvijanja prototipne palubice

Polje	t (mm)	l (mm)	s (mm)	σ_{ax} (N/mm ²)	σ_{ay} (N/mm ²)	τ_{xy} (N/mm ²)	ψ_x	ψ_y	Faktor izvijanja
5	6	3000	546	34.50	45.46	30.62	4.65	1.11	1.62
14	6	2730	600	67.20	33.53	16.43	1.24	1.13	1.44
18	6	2730	600	68.18	46.65	4.46	1.17	1.19	1.76
23	6	2730	600	74.55	29.86	5.60	1.00	1.00	1.29
26	6	2730	600	74.40	36.63	4.41	1.00	1.00	1.42

Iz tablice 11. vidljivo je da niti jedno od analiziranih polja ne zadovoljava zahtjevani faktor izvijanja. Nakon analize svih 94 polja, ispostavilo se da je samo 10 polja zadovoljavalo kriterij izvijanja.

4.2. Modeli za analizu kompozitnih palubica konačnim elementima

Kompozitni paneli koji su oslonjeni na čelični roštilj palube ne sudjeluju u globalnoj čvrstoći palubnog roštilja i potrebno ih je dimenzionirati s obzirom na lokalna opterećenja. Generirana su tri modela za dvije izvedbe roštilja, V1 i V2:

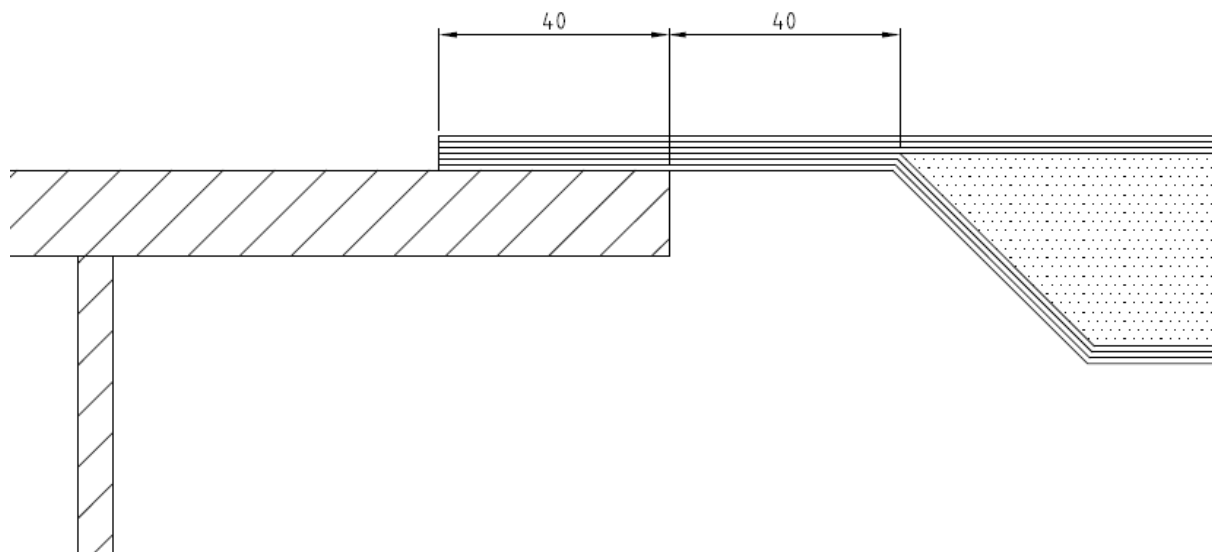
1. Model panela V1 sa 2 reda rupa
2. Model panela V2 sa 2 reda rupa
3. Model panela V2 sa 3 reda rupa

4.2.1. Generiranje mreže konačnih elemenata

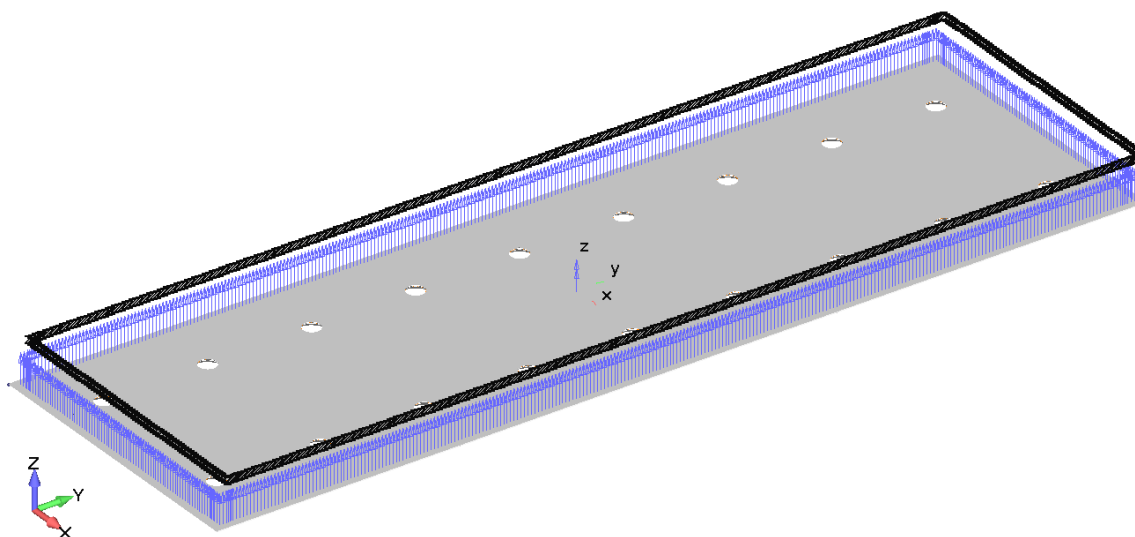
MKE modeli kompozitnih panela generirani su prema modelu korištenom u [12]. Panel je diskretiziran na način da je jezgra modelirana 3D volumnim konačnim elementima, i to tako da su po visini jezgre korištena četiri sloja konačnih elemenata. Ovisno o potrebi korišteni su volumni elementi sa četiri čvora (CTETRA), šest čvorova (CPENTA) i osam čvorova (CHEXA). Laminat je diskretiziran pomoću 2D konačnih elemenata te su se ovisno o potrebi koristili konačni elementi sa tri čvora (CTRIA3) i sa četiri čvora (CQUAD4). Elementi sa tri čvora korišteni su samo u onim dijelovima modela gdje zbog složenosti geometrije nije bilo moguće koristiti četverokutne elemente. Svi konačni elementi imaju svih šest stupnjeva slobode u svakom čvoru. Iz razloga što su isti tipovi i dimenzije elemenata korišteni za analizu kompozitnog panela u radu [12], nije bilo potrebno vršiti analizu senzitivnosti mreže.

4.2.2. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti simulirali su kompozitni panel oslonjen na roštilj palubice po svom obodu na 40 mm od ruba panela (Slika 28.). Ta točka predstavlja prvu točku dodira između kompozitne palubice i roštilja, te se smatra da će panel pod opterećenjem biti poduprt samo u tom području, te su stoga u svim čvorovima po obodu 40 mm od ruba fiksirani pomaci u vertikalnom smjeru (T_z). Također, kako bi se izbjegao pomak kompozitnog panela kao krutog tijela, u središnjem čvoru modela (na presjecištu uzdužne i poprečne simetrale) fiksirani su pomaci u uzdužnom i poprečnom smjeru te rotacija oko vertikalne osi (T_x , T_y i R_z), (Slika 29.).



Slika 28. Način na koji je panel oslonjen na roštilj



Slika 29. Rubni uvjeti na MKE modelu panela V1

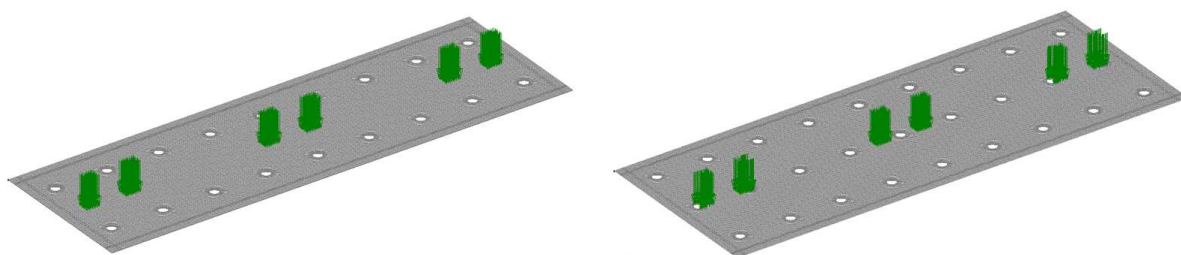
4.2.3. Opterećenja

Za analizu modela kompozitnih panela korištena su dva slučaja opterećenja:

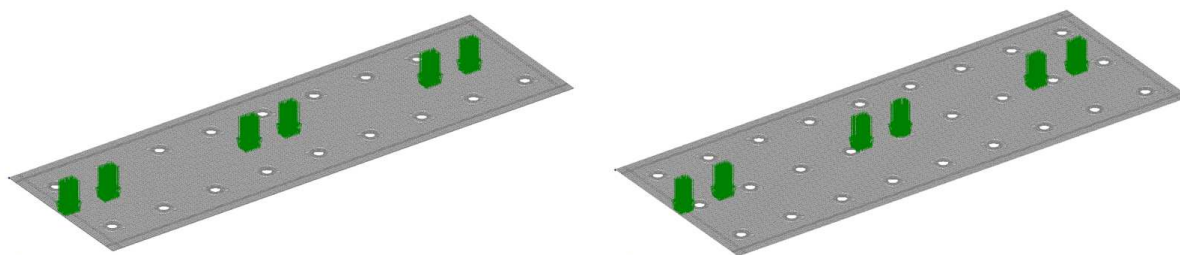
1. Slučaj opterećenja 1 (LP1): automobili parkirani simetrično s obzirom na y os panela (Slika 30.) .
2. Slučaj opterećenja 2 (LP2): automobili parkirani na način da kotač prvog automobila pada na rub kompozitnog panela (Slika 31.).

U slučaju kompozitne palubice V2 koja ima rupe za privez automobila po sredini širine panela, analiziran je slučaj kao da su kotači automobila prekrili rupe za privez, što u stvarnosti

vjerojatno nije slučaj, ali je konzervativno rješenje. Vrijednost opterećenja na prednjoj osovini od 1500 kg raspodijeljena je na dva kotača čiji trag ima dimenzije 177mm x 140mm. Za oba slučaja opterećenja zadana vertikalna akceleracija iznosi $a_z = 1,46 \cdot g$. Time se dobije da je ukupna sila kojom kotač pritišće panel 10742 N, a ukupni tlak na površinu ispod kotača 433493 N/m². Opterećenje je u modelu za analizu zadano kao tlak na element gornjeg sloja laminata. Ukoliko se kotač nalazio iznad rupe za privez automobila, zadani tlak je uvećan proporcionalno smanjuju kontaktne površine između kotača i panela.



Slika 30. Slučaj opterećenja LP1 za panele V1 i V2



Slika 31. Slučaj opterećenja LP2 za panele V1 i V2

4.2.4. Rezultati

U tablici 12. prikazani su rezultati analize modela za slučajeve opterećenja LP1 i LP2. Prikazane su vrijednosti LFI za svaki sloj laminata, kao i vrijednosti najvećeg tlačnog naprezanja σ_c i najvećih smičnih naprezanja τ_{13} i τ_{23} u jezgri. Bezdimenzijski LFI (indeks popuštanja laminata) računat je izravno u FEMAP-u prema Hoffman-ovoj teoriji popuštanja. Prema definiciji LFI-a popuštanje se događa kada je $LFI > 1$.

Zbog nepostojanja sličnog prikladnog kriterija za naprezanja u materijalu jezgre, vrijednosti najznačajnijih komponenti naprezanja (tlačno σ_3 , τ_{12} i τ_{23}) su prihvaćene kao reprezentativno mjerilo čvrstoće materijala jezgre. Njihova vrijednost trebala bi biti manja od one koja je navedena kao teoretsko naprezanje (σ_{brc} i τ_{br}) prije loma materijala jezgre.

Kao mjerilo krutosti panela prikazane su vrijednosti maksimalnog progiba kompozitnog panela [12].

Tablica 12. Rezultati dobiveni za analizirane izvedbe panela

V1 2 REDA RUPA							
	LFI sloj 1	LFI sloj 2	LFI sloj 3	σ_c N/mm ²	τ_{13} N/mm ²	τ_{23} N/mm ²	W_{max} mm
LP1	0.113	0.032	0.078	0.304	0.410	0.513	25.2
LP2	0.173	0.049	0.107	0.354	0.411	0.568	25.2
V2 2 REDA RUPA							
	LFI sloj 1	LFI sloj 2	LFI sloj 3	σ_c N/mm ²	τ_{13} N/mm ²	τ_{23} N/mm ²	W_{max} mm
LP1	1.341	0.039	0.087	0.869	0.414	0.538	39.6
LP2	2.048	0.060	0.118	1.013	0.416	0.595	39.6
V2 3 REDA RUPA							
	LFI sloj 1	LFI sloj 2	LFI sloj 3	σ_c N/mm ²	τ_{13} N/mm ²	τ_{23} N/mm ²	W_{max} mm
LP1	0.166	0.199	0.156	0.684	0.437	0.511	41.4
LP2	0.183	0.242	0.190	1.016	0.427	0.598	41.5

Iz priloženih rezultata može se vidjeti da svi slojevi laminata u obe izvedbe zadovoljavaju kriterij LFI. Naprezanja u jezgri također ne prelaze maksimalna dozvoljena naprezanja za zadani materijal. Kriterij maksimalnog progiba nije eksplicitno zadan pa se iz usporedbe rezultata može samo zaključiti da panel V1 ima oko 40% manji progib od panela V2.

Također možemo vidjeti da slučaj opterećenja LP2 predstavlja najgori slučaj opterećenja za sve komponente naprezanja, te će se on u daljnjem radu koristiti kao reprezentativan slučaj za dimenzioniranje kompozitnih panela.

Kao dodatak gore navedenim kriterijima, paneli su evaluirani i prema preskriptivnim kriterijima BV-a koji su temeljeni na parcijalnim faktorima sigurnosti navedenima u poglavlju 2. tablici 13. prikazane su vrijednosti maksimalno dozvoljenih naprezanja prije loma, gdje σ_{brc} i σ_{brt} označavaju maksimalno dozvoljeno naprezanje u smjeru x i y (1 i 2), τ_{br} predstavlja maksimalno dozvoljeno smično naprezanje u laminatu, dok za jezgru te vrijednosti također predstavljaju maskimalno dozvoljeno naprezanje PVC materijala.

Tablica 13. Maksimalna dozvoljena naprezanja

LAMINAT		
σ_{brc1}	309.53	N/mm ²
σ_{brt1}	309.53	N/mm ²
σ_{brc2}	309.53	N/mm ²
σ_{brt2}	309.53	N/mm ²
τ_{br12}	34.98	
JEZGRA		
σ_{brc}	2	N/mm ²
σ_{brt}	3.1	N/mm ²
τ_{brt}	1.5	N/mm ²

U tablici 14. prikazana su najveća izračunata naprezanja, a u pravilu se sva najveća naprezanja javljaju za slučaj opterećenja LC2.

Tablica 14. Vrijednosti naprezanja za prototipne kompozitne panele

	V1 2 REDA RUPA			V2 3 REDA RUPA			V2 2 REDA RUPA		
	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 1	sloj 2	sloj 3
Laminat									
σ_{1c} (N/mm ²)	63.9	53.2	113.2	55.3	84.5	118.4	58.7	55.1	118.8
σ_{1t} (N/mm ²)	130.2	54.0	65.6	135.3	79.9	43.7	136.2	39.8	38.7
σ_{2c} (N/mm ²)	45.8	53.2	58.3	101.1	84.6	104.9	60.2	54.1	59.9
σ_{2t} (N/mm ²)	58.9	54.0	45.8	113.5	79.8	100.4	60.0	39.8	48.3
τ_{12} (N/mm ²)	11.0	7.0	7.1	14.1	16.2	14.3	14.6	7.29	9.7
Jezgra									
σ_{3c} (N/mm ²)	1.01			1.02			1.04		
σ_{3t} (N/mm ²)	0.99			1.04			1.04		
τ_{13} (N/mm ²)	0.41			0.44			0.42		
τ_{23} (N/mm ²)	0.57			0.60			0.59		

Kako bi se izračunao ostvareni faktor sigurnosti (*demand*), potrebno je maksimalna dozvoljena naprezanja podijeliti sa odgovarajućim izračunatim naprezanjima u panelu. U tablici 15. prikazane su vrijednosti tako izračunatih faktora sigurnosti za sve tri varijante kompozitnih panela. Ove izračunate faktore sigurnosti potrebno je usporediti sa odgovarajućim vrijednostima izdržljivosti panela proračunatima u poglavlju 2.

Tablica 15. Ostvareni faktori sigurnosti za prototipne panele

	V1 2 REDA RUPA			V2 3 REDA RUPA			V2 2 REDA RUPA		
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 1	sloj 2	sloj 3
$D(\sigma_{1c})$	4.84	5.82	2.73	5.60	3.66	2.61	5.27	5.62	2.61
$D(\sigma_{1t})$	2.38	5.74	4.72	2.29	3.87	7.09	2.27	7.78	7.99
$D(\sigma_{2c})$	6.76	5.82	5.31	3.06	3.66	2.95	5.15	5.72	5.17
$D(\sigma_{2t})$	5.25	5.74	6.76	2.73	3.88	3.08	5.15	7.78	6.41
$D(\tau_{12})$	3.19	4.97	4.94	2.47	2.16	2.44	2.39	4.80	3.60
Jezgra									
$D(\sigma_{3c})$	1.99			1.97			1.93		
$D(\sigma_{3t})$	3.13			2.97			2.97		
$D(\tau_{13})$	3.65			3.43			3.61		
$D(\tau_{23})$	2.64			2.51			2.52		

Tablica 16 prikazuje omjer između ostvarenog faktora sigurnosti i zahtjevane izdržljivosti, a da bi konstrukcija zadovoljila zahtjeve on mora biti veći od 1.

Tablica 16. Omjer između ostvarenog i zahtjevanog faktora sigurnosti

	V1 2 REDA RUPA			V2 3 REDA RUPA			V2 2 REDA RUPA		
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 1	sloj 2	sloj 3
σ_{1c}	1.2	1.4	0.7	1.4	0.9	0.6	1.3	1.4	0.6
σ_{1t}	0.6	1.4	1.2	0.6	1.0	1.7	0.6	1.9	2.0
σ_{2c}	1.7	1.4	1.3	0.8	0.9	0.7	1.3	1.4	1.3
σ_{2t}	1.3	1.4	1.7	0.7	1.0	0.8	1.3	1.9	1.6
τ_{12}	1.0	1.6	1.6	0.8	0.7	0.8	0.8	1.5	1.2
Jezgra									
σ_{3t}	0.9			0.9			0.9		
σ_{3c}	1.4			1.4			1.4		
τ_{13}	1.3			1.2			1.3		
τ_{23}	1.0			0.9			0.9		

Iz priloženih rezultata može se uočiti da kompozitni panel V1 ne zadovoljava zahtjeve zbog tlačnog naprezanja u trećem sloju vlakana i vlačnog naprezanja u prvom sloju vlakana. Također jezgra ne zadovoljava tlačna naprezanja, kao ni smična naprezanja. Slične rezultate

postigao je i panel V2 sa 2 reda rupa. Laminat panela V2 sa 3 reda rupa ne zadovoljava niti jedan kriterij, dok su vrijednosti za jezgru slične onima koje su dobivene i za V1.

5. REPROJEKTIRANJE PODIZNIH PALUBICA

5.1. Reprojektiranje palubica izrađenih od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela

Kako bi se dimenzije konstrukcijskih elemenata palubnog roštilja dovele u ravnopravan položaj zbog usporedbe razmatranih varijanti konstrukcije, potrebno je promijeniti dimenzije glavnih nosača palubnih roštilja da se kompozitne palubice V1 i V2 dovedu u stanje podobnosti. Također je potrebno reprojektirati čeličnu palubicu kako bi zadovoljila kriterije izvijanja. Za sve navedene varijante reprojektiranje je provedeno s ciljem minimizacije mase.

5.1.1. Reprojektiranje roštilja čelično kompozitnih palubica

Iz razloga što primjenom programskog paketa Siemens NX/FEMAP nije bilo moguće provesti optimizaciju konstrukcije roštilja koja bi istovremeno odredila optimalne dimenzije sustava roštilja i dimenzije svakog pojedinog presjeka glavnih nosača, reprojektiranje dimenzija roštilja provedeno je u dva koraka:

1. Određivanje optimalnih momenata tromosti za grupe nosača T1, T2, L1 i L2.
2. Određivanje optimalnih dimenzija I profila za potrebni moment tromosti pojedinih nosača.

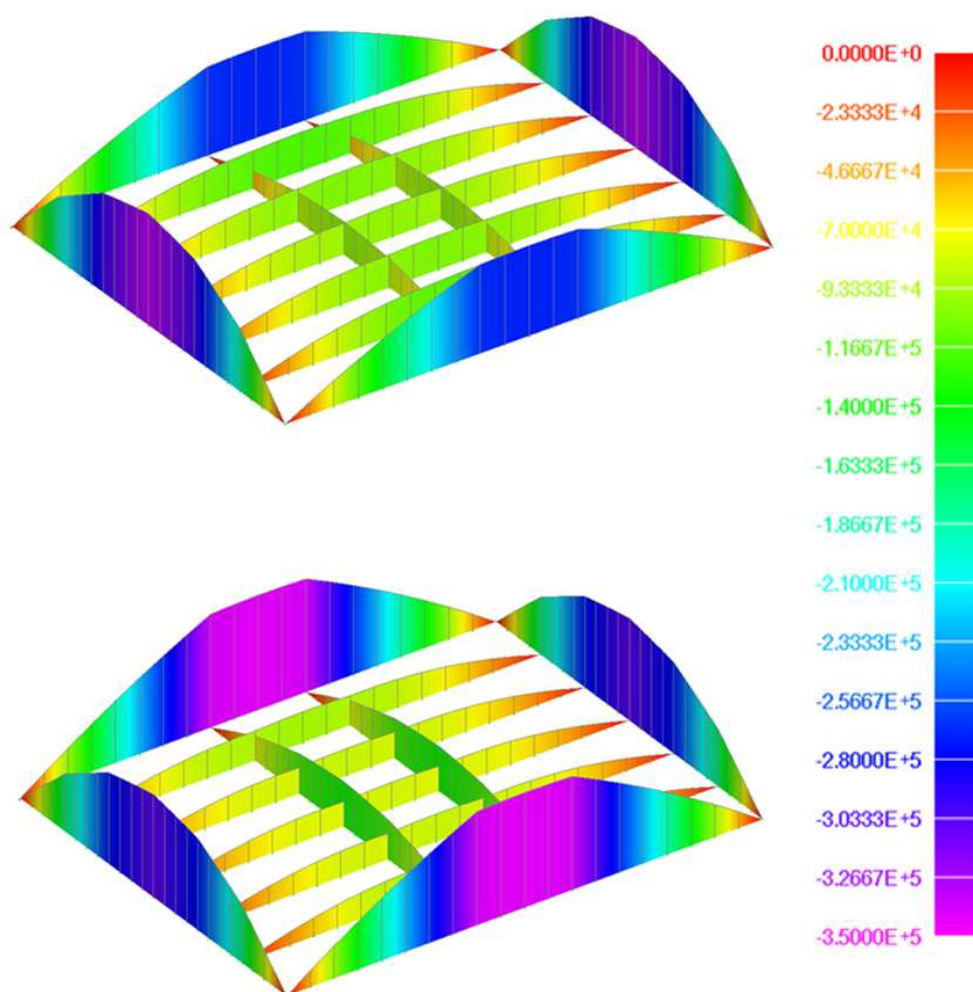
Važna značajka roštiljnih konstrukcija je ta da se promjenom dimenzija konstrukcijskih elemenata mijenja i raspodjela momenata savijanja na elementima. Time problem pronalaska optimalnih dimenzija postaje nelinearan, tj. promjenom geometrijskih značajki presjeka nekog nosača njegov odziv se ne mora nužno mijenjati linearno proporcionalno toj geometrijskoj značajki (moment tromosti, moment otpora profila) kao što je to slučaj sa običnom gredom. Optimalni momenti tromosti pojedine grupe nosača određeni su pomoću optimizacijskog algoritma ugrađenog u programskom paketu Siemens NX/FEMAP. Cilj optimizacije bio je minimizacija mase konstrukcije sa zadovoljenjem projektnih ograničenja maksimalnog progiba rubova palubice i maksimalnog progiba palubice, kao i maksimalnih dozvoljenih naprezanja. Kako znamo da su progibi grede opterećene na savijanje proporcionalni njenom momentu tromosti oko osi oko koje se savija, momenti tromosti grede predstavljaju nam najvažniji rezultat ove optimizacije. Željeni momenti tromosti dobiveni su na način da je optimizacijski algoritam varirao debljine prirubnica na ljuskastom modelu palubica. Optimizacija je provedena za roštilj čelično kompozitne palubice V1, a iste

dimenzije su korištene i kod čelično kompozitne palubice V2. Rezultati su prikazani u tablici 17.

Tablica 17. Momenti tromosti glavnih nosača prije i nakon reprojekiranja

	PROTOTIP	REPROJEKT	
L1 PROFIL	3.47E-04	5.16E-04	m ⁴
T1 PROFIL	4.57E-04	6.68E-04	m ⁴
L2 PROFIL	1.37E-04	3.16E-04	m ⁴
T2 PROFIL	2.40E-04	2.18E-04	m ⁴

Bolji uvid u rezultate optimizacije roštilja može se dobiti ako se analizira raspodjela momenata savijanja na elementima roštilja prije i nakon optimizacije (Slika 32.). Na slici je vidljivo da su nakon optimizacije najveći moment tromosti preuzeli poprečni elementi T1, kao i da su uzdužni elementi L2 preuzeli dvostruko više momenta savijanja od poprečnih elemenata T2, što nije bio slučaj kod prototipa.



Slika 32. Momenati savijanja (u Nm) prototipa (iznad) i reprojektiranog roštilja (ispod)

Nakon toga, u drugom koraku provedena je optimizacija dimenzija I profila za zadani moment tromosti, i to koristeći nelinearni optimizator Solver u programskom paketu Microsoft Excel. Varijable su bile debljina pojasa nosača, širina pojasa nosača i debljina struka nosala. Visina struka nosača nije mijenjana kao varijabla iz razloga što tada problem zadovoljenja svjetle visine postao nelinearan, tj. nebi bilo moguće unaprijed znati hoće li biti zadovoljen kriterij svjetle visine. Cilj optimizacije bio je minimiziranje površine poprečnog presjeka pojedinog nosača uz zadovoljenje zahtjeva jednakosti zadanog i ostvarenog momenta tromosti nosača. Ograničenja vezana uz omjere pojedinih dimenzija presjeka nosača preuzete su iz [14], a navedene su u tablici. BF predstavlja širinu pojasa nosača, TF debljinu pojasa nosača, HW visinu struka nosača, a TW debljinu struka nosača. Iznimku u ograničenjima predstavlja maksimalni dozvoljeni omjer širine pojasa i visine struka nosača, koji prema [14] iznosi 0,5, ali ovdje je, prema dimenzijama prototipnih profila on povećan na 1. To je čest slučaj kod brodova kod kojih je visina nosača kritična dimenzija poput PCC-a i RO-RO brodova.

Tablica 18. Dozvoljeni omjeri dimenzija profila

	MIN	MAX
BF/TF	4	20
HW/TW	10	90
BF/HW	0.2	1
TF/TW	1	3

Kako se zbog tehnoloških razloga ovakvi roštilji u pravilu grade sa jednakom visinom struka nosača, a to je bio slučaj i kod prototipnih dimenzija roštilja, a za vrijednost visine struka odabrana je visina struka prototipnih roštilja, koja je iznosila 364 mm. Također iz tehnoloških razloga, minimalna debljina lima ograničena je na 6 mm, što je bila najmanja debljina lima kod prototipnih palubica, a čime se sprječavaju pretjerane deformacije pri zavarivanju. U tablici 19. i tablici 20. prikazane su nove dimenzije konstrukcijskih elemenata, a rezultati analize prikazani su u tablici 21.

Tablica 19. Dimenzije konstrukcijskih elemenata roštilja V1

Element	Dimenzije (mm) BFxTF + HWxTW + BFxTF	Tip	Masa elemenata (kg)
L1	364x18.5 + 364x6.5 + 364x18.5	I profil	2680
L2	280x15 + 364x6 + 280x15	I profil	1800
T1	364x21 + 364x7.5 + 364x21	I profil	3860
T2	230x12 + 364x6 + 230x12	I profil	4130

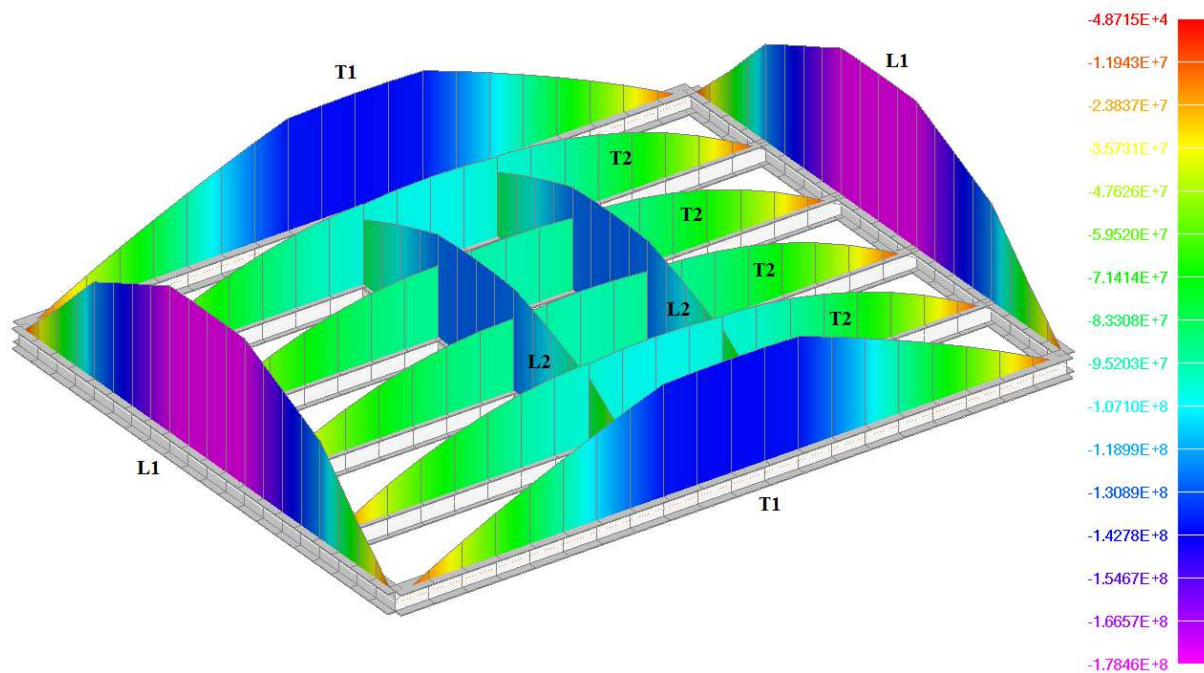
Tablica 20. Dimenzije konstrukcijskih elemenata roštilja V2

Element	Dimenzije (mm) BFxTF + HWxTW + BFxTF	Tip	Masa elemenata (kg)
L1	364x18.5 + 364x6.5 + 364x18.5	I profil	2680
L2	280x15 + 364x6 + 280x15	I profil	1800
T1	364x23 + 364x7.5 + 364x23	I profil	4170
T2	230x12 + 364x6 + 230x12	I profil	3300

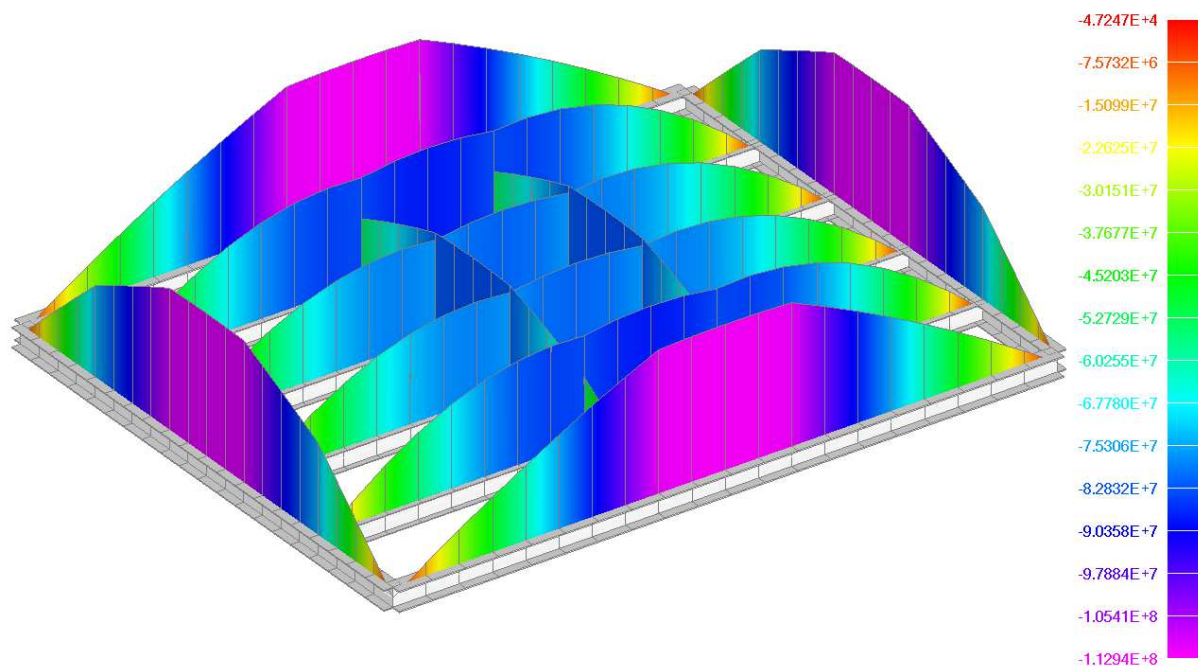
Tablica 21. Rezultati analize reprojektiranih roštilja V1 i V2

PRORAČUN POMAKA LC1			
Tip palubice	V1	V2	kriterij
Maksimalni progib (mm)	73.45	74.15	73.00
Ukupna visina (nosač + progib) (mm)	473.45	474.15	473.00
Progib na rubu T1 (mm)	50.86	50.81	50.00
Progib na rubu L1 (mm)	35.98	33.98	50.00
PRORAČUN NAPREZANJA LC2			
Tip palubice	V1	V2	kriterij
σ_Y T1 (N/mm ²)	156.72	164.89	302.00
σ_X L1 (N/mm ²)	173.77	161.63	302.00
τ_{XY} T1 (N/mm ²)	78.36	82.45	174.00
τ_{XY} L1 (N/mm ²)	86.89	80.82	174.00
σ_e T1 (N/mm ²)	156.72	164.89	320.00
σ_e L1 (N/mm ²)	173.77	161.63	320.00
Ukupna masa roštilja (kg)	12450	11900	-

Na slici 33. i slici 34. prikazana je raspodjela napreznja u gornjoj prirubnici nosača roštilja za palubicu V2 prije i nakon reprojekiranja za slučaj opterećenja LC1.



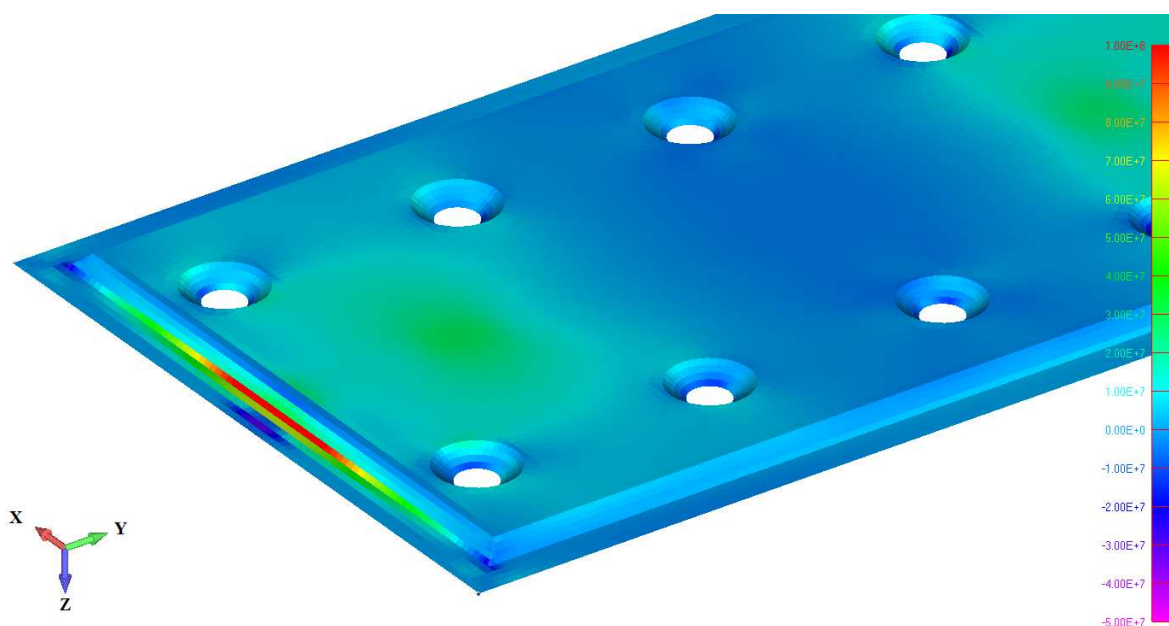
Slika 33. Raspodjela napreznja (u Pa) u prirubnici nosača prije optimizacije



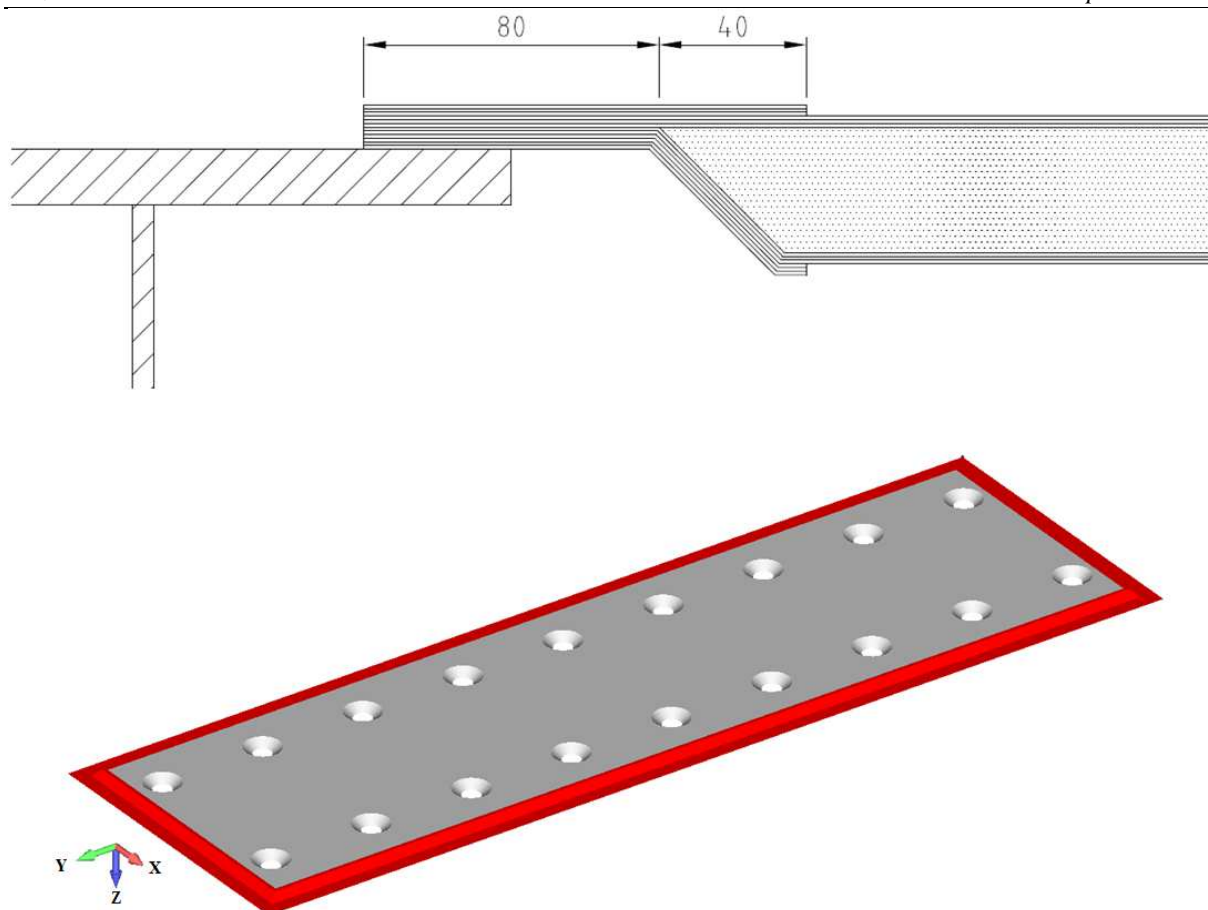
Slika 34. Raspodjela napreznja (u Pa) u prirubnici nosača nakon optimizacije

5.1.2. Reprojektiranje kompozitnih panela

Kako bi se zadovoljili kriteriji čvrstoće provedeno je reprojektiranje dimenzija kore (laminata) kompozitnog sendvič panela. S obzirom da je uočeno da se najveća naprezanja u panelu redovito javljaju kao koncentracija naprezanja na pojedinim dijelovima panela (u području prelaska sa sendvič konstrukcije na jednostuku oplatu (*single skin*), (Slika 35.). odlučeno je reprojektiranje provesti na način da su dodavani novi slojevi laminata u zoni 40 mm udaljenoj od ruba jezgre (Slika 36.). Na taj način je moguće puno efikasnije i bez značajnog povećanja mase riješiti postojeće probleme, nego povećanjem debljine jezgre ili dodavanjem novog sloja laminata po čitavom panelu. Reprojektiranje je provedeno postepeno, tj. u koracima. U svakom novom koraku dodavan je po jedan sloj laminata. Iznimka je slučaj kompozitne palubice V2 sa tri reda rupa gdje je zbog povećanih naprezanja na sredini panela bilo potrebno dodavati novi sloj laminata na čitavome panelu. Dodavanje slojeva je provedeno onoliko puta koliko je bilo potrebno da kompozitni panel zadovolji sve kriterije čvrstoće.

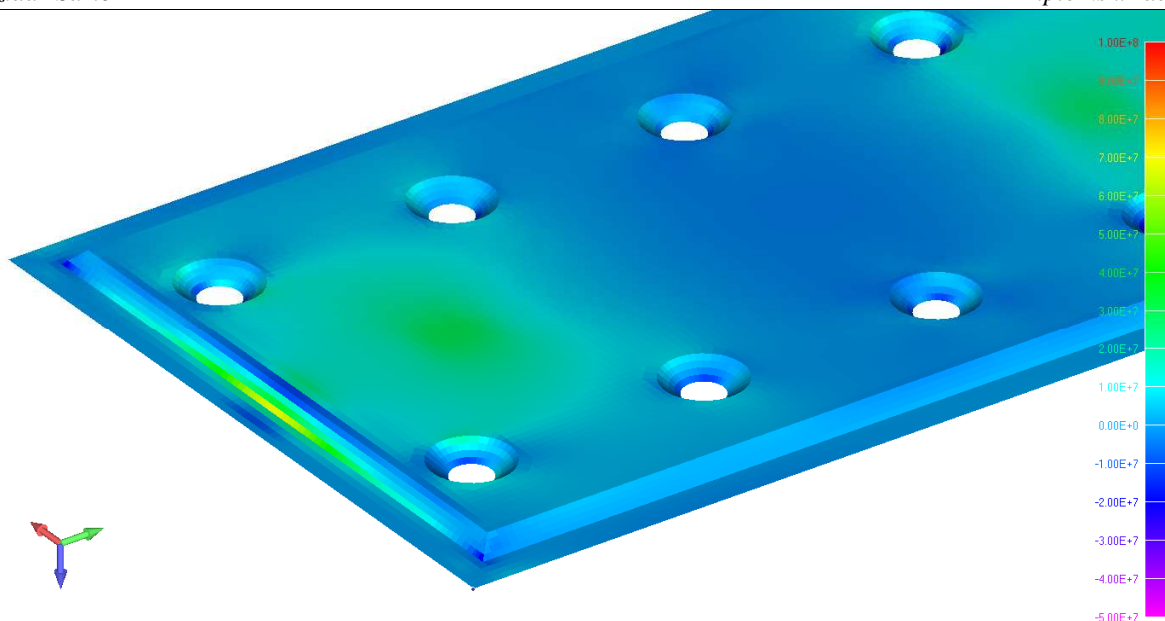


Slika 35. Naprezanja (u Pa) u smjeru x -osi u prvom sloju laminata panela V1 prije lokalnog podebljanja



Slika 36. Područje u kojem je postavljeno lokalno podebljanje

Nakon nekoliko koraka lokalnog podebljanja došlo se do zadovoljenja svih kriterija. Panel V1 sa dva reda rupa zadovoljio je kriterije nakon lokalnog podebljanja sa tri sloja laminata orijentacije 0/90 (Slika 37.). Masa ovog panela iznosi $14,03 \text{ kg/m}^2$. U slučaju panela V2 sa tri reda rupa, da bi došlo do zadovoljenja kriterija bilo je potrebno staviti dva dodatna sloja laminata orijentacije 0/90 po čitavoj površini panela. Masa takvog panela iznosi $18,06 \text{ kg/m}^2$. Panel V2 sa dva reda rupa zadovoljio je sve kriterije nakon lokalnog podebljanja sa tri sloja laminata orijentacije 0/90, te je njegova masa iznosila $13,91 \text{ kg/m}^2$.



Slika 37. Naprezanja (u Pa) u smjeru x -osi u prvom sloju laminata panela V1 nakon lokalnog podebljanja

U tablici 22. prikazana su najveća izračunata naprezanja koja se javljaju nakon reprojektiranja za slučaj opterećenja LP2.

U tablici 23. prikazana su najveća izračunata naprezanja, a u pravilu se sva najveća naprezanja javljaju za slučaj opterećenja LC2.

Tablica 24. prikazuje omjer između ostvarenog faktora sigurnosti i zahtjevane izdržljivosti, a da bi konstrukcija zadovoljila zahtjeve on mora biti veći od 1.

Tablica 22. Vrijednosti naprezanja za reprojektirane kompozitne panele

V1 2 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	sloj 6
σ_{1c} (N/mm ²)	62.54	52.59	38.49	11.88	27.37	47.82
σ_{1t} (N/mm ²)	67.63	53.41	64.23	10.31	17.47	24.63
σ_{2c} (N/mm ²)	45.76	52.59	58.14	9.27	11.9	17.64
σ_{2t} (N/mm ²)	58.81	53.41	45.72	18.05	17.39	16.73
τ_{12} (N/mm ²)	7.03	7.01	6.81	4.84	4.55	4.85
Jezgra						
σ_{3c} (N/mm ²)	0.719					
σ_{3t} (N/mm ²)	0.212					
τ_{13} (N/mm ²)	0.411					
τ_{23} (N/mm ²)	0.480					
V2 2 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	sloj 6
σ_{1c} (N/mm ²)	39.21	43.49	33.79	12.37	28.45	49.3
σ_{1t} (N/mm ²)	69.85	39.63	30.57	10.6	17.97	25.35
σ_{2c} (N/mm ²)	52.53	43.49	59.65	11.19	12.99	15.85
σ_{2t} (N/mm ²)	59.8	39.63	48.1	18.43	17.78	17.61
τ_{12} (N/mm ²)	8.509	6.74	7.81	6.003	5.17	5.32
Jezgra						
σ_{3c} (N/mm ²)	0.734					
σ_{3t} (N/mm ²)	0.224					
τ_{13} (N/mm ²)	0.416					
τ_{23} (N/mm ²)	0.485					
V3 3 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	
σ_{1c} (N/mm ²)	29.71	52.93	26.75	30.51	56.14	
σ_{1t} (N/mm ²)	74.84	54.11	23.2	22.2	24.14	
σ_{2c} (N/mm ²)	57.96	52.98	59.88	62.97	66.51	
σ_{2t} (N/mm ²)	74	54.04	62.34	58	53.65	
τ_{12} (N/mm ²)	9.44	9.99	9.96	10.42	11.05	
Jezgra						
σ_{3c} (N/mm ²)	0.758					
σ_{3t} (N/mm ²)	0.462					
τ_{13} (N/mm ²)	0.387					
τ_{23} (N/mm ²)	0.447					

Tablica 23. Ostvareni faktori sigurnosti za reprojektirane panele

V1 2 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	sloj 6
$D(\sigma_{1c})$	4.949	5.886	8.042	26.055	11.309	6.473
$D(\sigma_{1t})$	4.577	5.795	4.819	30.022	17.718	12.567
$D(\sigma_{2c})$	6.764	5.886	5.324	33.391	26.011	17.547
$D(\sigma_{2t})$	5.263	5.795	6.770	17.148	17.799	18.501
$D(\tau_{12})$	4.976	4.990	5.137	7.221	7.691	7.206
Jezgra						
$D(\sigma_{3c})$	2.78					
$D(\sigma_{3t})$	14.62					
$D(\tau_{13})$	3.64					
$D(\tau_{23})$	3.12					
V2 2 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	sloj 6
$D(\sigma_{1c})$	7.894	7.117	9.160	25.023	10.880	6.278
$D(\sigma_{1t})$	4.431	7.810	10.125	29.201	17.225	12.210
$D(\sigma_{2c})$	5.892	7.117	5.189	27.661	23.828	19.529
$D(\sigma_{2t})$	5.176	7.810	6.435	16.795	17.409	17.577
$D(\tau_{12})$	4.111	5.190	4.479	5.827	6.766	6.575
Jezgra						
$D(\sigma_{3c})$	2.73					
$D(\sigma_{3t})$	13.84					
$D(\tau_{13})$	3.61					
$D(\tau_{23})$	3.09					
V2 3 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	
$D(\sigma_{1c})$	10.418	5.848	11.571	10.145	5.514	
$D(\sigma_{1t})$	4.136	5.720	13.342	13.943	12.822	
$D(\sigma_{2c})$	5.340	5.842	5.169	4.916	4.654	
$D(\sigma_{2t})$	4.183	5.728	4.965	5.337	5.769	
$D(\tau_{12})$	3.706	3.502	3.512	3.357	3.166	
Jezgra						
$D(\sigma_{3c})$	2.64					
$D(\sigma_{3t})$	6.72					
$D(\tau_{13})$	3.88					
$D(\tau_{23})$	3.36					

Tablica 24. Razlika između ostvarenog i zahtjevanog faktora sigurnosti

V1 2 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	sloj 6
σ_{1c}	1.2	1.5	2.0	6.4	2.8	1.6
σ_{1t}	1.1	1.4	1.2	7.4	4.4	3.1
σ_{2c}	1.7	1.5	1.3	8.2	6.4	4.3
σ_{2t}	1.3	1.4	1.7	4.2	4.4	4.6
τ_{12}	1.6	1.6	1.6	2.3	2.5	2.3
Jezgra						
σ_{3c}	1.3					
σ_{3t}	6.6					
τ_{13}	1.3					
τ_{23}	1.1					
V2 2 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	sloj 6
σ_{1c}	1.9	1.8	2.3	6.2	2.7	1.5
σ_{1t}	1.1	1.9	2.5	7.2	4.2	3.0
σ_{2c}	1.5	1.8	1.3	6.8	5.9	4.8
σ_{2t}	1.3	1.9	1.6	4.1	4.3	4.3
τ_{12}	1.3	1.7	1.4	1.9	2.2	2.1
Jezgra						
σ_{3c}	1.2					
σ_{3t}	3.1					
τ_{13}	1.4					
τ_{23}	1.2					
V2 3 REDA RUPA						
Laminat	sloj 1	sloj 2	sloj 3	sloj 4	sloj 5	
σ_{1c}	2.6	1.4	2.9	2.5	1.4	
σ_{1t}	1.0	1.4	3.3	3.4	3.2	
σ_{2c}	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	
σ_{2t}	1.0	1.4	1.2	1.3	1.4	
τ_{12}	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	
Jezgra						
σ_{3c}	1.2					
σ_{3t}	6.3					
τ_{13}	1.3					
τ_{23}	1.1					

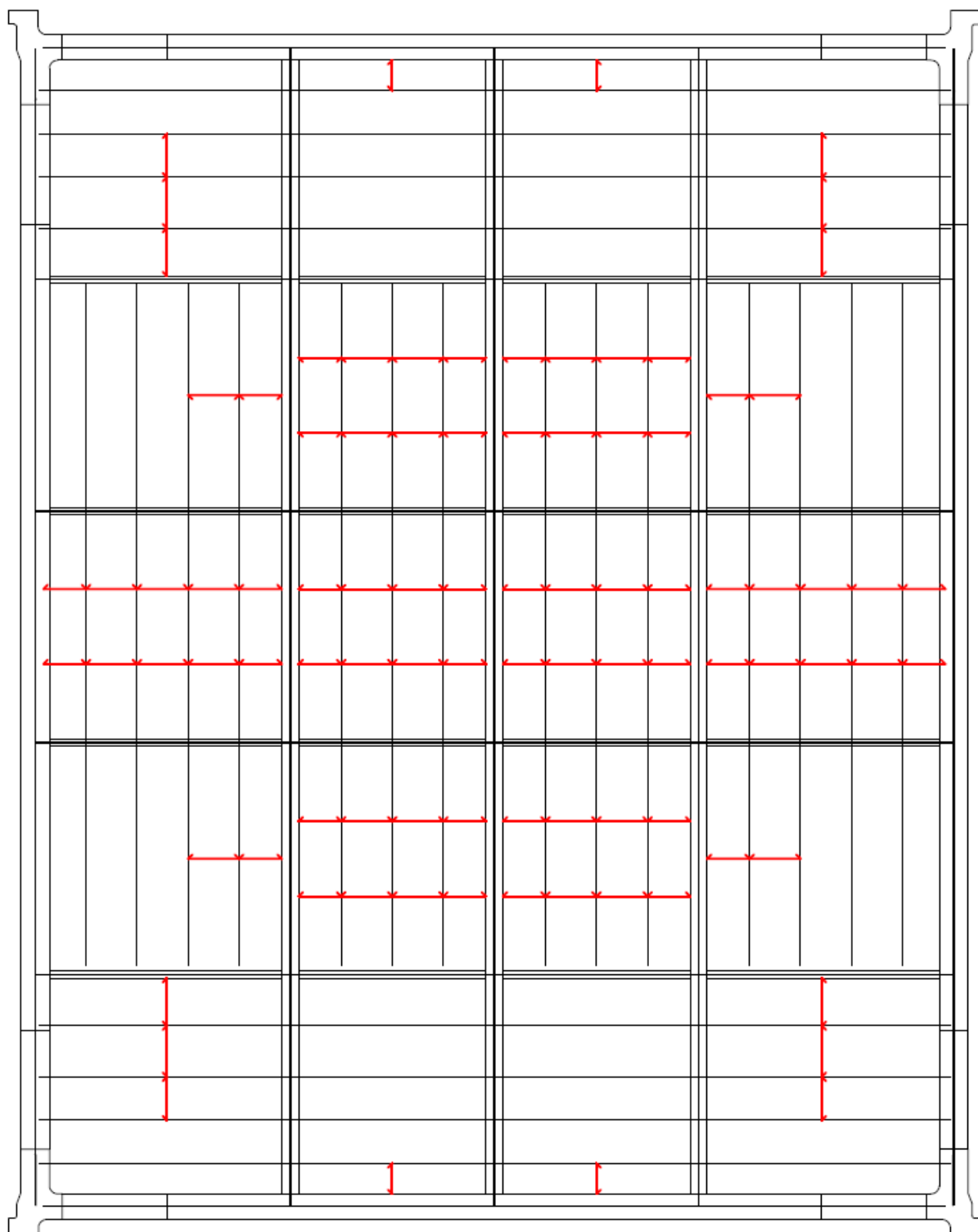
5.2. Reprojektiranje čelične palubice

Konstrukcija gornje oplata čelične palubice (*top plate*) nije zadovoljavala kriterij izvijanja oplata između ukrepa. Reprojektiranje je provedeno na način da je povećavana debljina lima oplata za 0,5 mm, te su na mjestima gdje se podebljanjem lima nije moglo izbjeći izvijanje postavljene su ukrepe protiv izvijanja (*anti-buckling stiffeneri*) u vidu plosnog profila FB 80x6. Ukoliko postavljanje dviju ukrepa protiv izvijanja na jednom polju lima nije dovoljno da se izbjegne izvijanje, debljina je ponovno povećavana za 0,5 mm te se ponovo postavljaju ukrepe protiv izvijanja. Konačna debljina lima oplata iznosila je 7 mm, a konačni raspored ukrepa protiv izvijanja prikazan je na slici 38.

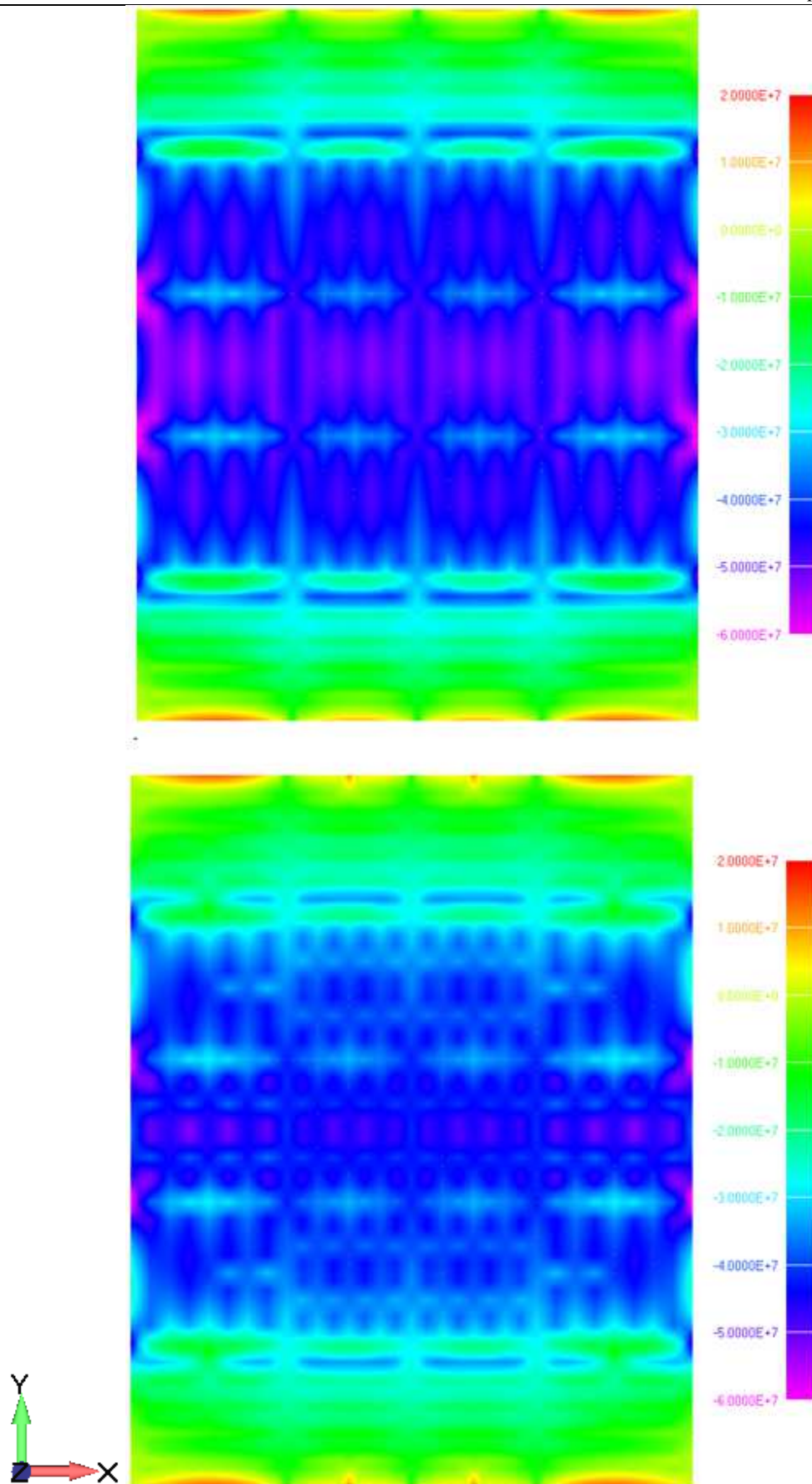
Tablica 25. Rezultati analize izvijanja reprojektirane palubice

Polje	t (mm)	l (mm)	s (mm)	σ_{ax} (N/mm ²)	σ_{ay} (N/mm ²)	τ_{xy} (N/mm ²)	ψ_x	ψ_y	Faktor izvijanja
6	7	1500	546	23.02	30.48	26.53	4.24	1.07	0.91
14	7	1365	600	67.20	33.53	16.43	1.24	1.13	0.98
18	7	910	600	68.18	46.65	4.46	1.17	1.19	0.98
23	7	910	600	74.55	29.86	5.60	1.00	1.00	0.8
26	7	910	600	74.40	36.63	4.41	1.00	1.00	0.87

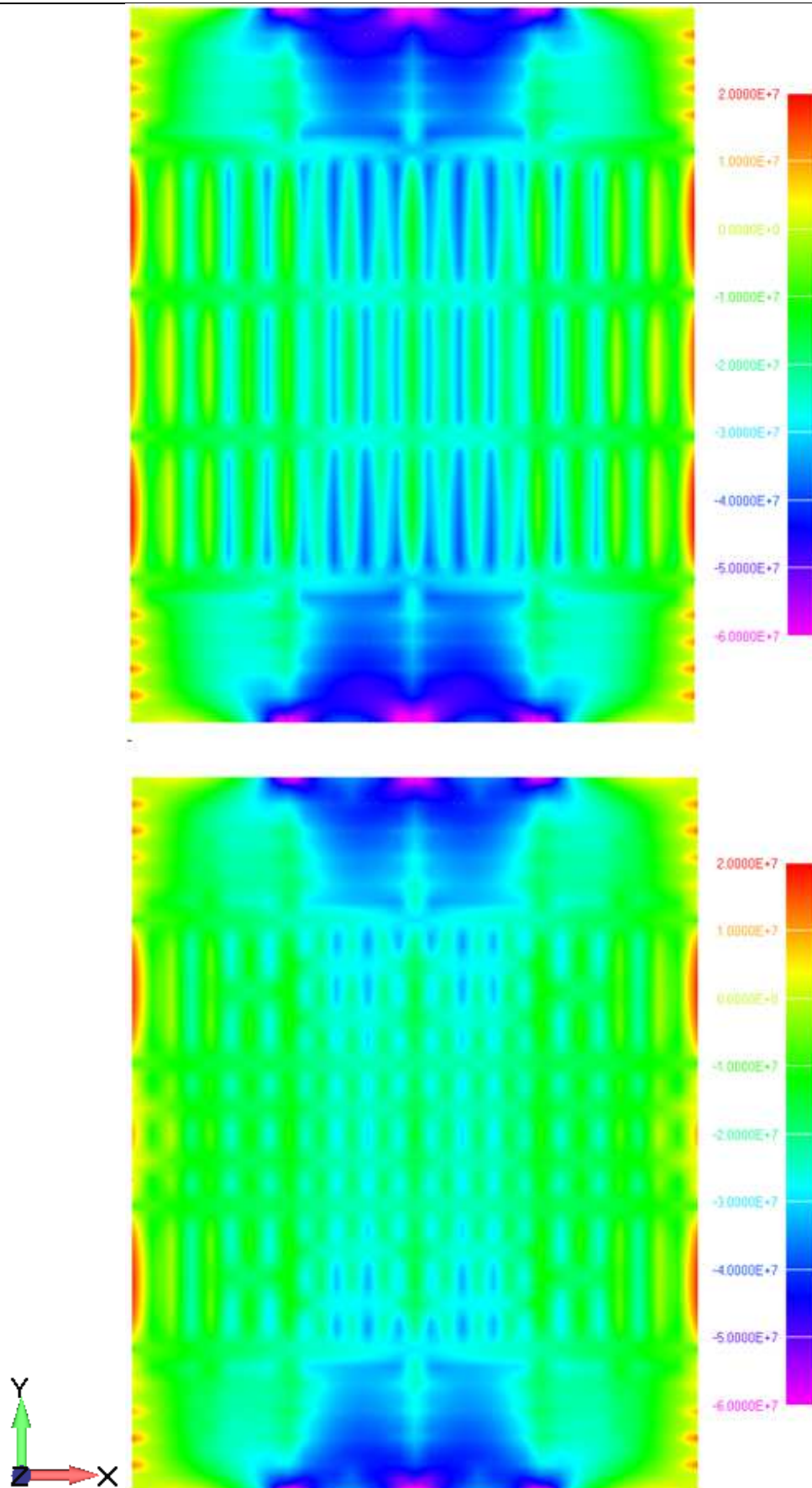
Promjena stanja naprezanja u oplati palubice prije i nakon reprojektiranja prikazana je na slici 39. za naprezanje u smjeru y-osi a na slici 40. za naprezanje u smjeru x-osi.



Slika 38. Lokacije na panelu na kojima su postavljene ukrepe protiv izvijanja



Slika 39. Naprezanja (u Pa) u smjeru y-osi prije i nakon reprojektiranja



Slika 40. Naprezanja (u Pa) u smjeru x-osi prije i nakon reprojektiranja

5.3. Usporedna analiza kriterija kvalitete razmatranih varijanti konstrukcije

5.3.1. Usporedba različitih varijanti palubica izrađenih od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela

Nakon što su obje topološko-geometrijske varijante palubica izrađenih od kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih panela dovedene u stanje zadovoljenja svih kriterija podobnosti može ih se usporediti po kriteriju kvalitete, odnosno masi. Vrijednosti po kojima se razlikuju tri izvedbe ovog tipa palubice prikazane su u tablici 26.

Tablica 26. Usporedba izvedbi kompozitnih palubica

	V1 2	V2 2	V2 3
	REDA	REDA	REDA
	RUPA	RUPA	RUPA
Masa elemenata roštilja (kg)	12450	11900	11900
Masa kompozitnih panela (kg)	2070	2050	2660
Masa ukupno (kg)	14520	13950	14560
Površina kompozitnih panela (m ²)	147	147	147
Broj rupa za privez automobila	264	220	330
Masa roštilja po m ² (kg/m ²)	84.7	81.0	81.0
Masa kompozitnih panela po m ² (kg/m ²)	14.08	13.95	18.10
Masa po m ² (kg/m ²)	98.8	94.9	99.0
Maksimalni progib kompozitnog panela (mm)	23.93	38.15	25.64

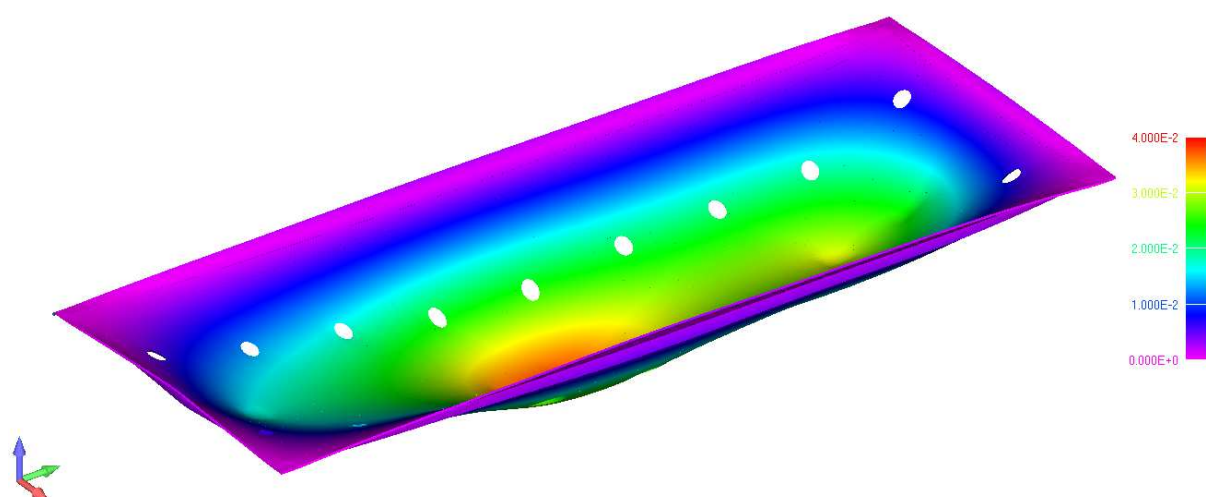
Iz tablice možemo zaključiti da je topološka izvedba roštilja palubice V2 prihvatljivija sa stajališta minimalne mase konstrukcije od izvedbe palubice V1. Razlog tome vjerojatno je što sam roštilj palubice V1 nije konstruiran na način da se najbolje opire globalnom savijanju palubice, već su položaji poprečnih i uzdužnih greda određeni željenim dimenzijama kompozitnih panela koji se oslanjaju na njih. Zbog toga je dodatna središnja poprečna greda u izvedbi V1 bila suvišna sa stajališta čvrstoće roštilja.

Ovdje je prikazao da veća širina kompozitnog panela ne utječe puno na njegovu masu, čak ni u slučaju kada takav panel ima veći broj rupa za privez automobila po m² od užeg panela V1. Razlog tome je što je broj slojeva laminata kod panela V1 i V2 sa dva reda rupa dimenzioniran isključivo prema maksimalnim naprezanjima koja su se javljala kao koncentracije na rubovima panela, te u oba slučaja nisu ovisila o dimenzijama (širini) kompozitnog panela.

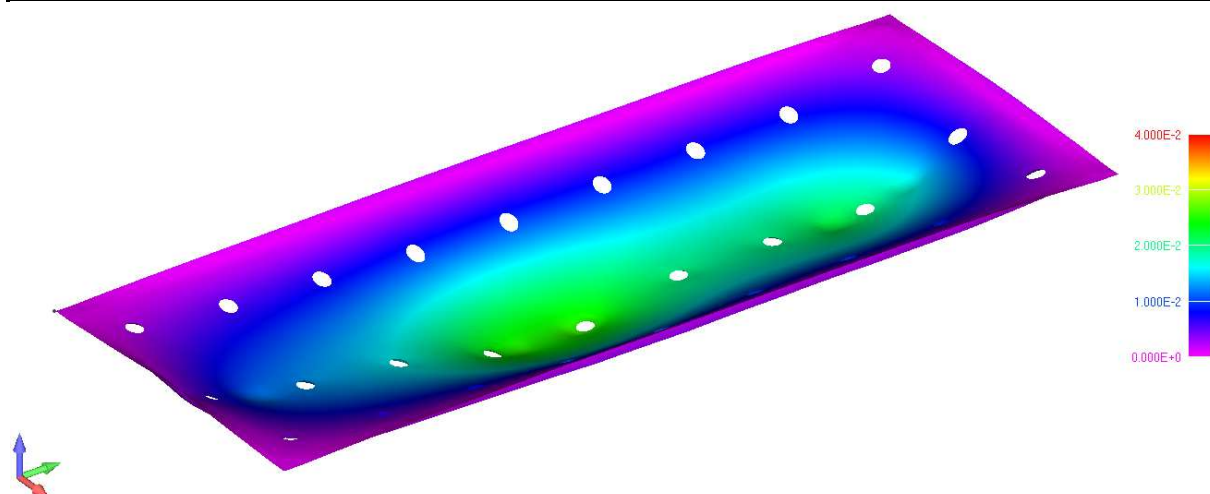
Ukoliko se usporede vrijednosti maksimalnih progiba kompozitnih panela, koja nije navedena kao kriterij pri dimenzioniranju panela, ali se može smatrati mjerom krutosti panela, pa je panel kvalitetniji ukoliko ima manji progib, tada vidimo da su u ovom slučaju vrijednosti maksimalnog progiba kod panela V2 sa dva reda rupa oko 40% veća od vrijednosti kod panela V1 sa dva reda rupa i V2 sa tri reda rupa. Razlog tomu je što lokalna podebljanja nisu pridonijela mnogo krutosti panela, dok je panel V2 sa tri reda rupa kojemu su dodana dva sloja laminata po čitavoj površini ostvario 38% smanjenje maksimalnog progiba.

Ovdje je riječ o rezultatima za specifičan slučaj kompozitnih panela s obzirom na zadanu topologiju i geometriju, te bi za nekakav drugačiji omjer stranica panela ili raspored rupa za privez automobila bilo nužno ponovo provesti analizu, jer rezultati uvelike ovise o lokalnim stanjima naprezanja u dijelovima panela.

Na slici 41. i slici 42. prikazani su vertikalni pomaci kompozitnih panela V2 sa dva i tri reda rupa uvećane za 20 puta.



Slika 41. Vertikalni pomaci (u m) u kompozitnom panelu V2 sa dva reda rupa



Slika 42. Vertikalni pomaci (u m) u kompozitnom panelu V2 sa tri reda rupa

5.3.2. Usporedba čelično kompozitnih palubica sa klasičnom palubicom u potpunosti izgrađenom od čelika

U tablici 27. su usporedno prikazani rezultati čelične i kompozitnih palubica V1 sa dva reda rupa i V2 sa dva reda rupa.

Tablica 27. Usporedba različitih koncepata podiznih palubica

	ČELIČNA	V1	V2
Masa elemenata roštilja (kg)	5508	12450	11900
Masa oplata+ukrepe/kompozitni panel (kg)	9400	2070	2050
Masa ukupno (kg)	14908	14520	13950
Masa roštilja po m ² (kg/m ²)	37.5	84.7	81.0
Masa oplata+ukrepe/kompozitni panel po m ² (kg/m ²)	63.95	14.08	13.95
Masa po m ² (kg/m ²)	101.4	98.8	94.9
Smanjenje mase u odnosu na čeličnu palubicu (%)	-	2.6	6.4

Može se vidjeti da razlika u masi između sve tri palubice ne prelazi 7%, što je puno manje od uštede do 20% koja je ostvarena za fiksne palube u [6], i gotovo dvostruko manje od uštede od 12% za slične podizne palubice koja je spomenuta u [15]. Razlog tome može biti u načinu oslanjanja čeličnog roštilja, koji u oba slučaja, V1 i V2, čini preko 80% mase palubice. Način oslanjanja roštilja zglobno u četiri rubne točke jako je nepovoljan sa stajališta maksimalnih progiba palubice, koji su u ovom slučaju bili mjerodavni za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata. Iz tog razloga zamjena lima oplata lakšim materijalom ne pridonosi puno uštedi u

masi na globalnoj razini, posebice stoga jer sam lim oplata uvelike sudjeluje u savijanju roštilja palubice, kao gornja prirubnica nosača roštilja.

U ovome slučaju nakon provedene optimizacije, grede roštilja dimenzionirane su isključivo na temelju dozvoljenih progiba. Time nije iskorišten dobar dio kapaciteta čelika AH36, te bi zapravo bilo moguće kod roštilja kompozitnih palubica zamijeniti čelik povišene čvrstoće običnim brodograđevnim čelikom jer maksimalna naprezanja u oba roštilja, V1 i V2, ne prelaze 74% granice razvlačenja čelika ST24.

S obzirom da je procijenjena cijena proizvodnje kompozitnih palubica, prema podacima iz [7], barem 50% veća od klasičnih čeličnih, isplativost zamjene čeličnih palubica kompozitnima za ovaj slučaj postaje jako upitna.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza i reprojektiranje konstrukcije podiznih palubica brodova za prijevoz automobila i vozila primjenom metode konačnih elemenata. Cilj rada bio je istraživanje i ocjena mogućnosti primjene novog koncepta podiznih palubica uporabom kombinacije čeličnog roštilja i kompozitnih sendvič panela. U tu svrhu, dvije različite topološke varijante novog koncepta palubica su analizirane i reprojektirane na način da zadovoljavaju sve zahtjevane kriterije uz minimiziranje mase konstrukcije. Takve dobivene varijante uspoređene su sa palubicom klasične konstrukcije u potpunosti izrađene od čelika, koja je u ovom radu također dimenzionirana da zadovoljava iste zahtjevane kriterije.

Usporedbom ovih dvaju koncepata zaključeno je da za zadani tip podizne palubice, zadanih dimenzija, opterećenja i operacijskih kriterija, ušteda u masi zamjenom klasične konstrukcije novim konceptom ne prelazi 7%. Ta ušteda bitno je manja od one koja je ostvarena (oko 20%) u slučajevima kada se koncept sličan ovome primjenjivao na fiksne palube za prijevoz automobila na sličnom tipu broda. S obzirom da primjena kompozitnih materijala u velikoj brodogradnji, osim što često nailazi na probleme sa dobivanjem odobrenja od strane klasifikacijskih društava, uvelike povećava cijenu proizvodnje broda, teško je ocjeniti koliko je ova ušteda u masi isplativa brodograditelju.

Mogući uzrok za relativno male uštede u masi čelično kompozitnih varijanti palubica jest, što u slučaju podiznih palubica, način na koji su oslonjene za brodsku konstrukciju, kao i operacijski kriteriji koje moraju zadovoljiti, naglasak stavljaju na krutost konstrukcije a ne na naprezanja, što je svojstvo kod kojega kompozitni materijali nemaju značajnu prednost nad klasičnim konstrukcijskim materijalima poput čelika ili aluminijskih legura. Stoga zamjena čeličnih elemenata podizne palubice kompozitnim dovodi do smanjenja krutosti njene konstrukcije, što je u suprotnosti sa svojstvima koja se žele ostvariti.

S druge strane, kod brodova za prijevoz vozila, smanjenjem mase i snižavanjem težišta broda može se postići višestruka ušteda zbog smanjene potrebe za krcanjem balasta pri plovidbi te je za konačnu ocjenu izvedivosti primjene ovog koncepta nužno ovaj problem sagledati cjelovito, kao dio u procesu osnivanja broda.

LITERATURA

- [1] Torri, Y., Hogha, H., Nishimura, K., Uetani, H.: "Car Carriers", Ch.34 in Ship Design and Construction, Vol.2, Editor T.Lamb, SNAME 2004.
- [2] MacGregor: Technical information, Hoistable decks, 2010.
- [3] TTS: Car decks and ramps, 2018.
- [4] Andersson, E.; Guhrén, A.: Alternative Design of Steel/Aluminium Car Deck Panels, Master thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2014.
- [5] Andersson, P, Öisjöen, D., Rinsberg, J.W.: Development and Analysis of Composite Car Deck Structures, LIWEM, Gothenburg, Germany 2012.
- [6] Radolović, V., Rahm, M.: Design of car decks with composite panels introduced on a 7000 cars car carrier, E-LASS Conference Pula, 2017.
- [7] MacGregor: Idejni nacrti podiznih palubica PCTC broda, 2018.
- [8] DNV-GL Rules for classification of ships, January 2017.
- [9] Bureau Veritas, Rule, BV Note NR 546, Hull in composite materials and plywood, material approval, design principles, construction and survey, March 2012.
- [10] DNV - Hull Structural Design, Ships with Length 100 metres and above, July 2011.
- [11] Barišić, A.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [12] Stipčević, M., Kitarović, S., Dundara, Đ., Radolović, V. - Evaluation of composite sandwich panel structural variants for fixed car decks in the upper cargo hold of the Ro-Ro car and truck carrier, Proceedings of IMAM 2015, Pula, 2015
- [13] Bureau Veritas - NR 600 DT R00 E, Hull Structure and Arrangement for the Classification of Cargo Ships less than 65 m and Non Cargo Ships less than 90 m, July 2014.
- [14] Uršić, J.: Čvrstoća broda II, Sveučilište u Zagrebu, 1983.
- [15] Rinsberg, J.W.: Steel or composite car deck structure - a comparison analysis of weight, strength and cost, Proceedings of MARSTRUCT 2015, Southampton, UK, 2015.

PRILOZI

I. CD-R disc