

Analiza čvrstoće konstrukcijskih detalja na brodovima građenim od biokompozita

Budak, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:743973>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Budak

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan, dipl. ing.

Student:

Nikola Budak

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, profesoru Smiljku Rudanu prvenstveno na svojoj pomoći, te što mi je zadao veoma zanimljiv zadatak i omogućio da prisustvujem u projektu suradnje s industrijom što mi je bila velika želja. Također, ovim putem htio bih se zahvaliti na svojoj podršci svojim kolegama sa smjera koji su mi tijekom ovih godina studiranja postali bliski prijatelji. U konačnici, velike zahvale idu mojoj majci i sestri bez čije bezuvjetne podrške ne bih danas bio ovdje.

Nikola Budak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Budak** JMBAG: **0035225221**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza čvrstoće konstrukcijskih detalja na brodovima građenim od biokompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Strength analysis of structural details on the ships made of biocomposites**

Opis zadatka:

Manja plovila često se izrađuju od kompozitnih materijala. Ojačala su najčešće staklena ili ugljična vlakna, a slojevi vlakana povezuju se smolom ili matricom druge vrste. Takvi kompozitni materijali vrlo su prikladni za gradnju brodova, no nije ih jednostavno ili čak uopće moguće reciklirati. Osim što je njihova primjena stoga neodrživa, troškovi njihova zbrinjavanja rastu. Alternativa primjeni klasičnih kompozita u brodogradnji je primjena biokompozita. Kod biokompozita i ojačalo i matrica biorazgradivi su materijali, npr. vlakna od lana i biorazgradiva smola. Propisi o gradnji brodova ne daju specifične upute za primjenu biokompozita, već za takve nekonvencionalne materijale propisuju kako oni moraju imati „jednaka ili bolja mehanička svojstva“, a za što je potrebno pružiti dokaz. U radu je potrebno sagledati mogućnost primjene biokompozita u brodogradnji. Zatim, za odabrani brod čiji su nacrti dostupni, potrebno je uočiti potencijalno kritične konstrukcijske detalje.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled upotrebe biokompozita u gradnji malih brodova.
2. Odabrati referentni biokompozit na osnovi dostupnih podataka te sagledati njegova osnovna mehanička svojstva.
3. Na osnovi dostupnih nacrti broda, identificirati više kritičnih strukturnih detalja, s osvrtom na izloženost tih detalja određenim opterećenjima za brod u službi.
4. Izraditi mrežu konačnih elemenata odabranih konstrukcijskih detalja načinjenih od biokompozita.
5. Analizirati čvrstoću konstrukcijskih detalja u izvedbi od biokompozita i onoj od klasičnih kompozita.
6. Po mogućnosti, predložiti mogućnost tehnološkog i konstrukcijskog unaprjeđenja razmatranih detalja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. TEHNIČKE SPECIFIKACIJE KATAMARANA PROECO	3
2.1. Tehničke specifikacije katamarana	3
2.2. Opis strukture trupova i palube	3
2.2.1. Struktura trupa.....	4
2.2.2. Struktura palube	5
2.3. Materijali korišteni u izradi trupova i palube katamarana	5
2.4. Sastav korištenih laminata.....	6
2.4.1. Laminati panela.....	7
2.4.1.1. Raspored slojeva u laminatu panela dna	7
2.4.1.2. Raspored slojeva u laminatu panela boka	7
2.4.1.3. Raspored slojeva u laminatu panela boka	8
2.4.1.4. Raspored slojeva u laminatu nepropusne pregrade.....	8
2.4.2. Laminati uzdužnjaka	9
2.4.2.1. Raspored slojeva u laminatu rebara	9
2.4.2.2. Raspored slojeva u laminatu uzdužnjaka	9
3. BIOKOMPOZITI I NJIHOVA PRIMJENA U INDUSTRIJI I MALOJ BRODOGRADNJI	11
3.1. Definicija kompozita i biokompozita.....	11
3.2. Prednosti korištenja biokompozita s lanenim vlaknima.....	11
3.3. Biokompozit lan/epoksi korišten u radu	12
3.3.1. Svojstva ampliTEx 5040 u epoksidnoj matrici	12
4. METODA KONAČNIH ELEMENATA	14
4.1. Metoda konačnih elemenata.....	14
4.2. Korišteni programski paket Simcenter Femap/NX Nastran.....	14
4.3. Postupak unosa svojstava laminata u FEMAP.....	14
5. VALIDACIJA MATERIJALNIH SVOJSTAVA BIOKOMPOZITA	17
5.2. Analitički proračun rasteznog modula elastičnosti laminata sa zakrenutim slojevima 18	
5.3. Validacija podataka vlačnim ispitivanjem	19
5.3.1. Vlačno ispitivanje na kidalici.....	20
5.3.2. Simulacija vlačnog testa MKE.....	21
5.4. Validacija podataka ispitivanjem na savijanje	23
5.4.1. Savojno ispitivanje na kidalici	25

6. ODREĐIVANJE SLOJEVA U EKVIVALENTNIM LAMINATIMA BIOKOMPOZITA	
29	
6.1. Postupak određivanja broja slojeva biokompozita po dijelovima trupa	29
6.1.1. Rubni uvjeti na panele.....	29
6.1.2. Diskretizacija panela	30
6.1.3. Orijentacija materijala.....	30
6.1.4. Kriterij ekvivalentnosti	30
6.2. Određivanje ekvivalentnih laminata panela	31
6.2.1. Ekvivalentni panel dna.....	32
6.2.2. Ekvivalentni panel boka.....	32
6.2.3. Ekvivalentni panel palube	33
6.2.4. Ekvivalentni panel nepropusne pregrade	34
6.3. Određivanje ekvivalentnih laminata ukruta	35
6.3.1. Ekvivalentni laminat rebra	35
6.3.2. Ekvivalentni laminat uzdužnjaka boka i dna	36
6.3.3. Ekvivalentni laminat uzdužnjaka palube	38
7. GLOBALNI PRORAČUN TRUPA	40
7.1. Priprema geometrije trupa broda.....	40
7.1.2. Pojednostavljanje geometrije u FEMAP-u	42
7.1.4. Diskretizacija trupa	46
7.2. Usporedba mase trupa obzirom na korišteni materijal.....	47
7.3. Uzdužno opterećenje.....	47
7.3.1. Rubni uvjeti za proračun pregiba i progiba.....	48
7.3.3. Rezultati pregiba i progiba trupa od biokompozita.....	52
7.4. Provjera trupa na tlakove	54
7.4.1. Dno.....	54
7.4.2. Bok.....	57
7.4.3. Paluba.....	58
7.4.4. Nepropusne pregrade	59
8. PRORAČUN KONSTRUKCIJSKIH DETALJA	61
8.1.1. Rezultati analize podmodela s progušćenom mrežom	64
8.2. Moguća konstrukcijska rješenja.....	66
8.2.1. Povećanje broja slojeva biokompozita u laminatu rebara.....	66
8.2.2. Promjena konstrukcijskog rješenja	67
9. ZAKLJUČAK.....	69
LITERATURA.....	71
PRILOZI.....	73

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Prikaz trupova i palube katamarana u izometriji [10]	4
Slika 2.2	Uzdužni presjek trupa [10]	4
Slika 2.3	Prikaz strukture palube bez gornje oplata	5
Slika 3.1	Lanena vlakna pletivo 4x4 (lijevo) i 2x2 (desno).....	13
Slika 4.1	Definiranje materijalnih konstanti u FEMAP-u	15
Slika 4.2	Sučelje FEMAP-a za slaganje slojeva u laminat	16
Slika 5.1	Ispitivani uzorci biokompozitnog laminata	18
Slika 5.2	Promjena modula elastičnosti ovisno o kutu ϑ []	18
Slika 5.3	Dimenzije epruvete za vlačni test.....	19
Slika 5.4	Dijagram naprezanje-istezanje pri vlačnom opterećenju za kompozit s 4 sloja vlakana.....	20
Slika 5.5	MKE model vlačnog testa	22
Slika 5.6	Vrijednosti istezanja u smjeru glavnih materijalnih osi	22
Slika 5.7	Ispitni postav za savojno ispitivanje.....	24
Slika 5.8	Simulacija savojnog testa, mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti	26
Slika 5.9	Čvorovi na kojima se računa prosječni progib	26
Slika 5.10	Vrijednosti istezanja sloja laminata od 4 sloja u smjeru materijalnih glavnih osi pri savijanju.....	27
Slika 6.1	Prikaz definiranja ploče sa koordinatnim sustavom u računalnom programu ComposeIT	29
Slika 6.2	Primjer rubnih uvjeta i mreže konačnih elemenata za panel dna	30
Slika 6.3	Najveći indeksi popuštanja na panelu dna.....	32
Slika 6.4	Najveći indeksi popuštanja na panelu boka.....	33
Slika 6.5	Najveći indeksi popuštanja na panelu palube.....	34
Slika 6.6	Najveći indeksi popuštanja na panelu nepropusne pregrade.....	34
Slika 6.7	Rubni uvjeti i mreža konačnih elemenata za proračun ekvivalentnog laminata rebra.....	35
Slika 6.8	Najveći indeksi popuštanja na ukruti okomitog rebra 200x40mm.....	36
Slika 6.9	Presjek uzdužne ukrepe	36
Slika 6.10	Rubni uvjeti i diskretizirana geometrija uzdužnjaka boka i dna	37
Slika 6.11	Najveći indeksi popuštanja na ukruti okomitog rebra 200x40mm.....	38
Slika 6.12	Uzdužnjak palube: rubni uvjeti, diskretizacija i najveći indeksi popuštanja.....	39
Slika 7.1	Greške u definiranju geometrije trupa	41
Slika 7.2	Uklanjanje otvora za stepenicu u oplati boka.....	41
Slika 7.3	Uklanjanje otvora nastalog izrezivanjem oplata dna za kobilicu konačne debljine	42
Slika 7.4	Poravnavanje površina palube	42
Slika 7.5	Pojednostavljenje geometrije vrha trupa	43
Slika 7.6	Oplata dna.....	43
Slika 7.7	Oplata boka.....	44
Slika 7.8	Ucrtane nepropusne pregrade	44
Slika 7.9	Ucrtana rebra	44
Slika 7.10	Ucrtane plohe oplata palube	45
Slika 7.11	Ucrtani uzdužnjaci oplata trupa 150x100mm.....	45
Slika 7.12	Ucrtani uzdužnjaci palube 300x100mm	45
Slika 7.13	Mreža konačnih elemenata na trupu.....	47
Slika 7.14	Zamjena laminata stakloplastike sa biokompozitom na boku	47
Slika 7.15	Skica progiba i pregiba broda [Ref.]	48

Slika 7.16	Raspodjela momenta duž broda i reakcijske sile u čvorovima.....	48
Slika 7.17	Odabir zavisnih čvorova na krmi	49
Slika 7.18	Odabir zavisnih čvorova na pramcu	49
Slika 7.19	Zadavanje rubnog uvjeta simetrije	50
Slika 7.20	Zadavanje sile na 973 čvora duž linije okomite na palubu	51
Slika 7.21	Zadani kruti elementi i sile na čvorovima razmaknute za središnjih 25% duljine broda.....	51
Slika 7.22	Polje progiba na deformiranom trupu od stakloplastike.....	52
Slika 7.23	Progib i pregib trupa izrađenog od biokompozita	53
Slika 7.24	Povišeno naprezanje na trupu od biokompozita u ukruti na mjestu djelovanja pregibne sile.....	54
Slika 7.25	Rubni uvjeti provjere hidrostatskog tlaka na panele dna.....	55
Slika 7.26	Najveći indeks popuštanja u uzdužnjacima dna pri hidrostatskom tlaku	55
Slika 7.27	Najveći indeks popuštanja u rebrima pri hidrostatskom tlaku dna.....	56
Slika 7.28	Koncentracija naprezanja na spoju rebra i uzdužnjaka dna.....	57
Slika 7.29	Rubni uvjeti kod hidrostatskog opterećenja panela boka	57
Slika 7.30	Povišen najveći indeks popuštanja u rebrima uslijed hidrostatskog opterećenja boka	58
Slika 7.31	Rubni uvjeti kod hidrostatskog opterećenja palube.....	58
Slika 7.32	Najveći indeks popuštanja za hidrostatsko opterećenje palube.....	59
Slika 7.33	Povišeni indeks popuštanja n spoju rebra oplata palube i uzdužnjaka boka	59
Slika 7.34	Rubni uvjeti hidrostatskog opterećenja na nepropusne pregrade drugog odjeljka	60
Slika 8.1	Grupiranje izdvojenih elemenata.....	61
Slika 8.2	Izbornik za uvođenje izdvojenih elemenata u novu simulaciju.....	62
Slika 8.3	Elementi koje podmodeliramo	62
Slika 8.4	Progušćena mreža konačnih elemenata na strukturnom detalju.....	63
Slika 8.5	Lijevo: Izbornik prenošenja pomaka sa globalnog na izdvojeni model	64
Slika 8.6	Najveći indeks popuštanja na podmodelu	65
Slika 8.7	Dodavanje elemenata postupnog prijelaza laminata rebra na oplatu	66
Slika 8.8	Naprezanja u smjeru materijalne osi 2, deformirani i nedeformirani model.....	66
Slika 8.9	Vlačno naprezanje u smjeru materijalne osi 2 nakon popunjavanja rupe u rebru.	67

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Karakteristike slojeva kompozita od stakloplastike	6
Tablica 2.2 Elastična svojstva slojeva kompozita od stakloplastike	6
Tablica 2.3 Najveća dopuštena naprezanja slojeva kompozita od stakloplastike	6
Tablica 2.4 Karakteristike materijala jezgri	6
Tablica 2.5 Elastična svojstva materijala jezgri	6
Tablica 2.6 Najveća dopuštena naprezanja materijala jezgri	6
Tablica 2.7 Dimenzije najvećih panela i tlakovi koji na njih djeluju	7
Tablica 2.8 Laminat dna od stakloplastike	7
Tablica 2.9 Laminat boka od stakloplastike	8
Tablica 2.10 Laminat palube načinjen od stakloplastike.....	8
Tablica 2.11 Laminat nepropusne pregrade od stakloplastike	9
Tablica 2.12 Laminat rebra od stakloplastike	9
Tablica 2.13 Laminat uzdužnjaka od stakloplastike	10
Tablica 3.1 Karakteristike slojeva biokompozita	13
Tablica 3.2 Elastična svojstva slojeva biokompozita	13
Tablica 3.3 Najveća dopuštena naprezanja slojeva biokompozita	13
Tablica 5.1 Uprosječeni rezultati vlačnog ispitivanja	21
Tablica 5.2 Rezultati simulacije vlačnog testa MKE	23
Tablica 5.3 Uprosječeni rezultati savojnog ispitivanja.....	25
Tablica 5.4 Rezultati simulacije savojnog testa MKE.....	27
Tablica 6.1 Usporedba panela dna.....	32
Tablica 6.2 Usporedba panela boka.....	33
Tablica 6.3 Usporedba panela palube.....	33
Tablica 6.4 Usporedba panela palube.....	34
Tablica 6.5 Usporedba laminata za rebro okomice 200x40mm	35
Tablica 6.6 Usporedba laminata za uzdužnjak trupa 150x100mm	37
Tablica 6.7 Usporedba laminata za uzdužnjak palube 300x100mm	39
Tablica 7.1 Segmenti geometrije i laminati koji su im dodjeljeni.....	46
Tablica 7.2 Ovisnost najvećeg indeksa naprezanja o broju slojeva u uzdužnjacima dna	56
Tablica 8.1 Ovisnost najvećeg indeksa naprezanja pri hidrostatskom tlaku na bok o broju slojeva u rebrima	67

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{OA}	m	Duljina preko svega
L_{PP}	m	Duljina između okomica
B_{OA}	m	Širina preko svega
B_{trup}	m	Širina trupa
T	m	Projektzni gaz
Δ	kg	Istisnina na projektnom gazu
$n_{putnika}$		Broj putnika
n_{posada}		Posada
$V_{pitka\ voda}$	L	Volumen pitke vode na brodu
$V_{crna\ i\ siva\ voda}$	L	Volumen crne i sive vode na brodu
E_1	MPa	Modul elastičnosti u smjeru materijalne osi 1
E_2	MPa	Modul elastičnosti u smjeru materijalne osi 2
G_{12}	MPa	Smični modul u smjeru 1-2
G_{13}	MPa	Smični modul u smjeru 1-3
G_{23}	MPa	Smični modul u smjeru 2-3
ν_{12}		Poissonov koeficijent u smjeru 1-2
ν_{21}		Poissonov koeficijent u smjeru 2-1
X_T	MPa	Najveće dopušteno vlačno naprezanje u smjeru osi 1
X_C	MPa	Najveće dopušteno tlačno naprezanje u smjeru osi 1
Y_T	MPa	Najveće dopušteno vlačno naprezanje u smjeru osi 2
Y_C	MPa	Najveće dopušteno tlačno naprezanje u smjeru osi 2
S	MPa	Najveće dopušteno smično naprezanje
τ_{IL1}	MPa	Međuslojna čvrstoća u smjeru materijalne osi 1
τ_{IL2}	MPa	Međuslojna čvrstoća u smjeru materijalne osi 2
p	kN/m ²	Hidrostatski tlak
a	m	Duljina najdulje stranice panela
b	m	Širina najšireg panela
E_x	MPa	Modul elastičnosti u smjeru osi x
E_y	MPa	Modul elastičnosti u smjeru osi y
θ	°	Kut između x osi i glavne materijalne osi 1
E_R	MPa	Rastezni modul elastičnosti laminata
$E_{R\ teoeijski}$	MPa	Teorijska vrijednost rasteznog modula elastičnosti
$E_{R\ exp}$	MPa	Rastezni modul elastičnosti određen eksperimentalno
$E_{R\ mke}$	MPa	Rastezni modul elastičnosti dobiven simulacijom MKE
E_S	MPa	Savojni modul elastičnosti laminata
$E_{S\ exp}$	MPa	Savojni modul elastičnosti određen eksperimentalno
$E_{S\ mke}$	MPa	Savojni modul elastičnosti dobiven simulacijom MKE
σ	MPa	Normalno naprezanje

ε	mm/mm	Istezanje
F	N	Sila
A_0	mm ²	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
b_1	mm	Početna širina epruvete na užem dijelu
h	mm	Početna debljina epruvete
Δl	mm	Produženje epruvete
l_0	mm	Početna ispitna duljina epruvete
t	mm	Debljina sloja
L	mm	Razmak između oslonaca
l	mm	Duljina ispitivanog uzorka
σ_f	MPa	Naprezanje uslijed savojnog opterećenja
ε_f	mm/mm	Istezanje uslijed savojnog opterećenja
s	mm	Progib uzorka tijekom savojnog testa
X_ε	mm/mm	Najveće dopušteno iszezanje u smjeru osi 1
Y_ε	mm/mm	Najveće dopušteno iszezanje u smjeru osi 2
S_ε	mm/mm	Najveće dopušteno smično iszezanje
S_f		Faktor sigurnosti
Fi		Indeks popuštanja
M		Maksimalni moment pri progibu i pregibu
L_1	mm	Udaljenost prve koncentrirane sile od krme pri progibu
L_2	mm	Udaljenost druge koncentrirane sile od krme pri progibu
F_R	N	Rezultantna sila

SAŽETAK

Kompoziti ojačani staklenim vlaknima već desetljećima drže primat u izradi malih i srednjih brodova. Porastom osvještenosti utjecaja svake grane industrije, pa tako i brodograđevne, na okoliš posljednjih se godina sve aktivnije traži alternativa koja će parirati kompozitima izrađenim od staklenih vlakana po cijeni, mehaničkim svojstvima, dostupnosti i otpornosti kako bi se našao materijal koji ima manji ugljični otisak u proizvodnji, može se reciklirati i nije opasan za rukovanje. Jedan od prominentijih kandidata da zamijeni korištenje staklenih vlakana kao ojačalo jesu prirodna lanena vlakna. Kako je iskustvo njihovog korištenja u industriji znatno oskudnije, EU je sufinancirala projekt izrade ekološki prihvatljivog katamarana PROeco tvrtke Marservis d.o.o. koji koristi biokompozit izrađen od biorazgradive epoksidne smole ojačane lanenim vlaknima za izradu nadgrađa katamarana. Cilj ovog rada bio je proračunati trupove katamarana metodom konačnih elemenata i tako se nadovezati na radove drugih kolega u nakani da se dokaže mogućnost korištenja biokompozita s lanenim vlaknima i za izradu trupova katamarana koji podliježu znatno strožim kriterijima Hrvatskog registra brodova. U tu svrhu prvo je napravljena validacija podataka dostavljenih od strane proizvođača lanenih ojačala sa podacima dobivenih eksperimentalnim putem na FSB-u. Potom su ti podaci bili korišteni u proračunima za određivanje potrebnih sastava biokompozitnih laminata za pojedine segmente trupa. kada su određeni sastavi laminata, napravljen je globalni proračun cijelog trupa metodom konačnih elemenata na opterećenja danim od strane registra, a posebno su proračunati konstrukcijski detalji koji su u procesu određeni kao kritični metodom podmodeliranja.

Ključne riječi: mala brodogradnja, lanena vlakna, metoda konačnih elemenata, tehnika podmodeliranja

SUMMARY

For decades glass fiber reinforced composites have been extensively used for construction of small and medium sized vessels. With the rise of environmental awareness, in all industries including shipbuilding, new, more sustainable composites are being sought to replace the glass fiber reinforced composites. These new materials should have equal or better mechanical properties, price, availability, and resilience. They should also be recyclable and safe to use and work with. One of the more prominent candidates to replace the use of glass fibers are natural linen fibers. To build experience in the use of linen fiber composites, the EU has funded a project to build environmentally sustainable catamaran ProEco by company Marservis d.o.o. The catamaran superstructure is made from bio composites with biodegradable epoxy resin reinforced with linen fibers. The goal of this thesis is to determine layers of bio composites needed for the laminates to be used in production of catamaran hull using the Finite element method (FEM) and to build upon the previous work from other students in an attempt to prove the viability of linen reinforced bio composites in ship design. The catamaran design must comply with the strict criteria of Croatian register of shipping. Data obtained from the composite manufacturer is validated with experimental data obtained from the other research papers written by faculty colleagues. Furthermore, this data is then used in calculations conducted to determine the bio composite laminate properties of individual hull segments. Then, with known laminate properties global analysis of the hull is conducted using FEM. The loads used in the analysis are taken from the Croatian register of shipping. Hull components that were deemed critical were submodelled and analyzed.

Key words: small shipbuilding, linen fibers, finite element method, submodeling

1. UVOD

Prije više desetljeća godine dogodila se revolucija u maloj brodogradnji kada su kompozitni materijali istisnuli drvo i metal kao primarni materijal za izradu brodova. Primarnu u ulogu u tome imali su kompoziti sa ojačalom od staklenih vlakana. Njihova prednost bila je odlična specifična čvrstoća, obradivost i otpornost na koroziju [1]. Međutim, njihova slaba reciklabilnost, relativno visok ugljični otisak tijekom proizvodnje i toksičnost sitnih čestica koje nastaju prilikom njegove obrade zadnjih godina je stavilo u fokus traženje alternative kompozitima od stakloplastike [2]. Alternativni materijal osim što bi morao parirati mehaničkim svojstvima, morao bi biti i cjenovno prihvatljiv kako bi postao naširoko upotrebljavan u industriji. Jedan od materijala koji pokazuje potencijal da istisne stakloplastiku iz široke uporabe je biokompozit čije je ojačalo načinjeno od lanenih vlakana, a matrica od biorazgradive epoksidne smole [3][4]. Zadnjih godina nazire se trend povećanja njegove uporabe, pa je tako 2003. godine u Europskoj Uniji, koja je glavni svjetski proizvođač lanenih vlakana, bilo korišteno 43000 tona biovlakana kao ojačalo kompozita, da bi taj broj narasao na 315000 tona u 2010., s projekcijom da će se do 2020. koristiti 815000 tona [5]. Nedavna studija predviđa da će u periodu od 2016. do 2024. godine svjetsko tržište biokompozita rasti stopom od 11,4% godišnje [2]. Kako bi ubrzali taj proces i afirmirali biokompozite kao materijale s inženjerskom primjenom, Europska Unija ulaže u financiranje projekata tvrtki koji će napraviti istraživanje i razvoj proizvoda koji u svojoj izradi praktično primjenjuju navedeni materijal i u procesu stekli iskustvo njegove primjene [6]. Tako je brodogradilište Marservis d.o.o. iz Kaštelira započelo projekt izrade katamarana PROEco, čija je jedna od brojnih ekoloških značajki korištenje spomenutog biokompozita za izradu njegovog nadgrađa [7]. Trup katamarana PROEco ipak je izrađen od stakloplastike jer su zahtjevi Hrvatskog registra brodova za čvrstoću trupa broda znatno stroži nego za nadgrađe te dokazivanje udovoljavanja tih kriterija za novi materijal predstavlja znatno opsežniji posao [8][9]. Cilj ovog rada je istražiti može li trup katamarana PROEco u kojem su svi slojevi stakloplastike zamijenjeni biokompozitom zadovoljiti navedene kriterije čvrstoće i tako doprinijeti naporima da se buduće inačice katamarana izrađuju s višim udjelom korištenja biokompozita.

1.1. Tijek rada

Kako bi se ispunio navedeni cilj, rad se sastoji od slijedećih koraka:

1. Definiranje tehničkih specifikacije katamarana PROEco i geometrije trupa
2. Pregled biokompozita i njihovog korištenja u industriji i maloj brodogradnji

3. Pregled korištene metode proračuna konačnim elementima i računalnog programskog paketa Simcenter Femap/NX Nastran u kojem su provedene simulacije
4. Validacija dostupnih podataka o materijalnim svojstvima biokompozita koreliranjem numeričkih simulacija vlačnog i savojnog testa metodom konačnih elementata s eksperimentalno dobivenim vrijednostima
5. Određivanje okvirne strukture laminata koji bi se koristili za pojedini dio trupa
6. Globalni proračun cijelog trupa metodom konačnih elemenata u programu FEMAP/NX Nastran kako bi se odredili kritični konstrukcijski detalji
7. Proračun konstrukcijskih detalja tehnikom podmodeliranja kako bi se dobio točan uvid u iznose povišenih naprezanja koja se tamo pojavljuju te po potrebi nužne korekcije broja, orijentacije ili načina polaganja slojeva laminata kako bi se zadovoljili kriteriji čvrstoće

2. TEHNIČKE SPECIFIKACIJE KATAMARANA PROECO

Nacrti katamarana su dostavljeni od strane brodogradilišta Marservis d.o.o., ali nisu dostupni za javno izlaganje budući da su zaštićeni potpisanom Izjavom o povjerljivosti između tvrtke i mentora ovog rada. U ovom poglavlju predstavljene su tehničke specifikacije katamarana, prikazani strukturni dijelovi koji sačinjavaju njegove trupove i palubu. Navedena su svojstva materijala od kojeg su izrađeni trupovi i paluba, kao i slojevi koji sačinjavaju laminare njihovih strukturalnih komponenti.

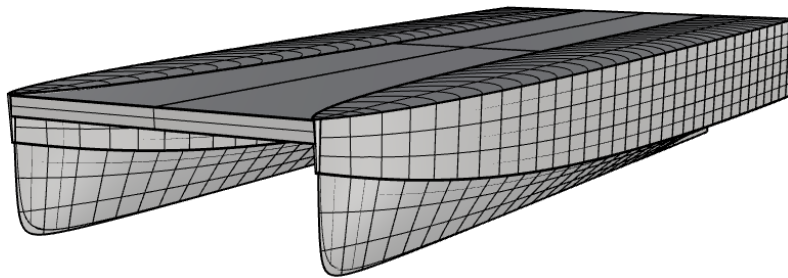
2.1. Tehničke specifikacije katamarana¹

- $L_{OA} = 19 \text{ m}$
- $L_{PP} = 17.8 \text{ m}$
- $B_{OA} = 7.5 \text{ m}$
- $B_{trup} = 2.1 \text{ m}$
- $T = 0.95 \text{ m}$
- $\Delta = 32000 \text{ kg}$
- $P_{MCR} = 2 \cdot 50 \text{ kW}$
- $n_{putnika} = 100$
- $n_{posada} = 2$
- $V_{pitka \text{ voda}} = 1000 \text{ m}^3$
- $V_{crna \text{ i siva voda}} = 1000 \text{ m}^3$

2.2. Opis strukture trupova i palube

Katamaran se sastoji od dva jednaka paralelna trupa međusobno povezanih palubom. Geometrija oplata trupa dostavljena je kolegi Grgoriniću izrađena u CAD programu Rhinoceros 7 gdje je ucrtao ostalu pripadajuću geometriju. Njen izometrijski prikaz dan je Slikom 2.1

¹ Korištene su iste oznake kao i u završnom radu kolege Grgorinića radi dosljednosti

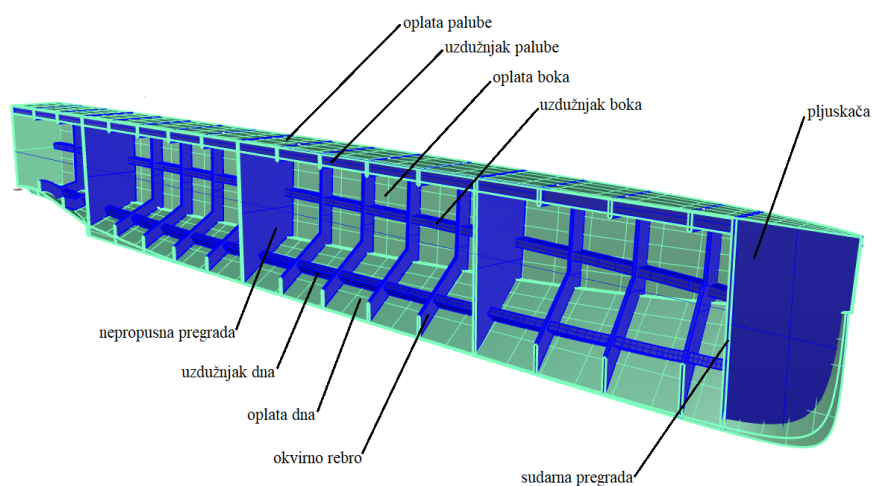


Slika 2.1 Prikaz trupova i palube katamarana u izometriji [10]

2.2.1. Struktura trupa

Na Slici 2.2 dan je prikaz uzdužnog presjeka trupa sa ucrtanim njenim sastavnim dijelovima:

- Oplata dna
- Oplata boka
- Oplata palube
- 4 nepropusna odjeljka odijeljena s 3 nepropusne pregrade i sudarnom pregradom na pramcu
- 13 okvirnih rebara 200x40mm
- Pljuskača
- 5 uzdužnjaka trupa 150x100mm: 1 palube, 2 boka i 2 dna

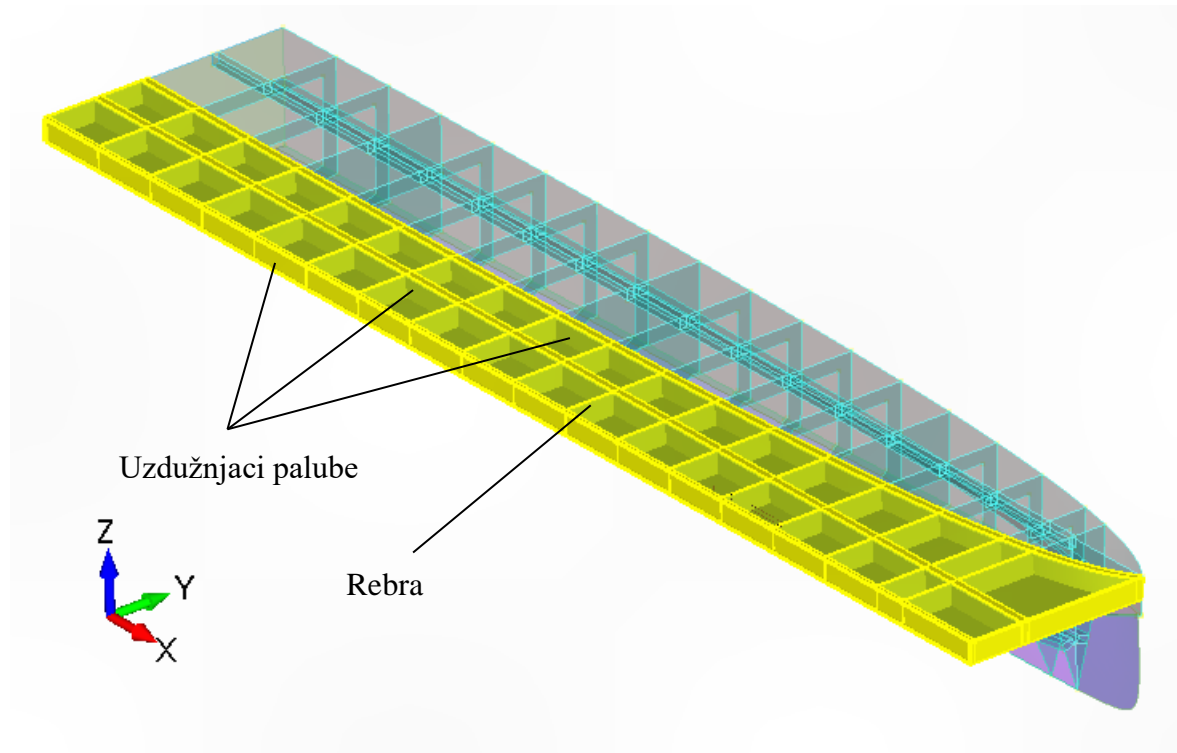


Slika 2.2 Uzdužni presjek trupa [10]

2.2.2. Struktura palube

Slika 2.3 prikazuje presjek trupa i palube po ravni simetrije. Na njoj su žuto označeni strukturni dijelovi koji ojačavaju palubu na spojevima trupova:

- 5 uzdužnjaka 300x100mm
- 17 rebara 300x40mm



Slika 2.3 Prikaz strukture palube bez gornje oplata

2.3. Materijali korišteni u izradi trupova i palube katamarana

Kao što je već navedeno u uvodu, paluba i trupovi izrađeni su od laminata nastali slaganjem slojeva staklenih vlakana u poliestersku matricu ili monolitno ili oko jezgre u sendvič strukturu.

U slojevima izrađenim od stakloplastike korištena su tri različita tkanja staklenih vlakana:

- Jednosmjerno, u tablicama označen „UD”
- Dvosmjerno, u tablicama označen „Roving“
- Slučajno usmjerena, u tablicama označen „Mat“

Slojevi su opisani kao 2D ortotropni materijal. Njihova svojstva dana su u Tablici 2.1.

Tablica 2.1 Karakteristike slojeva kompozita od stakloplastike

Name	Fibre	Resin	Fibre %	in	Fibre mass/m ² (g/m ²)	Woven balance coef %	Resin mass/m ² (g/m ²)	Mass/m ² (g/m ²)	Thickness (mm)	Density
UD	E Glass	Polyester	30	Mass	300,00	x	700,00	1.000,00	0,700	1,428
Mat	E Glass	Polyester	34	Mass	225,00	x	436,76	661,76	0,452	1,466
Roving	E Glass	Polyester	50	Mass	1.200,00	50,00	1.200,00	2.400,00	1,467	1,636

Elastična svojstva dana su u Tablici 2.2,

Tablica 2.2 Elastična svojstva slojeva kompozita od stakloplastike

Name	E1 (MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)	v12	v21
UD	15.147	4.218	1.652	1.652	1.156	0,321	0,089
Roving	15.802	15.802	2.212	1.991	1.991	0,109	0,109
Mat	9.151	9.151	3.520	1.217	1.217	0,300	0,300

a maksimalna dopuštena naprezanja u Tablici 2.3.

Tablica 2.3 Najveća dopuštena naprezanja slojeva kompozita od stakloplastike

Name	X _T	X _C	Y _T	Y _C	S	τ _{IL1}	τ _{IL2}
UD	327,18	218,12	17,88	52,30	23,79	23,13	23,79
Roving	227,55	227,55	227,55	227,55	26,54	28,67	28,67
Mat	113,48	113,48	113,48	113,48	56,32	20,93	20,93

Dva su materijala korištena za jezgre laminata: PET pjena za uzdužnjake te balsa za pregrade i rebra. Njihova svojstva dana su u Tablici 2.4.

Tablica 2.4 Karakteristike materijala jezgri

Name	Type	Core material	Thickness (mm)	Mass/m ² (g/m ²)	Density
Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	Balsa	Balsa, 80 kg/m ³	18,000	1.440,00	0,080
Foam PET, 60 kg/m ³ , 100mm	Foam PET	Foam PET, 60 kg/m ³	100,000	6.000,00	0,060

Njihova elastična svojstva dana su u Tablici 2.5,

Tablica 2.5 Elastična svojstva materijala jezgri

Name	E1 (MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)	v12	v21
Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	23	23	40	57	57	0,015	0,015
Foam PET, 60 kg/m ³ , 100mm	85	85	15	15	15	0,320	0,320

a maksimalna dopuštena naprezanja navedena su u Tablici 2.6.

Tablica 2.6 Najveća dopuštena naprezanja materijala jezgri

Name	X _T	X _C	Y _T	Y _C	S	τ _{IL1}	τ _{IL2}
Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	0,28	0,48	0,28	0,48	0,70	0,94	0,94
Foam PET, 60 kg/m ³ , 100mm	1,50	0,85	1,50	0,85	0,55	0,55	0,55

2.4. Sastav korištenih laminata

Inženjer brodogradilišta Marservis d.o.o. odredio je raspored slojeva laminata i provjerio njihovu čvrstoću u računalnom programu Bureau Veritasa ComposeIT gdje su primjenjena

pravila NR600 [11][12]. U tom programu prvo se definiraju slojevi koji sačinjavaju laminat za pojedini dio trupa i palube. Potom se prema zahtjevima pravilnika hrvatskog registra brodova ispituju paneli i uzdužnjaci koji ih ukružuju primjenom hidrostatskog tlaka koji laminat pojedinog dijela trupa mora izdržati na najveće korištene ploče [8].

2.4.1. Laminati panela

Dimenzije ispitivanih ploča, opterećenja hidrostatskog tlaka na koja se proračunavaju te faktori sigurnosti prikazane su u Tablici 2.7

Tablica 2.7 Dimenzije najvećih panela i tlakovi koji na njih djeluju

Dio trupa	Tlak p, [kN/m ²]	Duljina a, [m]	Širina b, [m]	Minimalni faktor sigurnosti
Dno	51	1	0,5	2,4
Bok	42,5	1	0,7	2,4
Paluba	11,25	1	1	2,4
Nepropusna pregrada	18,2	2	1,8	2,4

2.4.1.1. Raspored slojeva u laminatu panela dna

Raspored slojeva u korištenom laminatu za panele dna prikazan je Tablicom 2.8.

Tablica 2.8 Laminat dna od stakloplastike

Layer	Type	Label	Angle	Thickness
1	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
2	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
3	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
4	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
5	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
6	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
7	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
8	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
9	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
10	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45

Vidljivo je da se laminat sastoji od 10 slojeva, gdje je deblje dvosmjerno tkanje u sredini, sa tanjom oblogom od višeslojnih vlakana.

2.4.1.2. Raspored slojeva u laminatu panela boka

Raspored slojeva u korištenom laminatu za panele boka dan je u Tablici 2.9. Laminat je nešto deblji od laminata dna jer iako na njega djeluje manji tlak, širina najvećeg panela je veća kao što to pokazuje tablica. Stoga je dodan jedan sloj dvosmjernog tkanja i jedan sloj višesmjernog tkanja. Laminat je simetričan.

Tablica 2.9 Laminat boka od stakloplastike

Layer	Type	Label	Angle	Thickness
1	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
2	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
3	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
4	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
5	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
6	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
7	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
8	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
9	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
10	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
11	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
12	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45

2.4.1.3. Raspored slojeva u laminatu panela boka

Raspored slojeva u korištenom laminatu za panele boka dan je u Tablici 2.10. Radi se o najtanjem laminatu budući da je opterećen na daleko najmanji hidrostatski tlak.

Tablica 2.10 Laminat palube načinjen od stakloplastike

Layer	Type	Label	Angle	Thickness
1	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
2	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
3	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
4	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
5	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
6	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
7	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
8	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45

2.4.1.4. Raspored slojeva u laminatu nepropusne pregrade

Raspored slojeva u korištenom laminatu za izradu nepropusnih pregrada dan je u Tablici 2.11. Vidljivo je da je ovaj panel najdeblji, pošto mora osigurati krutost trupa i nepropusnost u slučaju prodiranja vode u jedan od nepropusnih odjeljaka trupa kako bi ostali dijelovi nastavili osiguravati plutanje broda. Također, ovdje je korišteno drvo balse kao jezgra. Time se znatno povećava debljina laminata uz mali dodatak mase budući da je drvo balse ima nekih 20-ak puta manju gustoću od stakloplastike, pa su nosivi slojevi u povoljnijem položaju za preuzimanje opterećenja. Također treba napomenuti da nepropusne pregrade imaju dvojaku ulogu: ojačati oplatu trupa i izdržati zahtijevani hidrostatski tlak, stoga je proračunato i kao panel na koji djeluje tlak i kao ukruta panela koje učvršćuje na koje djeluje tlak.

Tablica 2.11 Laminat nepropusne pregrade od stakloplastike

Layer	Type	Label	Angle	Thickness
1	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
2	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
3	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
4	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
5	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
6	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
7	Core	Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	0,00	18,00
8	Core	Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	0,00	18,00
9	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
10	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
11	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
12	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
13	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
14	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45

2.4.2. Laminati uzdužnjaka

Uzdužnjaci i rebra se proračunavaju kao ploče okomito postavljene na rubove panela koje učvršćuju. Potom se panele optereti na tlakove navedene u Tablici 2.7, kako bi se zadano opterećenje prenijelo na ukrute i tako izračunalo zadovoljavaju li kriterije maksimalnih naprezanja i Tsai-Wu kriterij. Zahtijevani faktor sigurnosti je 2,61.

2.4.2.1. Raspored slojeva u laminatu rebara

Laminat od kojeg su izrađena okvirna rebra 200x40mm za ukrutu trupa i rebra 300x40mm za ukrutu središnjeg djela palube sastoji se od slojeva prikazanih Tablicom 2.12. Isto kao i kod nepropusnih pregrada, korišteno je drvo balse kao jezgra kako bi se slojeve staklenih vlakana stavilo u povoljniji položaj prilikom savojnog opterećenja okomitog na laminat.

Tablica 2.12 Laminat rebra od stakloplastike

Layer	Type	Label	Angle	Thickness
1	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
2	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
3	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
4	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
5	Core	Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	0,00	18,00
6	Core	Balsa, 80 kg/m ³ , 18mm	0,00	18,00
7	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
8	Woven Roving	Roving1200 @50%(M) balance 50% E Glass Polyester	0,00	1,47
9	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
10	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45

2.4.2.2. Raspored slojeva u laminatu uzdužnjaka

Raspored slojeva u laminatu od kojeg je su izrađeni uzdužnjaci 150x100mm i 300x150mm prikazan je u Tablici 2.13. Budući da oni nose značajno savojno opterećenje, slojevi staklenih vlakana ojačanih poliesterskom matricom razmaknuti su PET pjenom debljine čak 100mm. Sama pjena nema velik utjecaj na savojnu krutost, već daje oblik gredi [10].

Tablica 2.13 Laminat uzdužnjaka od stakloplastike

Layer	Type	Label	Angle	Thickness
1	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
2	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
3	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
4	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
5	Core	Foam PET, 60 kg/m ³ , 100mm	0,00	100,00
6	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
7	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
8	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45
9	Mat	Mat225 @34%(M) E Glass Polyester		0,45

3. BIOKOMPOZITI I NJIHOVA PRIMJENA U INDUSTRIJI I MALOJ BRODOGRADNJI

U ovom radu korišten je biokompozit sačinjen od lanenih vlakana i epoksidne smole, stoga je u ovom poglavlju osim definicija kompozita i biokompozita ojačanih vlaknima dan pregled korištenja kompozita ojačanim lanenim vlaknima kao i svojstva materijala koji se razmatra u radu.

3.1. Definicija kompozita i biokompozita

Kompozitni materijali, ili skraćeno kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [13]. Kompozitni materijali ojačani vlaknima sastoje se od dva osnovna konstituenta: vlakna i matrice koji čine slojeve koji su međusobno povezani i tako čine višeslojni kompozit (laminat) [14]. Biokompoziti su kompoziti čiji je barem jedan konstituent dobiven prirodno [15].

3.2. Prednosti korištenja biokompozita s lanenim vlaknima

Vlakna ojačala najčešće uključuju biljna vlakna poput jute, lana, konoplje i kenafa zbog iznimno dobrih mehaničkih svojstava s obzirom na njihovu nisku cijenu. Specifično je zamijećen porast korištenja kompozita ojačanih lanenim vlaknima kao zamjenu za staklena vlakna, pogotovo u automobilskom sektoru [16][17]. Prednosti lanenih vlakana su:

- Odlično prigušenje vibracija [18]
- Niska gustoća i time specifična čvrstoća
- Niska cijena
- Nizak ugljični otisak
- Biorazgradivost
- Niski zdravstveni rizici pri korištenju [19]

3.2.1. Primjeri korištenja lanenih vlakana u industriji i brodogradnji

Još 2013. godine u svom radu napravljena u studija slučaja gdje je ispitivano mogu li se lopatice rotora male vjetroturbine snage 11kW izraditi od kompozita ojačanim lanenim vlaknima. Osim što je bilo ustanovljeno da tako izrađene lopatice zadovoljavaju sve kriterije za korištenje na maloj vjetroturbini, lopatice izrađene od biokompozita bile su 10% lakše nego njihov pandan izrađen od stakloplastike [19].

3.2.1.1. *Primjeri brodova izgrađenih sa značajnim udjelom lanenih vlakana*

Brodogradilište IDB Marine 2011. godine izgradilo je malu jahtu klase 6.5 Araldite u kojoj su 75% ojačala činila lanena vlakna. Također 2013. godine tvrtka Kaïros Environnement koristila je lanena vlakna kako bi proizvela 7 metarski trimaran Gwalaz. U međuvremenu je osnovana tvrtka Greenboats koja je 2016. godine razvila svoju verziju jahte Bente od 24 stope izrađenu od lanenih vlakana, prigodno nazvanom GreenBente 24'. Ta jahta koristi lanena vlakna iz iste linije proizvoda ampliTEX koja su razmatrana i u ovome radu [20]. Najnoviji brod čiji je trup u potpunosti izgrađen od lanenih vlakana je Baltic 68 Café Racer Pink Gin Verde proizvođača Baltic Yachts iz Pietarsaari, Finske [21]. Sličnih je dimenzija ($L_{OA} = 20,73 \text{ m}$, $\Delta = 28000 \text{ kg}$) kao i katamaran ProEco.

3.3. **Biokompozit lan/epoksi korišten u radu**

Za potrebe gradnje nadgrađa katamarana korišten je biokompozit dobiven vakuumskom infuzijom epoksidne smole Infugreen 810 proizvođača Sicomin iz Châteauneuf les Martigues, Francuska u slojeve netretiranih lanenih vlakana ampliTEX 5042 proizvedenim u Bcomp-u, iz Fribourga, Švicarska. Iz tog razloga je u radu razmatran upravo taj materijal za korištenje u izradi trupa.

3.3.1. *Svojstva ampliTEX 5040 u epoksidnoj matrici*

Na poslani upit o mehaničkim svojstvima jednog sloja kompozita dobivenog vakuumskom infuzijom epoksi/lanena vlakna sa pletivom AmpliTEX 5042, proizvođač Bcomp Ltd. dostavio je podatke za pletivo AmpliTEX 5040 pri masenom udjelu vlakana 41%. Napomena proizvođača je da se pletivo AmpliTEX 5040 razlikuje od AmpliTEX 5042 samo po pletenju, tj. tkanina AmpliTEX 5040 je pletena 2x2, a AmpliTEX 5042 4x4, Slika 3.1. To u teoriji rezultira nekoliko postotaka nižim modulima elastičnosti za 2x2 i to tkanje se teže oblikuje u kalupe ali ga je lakše koristiti u proizvodnji jer se manje raspliće prilikom polaganja u kalup.



Slika 3.1 Lanena vlakna pletivo 4x4 (lijevo) i 2x2 (desno)

Svojstva biokompozita dana su u Tablici 3.1.

Tablica 3.1 Karakteristike slojeva biokompozita

Name	Fibre	Resin	Fibre %	in	Fibre mass/m ² (g/m ²)	Woven balance coef %	Resin mass/m ² (g/m ²)	Mass/m ² (g/m ²)	Thickness (mm)	Density
AmpliTex 5040	Lan	Epoxy	41	Mass	516,6	50	743,4	1260	1	1260

Elastična svojstva dana su u Tablici 3.2,

Tablica 3.2 Elastična svojstva slojeva biokompozita

Name	E1 (MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)	v12	v21
AmpliTex5040	12.800	12.800	2.000	1.600	2.000	0,13	0,13

a maksimalna dopuštena naprežanja u Tablici 3.3.

Tablica 3.3 Najveća dopuštena naprežanja slojeva biokompozita

Name	X _T	X _C	Y _T	Y _C	S	τ _{IL1}	τ _{IL2}
AmpliTex5040	137	137	137	137	25	25	25

Također ovdje valja napomenuti da se materijal ponaša nelinearno elastično, bez izražene granice plastičnosti što je kasnije vidljivo na grafu naprežanje istežanje vlačnog testa na Slici 5.4. Zbog toga proizvođač opisuje materijal kao bilinearan, to jest da je modul elastičnosti $E_1 = E_2 = E = 12,8$ GPa do vrijednosti istežanja 0,18%, a nakon toga iznosi $E_1 = E_2 = E = 8,7$ GPa. Za modul elastičnosti uzeta je vrijednost prvog pravca $E = 12,8$ GPa, koji aproksimira krivulju istežanja do 0,18% iz razloga koji su pojašnjeni u poglavlju 4.3.

4. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Klasične metode rješavanja problema kontinuiranih sustava temelje se na rješavanju diferencijalnih jednadžbi čije je točno analitičko rješenje moguće dobiti samo za jednostavnije proračunske modele. U općem slučaju vrlo je teško dobiti rješenje koje zadovoljava diferencijalnu jednadžbu u cijelom području razmatranog modela. Stoga se rabe približne numeričke metode koje se temelje na diskretizaciji kontinuiranog sustava, gdje se diferencijalne jednadžbe zamjenjuju sustavom algebarskih jednadžbi [22].

4.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model mogao približiti ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnome rješenju raste s povećavanjem broja elemenata [22].

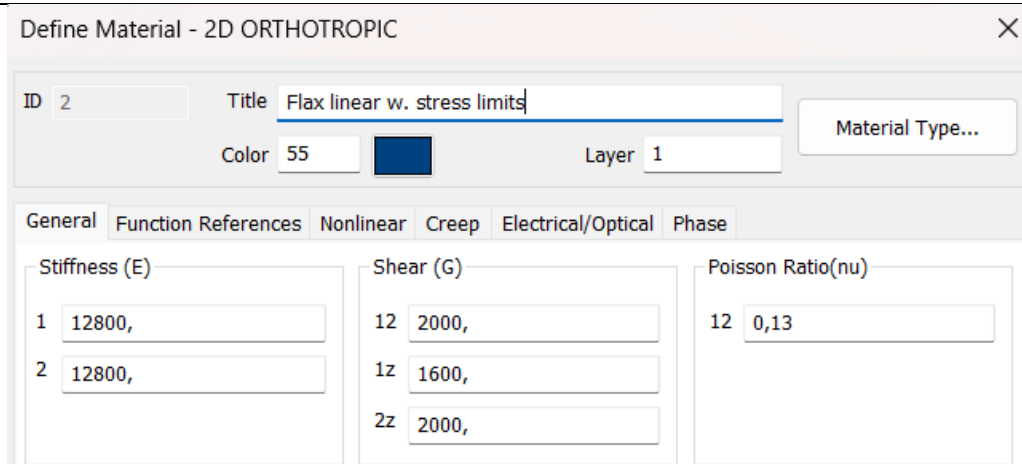
4.2. Korišteni programski paket Simcenter Femap/NX Nastran

Svi proračuni provedeni metodom konačnih elemenata u ovom radu napravljeni su u računalnom programu Simcenter Femap od tvrtke Siemens Digital Industries Software. Simcenter Femap je napredni simulacijski *pre-processor* i *post-processor* za kreiranje i uređivanje modela konačnih elemenata složenih proizvoda [23].

4.3. Postupak unosa svojstava laminata u FEMAP

4.3.1. Definiranje jednog sloja biokompozita u FEMAP-u

Svojstva jednog sloja unesene su u FEMAP kao 2D ortotropni materijal, Slika 4.1.



Slika 4.1 Definiranje materijalnih konstanti u FEMAP-u

Kao što je ranije napomenuto u poglavlju 3.3.2, proizvođač lanenih vlakana Bcomp Ltd. aproksimira nelinearno elastično ponašanje biokompozita bilinearnom krivuljom naprezanje istežanje. Takva formulacija nije izvediva u ovom radu zato što bi bilinearna formulacija modula elastičnosti zahtijevala *multi-step* metodu u kojoj se iterativno rješava statički problem tako da se u svakoj iteraciji korigira iznos modula elastičnosti pojedinog elementa obzirom na istežanje do kojeg je došlo u prethodnoj iteraciji. Osim što je to izrazito računalno zahtjevno, studentska licenca FEMAP-a ne podržava provođenje takvih simulacija. Iz tog razloga, provedene su linearne statičke analize u kojima je odabran iznos modula elastičnosti koji aproksimira donji dio krivulje naprezanje istežanje što je područje naprezanja u kojem se konstrukcija jedino i smije nalaziti. Također ovdje vrijedi napomenuti da je FEMAP bezdimenzijski softver, dakle korisnik sam usklađuje prefikse mjernih jedinica odabirom iznosa upisanih ulaznih vrijednosti.

4.3.2. Slaganje laminata u FEMAP-u

Kako bi definirali laminata s kojima tražimo korelaciju, slažemo slojeve kompozita ranije definiranih svojstava u određenoj debljini i orijentaciji. Primjer slaganja laminata od 4 sloja, $[+ - 45^\circ]_2$ prikazan je na Slici 4.2.

5. VALIDACIJA MATERIJALNIH SVOJSTAVA BIOKOMPOZITA

Za potrebe izrade nadgrađa ekološki prihvatljivog katamarana za putnički prijevoz PROEco izrađeno je ispitivanje svojstava laminata izrađenih od biokompozita kako bi se utvrdilo zadovoljava li takav materijal zahtjeve Hrvatskog registra brodova [8][9]. Studiju je provela prof. Tatjana Haramina za potrebe tvrtke Marservis d.o.o. a postupak ispitivanja i rezultati su prikazani u završnim radovima kolegice Karle Pintur za vlačna ispitivanja te Marka Tuškana za savojna ispitivanja [24][25][26]. Vlačna ispitivanja kako bi se odredila vlačna čvrstoća i rastezni modul elastičnosti napravljena su po normi EN ISO 527-4:1997, savojna ispitivanja kako bi se odredila savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti napravljena su po normi EN ISO 178:2003, a savojna ispitivanja kako bi se odredila prividna smična međuslojna čvrstoća napravljena je prema normi EN ISO 14130:1997 [27][28][29]. Iz tih ispitivanja nije moguće izračunati 5 neovisnih elastičnih konstanti za opisivanje ponašanja pojedninačnog sloja laminata kao 2D ortotropnog što je neophodno za provođenje numeričke analize metodom konačnih elemenata. Stoga su korišteni podaci o mehaničkim svojstvima dobiveni od strane proizvođača, navedeni u Tablici 3.2. Te elastične vrijednosti potom su unesen u računalni program za provedbu simulacija metodom konačnih elemenata FEMAP gdje su napravljene simulacije vlačnih i savojnih ispitivanja kako bi se provjerilo poklapanje modela sa eksperimentom i dokazala validnost dobivenih podataka o svojstvima materijala.

5.1. Ispitivani materijal i uzorci

Korištene biokompozitne ploče s netretiranim vlaknima izrađene su vakuuskom infuzijom u Marservis u od komponenti navedenim u potpoglavlju 3.3. Laminati su izrađeni zakretanjem slojeva za $[\pm 45^\circ]$, te su se onda iz tako izrađenih ploča izrezivale epruvete za ispitivanja prema normiranim dimenzijama, Slika 5.1.



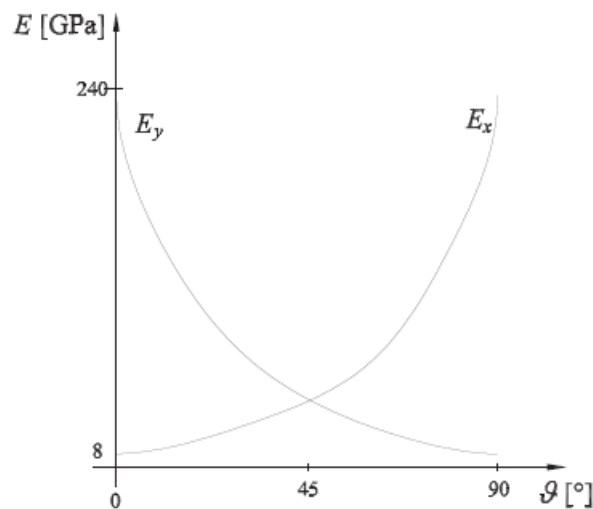
Slika 5.1 Ispitivani uzorci biokompozitnog laminata [24]

5.2. Analitički proračun rasteznog modula elastičnosti laminata sa zakrenutim slojevima

Za pojedini sloj postoje analitički izrazi koji opisuju ovisnost elastičnih konstanti obzirom na promjenu orijentacije vlakana. Transformacija modula elastičnosti u smjeru osi x koja je zakrenuta za kut θ obzirom na materijalni koordinatni sustava 1,2 dana je izrazom

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{1}{G_{12}} - 2 \frac{\nu_{12}}{E_1} \right). \quad (1)$$

Primjer promjene modula elastičnosti u smjeru osi x i y za jednosmjerna ugljična vlakna dan je na Slici 5.2.



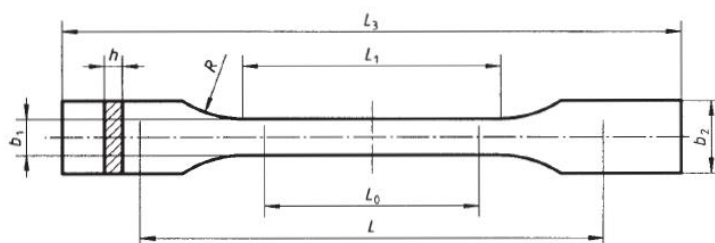
Slika 5.2 Promjena modula elastičnosti ovisno o kutu θ [14]

Iz Tablice 3.2 vidi se da su rastezni i savojni moduli elastičnosti isti u smjeru glavnih materijalnih osi 1 i 2, kao i Poissonovi koeficijenti. Iako su slojevi su slagani pod kutem od $[\pm 45^\circ]$, predznak ne radi razliku pri modeliranju zato što je udio vlakana u smjeru 1 i 2 podjednak. Iz toga zaključujemo da bi elastična svojstva laminata bila identična kada bi slojevi bili slagani $[+ 45^\circ]$, neovisno o njihovom broju, pa tako to vrijedi i za samo jedan sloj. Prividni rastezni modul elastičnosti $E_{R \text{ teorijski}}$ svih testiranih laminata stoga bi u po ovoj teoriji trebao biti jednak E_x iz izraza (1). Kada se u njega uvrste vrijednosti E_1 , E_2 , G_{12} i ν_{12} iz Tablice 3.2 dobiva se

$$E_{R \text{ teorijski}} = 6289,9 \text{ MPa}. \quad (2)$$

5.3. Validacija podataka vlačnim ispitivanjem

Ispitivanje je provedeno po normi EN ISO 527-4:1997 [24][25][27]. Laminati su slagani pod kutem $[\pm 45^\circ]$, te su ispitivanja provedena na laminatima sa 4 do 10 slojeva. Za svaki laminat napravljeno je minimalno 6 uzoraka. Dimenzije epruvete propisane su normom, Slika 5.3.



Dimensions in millimetres		
L_3	Overall length	≥ 150 ¹⁾
L_1	Length of narrow parallel-sided portion	$60 \pm 0,5$
R	Radius	≥ 60 ²⁾
b_2	Width at ends	$20 \pm 0,2$
b_1	Width of narrow portion	$10 \pm 0,2$
h	Thickness	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	$50 \pm 0,5$
L	Initial distance between grips	115 ± 1

Slika 5.3 Dimenzije epruvete za vlačni test [27]

Validacija se provodi uspoređivanjem izračunatog prividnog rasteznog modula elastičnosti iz vrijednosti dobivenih na vlačnom testu $E_{R \text{ exp}}$ i na numeričkoj simulaciji vlačnog testa $E_{R \text{ mke}}$. Izraz za njegovo računanje je

$$E_R = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3)$$

pri čemu se naprežanje računa izrazom

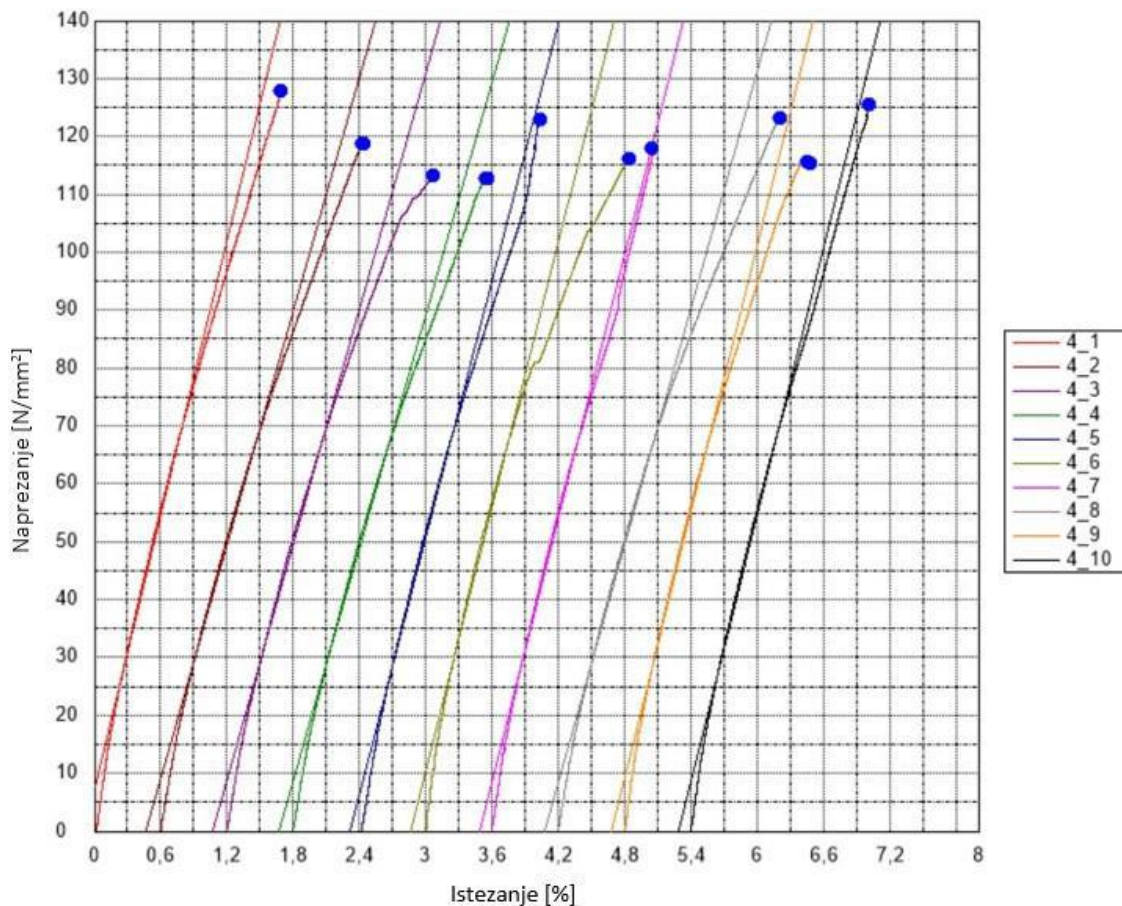
$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{b_1 \cdot h}, \quad (4)$$

a istežanje

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (5)$$

5.3.1. Vlačno ispitivanje na kidalici

Vlačni testovi provedeni su na kidalici, sa mjernom duljinom $l_0 = 50$ mm. Uređaj bilježi vlačnu silu i promjenu duljine, te iscrtava graf ovisnosti naprežanje/istežanje. Budući da je materijal nelinearno elastičan bez izražene plastične zone, rastezni modul elastičnosti je izračunat kao nagib pravca provučenog kroz točke naprežanja od 20 MPa i 50 MPa kako bi aproksimirao donji dio krivulje. Primjer bilježenja rezultata vlačnog testa sa provučenim aproksimacijskim pravcem za laminat sa 4 sloja prikazan je na Slici 5.4



Slika 5.4 Dijagram naprežanje-istežanje pri vlačnom opterećenju za kompozit s 4 sloja vlakana [25]

Objedinjeni rezultati ispitivanja svih laminata na kidalici prikazani su u Tablici 5.1 gdje je izračunat prosječni prividni rastezni modul elastičnosti za svaki laminat $E_{R \text{ exp}}$, i najveća

apsolutna odstupanja vrijednosti $E_{R\text{exp}i}$ mjenenog uzorka i od dobivenog prosjeka $E_{R\text{exp}}$ za pojedini ispitivani laminat.

$$\text{odstupanje } E_{R\text{exp}} = \frac{\max|E_{R\text{exp}i} - E_{R\text{exp}}|}{E_{R\text{exp}}} \quad (6)$$

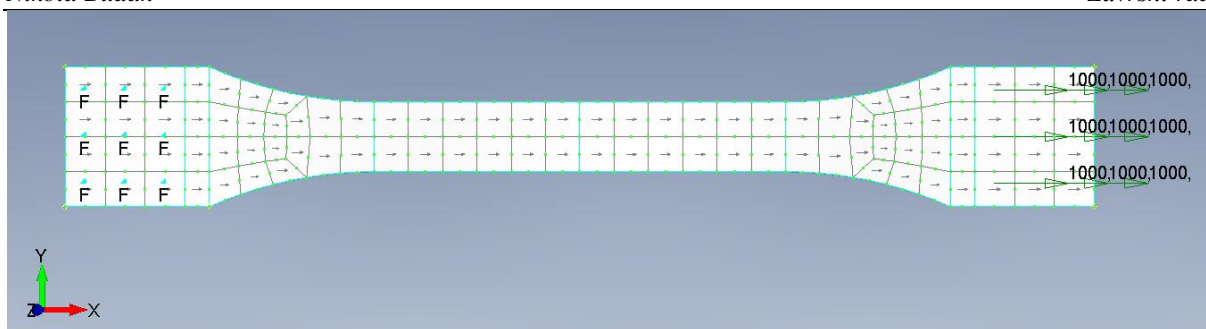
Tablica 5.1 Uprosječeni rezultati vlačnog ispitivanja

Vlačni test						
Broj slojeva	b [mm]	h [mm]	t [mm]	$E_{R\text{exp}}$ [N/mm ²]	Odstupanje $E_{R\text{exp}}$	
4	9,90 ±0,10	3,80 ±0,18	0,95	7289 ±619	8%	
5	9,98 ±0,12	4,46 ±0,12	0,89	7322 ±1.631	22%	
6	10,05 ±0,23	5,58 ±0,33	0,93	7666 ±720	9%	
7	10,17 ±0,13	6,75 ±0,11	0,96	7694 ±720	9%	
8	10,18 ±0,08	7,47 ±0,11	0,93	7338 ±936	13%	
9	10,19 ±0,13	8,36 ±0,12	0,93	7415 ±871	12%	
10	10,24 ±0,06	9,44 ±0,26	0,94	7061 ±725	10%	
prosjek	10,10 ±0,12	±0,17	0,935	7398 ±889	12%	

Iz priložene tablice vidljivo je da je prosječni prividni rastezni modul elastičnosti za $[\pm 45^\circ]$ laminat $E_{R\text{exp}} = 7398$ MPa, ali uz vrlo velike devijacije do 22% između ispitivanih uzoraka. Također, dimenzije ispitivanih uzoraka odstupaju više no što je predviđeno normom gdje nije dozvoljeno odstupanje u debljini veće od 2%. Taj uvjet ispunili su samo uzorci laminata sa 7, 8 i 9 slojeva. Maksimalno odstupanje u debljini pojavilo se u uzorku sa 6 slojeva, i iznosi 5,9%. Širina uzorka b također izlazi iz propisanih gabarita sa slike n gdje bi morala iznositi $10 \pm 0,2$ mm, što je iz Tablice 5.1 vidljivo da nije slučaj sa pojedinim uzorcima gotovo svih laminata.

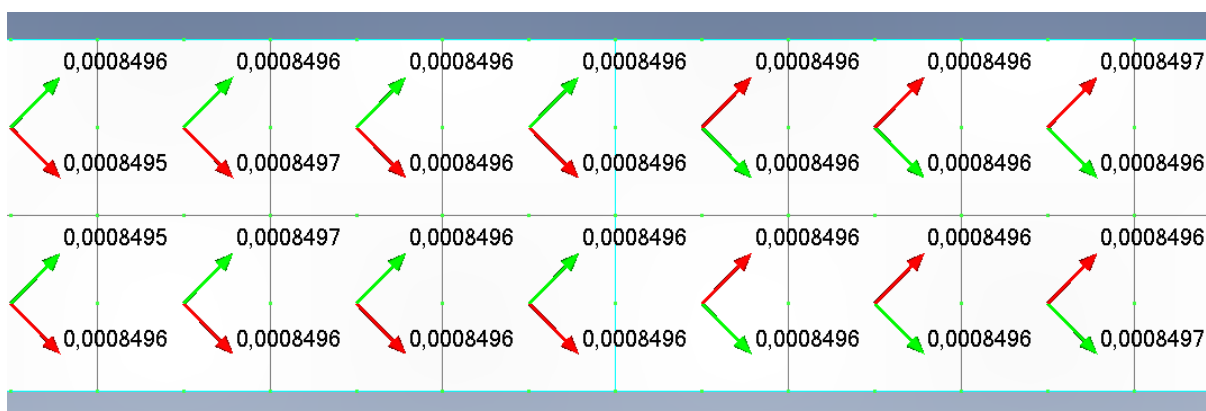
5.3.2. Simulacija vlačnog testa MKE

Prema normiranim dimenzijama epruvete napravljen je model u FEMAP-u, Slika 5.5. Model je diskretiziran sa četverokutnim paraboličkim pločastim konačnim elementima. Epruveta je učvršćena uklještenjem na površini s lijeve strane, dok je rastezna sila od $F = 1000$ N distribuirana po površini s desne strane. Korištene su površine koje odgovaraju čeljustima prihvata epruvete u eksperimentu, te je tako većinom mitigirana pojava numeričke greške beskonačnog naprezanja uslijed zadavanja koncentrirane sile na pojedinačni čvor.



Slika 5.5 MKE model vlačnog testa

Provedeno je ukupno 7 simulacija vlačnog testa, za svaku verziju laminata od 4 do 10 slojeva. Budući da zadani modul elastičnosti aproksimira krivulju naprezanje-istezanje do 0,18%, važno je potvrditi da nije došlo do istežanja laminata u smjeru materijalnih osi većih od tog iznosa. Najveće vrijednosti istežanja su u najtanjem laminatu sastavljenom od 4 sloja, a vrijednosti istežanja u smjeru materijalnih osi prikazane su na Slici 5.6 vektorima zelene i crvene boje za smjerove 1 i 2 te iznose manje od 0,085% pri navedenoj rasteznoj sili od 1000 N.



Slika 5.6 Vrijednosti istežanja u smjeru glavnih materijalnih osi

Svi elementi na vratu epruvete su jednakih svojstava i dimenzija 5x5mm te zbog jednoosnog stanja naprezanja nema znatne razlike u mjerenoj vrijednosti istežanja po x osi između bilo koja dva čvora na vratu epruvete. Usprkos tome, za što bolje poklapanje mjerene metode sa eksperimentom, za proračun istežanja mjereno je povećanje udaljenosti između čvorova na sredini vrata uslijed deformacije, inicijalno međusobno udaljenih 50 mm - jednako kao i mjerena duljina u eksperimentu. Prividni modul elastičnosti računat je na isti način kao i u eksperimentu. Rezultati, zajedno sa odstupanjem od eksperimentalno određene srednje vrijednosti modula elastičnosti određeni izrazom

$$\text{odstupanje } E_{R \text{ mke}} = \frac{E_{R \text{ exp}} - E_{R \text{ mke}}}{E_{R \text{ mke}}} \quad (7)$$

su prikazani u Tablici 5.2 za pojedinačni laminat.

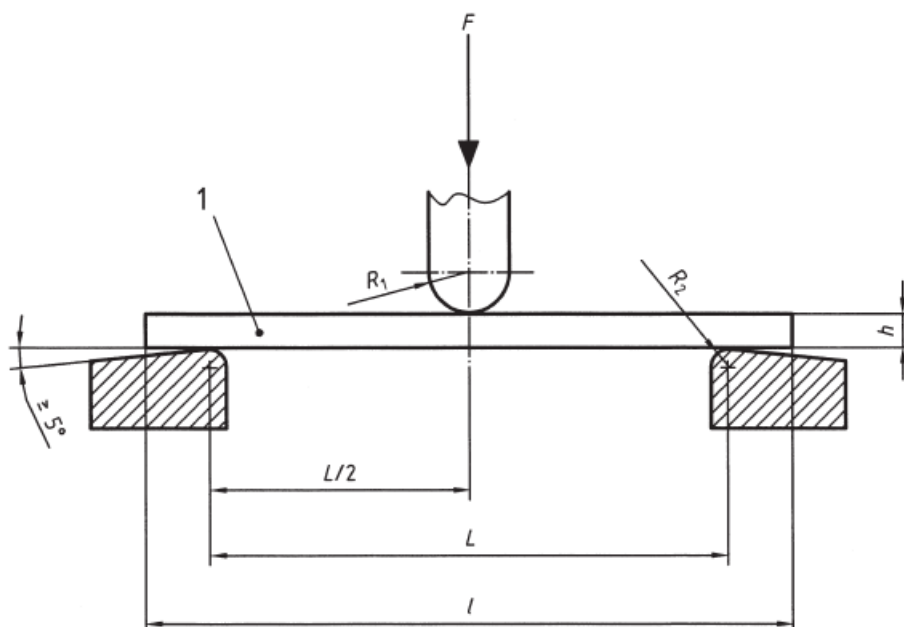
Tablica 5.2 Rezultati simulacije vlačnog testa MKE

FEM vlačno							
Broj slojeva	b [mm]	h [mm]	Δl [mm]	ε [mm/mm]	σ [N/mm ²]	$E_{R\ mke}$ [N/mm ²]	odstupanje $E_{R\ mke}$
4	10	4,0	0,199	0,398%	25,0	6287,69	-13,7%
5	10	5,0	0,159	0,318%	20,0	6287,69	-14,1%
6	10	6,0	0,133	0,265%	16,7	6287,69	-18,0%
7	10	7,0	0,114	0,227%	14,3	6287,67	-18,3%
8	10	8,0	0,099	0,199%	12,5	6287,69	-14,3%
9	10	9,0	0,088	0,177%	11,1	6287,69	-15,2%
10	10	10,0	0,080	0,159%	10,0	6287,69	-10,9%

Iz priloženih rezultata vidljivo je da se ovako proračunata vrijednost modula elastičnosti $E_{R\ mke}$ podudara sa analitički izračunatom vrijednošću $E_{R\ teorijski}$. Ovakav model u svim slučajevima pokazuje nižu krutost od prosječnih vrijednosti izmjerenim eksperimentom, ali i dalje je unutar područja eksperimentalno određenih vrijednosti.

5.4. Validacija podataka ispitivanjem na savijanje

Ispitivanje je provedeno po normi EN ISO 178:2003 [24][26][28]. Uzorci su izrezani iz istih ploča laminata kao i epruvete za vlačno ispitivanje. Dimenzije uzoraka također su propisane normom po kojoj su se radila ispitivanja EN ISO 178:2003. Skica ispitnog postava prikazana je na Slici 5.7.

**Key**

1	Test specimen	h	Thickness of specimen
F	Applied force	l	Length of specimen
R_1	Radius of loading edge	L	Length of span between supports
R_2	Radius of supports		

Slika 5.7 Ispitni postav za savojno ispitivanje [28]

Širina svih uzoraka iznosi $b = 15\text{mm}$, dok su duljina uzorka l i razmak između oslonaca L definirani u odnosu na debljinu uzorka relacijama

$$l = 20h \quad (8)$$

za duljinu, te

$$L = 16h \quad (9)$$

za razmak između oslonaca. Maksimalno naprezanje σ_f koje se pojavljuje pri savojnom opterećenju F definirano je izrazom

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad (10)$$

a istežanje uslijed istog opterećenja dano je s

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2}. \quad (11)$$

Savojni modul elastičnosti predstavlja nagib pravca na krivulji naprezanje istežanje, te se između dvije točke definira sa

$$E_S = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}. \quad (12)$$

5.4.1. Savojno ispitivanje na kidalici

Prema normi, savojni modul računa se između točaka istežanja $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ i $\varepsilon_{f2} = 0,0025$ a ne od nule kako bi oslonci bili u punom kontaktu a uzorak prednapregnut. U eksperimentalnom ispitivanju odlučili su se na jednostavniji pristup kako bi ostvarili isti efekt, te je savojni modul elastičnosti računat mjerenjem progiba na opterećenjima od $F_1 = 10$ N i $F_2 = 100$ N. Dimenzije i objedinjeni rezultati savojnih ispitivanja nad laminatima od 4 do 10 slojeva prezentirani su u Tablici 5.3 zajedno s odstupanjima izmjerenih vrijednosti

$$\text{odstupanje } E_{S \text{ exp}} = \frac{\max |E_{S \text{ exp } i} - E_{S \text{ exp}}|}{E_{S \text{ exp}}}. \quad (13)$$

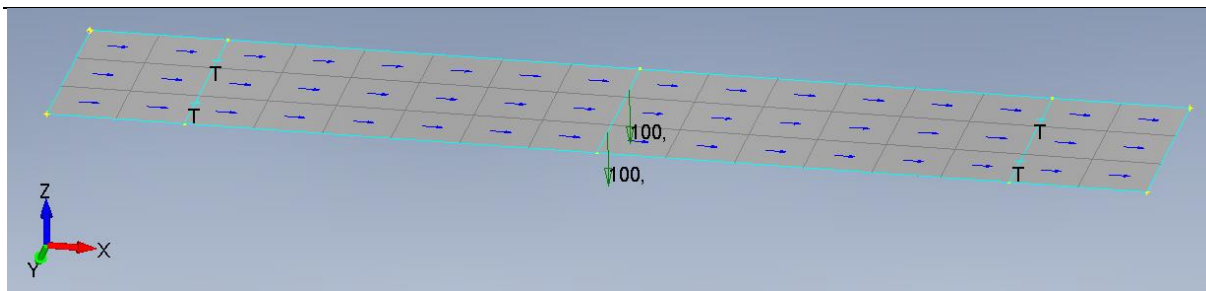
Tablica 5.3 Uprosječeni rezultati savojnog ispitivanja

Savojni test								
Broj slojeva	b [mm]	h [mm]	t [mm]	L [mm]	l [mm]	$E_{S \text{ exp}}$ [N/mm ²]	Odstupanje $E_{S \text{ exp}}$	
4	14,85 ±0,11	3,83 ±0,15	0,96	60	80	8691 ±788	9,1%	
5	15,06 ±0,18	4,46 ±0,16	0,89	70	100	8682 ±1.043	12,0%	
6	15,10 ±0,15	5,66 ±0,12	0,94	90	120	9409 ±749	8,0%	
7	14,97 ±0,21	6,65 ±0,19	0,95	106	140	10330 ±628	6,1%	
8	15,11 ±0,09	7,56 ±0,40	0,95	120	160	10099 ±634	6,3%	
9	15,16 ±0,28	8,47 ±0,23	0,94	136	180	10750 ±565	5,3%	
10	15,21 ±0,09	9,52 ±0,10	0,95	152	200	10516 ±451	4,3%	
Prosjeck	15,06 ±0,16	±0,19	0,94			9782 ±694	7,3%	

Odstupanje $E_{S \text{ exp}}$ između uzoraka za pojedini laminat je manja nego što je to slučaj sa vlačnim testom. Ono što nije očekivano jest da vrijednost savojnog modula znatno raste s brojem slojeva. Tako je najmanja prosječna vrijednost izmjerena na laminatu s 5 slojeva, dok je najveća na laminatu sa 9 slojeva i iznosi čak 23,8% više.

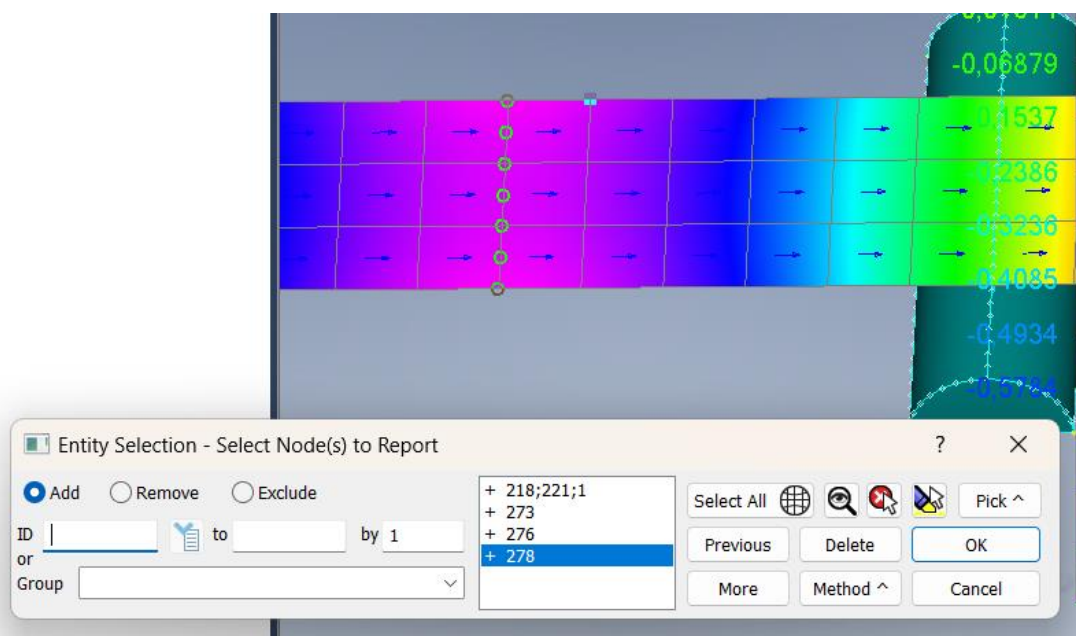
5.4.2. Simulacija savojnog testa MKE

Analiza je kao i kod vlačnog testa provedena pločastim paraboličkim konačnim elementima dimenzija zadanih osnovnom veličinom „default size“ 5x5mm. Iako se ovaj pokus može modelirati kao kontaktni problem sa više tijela koja predstavljaju čelični pritiskivač i oslonce u kontaktu s kompozitnom pločom uzorka, zbog velikih razlika u krutosti dolazi do znatnih numeričkih grešaka te produljenog vremena vršenja proračuna. Stoga su oslonci definirani rubnim uvjetom nulte translacije ali slobodne rotacije na čvorovima gdje dolazi do kontakta ploče i oslonaca, a pritiskivač je zamjenjen raspoređivanjem sile F na čvorove ploče koji bi bili u kontaktu s pritiskivačem. Mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti prikazani su Slikom 5.8.



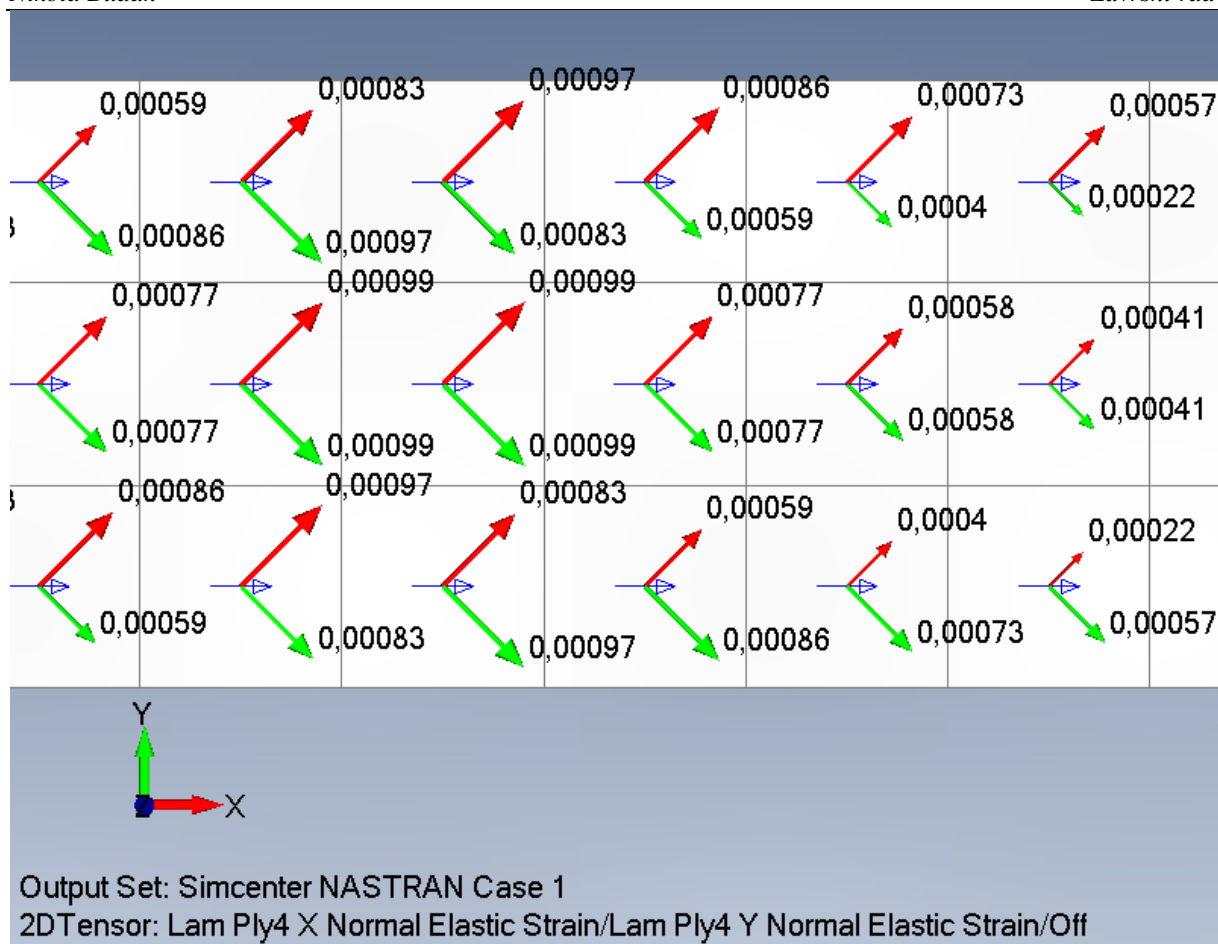
Slika 5.8 Simulacija savojnog testa, mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti

Simulacija je linearno elastičnog materijala, stoga nije potrebno stavljati predopterećenja kako bi se izračunao savojni modul elastičnosti te su rađene simulacije sa $F=100$ N. Potom se za progib uzela prosječna vrijednost pomaka čvorova označenih zelenim kružićima u smjeru Z osi na liniji gdje djeluje pritiskivač, Slika 5.9.



Slika 5.9 Čvorovi na kojima se računa prosječni progib

Kao i kod simulacije vlačnog testa, vršena je provjera maksimalnih vrijednosti istezanja u pravcu glavnih materijalnih osi kompozita, ali na svim laminatima s obzirom na promjenu geometrije. Najveći iznosi istezanja se pojavljuju u analizi laminata s 4 sloja vlakana, te iznose manje od 0,1%, Slika 5.10.



Slika 5.10 Vrijednosti istezanja sloja laminata od 4 sloja u smjeru materijalnih glavnih osi pri savijanju

Dimenzije simulirane geometrije, rezultati analize te odstupanje od eksperimentalno određenog savojnog modula elastičnosti dani su u Tablici 5.4.

$$\text{odstupanje } E_{S\text{ mke}} = \frac{E_{S\text{ exp}} - E_{S\text{ mke}}}{E_{S\text{ mke}}} \quad (14)$$

Tablica 5.4 Rezultati simulacije savojnog testa MKE

FEM savojno								
Broj slojeva	b [mm]	h [mm]	L [mm]	s [mm]	ε [mm/mm]	σ_f [N/mm ²]	$E_{S\text{ mke}}$ [N/mm ²]	Odstupanje $E_{S\text{ mke}}$
4	15	4	60	-0,896	0,00598	37,5	6274,74	-27,8%
5	15	5	70	-0,736	0,00451	28,0	6212,18	-28,4%
6	15	6	90	-0,907	0,00403	25,0	6198,59	-34,1%
7	15	7	106	-0,935	0,0035	21,6	6188,49	-40,1%
8	15	8	120	-0,910	0,00303	18,8	6180,12	-38,8%
9	15	9	136	-0,931	0,00272	16,8	6178,45	-42,5%
10	15	10	152	-0,947	0,00246	15,2	6177,85	-41,3%

Za razliku od eksperimenta, savojni modul elastičnosti izračunat MKE ostaje približno konstantan s obzirom na broj slojeva. Manja odstupanja u iznosu se događaju zbog promjene u geometriji postava od sloja do sloja. Također, savojni modul približno je jednak vlačnom

modulu, što je inače odlika izotropnih materijala pri malom progibu. To se može objasniti homogenošću vrijednosti vlačnog modula elastičnosti po slojevima, tj. E_R teorijski je jednak u svim slojevima laminata, neovisno o njihovom broju. Eksperiment je pokazao da savojni modul elastičnosti raste s brojem slojeva, pa tako rastu i odstupanja $E_{S_{mke}}$. Najniže odstupanje je u simulaciji laminata sa 4 sloja vlakna gdje je vrijednost savojnog modula 27,8% niža nego prosječno izmjerena u eksperimentu.

5.5. Osvrt na korelaciju simulacija sa eksperimentalnim vrijednostima

Iako su odstupanja savojnog modula elastičnosti $E_{S_{mke}}$ značajna, pogotovo kod laminata s većim broju slojeva, sve simulacije pokazuju niže vrijednosti krutosti nego eksperiment. $E_{R_{mke}}$ također ima odstupanja od $E_{R_{exp}}$ ali mnogo manja i konzistentnija nego što je to kod savojnog ispitivanja. Također su sve vrijednosti $E_{R_{mke}}$ niže od prosječno izmjerene $E_{R_{exp}}$. To znači da će korištenjem elastičnih konstanti iz Tablice 3.2 simulacije pokazivati manju krutost konstrukcije biokompozita nego što će biti u stvarnosti, te će stoga biti na strani sigurnosti. Za bolje korelacije bilo bi potrebno ponoviti sve testove ali sa laminatima čije se glavne materijalne osi poklapaju sa smjerom naprezanja iz dva razloga:

- U računicu simulacije ne računa se promjena elastičnih konstanti obzirom na zakret od materijalnih osi
- Na cijelom brodu korišteni su laminati čiji su slojevi poravnati sa smjerom prostiranja trupa [8]

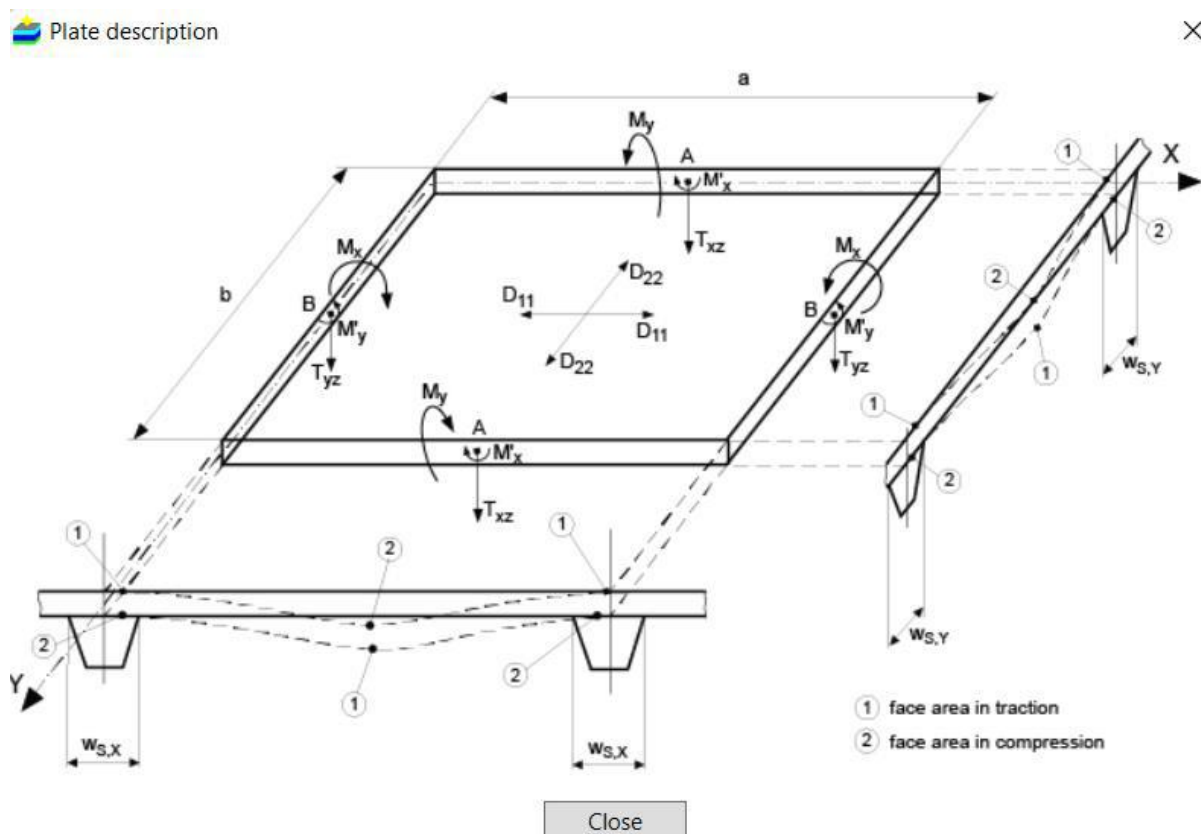
6. ODREĐIVANJE SLOJEVA U EKVIVALENTNIM LAMINATIMA BIOKOMPOZITA

S validiranim materijalnim podacima iz Tablice 3.2, određuje se raspored slojeva u laminatima od biokompozita koji će zamijeniti laminate izrađenih od stakloplastike prikazane u poglavlju 2.2. Cilj je odrediti broj slojeva u laminatima gdje se slojevi stakloplastike mijenjaju slojevima načinjenim od biokompozita koji zadovoljavaju kriterij maksimalnih naprezanja s uračunatim faktorom sigurnosti danim u Tablici 2.7.

6.1. Postupak određivanja broja slojeva biokompozita po dijelovima trupa

6.1.1. Rubni uvjeti na panele

Kako bi se odredio broj slojeva biokompozita koji će mijenjati slojeve stakloplastike u laminatima, napravljane su simulacije u FEMAP-u na panelima dimenzija danima u Tablici 2.7 i opterećenih na hidrostatski tlak naveden u istoj tablici. Rubni uvjet uklještenja stavljen je duž rubova ploče, budući da je to slučaj kakav koristi računalni program ComposeIT za proračun čvrstoće laminata, Slika 6.1.

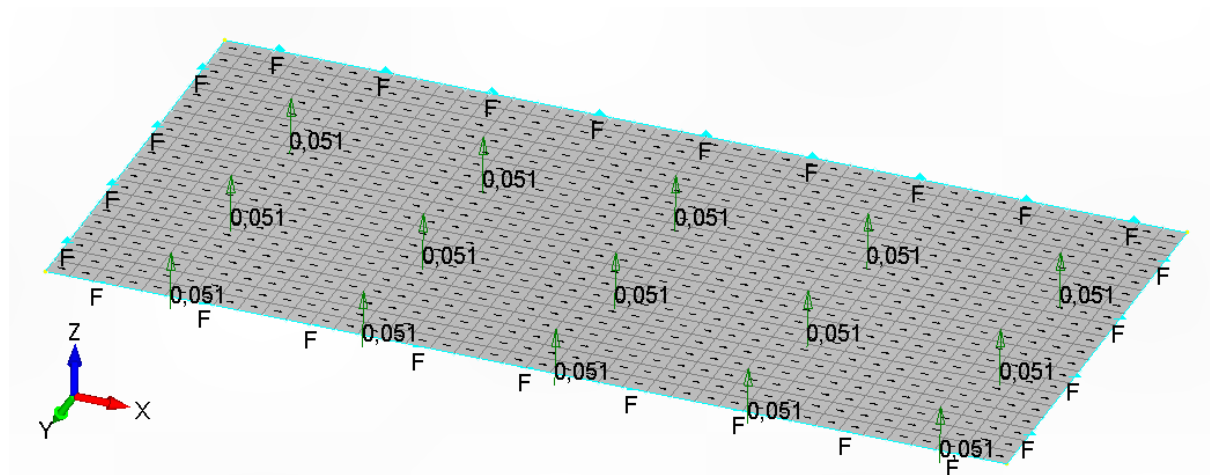


Slika 6.1 Prikaz definiranja ploče sa koordinatnim sustavom u računalnom programu [12]

Time se zapravo simulira naprezanje uslijed hidrostatskog opterećenja na najvećem panelu između uzdužnjaka koji su mnogo krući od ploče panela.

6.1.2. Diskretizacija panela

Za simulaciju panela u FEMAP-u korišteni su kvadratni 2D parabolički elementi veličine 25x25mm. Primjer mreže konačnih elemenata za panel dna sa rubnim uvjetima uklještenja i opterećenja te zadanom orijentacijom materijala u smjeru x osi prikazan je na Slici 6.2. Svi ostali paneli su opterećeni i diskretizirani na takav način.



Slika 6.2 Primjer rubnih uvjeta i mreže konačnih elemenata za panel dna

6.1.3. Orijehtacija materijala

Na krutost i naprezanja koja se pojavljuju u panelu značajno utječe i orijentacija materijala. Kao što je vidljivo iz Tablice 2.8, slojevi s biaksijalnim pletivom postavljeni su svi pod istim kutem i njihove materijalne osi 1 i 2 poklapaju se s x i y smjerom ploče. To je i zadani slučaj raspodjele slojeva na brodu, gdje je propisano registrom da se laminati moraju orijentirati duž smjera protezanja trupa [8]. To je logično iz dva razloga, prvi što su krutost i vlačna čvrstoća najveće kada se materijalne osi poklapaju sa glavnim osima naprezanja, Slika 5.2, a drugi zbog lakoće proizvodnje, gdje tkanine najčešće dolaze u rolama gdje je jeftinije proizvoditi role s tkanjem okomito/paralelnim sa rolom. Iz istih razloga u ekvivalentnom laminatu od biokompozita, slojevi AmpliTEX 5042 vlakana s biorazgradivom epoksidnom matricom su također slagani u laminat pod kutem od 0°, te se samo određuje njihov broj.

6.1.4. Kriterij ekvivalentnosti

Da bi se odredio broj korištenih slojeva biokompozita u laminatu određenog strukturnog elementa, prvo je provedena simulacija sa laminatom od stakloplastike. Kako bi odredili dovoljan broj slojeva biokompozita u laminatu, potrebno je da on zadovolji kriterij naprezanja sa istim faktorom sigurnosti kao i korišteni laminat od stakloplastike. Za tu potrebu u FEMAP-u su unesene vrijednosti maksimalnih dozvoljenih naprezanja za svaki materijal. Za tkanja

stakloplastike te vrijednosti su dane u Tablici 2.3 i Tablici 2.6, a vrijednosti maksimalnih dopuštenih napreznja biokompozita dan je u Tablici 3.3. Potom je u izborniku svojstva ploče zadan kriterij popuštanja najvećih istežanja *max strain*, koji je u direktnoj korelaciji sa kriterijem najvećih napreznja *max stress* budući da je on proporcionalan modulu elastičnosti koji u linearno elastičnoj analizi ostaje konstantan, jednadžbe (15), (16) i (17).

$$X_{\varepsilon} = \frac{X}{E_1} \quad (15)$$

$$Y_{\varepsilon} = \frac{Y}{E_2} \quad (16)$$

$$S_{\varepsilon} = \frac{S}{G_{12}} \quad (17)$$

Velika prednost FEMAP-a jest što se u postavkama analize može odmah postaviti ispis najmanje vrijednosti faktora sigurnosti S_f u danom elementu obzirom na zadane vrijednosti maksimalnih dopuštenih napreznja i kriterija popuštanja, jednadžba (18).

$$S_f = \frac{\textit{Stvarno napreznje}}{\textit{Dopušteno napreznje}} > 1 \quad (18)$$

Takav prikaz povoljan je za provjeru predimenzioniranosti elemenata, ali loš za dobivanje uvida u elemente s niskim faktorom sigurnosti. To je zato što program automatski skalira boje linearno od najmanje do najveće vrijednosti, što rezultira vrlo širokom skalom budući da manje opterećeni elementi imaju i po red veličine veći faktor sigurnosti od najopterećenijih elemenata. Kada se takva skala diskretizira na jednake dijelove, ona nije u mogućnosti diferencirati između elemenata s bliskim iznosima nižih faktora sigurnosti te većina domene poprimi uniformnu boju. Iz tog razloga za dobivanje detaljnije slike raspodjele faktora sigurnosti po elementima koristi se prikaz njegove recipročne vrijednosti: najveći indeks popuštanja, tj. *max failiure index*, dan izrazom (19)

$$F_i = \frac{1}{S_f} = \frac{\textit{Dopušteno napreznje}}{\textit{Stvarno napreznje}} < 1. \quad (19)$$

Najveći indeks popuštanja stoga predstavlja udio najveće iskorištenosti dopuštenog napreznja u pojedinom elementu. Iznos preko 1 predstavlja prelazak dopuštenog napreznja. U nastavku kako bi se odredio zadovoljavajući broj slojeva biokompozita, njihov najveći indeks popuštanja mora biti manji od najvećeg indeksa popuštanja kod laminata istog strukturnog elementa trupa ili palube. Da bi se to odredilo, ponavljaju se simulacije panela izrađenog od biokompozita, svaki put dodajući jedan sloj dok se ne odredi broj slojeva koji udovoljava navedeni uvjet.

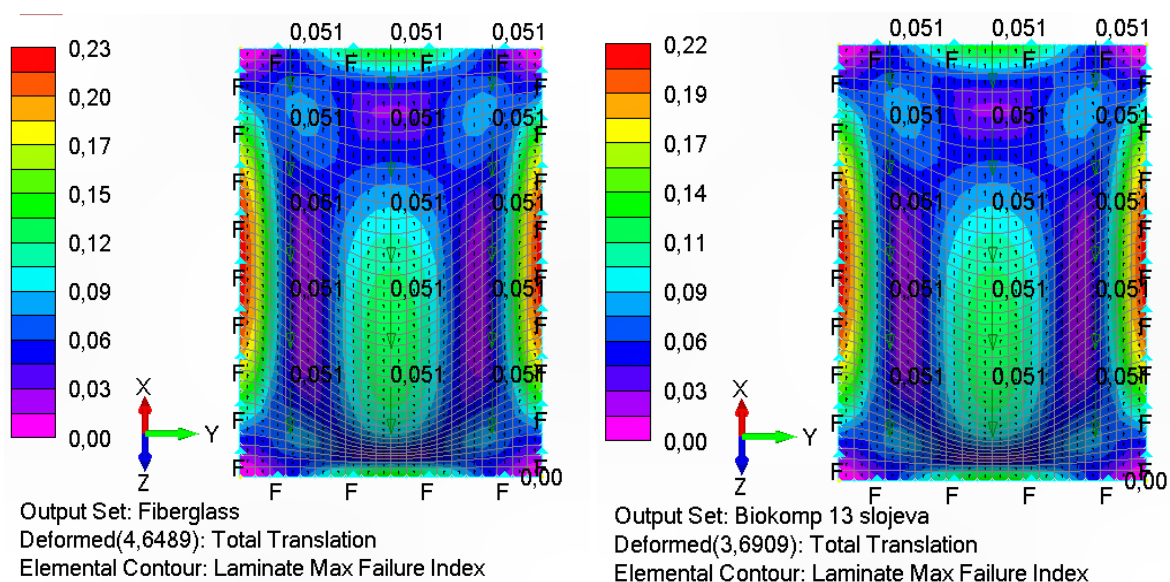
6.2. Određivanje ekvivalentnih laminata panela

6.2.1. Ekvivalentni panel dna

Polja najvećeg indeksa popuštanja po elementima najveće ploče dna izrađene od stakloplastike i biokompozita uspoređeni su na Slici 6.3. Vidljivo je da dno od stakloplastike ima manju krutost jer najveći pomak iznosi 4,65 mm te da je najveći indeks popuštanja 0,23 što odgovara faktoru sigurnosti 4,35 te je znatno viši od nužnog faktora od 2,4 zadanog Tablicom 2.7. Iako to ukazuje na značajnu predimenzioniranost panela, u ovom radu autor ne ulazi razloge takvog konstrukcijskog rješenja odabranog od strane brodogradilišta, stoga će broj korištenih slojeva biokompozita biti određen tako da ima jednak faktor sigurnosti ili veći. Iterativnim postupkom određeno je da je za to potrebno 13 slojeva. Pritom dolazi do znatno manjeg maksimalnog pomaka od 3,69mm. Rezultati su prikazani Tablici 6.1.

Tablica 6.1 Usporedba panela dna

Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva
Stakloplastika	0,23	4,35	4,65	
Biokompozit	0,22	4,55	3,69	15



Slika 6.3 Najveći indeksi popuštanja na panelu dna

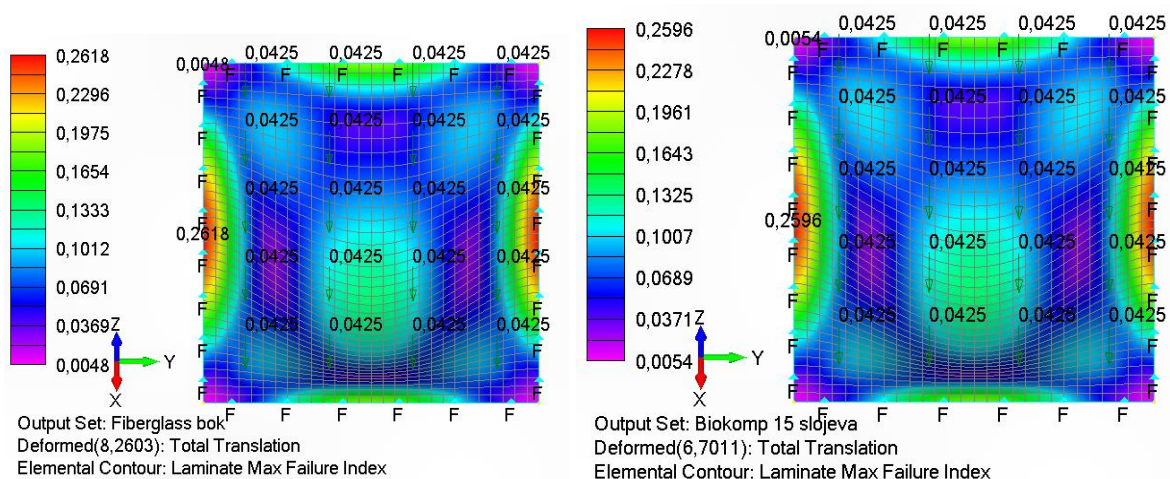
Lijevo stakloplastika, desno biokompozit

6.2.2. Ekvivalentni panel boka

Ovdje je korišten identičan postupak kao i kod panela dna. Promijenjen je rubni uvjet tlaka, te dimenzija ploče kako je navedeno Tablicom 2.7. Raspored slojeva u laminatu od stakloplastike za koji treba odrediti nužan broj slojeva u biokompozitu je prikazan u Tablici 2.9. Polja najvećeg indeksa popuštanja ocrтана na deformiranom panelu boka prikazana su Slikom 6.4. Rezultati su prikazani u Tablici 6.2.

Tablica 6.2 Usporedba panela boka

Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva
Stakloplastika	0,262	3,82	8,26	
Biokompozit	0,260	3,85	6,70	15



Slika 6.4 Najveći indeksi popuštanja na panelu boka

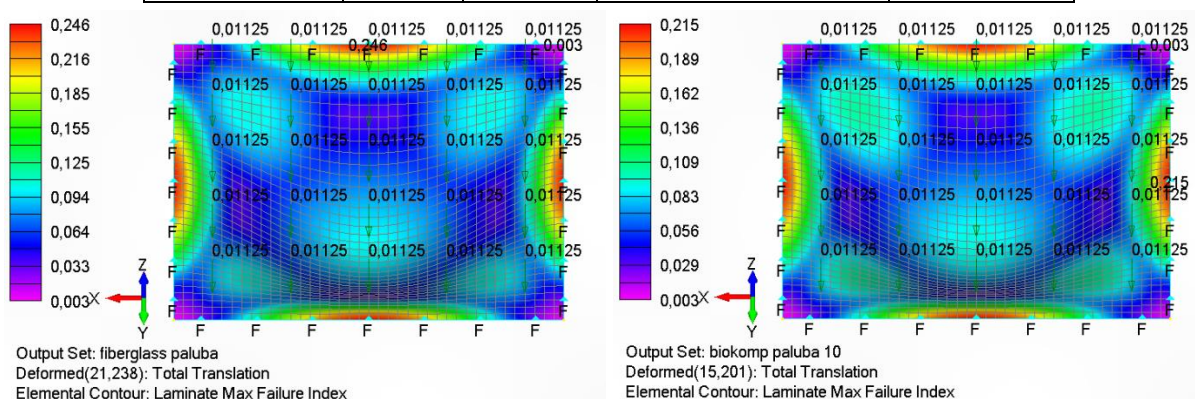
Lijevo stakloplastika, desno biokompozit

6.2.3. Ekvivalentni panel palube

Ovdje je korišten identičan postupak kao i kod prethodnih panela. Promijenjen je rubni uvjet tlaka, te dimenzija ploče kako je navedeno Tablicom 2.7. Raspored slojeva u laminatu od stakloplastike za koji treba odrediti nužan broj slojeva u biokompozitu je prikazan u Tablici 2.9. Polja najvećeg indeksa popuštanja ocrtna na deformiranom panelu boka prikazana su Slika 6.5. Rezultati su prikazani u Tablici 6.3.

Tablica 6.3 Usporedba panela palube

Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva
Stakloplastika	0,246	4,07	21,24	
Biokompozit	0,215	4,65	15,20	10



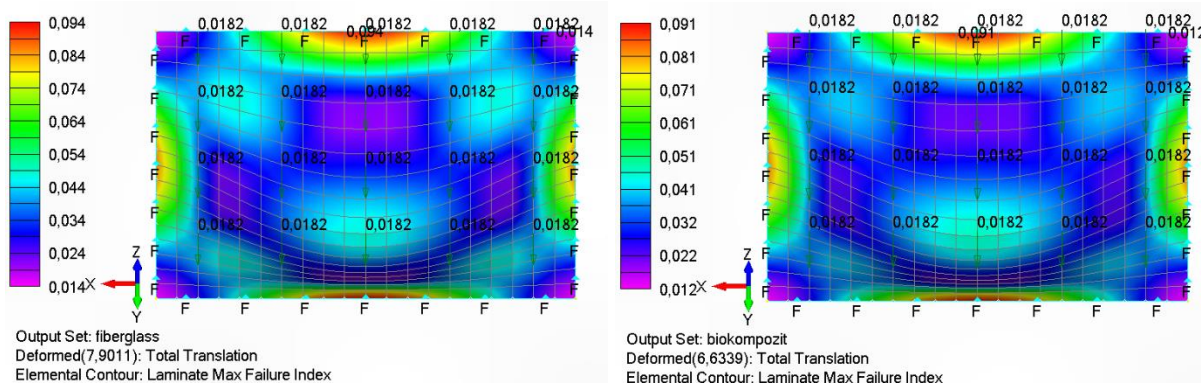
Slika 6.5 Najveći indeksi popuštanja na panelu palube

6.2.4. Ekvivalentni panel nepropusne pregrade

Ovdje je korišten identičan postupak kao i kod prethodnih panela. Promijenjen je rubni uvjet tlaka, te dimenzija ploče kako je navedeno Tablicom 2.7. Raspored slojeva u laminatu od stakloplastike za koji treba odrediti nužan broj slojeva u biokompozitu je prikazan u Tablici 2.9. Ovdje treba napomenuti da su nepropusne pregrade izrađene nanošenjem slojeva oko jezgre načinjene od balse. U ekvivalentnom laminatu biokompozit zamijenjuje samo slojeve izrađene od stakloplastike. Polja najvećeg indeksa popuštanja ocrтана na deformiranom panelu boka prikazana su Slika 6.5. Rezultati su prikazani Tablicom 6.3.

Tablica 6.4 Usporedba panela palube

Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva
Stakloplastika	0,094	10,64	7,90	
Biokompozit	0,091	10,99	6,63	12 (6 sa svake strane)



Slika 6.6 Najveći indeksi popuštanja na panelu nepropusne pregrade

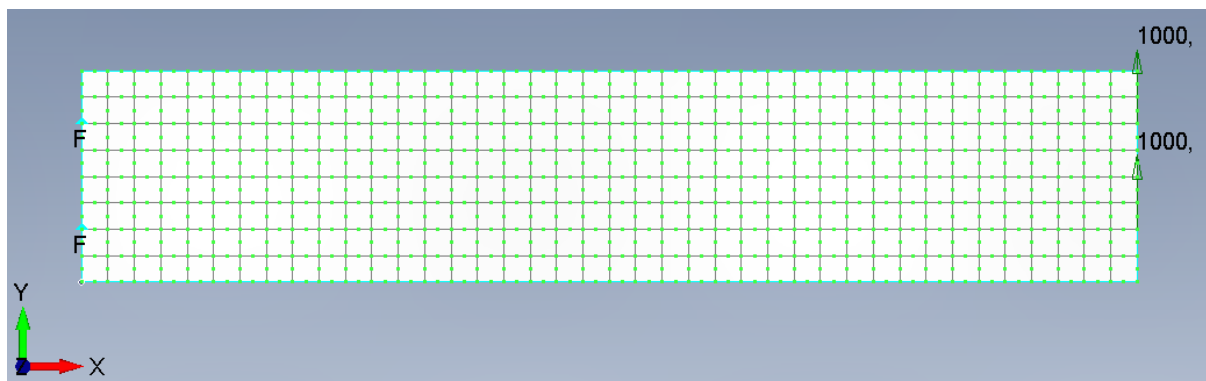
Lijevo stakloplastika, desno biokompozit

6.3. Određivanje ekvivalentnih laminata ukruta

Rebra i uzdužnjaci drugačije su opterećeni nego ploče trupa. U programu ComposeIT se proračunava njihova čvrstoća tako da se ploče proračunate u ovom poglavlju ojačaju tim rebrima ili uzdužnjacima okomito na rubove najvećeg panela te se tako preko njih prenosi hidrostatsko opterećenje. U ovom poglavlju se ne radi proračun maksimalnih naprezanja koja se pojavljuju u pojedinim dijelovima trupa jer je to načinjeno u potonjim poglavljima na globalnom modelu. Ovdje se samo dokazuje ekvivalentnost laminata korištenih u ukrutama prema najvećem indeksu popuštanja. Zbog toga su postavljeni pojednostavljeni rubni uvjeti za usmjerenje opterećenja koje je očekivano na ukrute, a to je čisto savijanje. Jedan kraj ukrute se uklješti, a na drugi djeluje proizvoljna sila od $F = 1000$ N.

6.3.1. Ekvivalentni laminat rebra

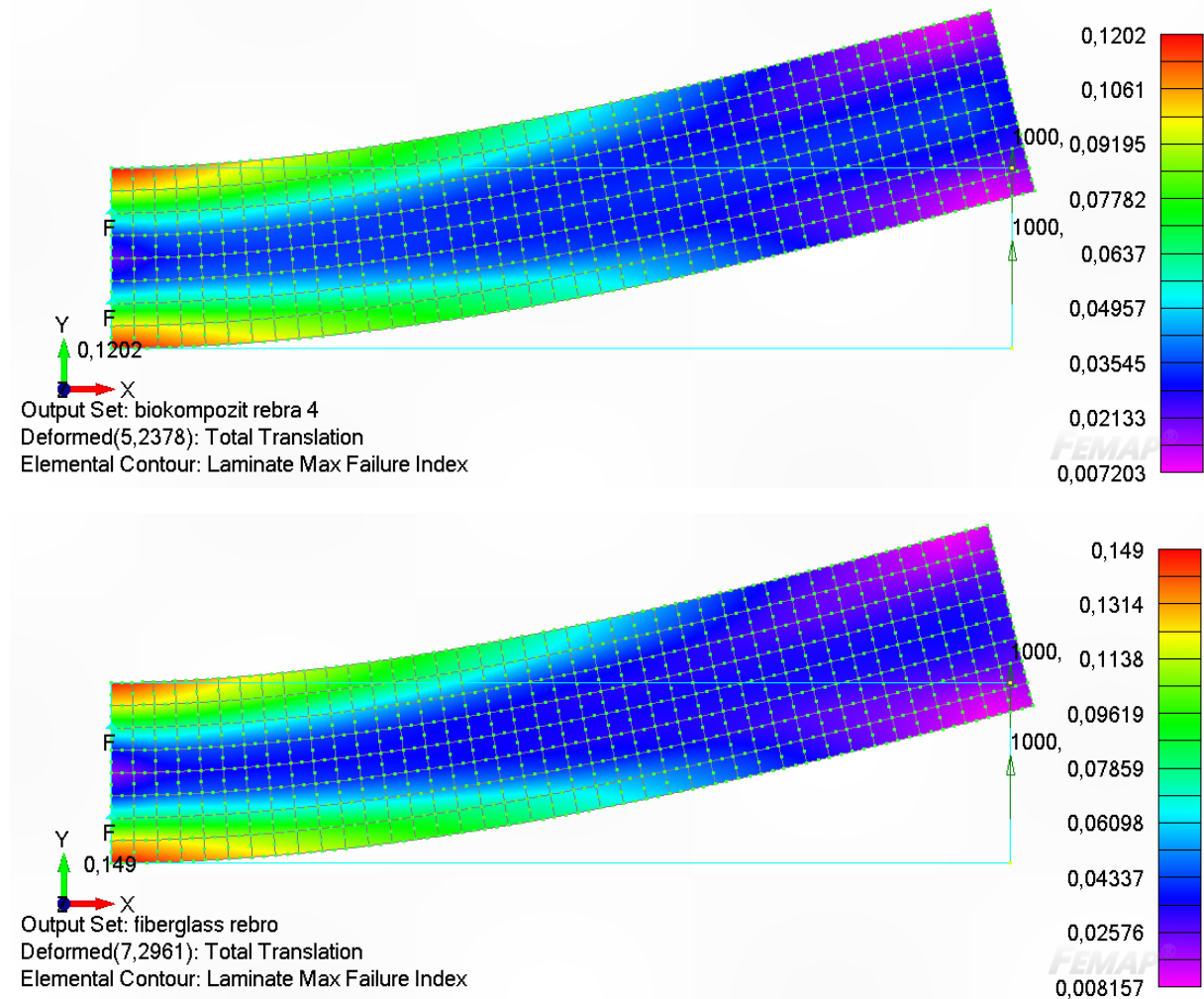
Rebro se definira kao pločasti element širine 200 mm, debljine 40 mm i očvršćuje najveće panele dna, boka i palube u maksimalnoj duljini od 1000 m. Tih dimenzija je i napravljena ploča. Savojna sila djeluje paralelno s površinom rebra, stoga djeluje u smjeru materijalne osi 2. Prikaz diskretizacije i rubnih uvjeta prikazan je Slikom 6.7.



Slika 6.7 Rubni uvjeti i mreža konačnih elemenata za proračun ekvivalentnog laminata rebra
 Raspodjela slojeva u laminatu rebra od stakloplastike dan je u Tablici 2.12. Rezultati najmanjeg indeksa popuštanja ocrtanog na deformiranom rebu prikazan je Slikom 6.8 i dan u Tablici 6.5.

Tablica 6.5 Usporedba laminata za rebro okomice 200x40 mm

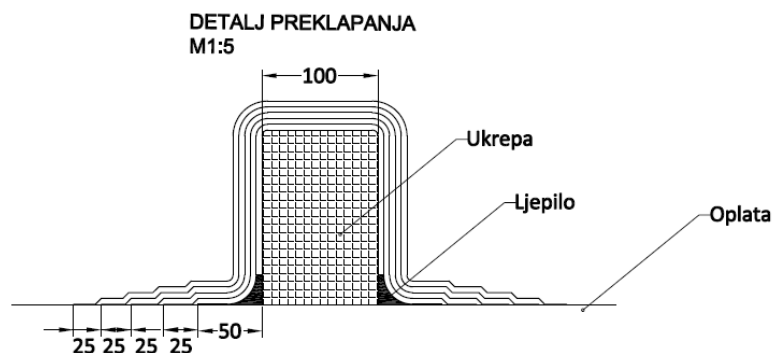
Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva (sa svake strane)
Stakloplastika	0,149	6,71	7,30	
Biokompozit	0,120	8,33	5,24	8 (4)



Slika 6.8 Najveći indeksi popuštanja na ukruti okomitog rebra 200x40mm iznad stakloplastika, ispod biokompozit

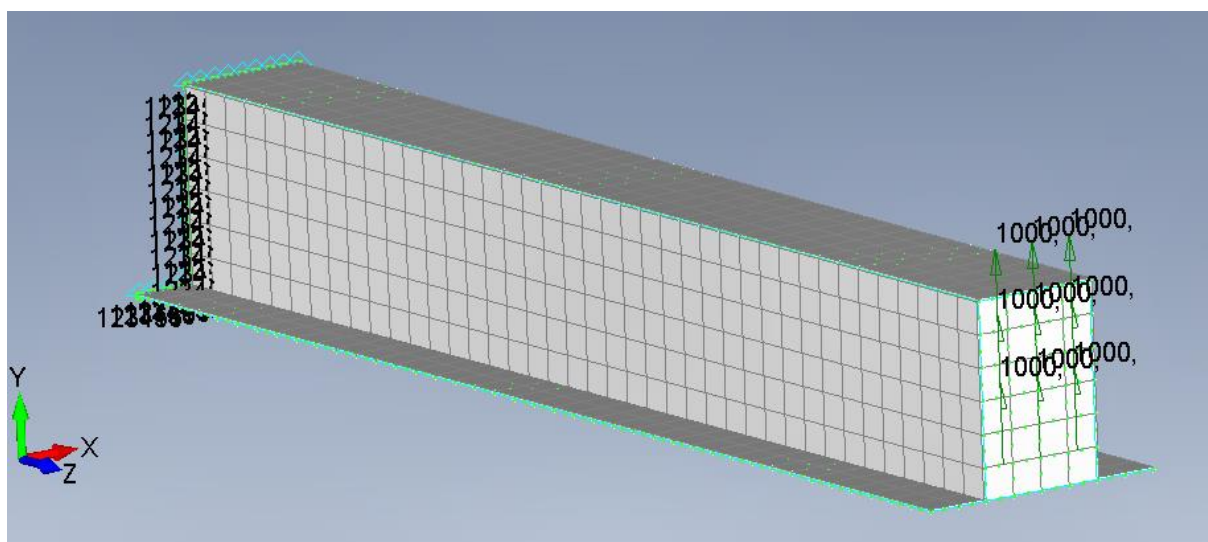
6.3.2. Ekvivalentni laminat uzdužnjaka boka i dna

Uzdužnjaci trupa 150x100 mm sastoje se od jezgre načinjene od PET pjene debljine 100 mm i visine 150 mm koja je obložena sa tri strane s četiri sloja višesmjernih tkanina stakloplastike, prikazano Slikom 6.9.



Slika 6.9 Presjek uzdužne ukrepe

Proračun u CompositIT-u ne dopušta definiranje takvog oblika, stoga je tamo rađen proračun gdje se definira laminat u kojem je jezgra od PET pjene debljine 100 mm obložena stakloplastikom sa dvije strane, te se takav laminat proračunavao kao pločasti. Budući da su u narednim poglavljima iskorištene naprednije mogućnosti modeliranja greda u FEMAP-u, ekvivalentna krutost uzdužnjaka proračunata je na 3D modelu gdje je jezgra diskretizirana sa volumenskim kubnim elementima, a slojevi stakloplastike i ekvivalentnog biokompozita su oblijepljeni oko tih elemenata. Isto kao i kod rebra, jedan kraj je ukliješten, a na drugi kraj udaljen 1000 mm je narinuta sila od 1000 N. Smjer narinute sile određen je da odgovara opterećenjima kojima se opiru uzdužnjaci na brodu, dakle okomito na ploču koju očvršćuje uzdužnjak, prema unutrašnjoj strani trupa. Rubni uvjeti i diskretizirana geometrija prikazani su na Slici 6.10.



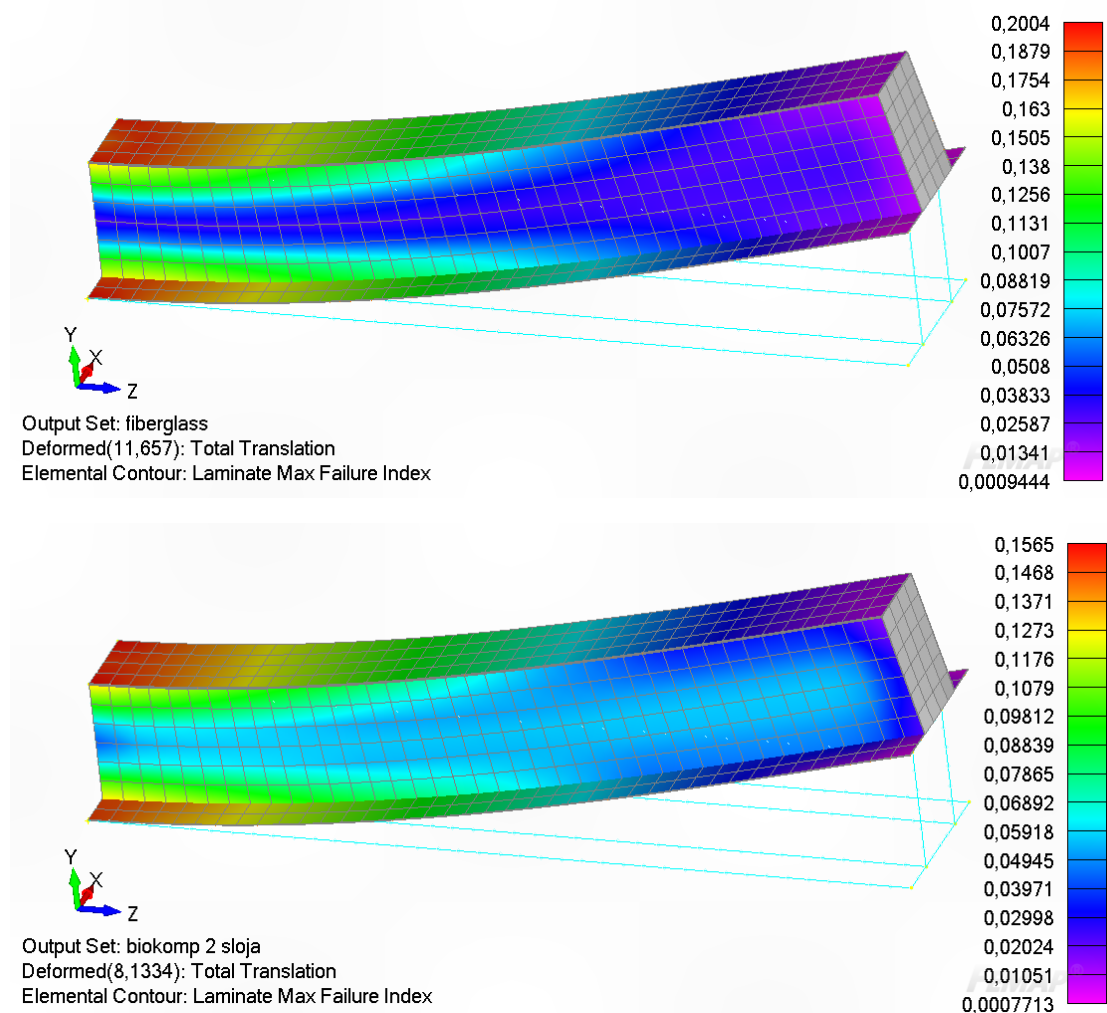
Slika 6.10 Rubni uvjeti i diskretizirana geometrija uzdužnjaka boka i dna

U Tablici 6.6 predstavljeni su rezultati najvećeg indeksa čvrstoće s obzirom na korišteni materijal prikazanom na deformiranom uzdužnjaku, a grafički prikaz dan je na Slici 6.11.

Tablica 6.6 Usporedba laminata za uzdužnjak trupa 150x100mm

Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva
Stakloplastika	0,200	4,99	11,66	2
Biokompozit	0,157	6,39	15,65	

Napomena, broj slojeva u ovoj ukruti definiran je kao broj slojeva s jedne strane jezgre, dakle broj slojeva koji oblažu jezgru kao na Slici 6.9.



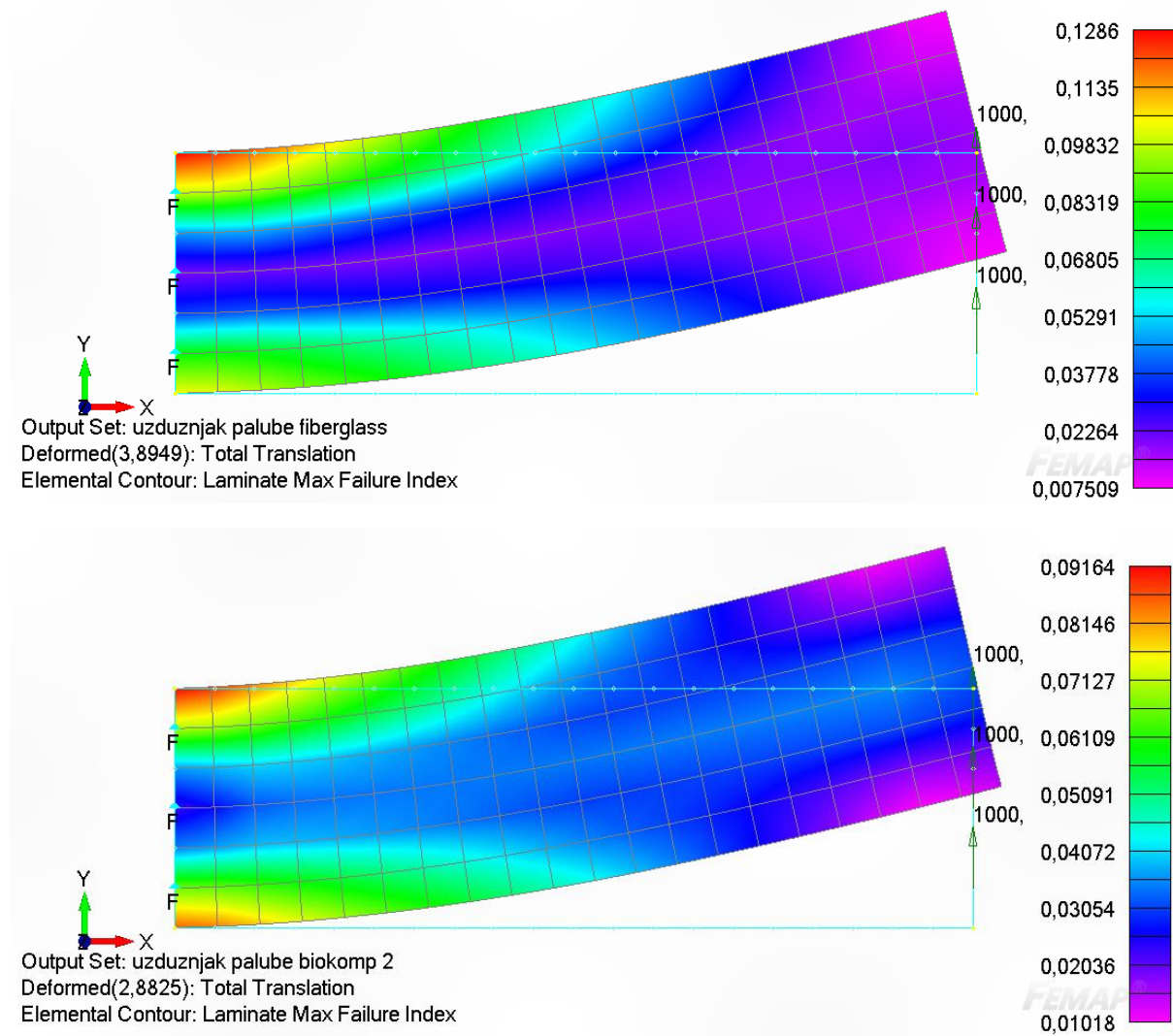
Slika 6.11 Najveći indeksi popuštanja na ukruti okomitog rebra 200x40 mm iznad stakloplastika, ispod biokompozit

6.3.3. Ekvivalentni laminat uzdužnjaka palube

Za razliku od uzdužnjaka dna i boka koji učvršćuju oplatu samo s jedne strane, uzdužnjak palube učvršćuje plohe palube i sa gornje i sa donje strane. Stoga se opisuje kao ploča sa jezgrom od PET pjene debljine 100 mm i širine 300 mm, obložena s 4 sloja stakloplastike, baš kao što je navedeno u Tablici 2.13. Budući da se opisuje kao ploča, rubni uvjeti su isti kao i kod računanja krutosti rebra, dakle ploča 300 mm širine i 1000 mm duljine koliko iznosi najveći panel koji ukrućuje. Rubni uvjeti, diskretizacija i polje najvećeg indeks popuštanja prikazan na deformiranoj ukrepi od stakloplastike i biokompozita prikazani su na Slici 6.12. Rezultati su predstavljeni u Tablici 6.7.

Tablica 6.7 Usporedba laminata za uzdužnjak palube 300x100mm

Laminat	F_i	S_f	Najveći progib [mm]	Broj slojeva (sa svake strane)
Stakloplastika	0,129	7,78	3,89	
Biokompozit	0,092	10,91	2,88	4(2)



Slika 6.12 Uzdužnjak palube: rubni uvjeti, diskretizacija i najveći indeksi popuštanja iznad stakloplastika, ispod biokompozit

7. GLOBALNI PRORAČUN TRUPA

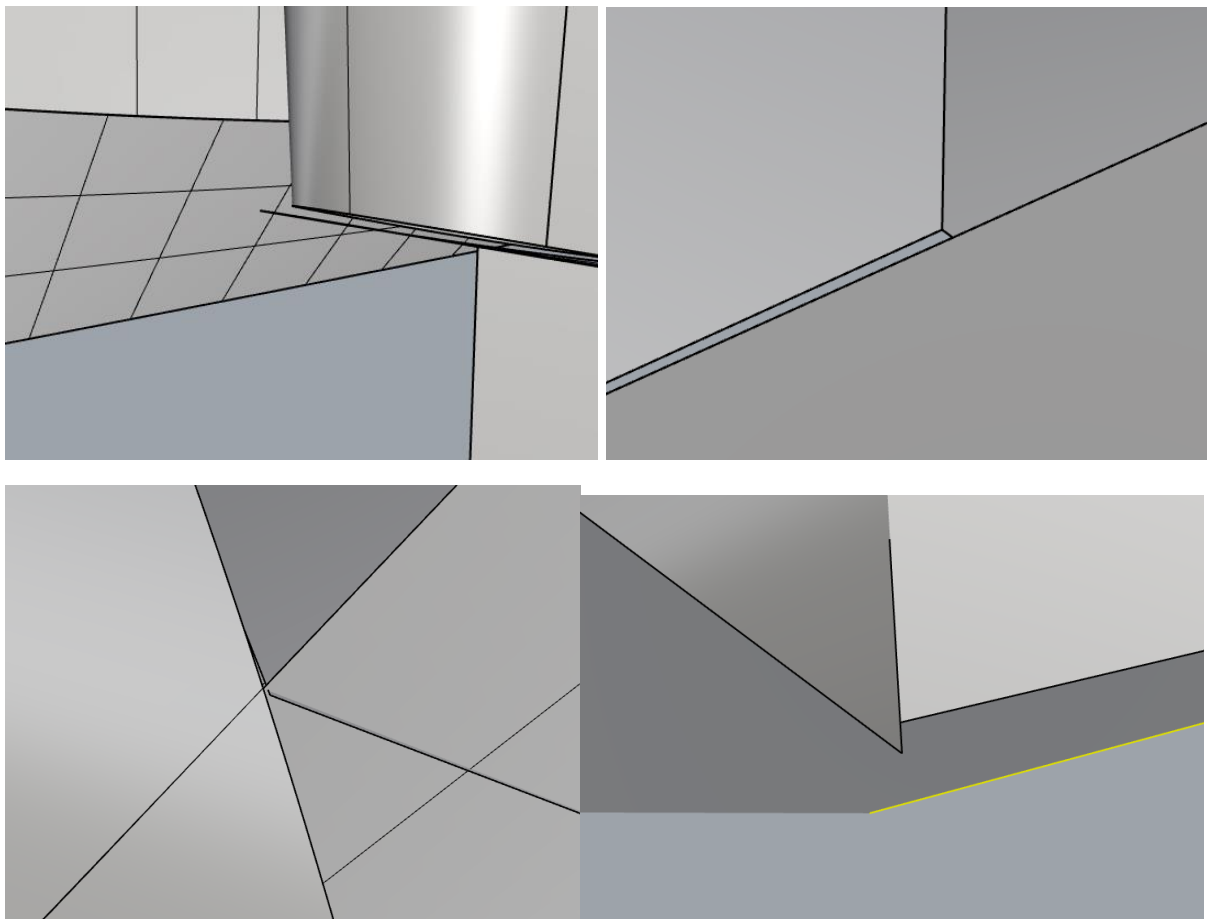
Kako bi se istražila prikladnost zamjene stakloplastike biokompozitom kao materijala od kojeg je napravljen trup katamarana, potrebno je dokazati da u takvoj izvedbi neće doći do popuštanja materijala. U proračunu metodom konačnih elemenata za potrebe numeričke preciznosti kod kompleksne geometrije potrebno je da su dimenzije korištenih elemenata nekoliko redova veličine manje od geometrije koja se modelira. Generalno pravilo je da je dobiveno polje naprezanja preciznije sa povećanjem broja korištenih elemenata korištenim za diskretizaciju geometrije. S druge strane, računalni resursi, te u ovom slučaju i studentska licenca FEMAP-a ograničavaju broj elemenata koji se mogu praktično koristiti. U praksi to znači da su dimenzije elemenata koje su dovoljne za diskretizaciju i precizan proračun krutosti čitavog trupa broda prevelike za dobivanje polja naprezanja u konstrukcijskim detaljima poput spojeva rebara i oplata. Stoga, za točno određivanje naprezanja korištena je tehnika podmodeliranja [22].

7.1. Priprema geometrije trupa broda

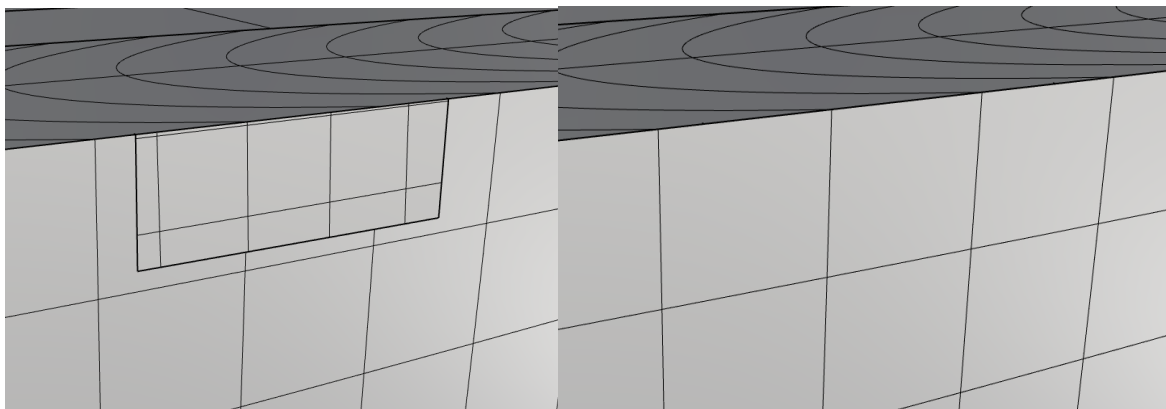
Geometrija trupa zaprimljena je u izvornom formatu programa Rhinoceros 7 (u daljnjem tekstu *Rhino*) gdje je izvorno nacrtan trup za potrebe prikaza katamarana na računalno generiranim fotografijama. To znači da je obraćena pozornost više na vjerodostojnost izgleda geometrije, i prikaza najsitnijih detalja, što je nepraktično za diskretizaciju konačnim elementima.

7.1.1. Priprema geometrije u *Rhino-u*

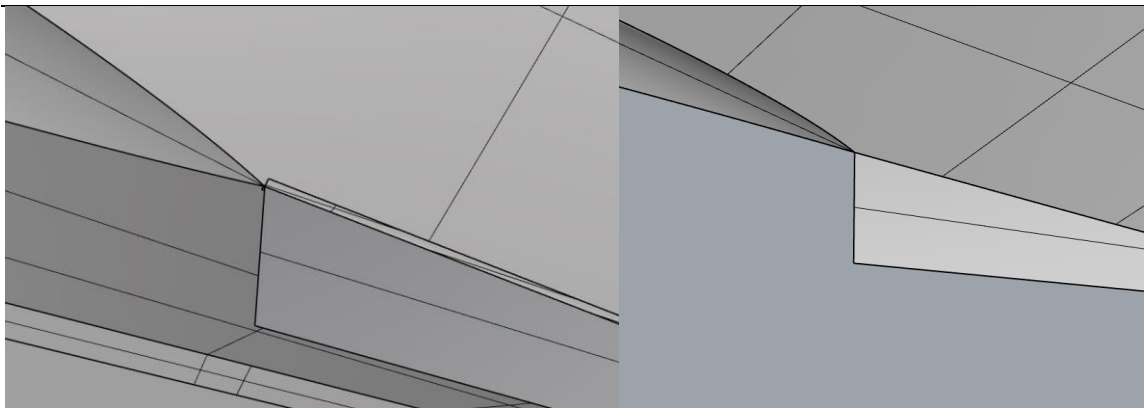
Prvo, su sve ploče oplata bile prikazane kao tanka volumenska tijela. Za potrebe diskretizacije 2D elementima, bilo je nužno opisati oplati samo sa plohama. Naredbom *solid>explode>delete surfaces* gdje volumeni su rastavljeni na plohe od kojih su se sastojale, te su potom brisane sve suvišne plohe. U tom procesu otkriveni su znatni problemi s definiranjem geometrije,. Naime, *Rhino* je izrazito pogodan program za modeliranje kompleksnih zakrivljenih ploha i krivulja kao što su to plohe oplata boka i dna, ali nepravilnim korištenjem može doći do loše definirane geometrije, kao što to prikazuje Slika 7.1. To pak kasnije radi značajne probleme u diskretizaciji u FEMAP-u. Također, za potrebe prikaza što vjernijih slika, dodavane su geometrijske značajke koje su mnogo manje od veličina konačnih elemenata koji se koriste za diskretizaciju, a ne utječu značajno na proračun. Primjer takvog uklanjanja jest otvor za stepenicu ulaza na vrhu trupa, Slika 7.2, uklanjanje tankog otvora nastalog izrezivanjem oplata dna zbog kobilice koja je bila definirana kao tanki volumen, Slika 7.3, poravnavanje palube broda koja je nagnuta na središnjem dijelu radi otjecanja vode, Slika 7.4, i brojne druge.



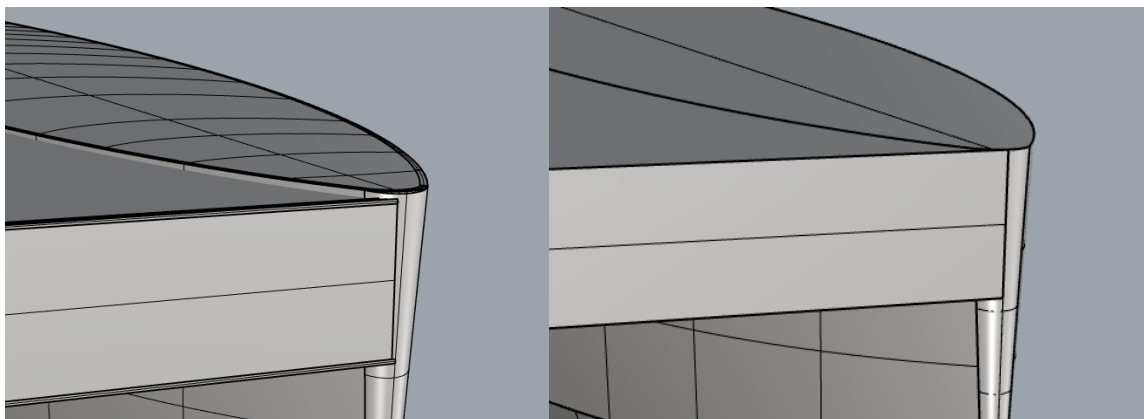
Slika 7.1 Greške u definiranju geometrije trupa



Slika 7.2 Uklanjanje otvora za stepenicu u oplati boka



Slika 7.3 Uklanjanje otvora nastalog izrezivanjem oplata dna za kobilicu konačne debljine

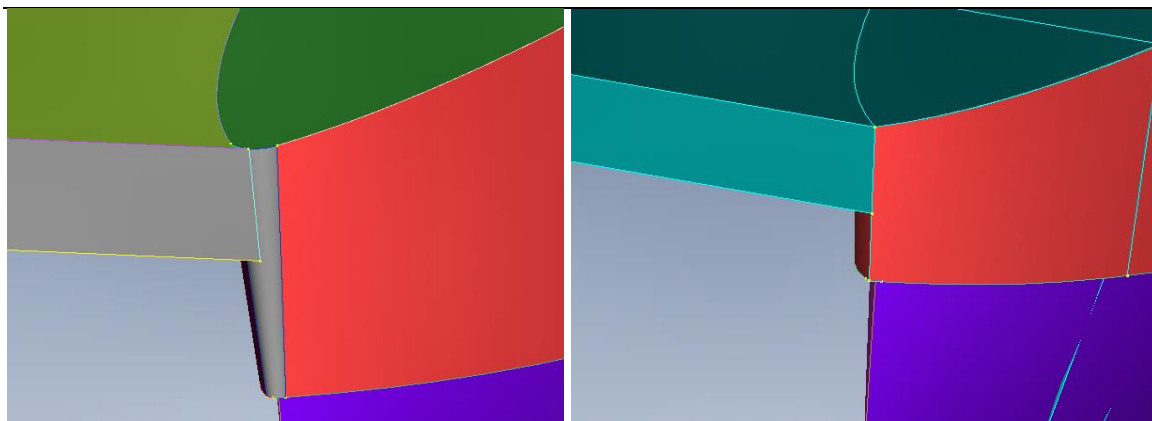


Slika 7.4 Poravnavanje površina palube

Nakon što je dorađena geometrija oplata trupa, točnije plohe koje definiraju oplatu boka i dna, izvezena je u formatu Parasolid – SolidEdge (.x_t) i uvezena u FEMAP. Ovaj format je odabran jer je upravo to format u kojim FEMAP originalno formira i čita svoju geometriju. Prilikom unošenja strane geometrije u FEMAP, potrebno je skalirati ju faktorom 1000 kako bi sve dimenzije bile u milimetrima.

7.1.2. Pojednostavljanje geometrije u FEMAP-u

Na tako uvezenoj geometriji napravljena su dodatna pojednostavljenja geometrije, poput uklanjanja zakrivljenog vrha trupa, Slika 7.5.

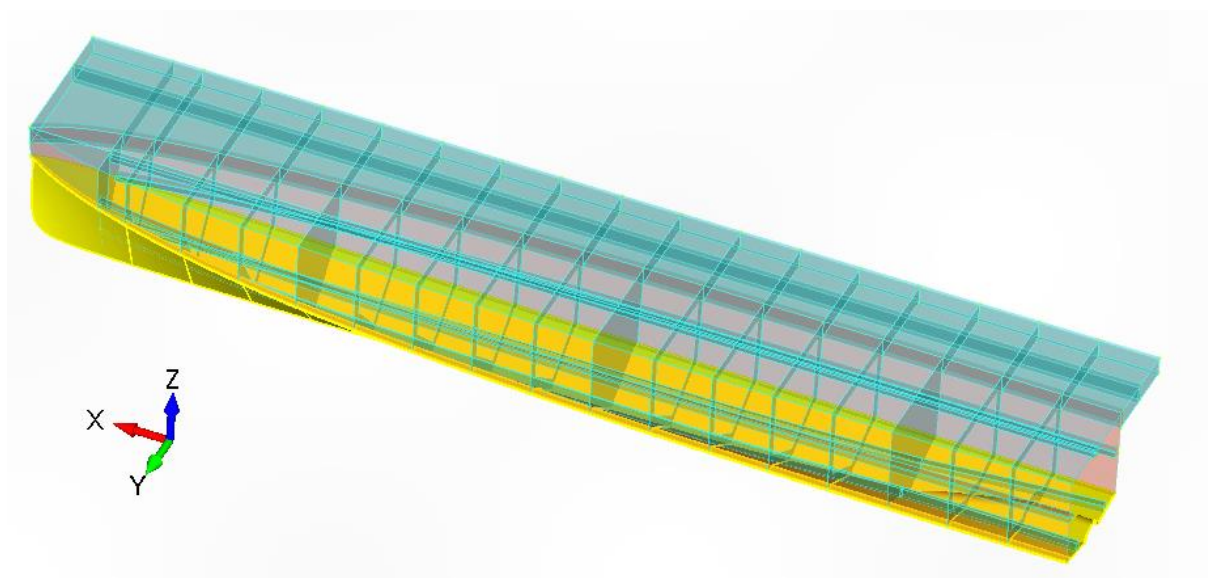


Slika 7.5 Pojednostavljenje geometrije vrha trupa

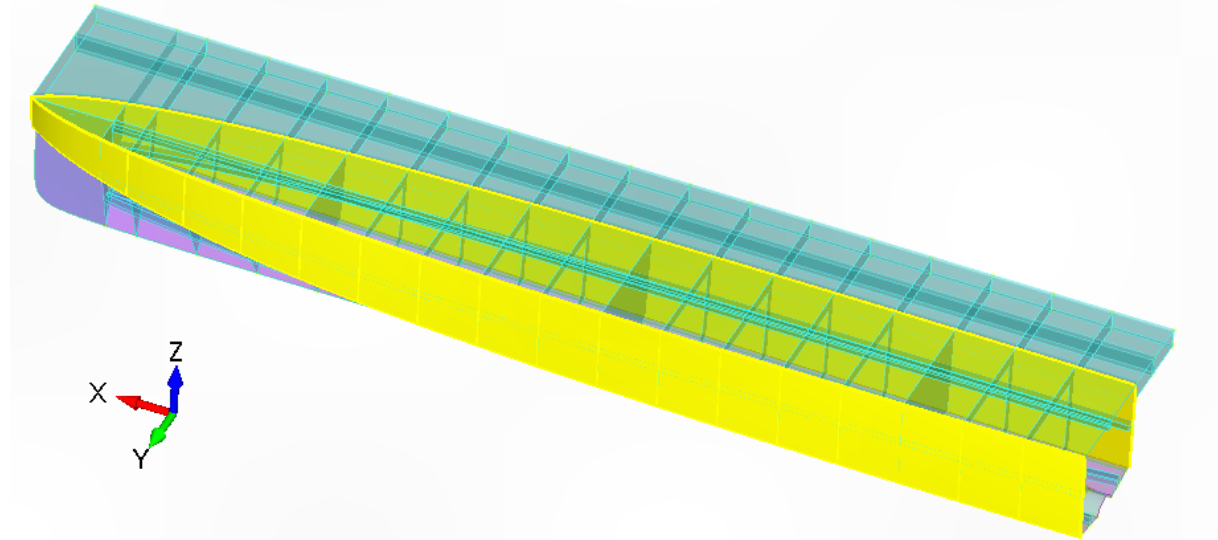
7.1.3. Ucertavanje geometrije koja nedostaje u FEMAP-u

Osim uvezene geometrije oplata dna Slika 7.6 i boka Slika 7.7, bilo je potrebno ucrtati:

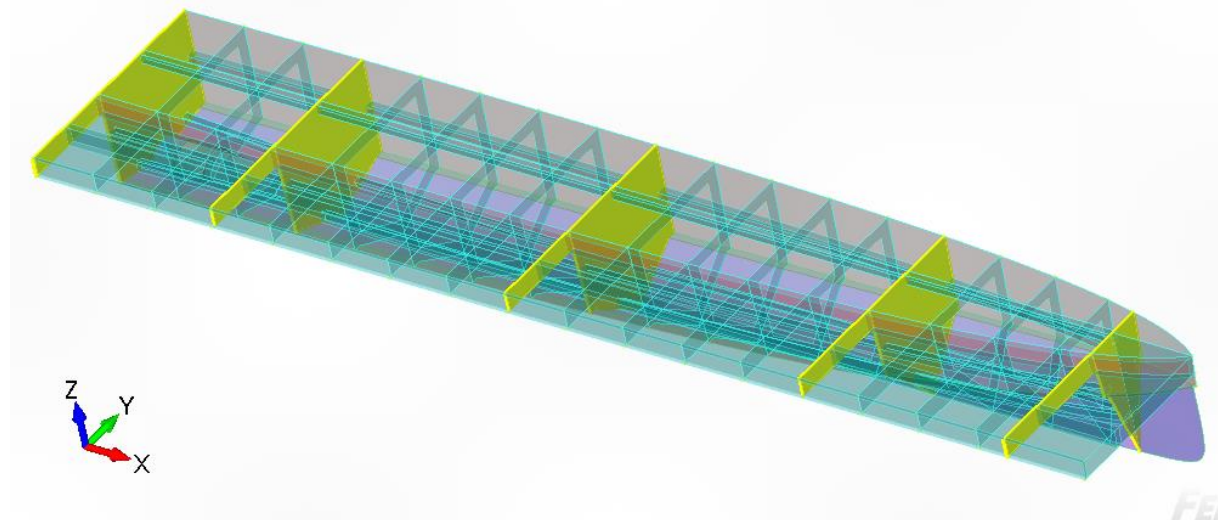
- Nепropusne pregrade, Slika 7.8
- Rebra i pljuskaču, Slika 7.9
- Oplatu palube, Slika 7.10
- Uzdužnjake trupa, Slika 7.11
- Uzdužnjake palube, Slika 7.12



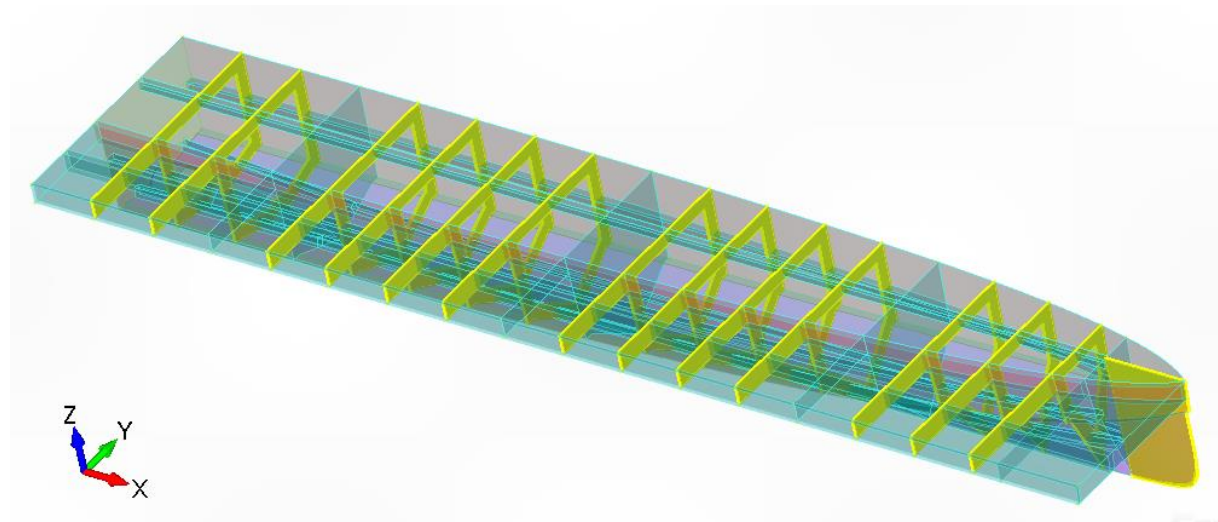
Slika 7.6 Oplata dna



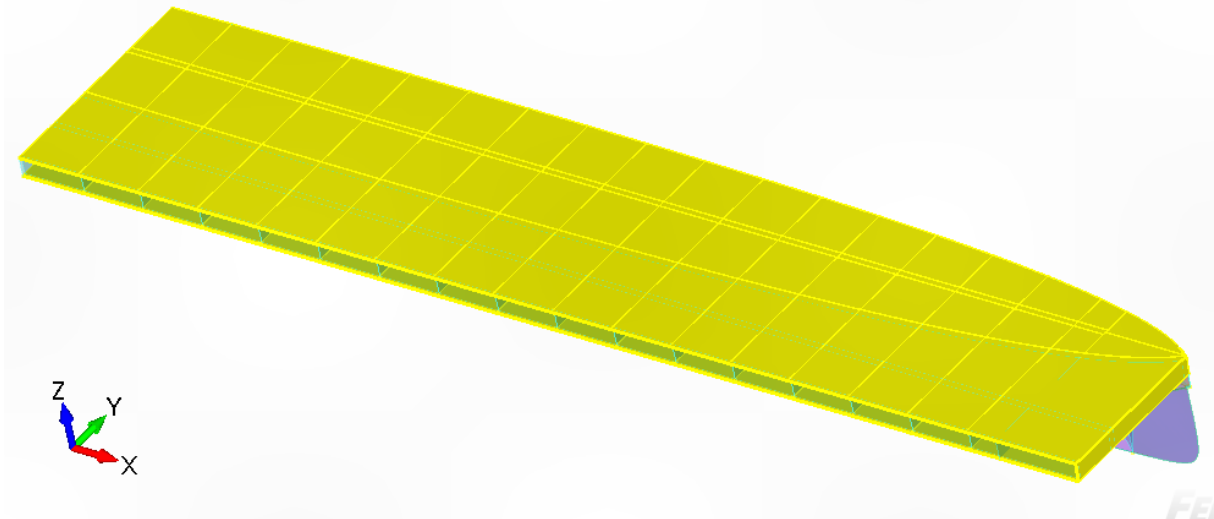
Slika 7.7 Oplata boka



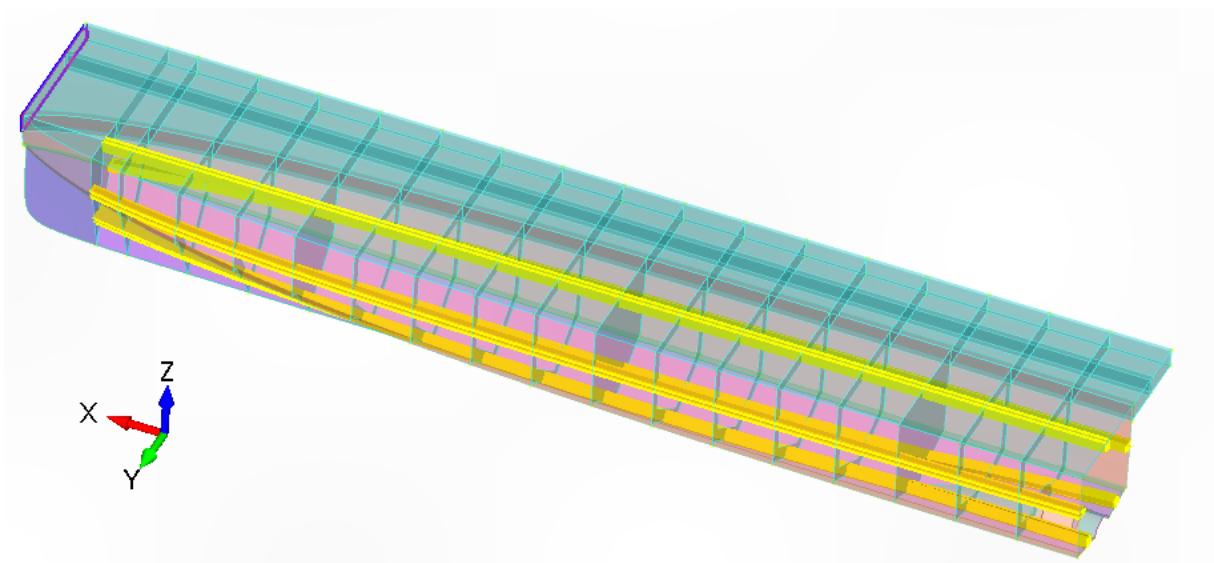
Slika 7.8 Ucrtane nepropusne pregrade



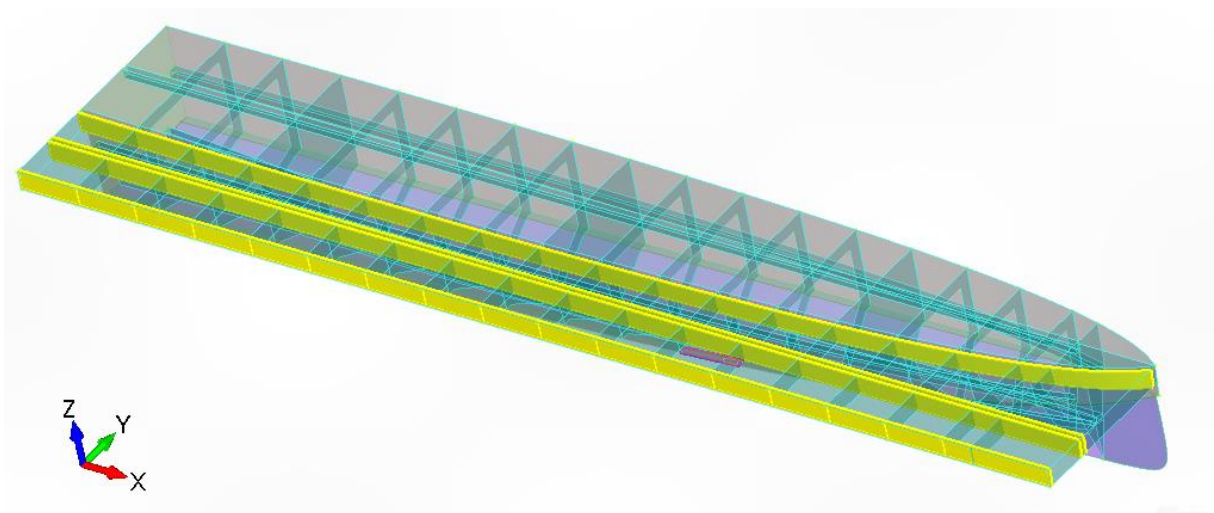
Slika 7.9 Ucrtana rebra



Slika 7.10 Ucertane plohe oplata palube



Slika 7.11 Ucertani uzdužnjaci oplata trupa 150x100mm



Slika 7.12 Ucertani uzdužnjaci palube 300x100mm

U ovom koraku sve su značajke geometrije definirane kao nepovezana kruta tijela. Za njihovo spajanje, FEMAP ima veoma jak alat: *nonManifold add* u kojem se definira koje se plohe treba spojiti po kojim linijama i sa kojom tolerancijom kako bi se dobilo jedno tijelo koje se sastoji od svih prikazanih površina.

7.1.4. Diskretizacija trupa

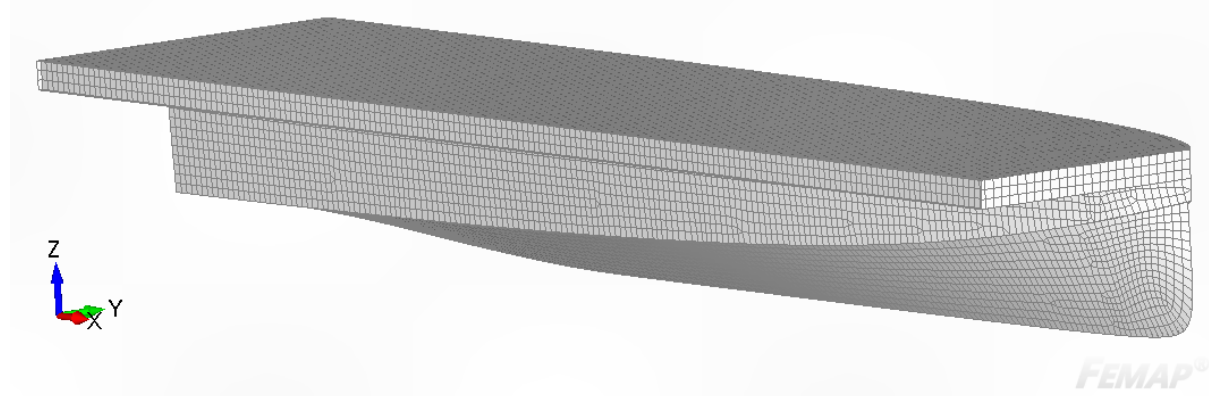
Za smanjenje računalnih resursa potrebnih za proračun moguće je iskoristiti ravninu simetrije koja se prostire duž broda. Svaki dio trupa je podijeljen na područja laminata od kojih je izrađen, te je tako diskretiziran. Tablica 7.1 prikazuje svojstva materijala koja su dodjeljena određenom segmentu te slike na kojima su označeni ti segmenti. Budući da je cijela geometrija opisana plohama, za njenu diskretizaciju korišteni su 2D konačni elementi sa središnjim čvorom radi povećanja preciznosti.

Tablica 7.1 Segmenti geometrije i laminati koji su im dodjeljeni

Dio trupa	Slika prikaza segmenta	Dodjeljeni laminat
Dno	Slika 7.6	Tablica 2.8
Bok	Slika 7.7	Tablica 2.9
Paluba	Slika 7.10	Tablica 2.10
Nepropusne pregrade	Slika 7.8	Tablica 2.11
Rebra	Slika 7.9	Tablica 2.12
Uzdužnjaci 300x100mm	Slika 7.12	Tablica 2.13
Uzdužnjaci 150x100mm	Slika 7.11	Slika 6.9

Kolega Grgorinić dokazao je u svom završnom radu da nema velike razlike u krutosti i napreznjima uzdužnjaka sa i bez jezgre na ovaj tip opterećenja, nego je jezgra tu samo za oblikovanje tijekom proizvodnje [10]. Iz tog razloga, uzdužnjaci su definirani samo plohama laminata tako gdje se nalaze slojevi stakloplastike, to jest biokompozita bez jezgre. Veličina konačnih elemenata određena je tako da minimizira računalne resurse, a opet daje dovoljno dobru sliku polja pomaka za kasnije podmodeliranje. Prikaz mreže dan je na Slici 7.13. Sastoji se od:

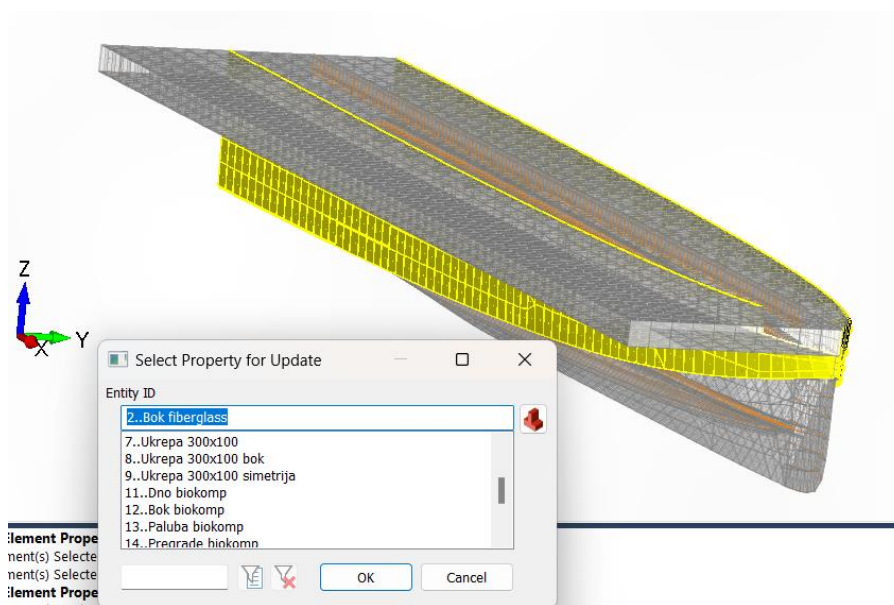
- 28815 kvadratnih elemenata s 8 čvorova
- 305 trokutastih elemenata sa 6 čvorova



Slika 7.13 Mreža konačnih elemenata na trupu

7.2. Usporedba mase trupa obzirom na korišteni materijal

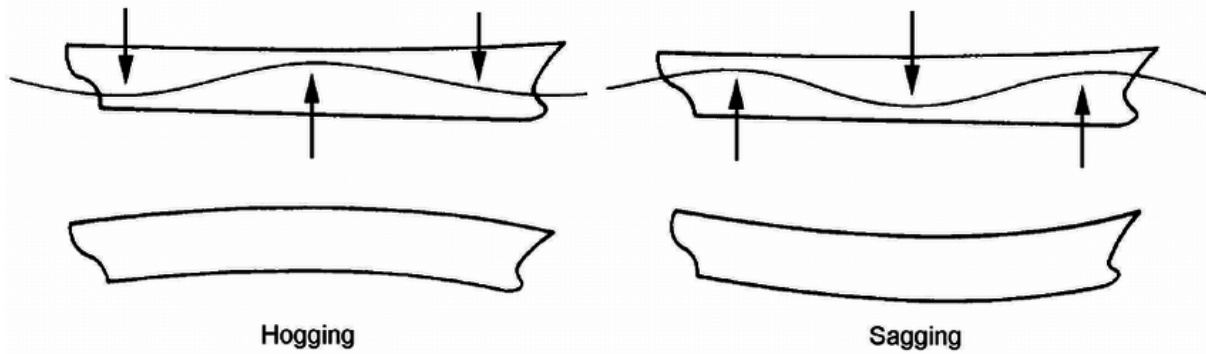
Masa trupa određuje se naredbom *Tools>mass properties>mesh properties* nakon čega se odaberu elementi kojima se želi izračunati masa, volumen i centar gravitacije. Masa pola trupa od stakloplastike 3640,95 kg, dakle 7281,89 kg za čitav trup. Zamjena svojstava laminata po predjelima trupa vrši se naredbom *Modify>Update Elements>Property ID* nakon čega se vrlo praktično mogu odabrati svi elementi kojima je dodjeljeno svojstvo te ga se zamijeni za novo svojstvo, Slika 7.14, temeljenom na laminatu od biokompozita određenih u predhodnom poglavlju. Izračunata masa pola tako izgrađenog trupa iznosi 3078,38 kg, dakle 6156,76 kg za čitav trup. To je znatno smanjenje mase za 1125kg, odnosno preko 15%.



Slika 7.14 Zamjena laminata stakloplastike sa biokompozitom na boku

7.3. Uzdužno opterećenje

Prvo opterećenje na koje se proračunava čvrstoća trupa navedeno u hrvatskom registuru brodova jest maksimalni longitudinalni moment koji uzrokuje pregib i progib broda, Slika 7.15.



Slika 7.15 Skica progiba i pregiba broda [30]

7.3.1. Rubni uvjeti za proračun pregiba i progiba

Maksimalni iunos momenta izračunava se po formuli (20)

$$M = 16 \cdot L_{OA}^3 \cdot B_{OA} \cdot 10^{-3} = 16 \cdot 17,8^3 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 676,77 \text{ kNm} \quad (20)$$

i djeluje na središnjih 25% duljine trupa, s linearnim smanjenjem do pramca, odnosno krme broda u nulu. Takva raspodjela je dobra aproksimacija stvarnog opterećenja na progib i pregib [31]. Kako bi se ostvarila takva raspodjela momenta duž broda, moraju djelovati dvije koncentrirane sile iznosa

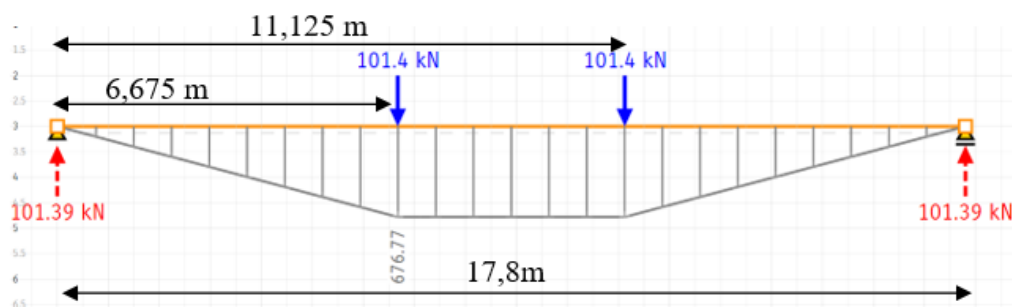
$$F = \frac{M}{0,375L_{OA}} = \frac{676,77}{0,375 \cdot 17,8} = 101,3888 \text{ kN} \quad (21)$$

međusobno odmaknute 25% duljine broda na njegovom središtu, to jest na udaljenosti

$$L_1 = 0,375L_{OA} = 0,375 \cdot 17,8 = 6,675 \text{ m} \quad (22)$$

$$L_2 = (1 - 0,375)L_{OA} = 0,625 \cdot 17,8 = 11,125 \text{ m}, \quad (23)$$

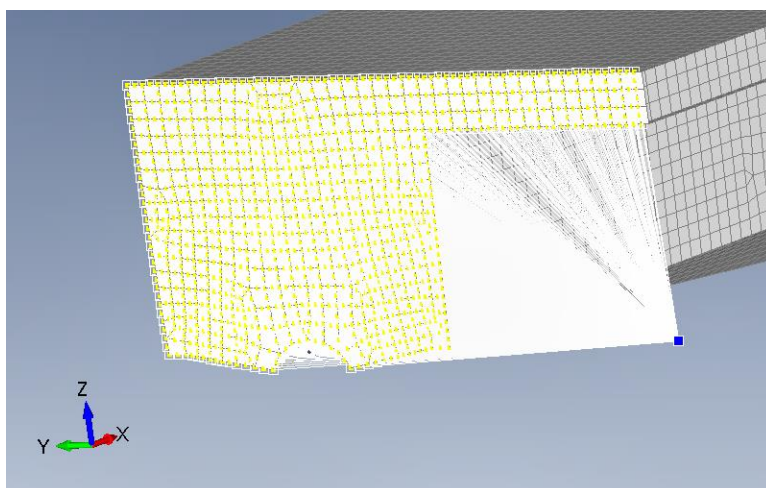
dok se na pramcu i krmi napravi zglobni odnosno pomični zglobni oslonac. Slika 7.16 prikazuje raspodjelu momenta i reakcijske sile duž broda.



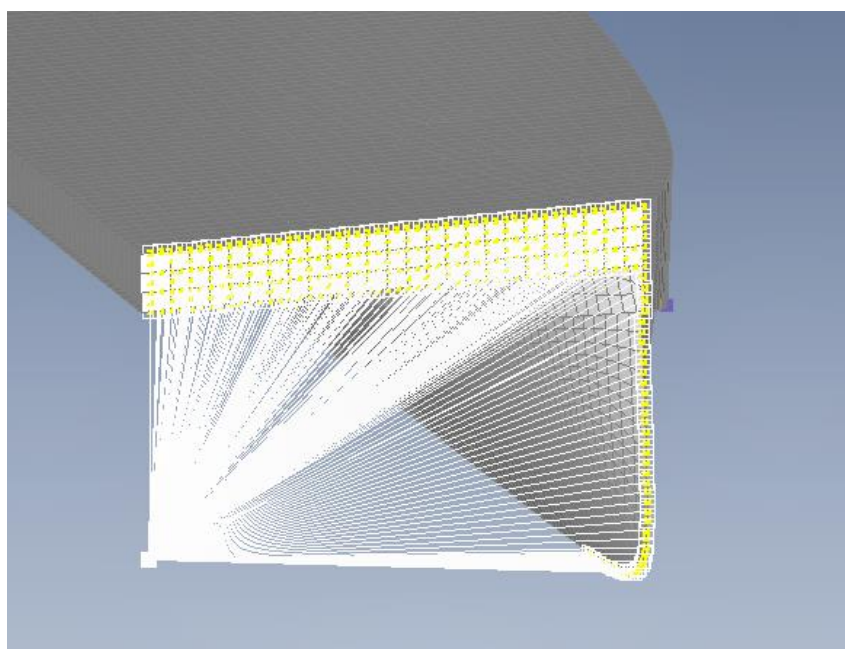
Slika 7.16 Raspodjela momenta duž broda i reakcijske sile u čvorovima

Efekt zglobnog oslonca na pramcu i krmi koje su složene geometrije dobije se povezivanjem čvorova koji čine geometriju krme i pramca sa jednim neovisnim čvorom putem krutog elementa. Kruti element je naziv za element kojim se dovodi u međuodnos pomaka više čvorova

s jednom čvorom. U ovom slučaju definirana su dva čvora koja čine zglobne oslonce na krmu i palubi. Definirani su u ravnini simetrije, na međusobnoj udaljenosti od 17,8 m, u $z = 0$. Odabir čvorova na koje se kruto prenosi pomak čvora koji čini oslonac na krmu prikazan je na Slici 7.17, a odabir čvorova pramca Slikom 7.18. Pritom je od velike važnosti da na odabranim čvorovima ne postoji neki drugi rubni uvjet, da se originalni čvor ne uvrsti u zavisne čvorove, i da dva kruta elementa nemaju zajedničkih zavisnih čvorova.

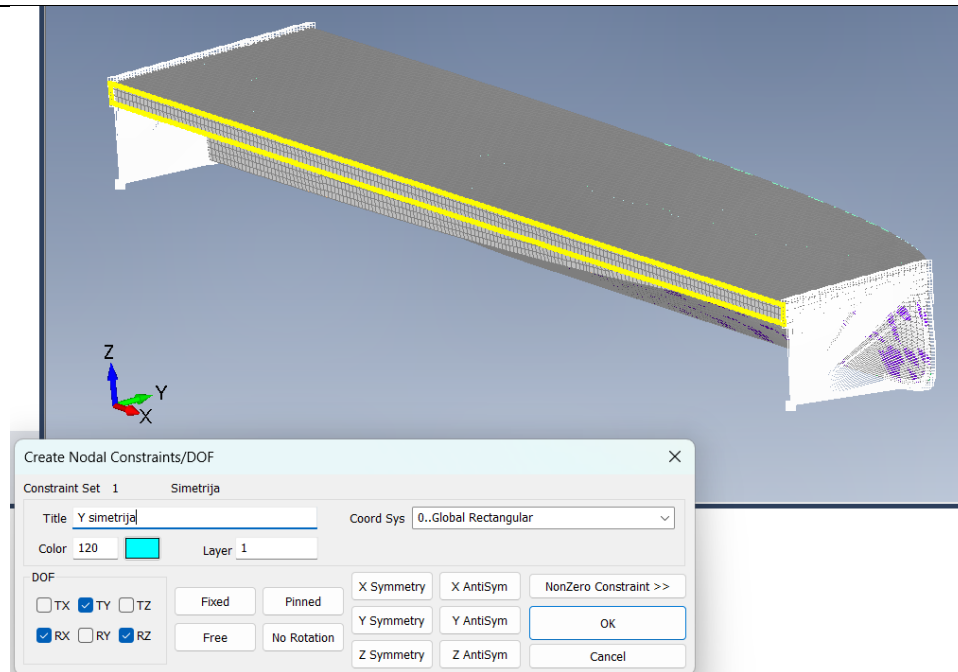


Slika 7.17 Odabir zavisnih čvorova na krmu



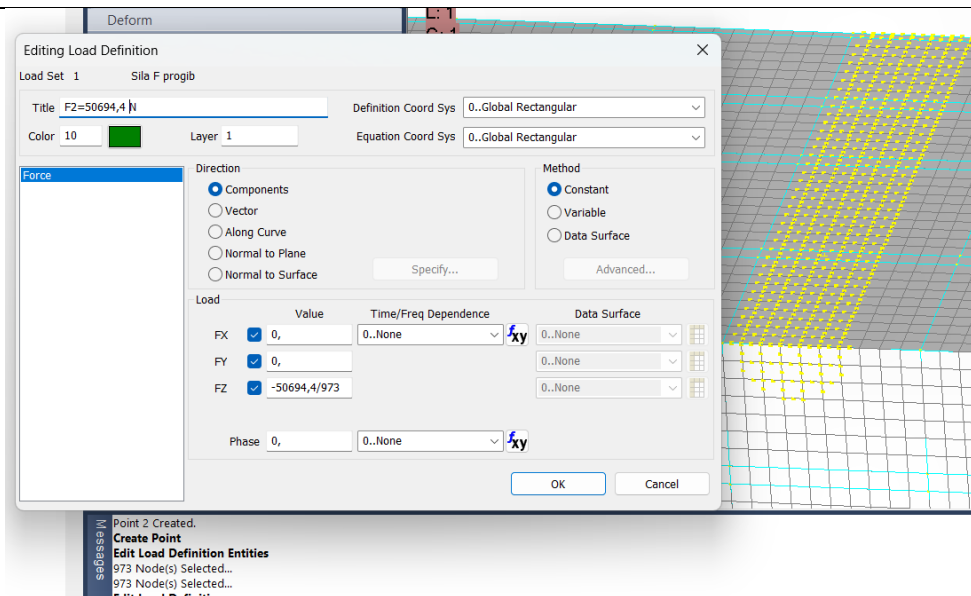
Slika 7.18 Odabir zavisnih čvorova na pramcu

Slika 7.19 prikazuje postupak zadavanja rubnog uvjeta simetrije, gdje se čvorovima u ravnini simetrije ograniči pomak okomito na ravninu te rotacija oko osi x i z . Također, zato što je korišteno samo pola geometrije, narinute sile također moraju biti prepolovljene, stoga iznose $F/2 = 50694,4$ N.

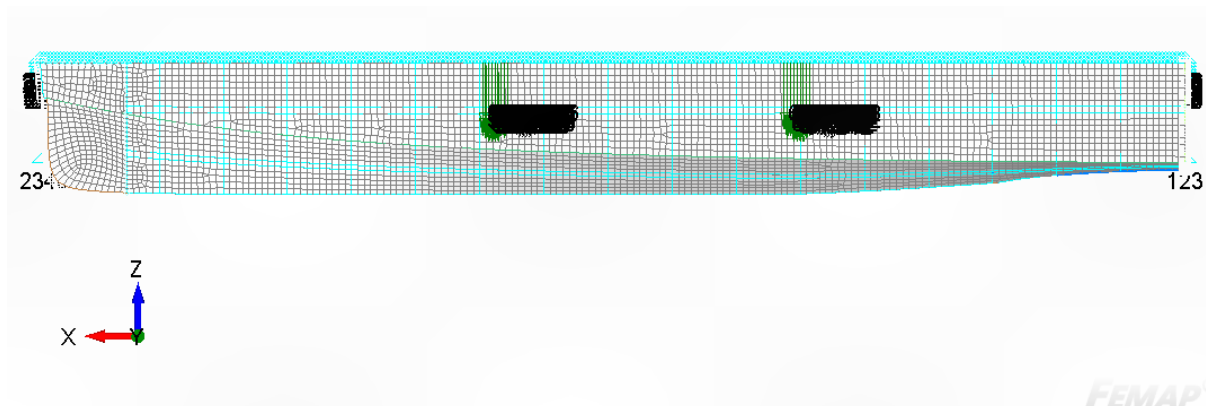


Slika 7.19 Zadavanje rubnog uvjeta simetrije

Sile nisu stavljene da djeluju u jednu singularnu točku budući da bi to stvorilo veoma veliku koncentraciju naprezanja, već je raspodjeljena jednoliko po čvorovima na palubi koji se nađu unutar radijusa od 300 mm od vektora paralelnim s y osi na udaljenostima L_1 i L_2 od krme. U sučelje za zadavanje sile na čvor mora se unijeti iznos koji djeluje na pojedini čvor. Kako nama treba ukupna sila duž vektora, iznos sile $F/2 = 50694,4$ N podijeljen je sa brojem čvorova na koji je ta sila raspoređena. Slika 7.20 prikazuje odabrane čvorove, njih 973, i unošenja sile koja djeluje na svaki od tih čvorova. Za proračun progiba broda sila je zadana s negativnim predznakom u smjeru osi z, a za proračun pregiba jednostavno se okrene da djeluje u pozitivnom smjeru osi z. Konačni izgled nanesenih rubnih uvjeta prikazan je za slučaj progiba na Slici 7.21.



Slika 7.20 Zadavanje sile na 973 čvora duž linije okomite na palubu

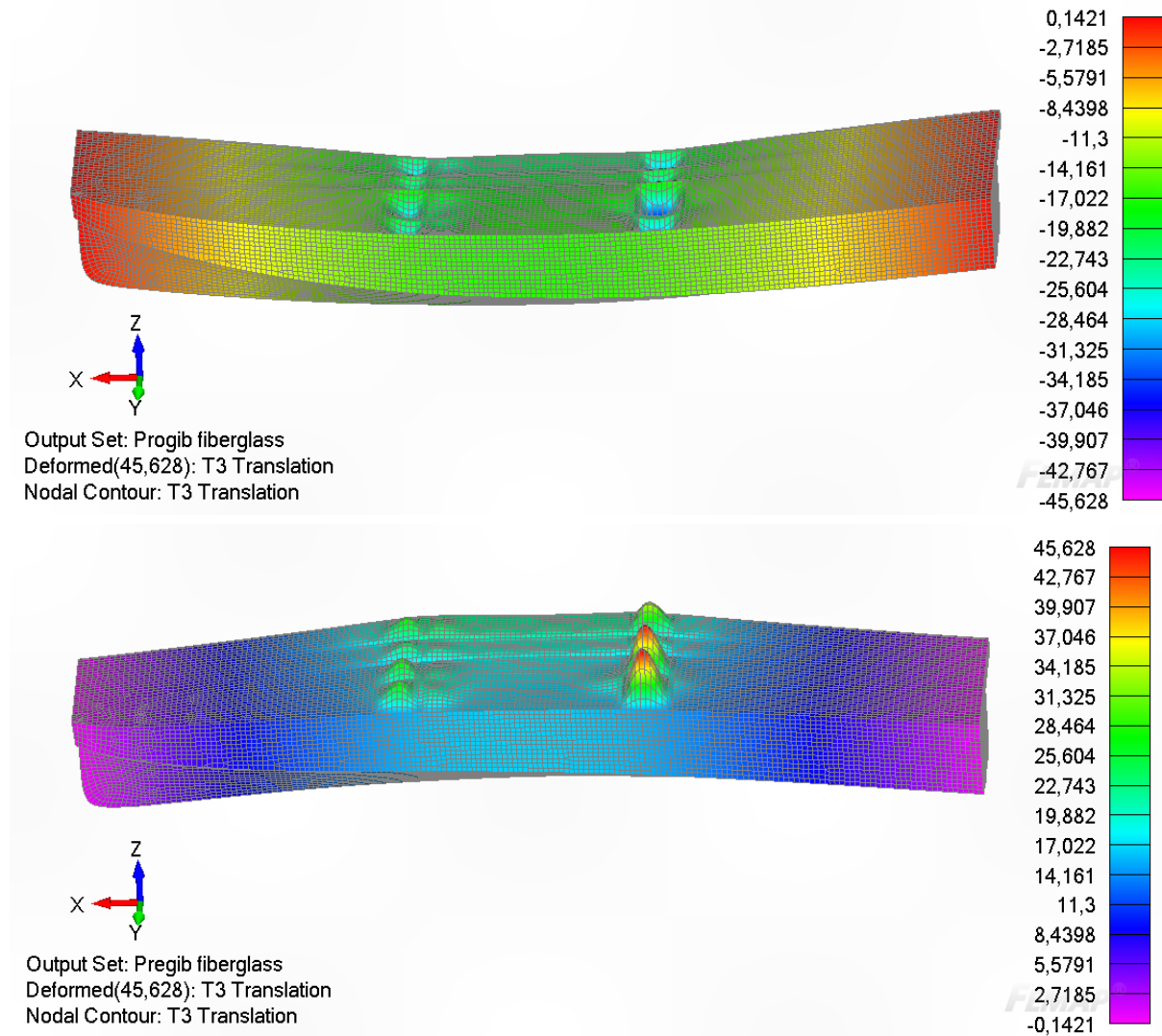


Slika 7.21 Zadani kruti elementi i sile na čvorovima razmaknute za središnjih 25% duljine broda

Nakon provedene analize, možemo se uvjeriti u ispravnost zadanih rubnih uvjeta provjerom resultantnih sila u neovisnim čvorovima krutih elemenata naredbom *Tools>check>Sum Forces* nakon čega se odabere čvor. Provjerom je dobivena reakcijska sila u smjeru osi z iznosa $F_R = 101388,8 \text{ N}$ što je točno jednako sili iz izraza (21), ukazujući na dobro postavljene rubne uvjete.

7.3.2. Rezultati pregiba i progiba trupa od stakloplastike

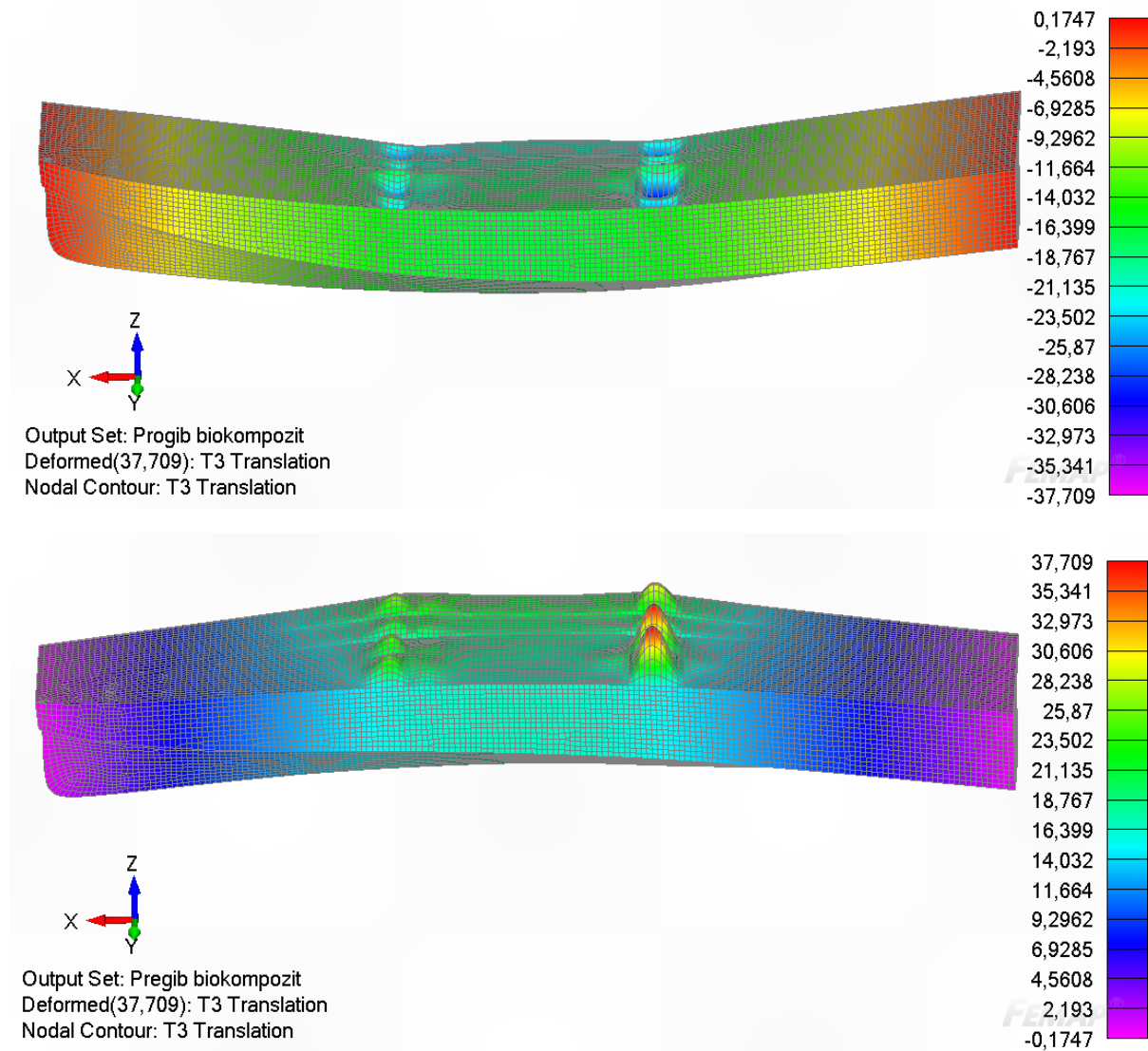
Rezultirajuće polja progiba i pregiba prikazana su na Slici 7.22. Na njoj je vidljivo da apsolutni maksimalni pomak u oba slučaja iznosi 45,63 mm, ali on se pojavljuje na pločama palube gdje djeluje sila F raspodjeljana na uski pojas čvorova palube na površini pa zapravo to više daje uvid u krutost laminata palube. Najveći apsolutni pomak trupa broda duž njegove najniže linije dna iznosi 17,35 mm i kod progiba i kod pregiba. To nam daje uvid u krutost čitave konstrukcije broda.



Slika 7.22 Polje progiba na deformiranom trupu od stakloplastike

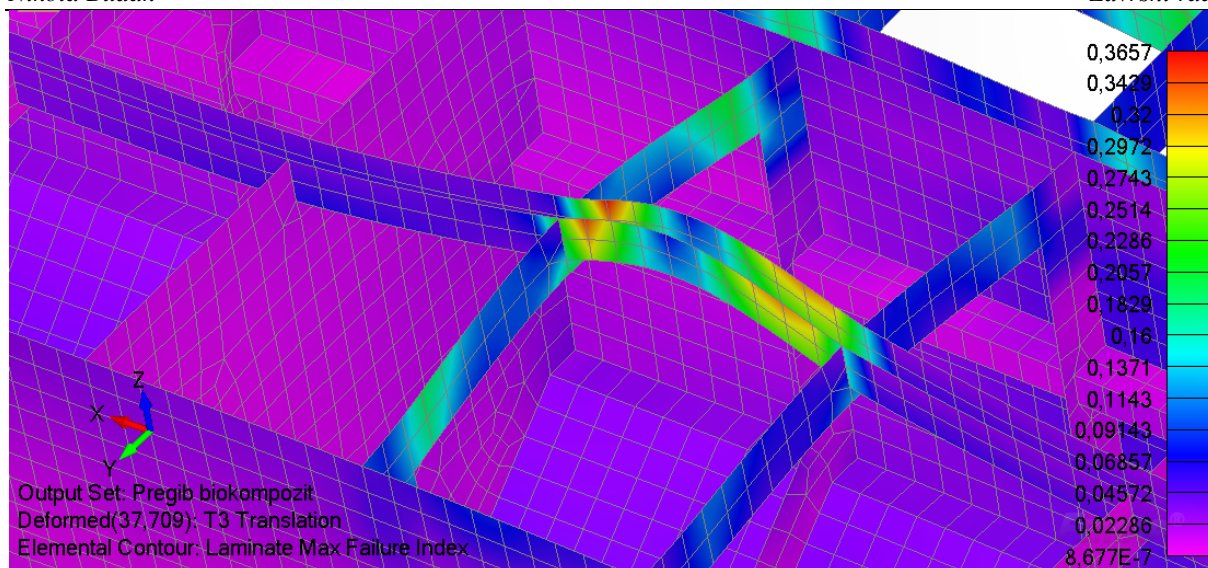
7.3.3. Rezultati pregiba i progiba trupa od biokompozita

Na Slici 7.23 prikazani su rezultati progiba i pregiba trupa izrađenog od biokompozita. Također su najviše vrijednosti pomaka na pločama palube gdje djeluje sila, ali iznose manje nego kod stakloplastike: 37,71 mm. Kod progiba je ista vrijednost samo u suprotnom smjeru, a na donjem spoju panela dna najveći iznos pomaka je 17,27 mm u slučaju i progiba i pregiba.



Slika 7.23 Progib i pregib trupa izrađenog od biokompozita

Provjerom vrijednosti najvećeg indeksa popuštanja uslijed pregiba i progiba trupa od biokompozita, Slika 7.24, ustanovljeno je da dolazi do povišenog naprezanja na ukruti 150x100 mm između 5. i 6. rebra okomice. Razlog tomu jest što tamo djeluje relativno velika sila na uskom području gdje ne zahvaća velik broj čvorova. Budući da način zadavanja opterećenja sile za progib i pregib nije jasno specificiran, naprezanje se može proizvoljno smanjiti jednostavnim povećavanjem broja čvorova na koje se raspoređuje sila. Usprkos tomu, čak i za ovaj nepovoljan slučaj najveći indeks popuštanja iznosi 0,366, što recipročno odgovara faktoru sigurnosti od 2,73, a to je i dalje veće od zahtjeva za minimalni faktor sigurnosti za uzdužnjake 2,61. Osim povišenih naprezanja na samom području djelovanja sile opterećenja, ostatak trupa ima veoma nizak i uniforman najveći indeks popuštanja što iako ukazuje na potencijalnu predimenzioniranost, s druge strane ukazuje na dobru izbalansiranost čvrstoće segmenata koji sačinjavaju trupove i oplatu za slučaj opterećenja na progib i pregib.



Slika 7.24 Povišeno naprezanje na trupu od biokompozita u ukruti na mjestu djelovanja pregibne sile

7.4. Provjera trupa na tlakove

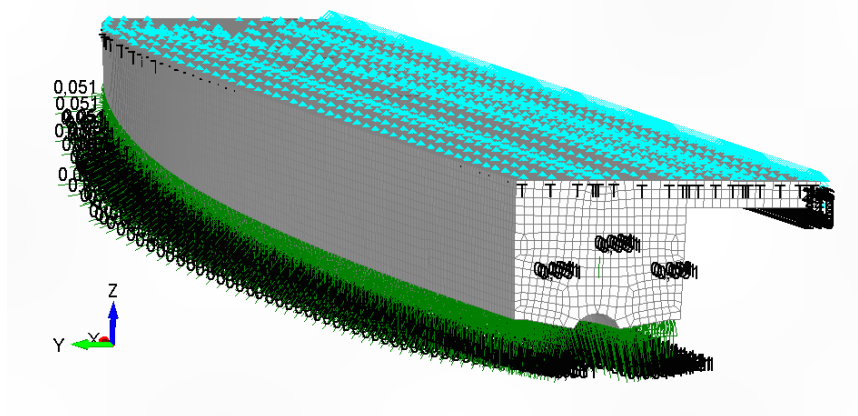
Osim na progib i pregib, Hrvatski registar brodova zahtjeva provjeru čvrstoće laminata na hidrostatske tlakove, kao što je to i učinjeno na pojednostavljenim modelima u poglavlju 6. Zbog toga je nužno provesti globalni proračun sa rubnim uvjetima iz Tablice 2.7. Najveći indeks popuštanja kada se uzme u obzir faktor sigurnosti ne smije prijeći

- 0,417 ($S_f = 2,4$) za panele
- 0,383 ($S_f = 2,61$) za rebra i uzdužnjake

7.4.1. Dno

7.4.1.1. Opis rubnih uvjeta

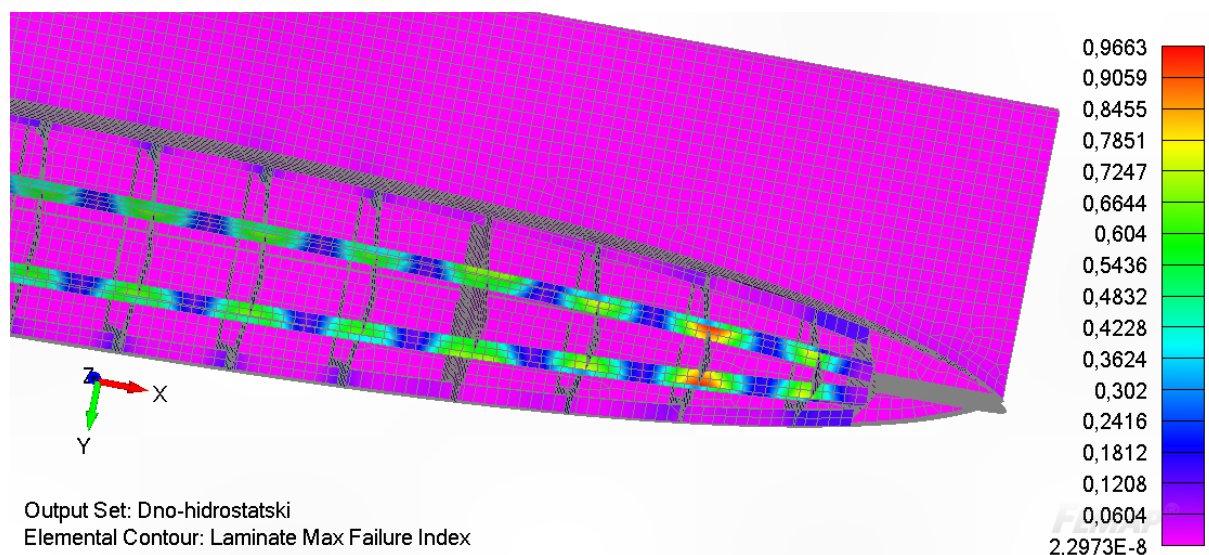
Na panele dna nanesen je hidrostatski tlak u smjeru normale na površine na koje djeluje. Kod globalnog modela pitanje je kako postaviti rubne uvjete pomaka. Ravnotežu hidrostatskom tlaku koji predstavlja djelovanje vode na dno trupa drži težina koja djeluje na palubu. Stoga je odabrano da rubni uvjet bude ograničenje translacije ploha palube. Rubni uvjeti prikazani su Slikom 7.25.



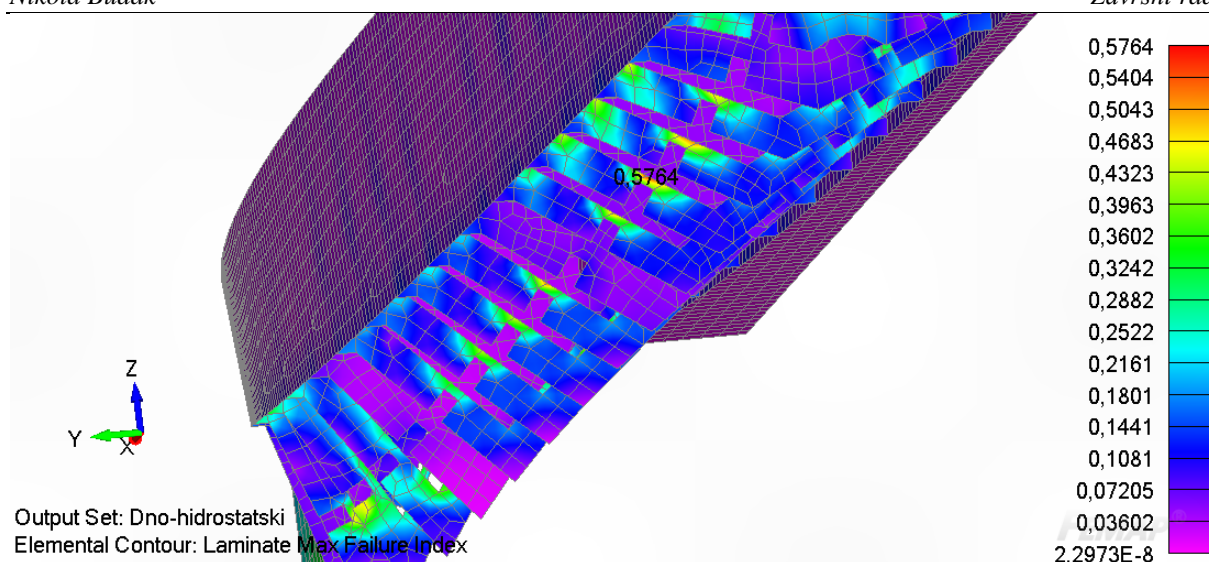
Slika 7.25 Rubni uvjeti provjere hidrostatskog tlaka na panele dna

7.4.1.2. Analiza čvrstoće

Ovdje su zabilježena mnogo veća naprezanja, to jest mnogo veći indeks popuštanja nego što je to bio slučaj kod progiba i pregiba. Najviša naprezanja pojavljuju se u uzdužnjacima dna, Slika 7.26. Ovdje se ne radi o koncentraciji naprezanja, jer je u gotovo svim djelovima uzdužnjaka dna došlo do znatno viših naprezanja nego u ostalim segmentima trupa. Najveća vrijednost indeksa popuštanja iznosi 0,97, što ni približno ne zadovoljava kriterij od minimalnog faktora sigurnosti 2,61 za uzdužnjake. U manjoj mjeri, ali također ne zadovoljavaju kriterij minimalnog faktora sigurnosti su rebra na spojevima s uzdužnjacima dna, Slika 7.27.



Slika 7.26 Najveći indeks popuštanja u uzdužnjacima dna pri hidrostatskom tlaku



Slika 7.27 Najveći indeks popuštanja u rebrima pri hidrostatskom tlaku dna

Ostali segmenti palube i trupa, uključujući i panel dna zadovoljavaju kriterije čvrstoće te su naprezanja u njima niža od dopuštenih za zadovoljavajuć faktor sigurnosti.

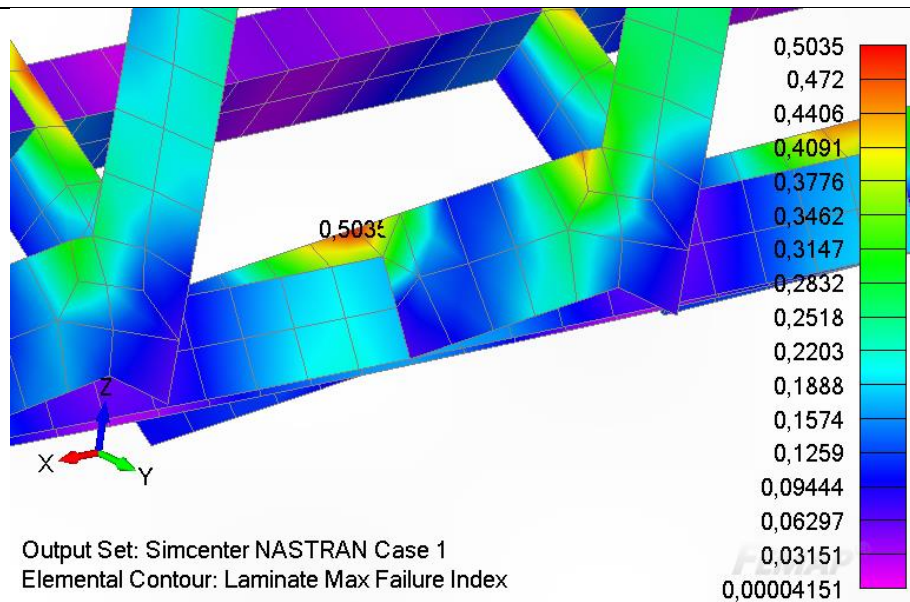
7.4.1.3. Promjena sastava slojeva obzirom na početnu analizu

Uvidom u rezultate provedene analize očito je da uzdužnjaci dna nisu dovoljno čvrsti za hidrostatsko opterećenje koje je preneseno preko panela dna. Iz tog razloga napravljeno je više simulacija s povećanjem broja slojeva biokompozita u laminatu od kojeg je napravljen uzdužnjak dna. Tablica 7.2 daje ovisnost najvećeg indeksa popuštanja u uzdužnjacima dna o broju slojeva od kojeg su napravljeni.

Tablica 7.2 Ovisnost najvećeg indeksa naprezanja o broju slojeva u uzdužnjacima dna

Simulacija br.	Broj slojeva	Najveći indeks popuštanja	Faktor sigurnosti	Zadovoljava
0	2	0,967	1,03	NE
1	4	0,5963	1,68	NE
2	6	0,4356	2,30	NE
3	8	0,3447	2,90	DA

Povećanje broja slojeva u laminatu uzdužnjaka blago je spustilo i najveći indeks popuštanja u rebrima sa 0,5764 na 0,5035, kao što to prikazuje Slika 7.28 ali to i dalje ne zadovoljava kriterij čvrstoće. Stoga je ponovljen postupak povećanja broja slojeva rebara te je dodan po jedan sloj sa svake strane jezgre kako bi laminat rebara i dalje bio simetričan. Broj slojeva korištenih u rebru tako je povećan na 10, a najveći indeks popuštanja smanjen je na 0,4227 što je vrlo blizu da zadovolji kriterij čvrstoće. Iz tog razloga detalj spoja 5. rebara s uzdužnjakom dna detaljnije je proračunat tehnikom podmodeliranja.



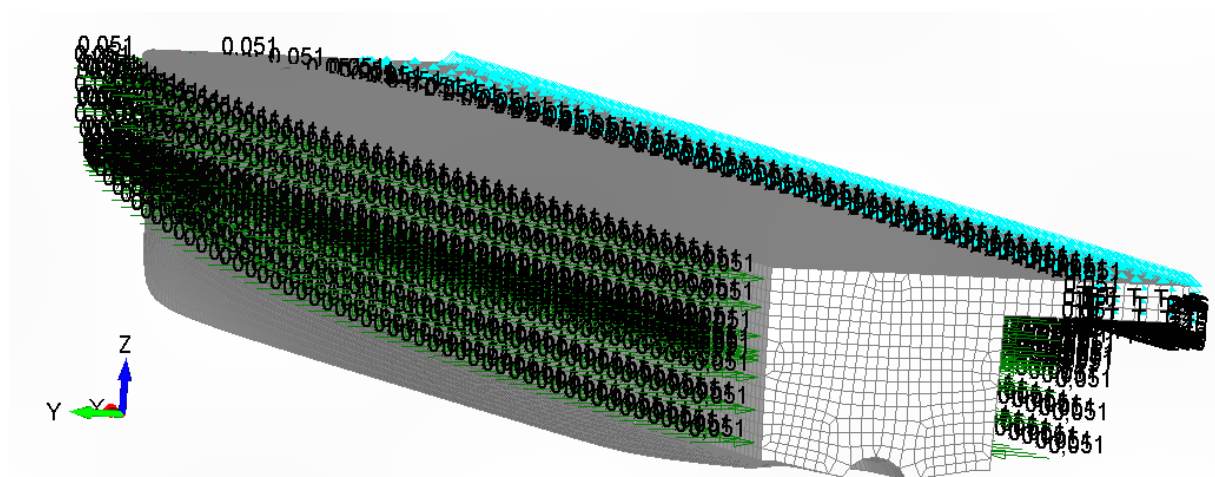
Slika 7.28 Koncentracija naprezanja na spoju rebra i uzdužnjaka dna

7.4.2. Bok

Proračun se nastavlja sa izmjenjenim brojem slojeva laminata uzdužnjaka i rebara.

7.4.2.1. Opis rubnih uvjeta

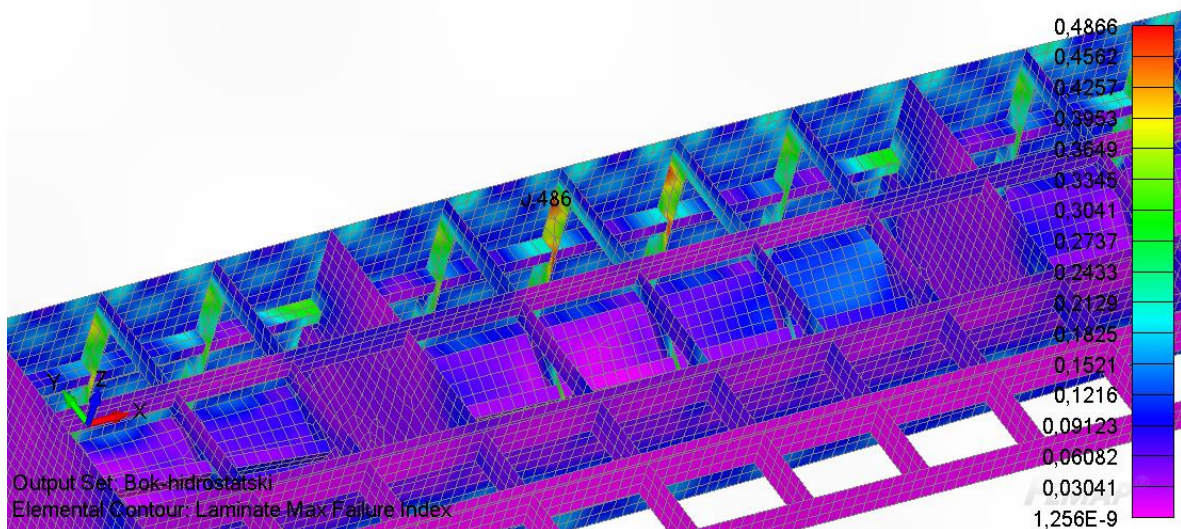
Budući da kada hidrostatski tlak djeluje okomito na panele boka, većina tog normalnog opterećenja djeluje na površine koje su okrenute nasuprotno jedna od druge pa se resultantna sila većinom globalno poništava. Drugim riječima, ne uzrokuje veliku silu u osloncima za izjednačavanje resultantne sile. Iz tog razloga je rubni uvjet nulte translacije postavljen na manje panele palube uz ravninu simetrije broda, Slika 7.29.



Slika 7.29 Rubni uvjeti kod hidrostatskog opterećenja panela boka

7.4.2.2. Analiza čvrstoće

U ovoj analizi jedini elementi u kojima dolazi do prekomjernog naprezanja je u rebrima, Slika 7.30. Kao i kod hidrostatskog tlaka na dno, kritični dio rebra jest spoj sa uzdužnjakom, gdje rebro ima suženi dio koji ide oko uzdužnjaka. Za razliku od analize hidrostatskog tlaka na dno, ovdje dolazi do još višeg naprezanja na spoju oplata boka i rebra.



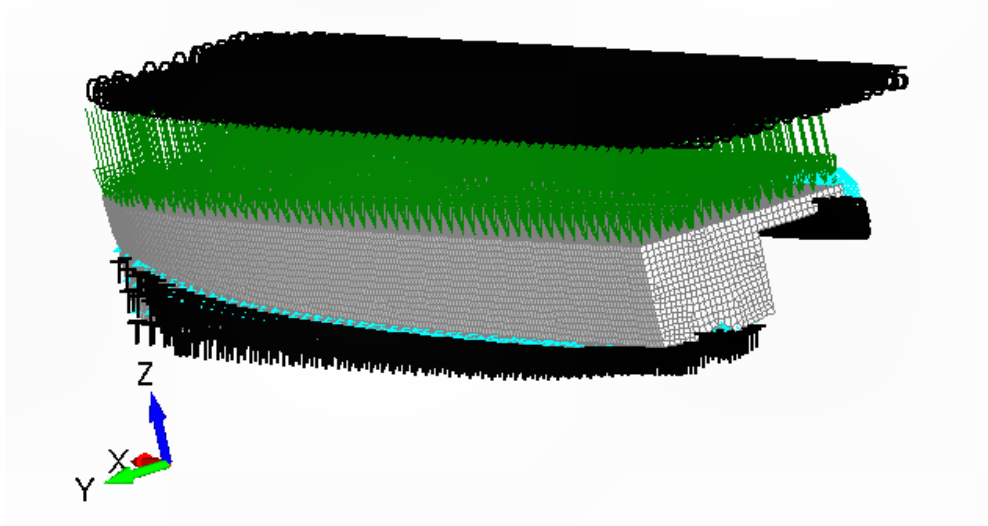
Slika 7.30 Povišen najveći indeks popuštanja u rebrima uslijed hidrostatskog opterećenja boka

Jedan od razloga zašto se to događa jest što u globalnom modelu nije modeliran postupni prijelaz laminata na oplatu, stvarajući gradijent krutosti oplata. To je zadatak za podmodeliranje, gdje je određeno treba li još povećavati broj slojeva laminata rebra ili ne.

7.4.3. Paluba

7.4.3.1. Opis rubnih uvjeta

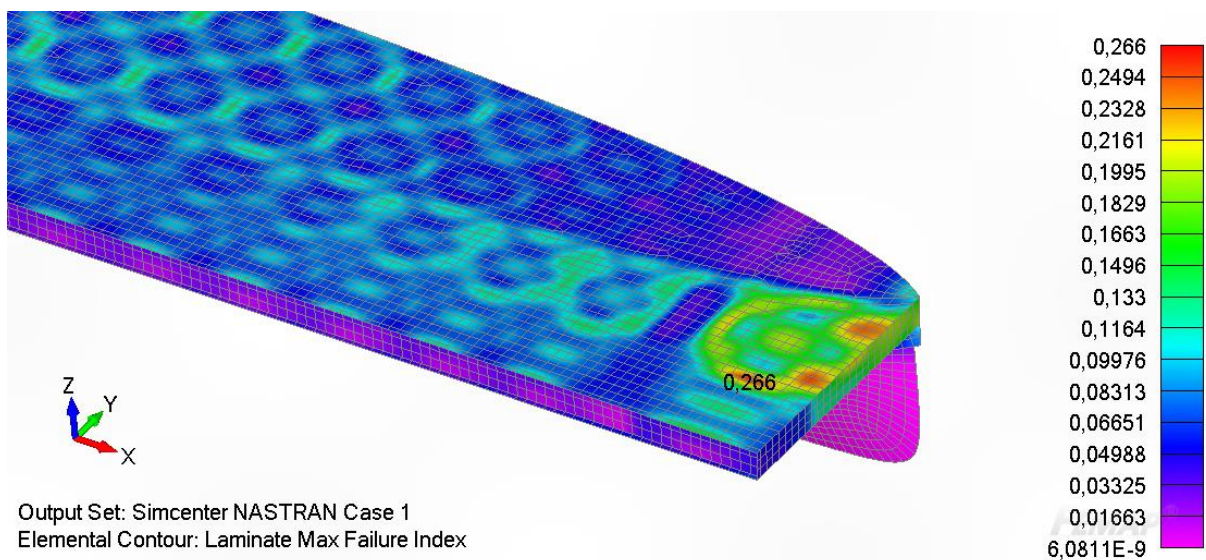
Suprotno od rubnog uvjeta na dnu, ovdje hidrostatski tlak djeluje na gornji panel palube, a spriječen je pomak čvorovima na panelima dna, Slika 7.31.



Slika 7.31 Rubni uvjeti kod hidrostatskog opterećenja palube

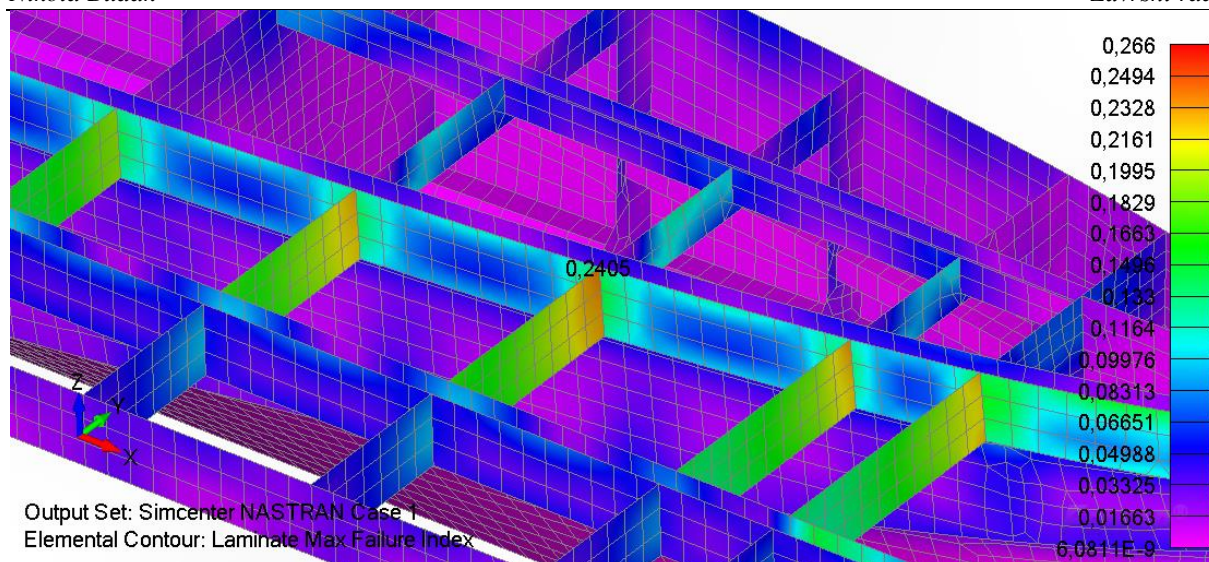
7.4.3.2. Analiza čvrstoće

U ovom slučaju opterećenja nije došlo do prelaženja najvećeg dopuštenog iznosa indeksa popuštanja, jer poprima najveću vrijednost od samo 0,266 i to na oplati palube na samom pramcu katamarana.



Slika 7.32 Najveći indeks popuštanja za hidrostatsko opterećenje palube

Slične vrijednosti poprima i spoj rebra palube sa uzdušnjakom boka 300x100 mm, gdje najveći indeks popuštanja iznosi 0,2405.

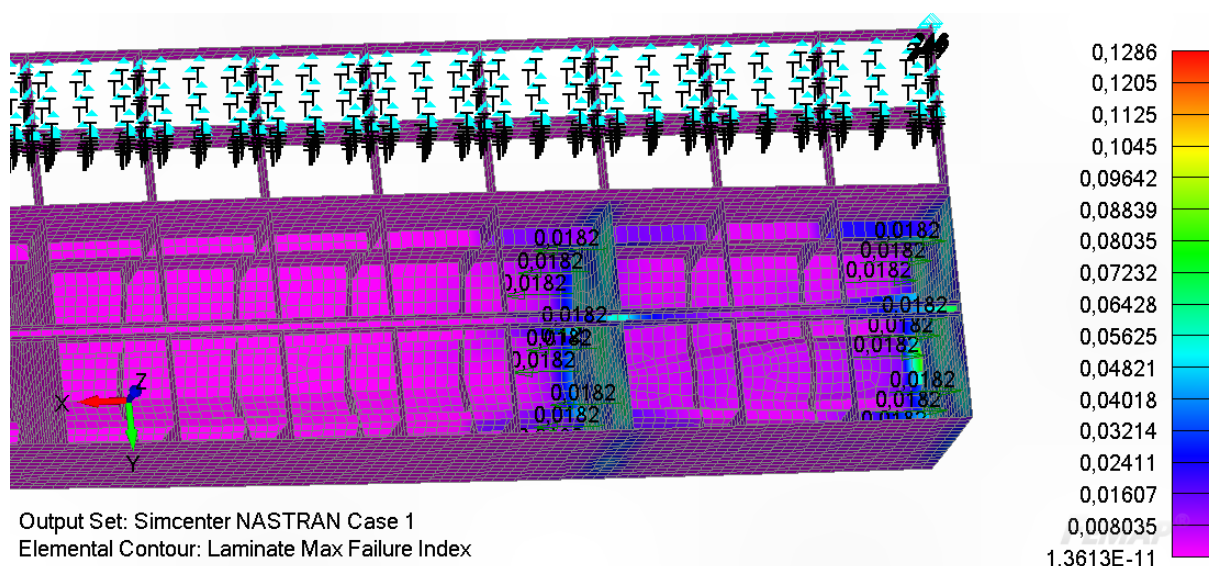


Slika 7.33 Povišeni indeks popuštanja n spoju rebra oplate palube i uzdužnjaka boka

7.4.4. Nepropusne pregrade

7.4.4.1. Opis rubnih uvjeta

Kao što je ranije navedeno, nepropusne pregrade služe za sprječavanje prodiranja vode u druge odjeljke trupa u slučaju proboja jednog od odjeljaka trupa. Zbog toga, simultano je narinut tlak na suprotne strane svakog odjeljka, osim na prvu i zadnju pregradu koje se moraju ispitati i na tlak izvana. Budući da se radi o velikom broju sličnih simulacija, nisu sve prikazane slikom, već samo rubni uvjeti tlaka na pregrade 2. komore od krme gdje je došlo do najviših naprezanja na Slici 7.34. Najveći indeks popuštanja iznosio je 0,1286 u simulaciji komore 1, što označava vrlo nisko naprezanje u ovom slučaju, stoga nije razmatrano za podmodeliranje.



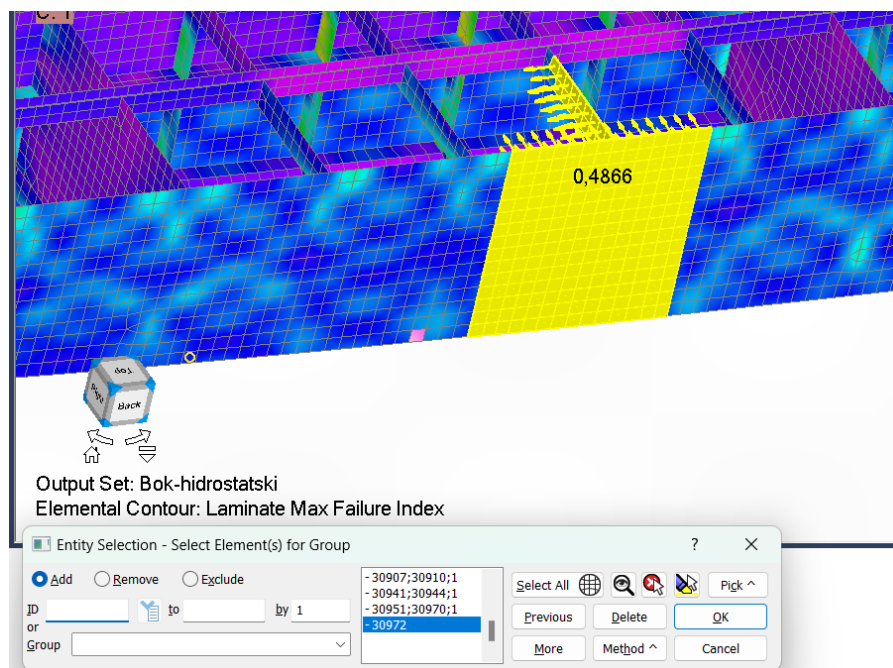
Slika 7.34 Rubni uvjeti hidrostatskog opterećenja na nepropusne pregrade drugog odjeljka

8. PRORAČUN KONSTRUKCIJSKIH DETALJA

Konstruktivske detalje koji su određeni kao kritični na globalnom modelu potrebno je dodatno detaljno proračunati. Za tu svrhu korištena je tehnika podmodeliranja. U toj tehnici nakon što se napravi globalni proračun čitavog modela sa krupnijim elementima, u ovom slučaju trupa broda, te se na njega postave rubnim uvjetima opterećenja i ograničenja pomaka odrede se kritični detalji kao što je učinjeno u poglavlju 7.4. Kada se odrede elementi kod kojih dolazi do povišenih naprezanja, izdvaja se geometrija koju ti elementi sačinjavaju. Zabilježe se pomaci čvorova koji se nalaze na rubovima izdvojene geometrije, te ju se potom detaljnije opisuje i finije diskretizira. Zabilježeni pomaci čvorova zabilježenim na geometriji globalnog modela postaju rubni uvjeti na detaljnom modelu, te se tako uz isti slučaj opterećenja kao i kod globalnog modela dobiva precizniji uvid u naprezanja. Prednost ove tehnike je što se proračunaju detalji bez da se čitav trup opisuje detaljnom geometrijom i mnogobrojnim elementima koji bi zahtijevali velike računalne resurse [22].

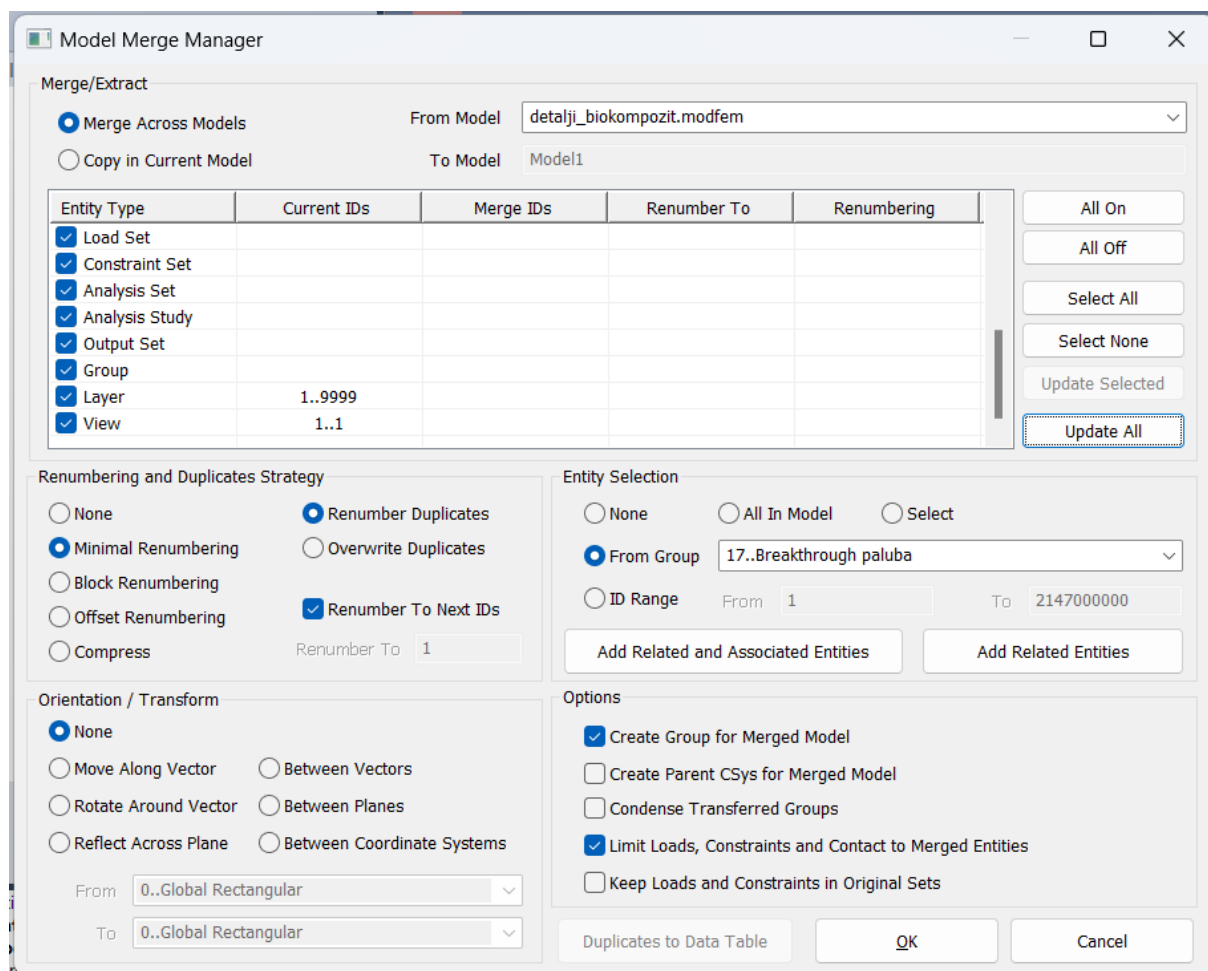
8.1. Metoda izdvajanja elemenata za detalje uslijed hidrostatskog tlaka na bok

Takozvana *Breakthrough* metoda je jedna od opcija za podmodeliranje u FEMAP-u. U njoj je automatiziran gore naveden postupak tako da se napravi grupa elemenata koje korisnik želi podmodelirati, u ovom slučaju elemente oko detalja sa Slike 7.30. Odabrani elementi prikazani su na Slici 8.1.



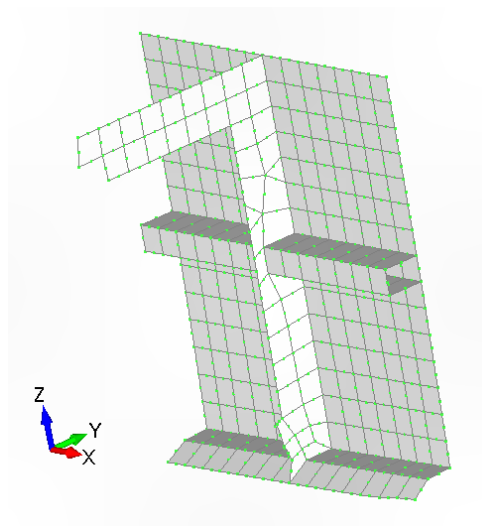
Slika 8.1 Grupiranje izdvojenih elemenata

Potom je osnovana nova simulacija *New*, te je korištena naredba *Merge* kako bi uvezli elemente grupe koju smo ranije definirali. Izbornik je prikazan Slikom 8.2.



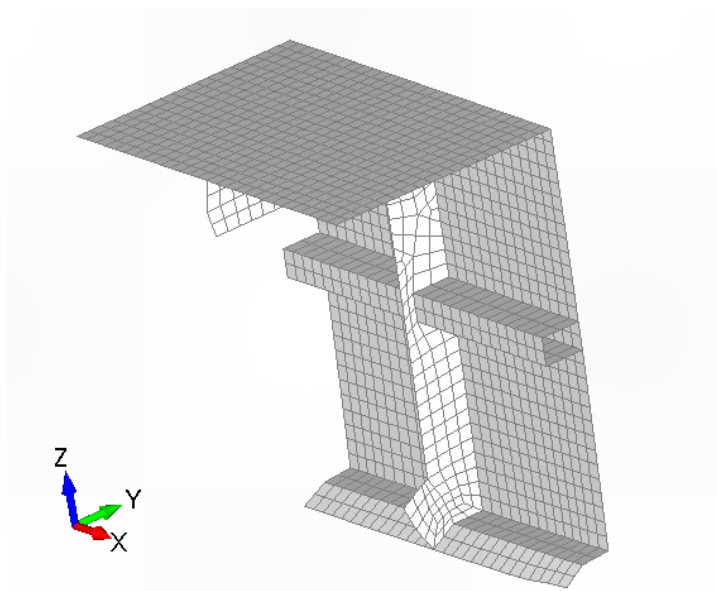
Slika 8.2 Izbornik za uvođenje izdvojenih elemenata u novu simulaciju

Time su izdvojeni elementi globalnog modela koje želimo podmodelirati, Slika 8.3.



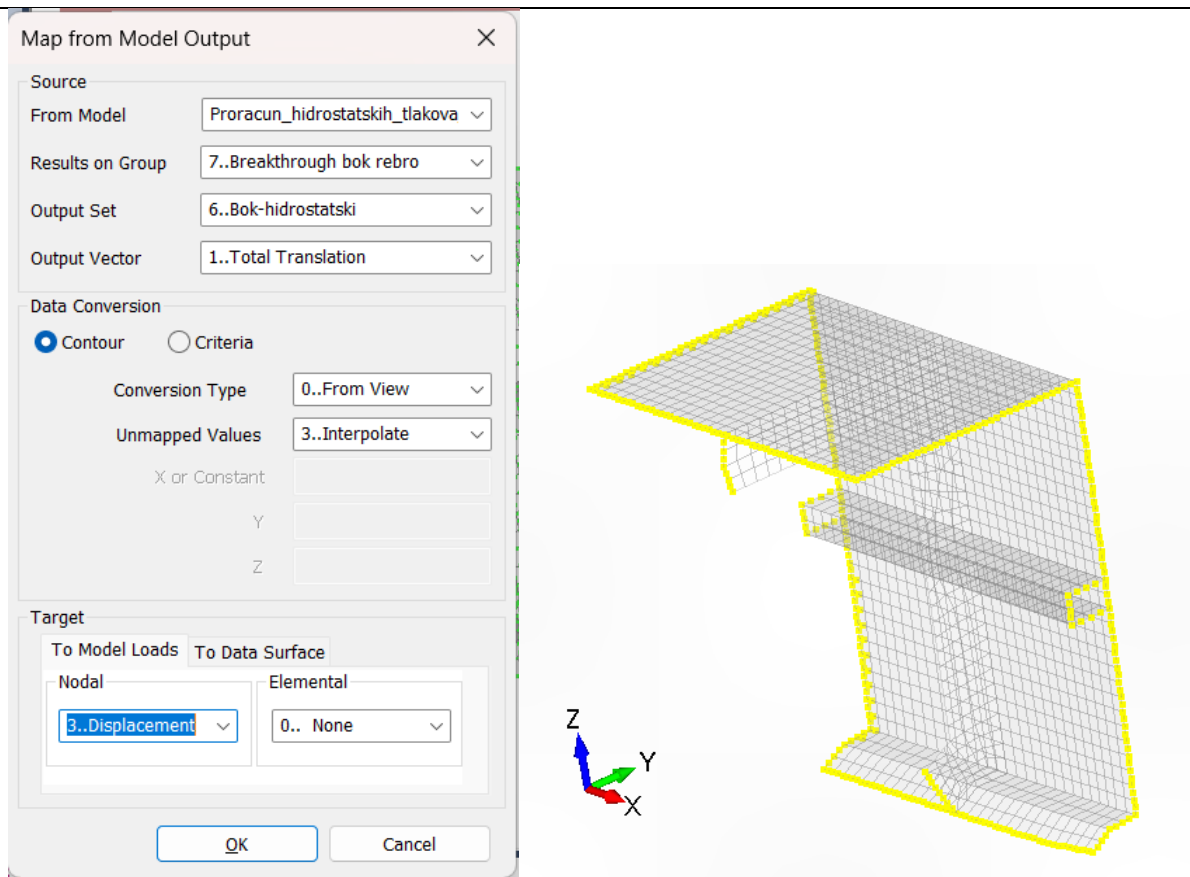
Slika 8.3 Elementi koje podmodeliramo

Prvi korak za dobivanje preciznijih rezultata je progušćivanje mreže konačnih elemenata. To je najbolje napraviti naredbom *Mesh>Editing>Element refine*, koja dijeli postojeće četverokutne elemente na 4 ili 9 manjih četverokutnih elemenata. Model s progušćenom mrežom prikazan je Slikom 8.4. Prednost te metode nad stvaranjem potpuno nove mreže je što tako originalni čvorovi zadržavaju svoje lokacije iz globalnog modela, te se tako preciznije prenosi opterećenje iz globalne simulacije.



Slika 8.4 Progušćena mreža konačnih elemenata na strukturnom detalju

Opterećenje iz globalne simulacije prenosi se na model prijenosom pomaka na čvorove koji se nalaze uz spojeve gdje bi se elementi detaljnog modela spajali s ostatkom globalnog modela. To je učinjeno radnjom *Model>Loads>From output sets* te je izbornik prikazan na Slici 8.5. Odabrana je simulacija globalnog modela, rezultati koji odgovaraju grupi sa Slike 7.30, slučaj hidrostatskog tlaka na bok i prijenos polja pomaka.

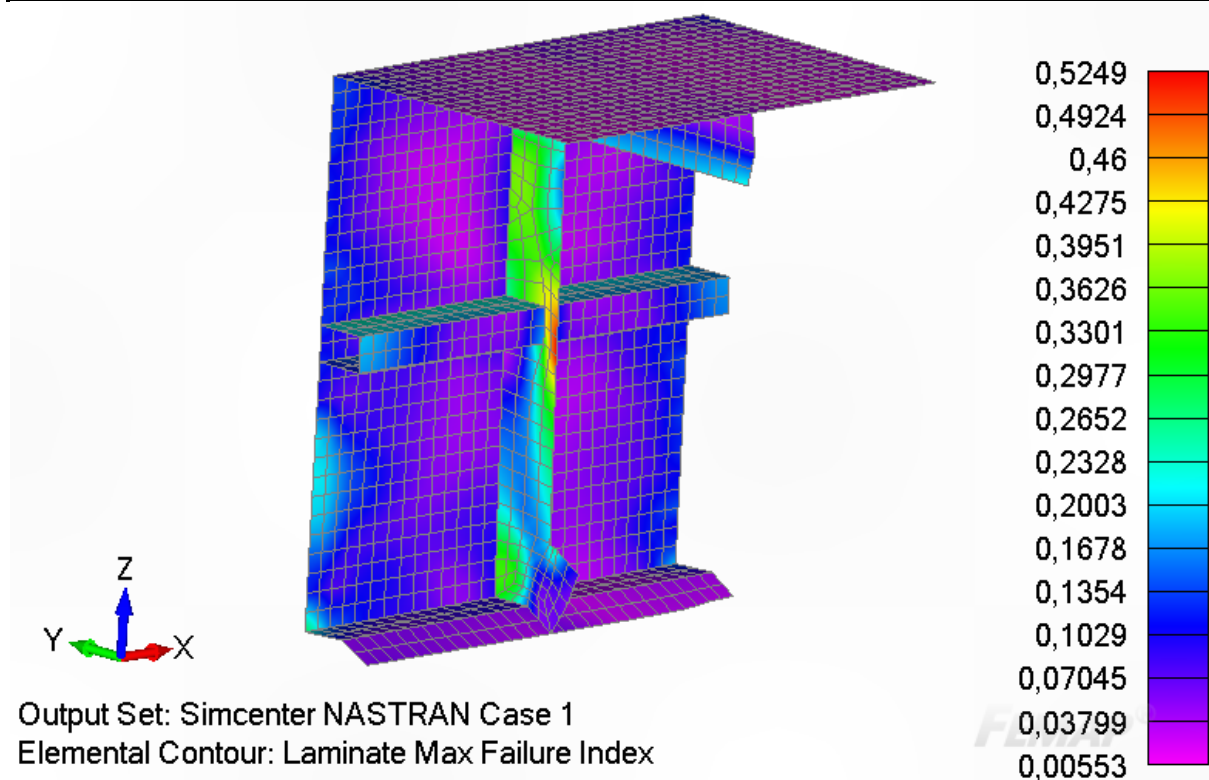


Slika 8.5 Lijevo: Izbornik prenošenja pomaka sa globalnog na izdvojeni model
Desno: čvorovi na koje se prenose pomaci s globalnog modela

Na isti set čvorova potrebno je i staviti rubni uvjet sprječavanja translacije kako bi dozvolili pomak koji prenosimo s globalnog modela a opet spriječili pojavu numeričke greške beskonačne translacije elemenata.

8.1.1. Rezultati analize podmodela s progušćenom mrežom

Na Slici 8.6 prikazano je dobiveno polje najvećeg indeksa popuštanja. Progušćivanjem mreže dogodile su se dvije promjene od istog polja ali na globalnom modelu. Prvo je što se smanjio indeks popuštanja na dijelu rebra gdje ojačava gornju oplatu boka, a upravo na tom mjestu je bio najveći iznos na Slici 7.30. Drugo, na već ranije određenom problematičnom mjestu ove konstrukcije – suženju rebra na mjestu gdje ide oko uzdužnjaka indeks popuštanja se povećao.

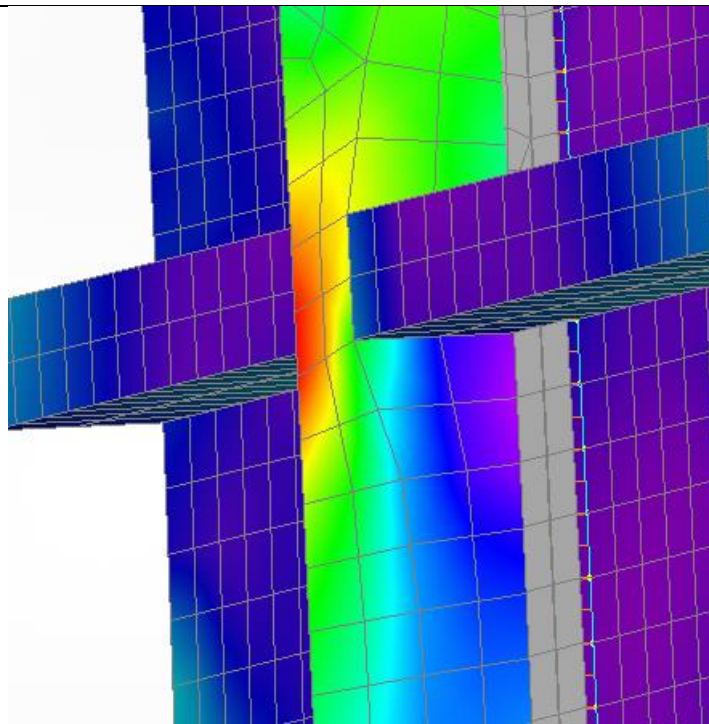


Slika 8.6 Najveći indeks popuštanja na podmodelu

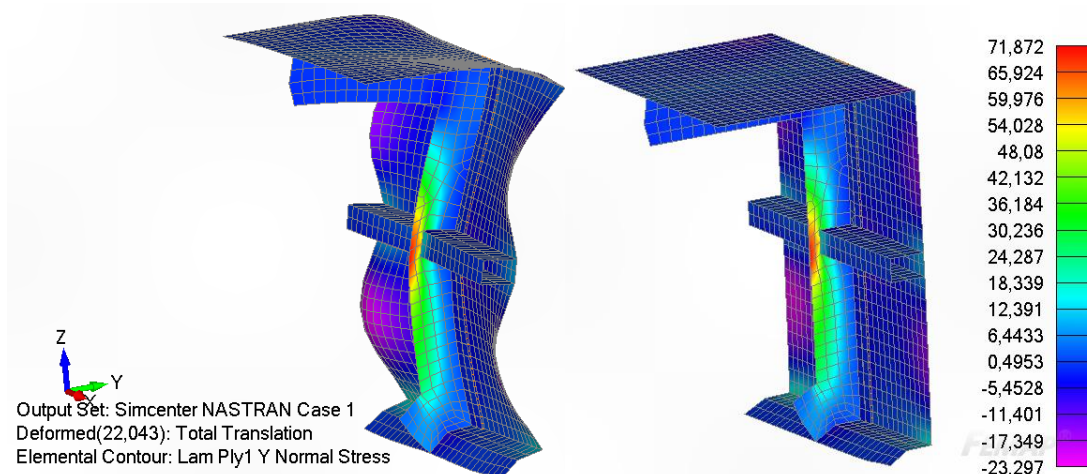
Stoga je potrebno napraviti daljnju analizu, jer u stvarnosti se preporuča na spojevima monolitne oplata i rebara polagati slojeve preko rebara na oplatu kako je prikazano Slikom 6.9. Tako se bolje prenosi opterećenje sa oplata, koju vidimo da nije pretjerano opterećena na rebro ili uzdužnjak. U ovom slučaju rebro se sastoji od balse presvučene sa 5 sloja biokompozita koja trebaju postupno prelaziti na oplatu trupa. Stoga je napravljena nova geometrija, Slika 8.7, gdje je progušćena mreža oplata uz rebro i u kojoj je dodano:

- 5 sloja biokompozita od rebra do udaljenosti 50 mm - jedan elementa udaljenosti
- 3 sloja biokompozita na udaljenosti od 50 mm do 100 mm

U tako izvedenoj geometriji naprezanja u kritičnom presjeku rebra ostala su gotovo ista, što znači da je jedino preostalo rješenje povećati broj slojeva ili mijenjati geometriju. Visok indeks popuštanja 0,52 posljedica je vlačnog naprezanja u smjeru materijalne osi 2, tj. na Slici 8.8 označene s y. Ona nastaje kao posljedica guranja oplata boka i uzdužnjaka na unutra u njegov najtanji presjek.



Slika 8.7 Dodavanje elemenata postupnog prijelaza laminata rebra na oplatu



Slika 8.8 Naprežanja u smjeru materijalne osi 2, deformirani i nedeformirani model

8.2. Moguća konstrukcijska rješenja

Dvije su alternativne opcije za spuštanje naprežanja koje se pojavljuje u rebrima kako bi bio ostvaren zadovoljavajući faktor sigurnosti 2,61.

8.2.1. Povećanje broja slojeva biokompozita u laminatu rebara

Prva je povećanje broja slojeva u rebru. zadovoljavajući broj određuje se iterativno ponavljanjem proračuna na globalnom modelu i iterativnim povećavanjem broja slojeva sve dok najveći indeks popuštanja ne padne ispod traženih $f_i = 0,383$. U Tablici 8.1 Ovisnost najvećeg indeksa naprežanja pri hidrostatskom tlaku na bok o broju slojeva u rebrima su

predočeni rezultati iterativnog postupka. Konačan broj potrebnih slojeva biokompozita u laminatima rebara je 14, po 7 sa svake strane jezgre od balse.

Tablica 8.1 Ovisnost najvećeg indeksa naprezanja pri hidrostatskom tlaku na bok o broju slojeva u rebrima

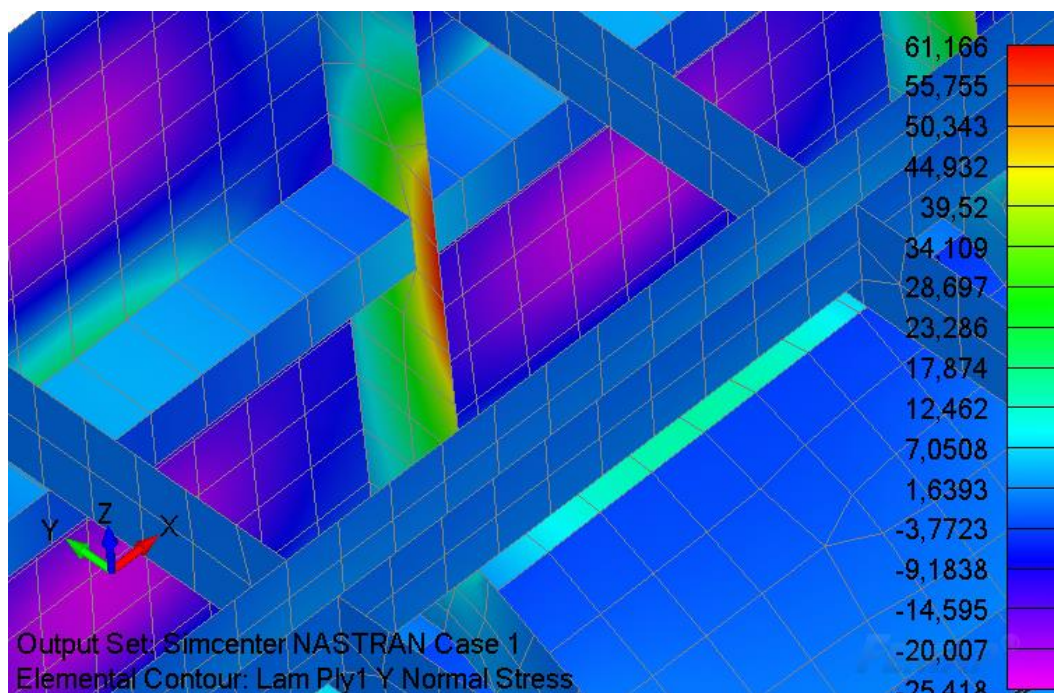
Simulacija br.	Broj slojeva	Najveći indeks popuštanja	Faktor sigurnosti	Zadovoljnost
0	10	0,521	1,92	NE
1	12	0,4232	2,36	NE
2	14	0,3756	2,66	DA

8.2.2. Promjena konstrukcijskog rješenja

Alternativa povećavanju slojeva jest promjena geometrije rebara. Da bi se sačuvao kontinuitet uzdušnjaka, kroz rebro širine 200 mm izrezane su rupe širine 100 mm i visine 150 mm za uzdušnjake. To ostavlja samo 50 mm u presjeku koji je najnapregnutiji na vlak pri savojnom opterećenju kao što je to slučaj kod hidrostatskog tlaka na oplatu boka ili dna. Rješenje je ili prekinuti kontinuitet uzdušnjaka kako bi se sačuvao integritet rebara, ili dodati materijal kako kritični presjek nebi iznosio samo 50 mm.

8.2.2.1. Prekid kontinuiteta uzdušnjaka

Popunjavanjem rupe koja je uzrezana za prolazak uzdušnjaka na najkritičnijem rebro spušteno je vlačno naprezanje u originalnom laminatu sa 10 slojeva sa 66.55MPa na 61,16MPa kao što je prikazuje Slika 8.9.



Slika 8.9 Vlačno naprezanje u smjeru materijalne osi 2 nakon popunjavanja rupe u rebro

To nije dovoljno da samostalno zadovolji kriterij čvrstoće, stoga treba razmotriti druge opcije. Jedna od njih je redizajnirati rebara kako bi išla u punom profilu oko uzdužnjaka ili istražiti utjecaj prekida kontinuiteta uzdužnjaka na krutost i čvrstoću čitavog trupa. Također, proizvođač korištenog pletiva ampliTEX ima drugi proizvod powerRibs što je mreža 30x30mm izrađena od krupno pletenih lanenih konopaca koji se nanose kao sloj na jednu stranu ploha monolitnog kompozita kakvi su korišteni na oplatama višestruko mu poboljšavajući savojna svojstva.

9. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je dokazati da se trupovi i paluba katamarana PROeco mogu izraditi od laminata u kojima je stakloplastika zamijenjena biokompozitom konstituiranog od biorazgradive epoksidne matrice i ojačane lanenim vlaknima. Iznalaženje kvalitetnih ulaznih podataka o elastičnim svojstvima biokompozita potrebnim za njegovu karakterizaciju kao dvodimenzionalnog ortotropnog materijala neophodnu za provedbu proračuna metodom konačnih elemenata pokazalo se kao najveći izazov u ovom radu. Korelacija simulacije vlačnog ispitivanja sa eksperimentalno provedenim pokazala se mnogo boljom od korelacije sa savojnim testom. Rastezni modul elastičnosti $E_{R\text{mke}}$ izračunat simuliranjem vlačnog testa metodom konačnih elemenata u prosjeku je odstupao manje od 15% i to uvijek na stranu sigurnosti jer je pokazivao manju krutost od eksperimentalno određenog $E_{R\text{exp}}$. Pri tome treba uzeti u obzir i da su vrijednosti rasteznog modula $E_{R\text{exp}}$ odstupala u prosjeku 12% između mjerenja. Kod savojnog modula izračunatog simuliranjem savojnog ispitivanja metodom konačnih elemenata, konzistentno su dobivane vrijednosti $E_{S\text{mke}}$ koje se poklapaju sa rasteznim modulom elastičnosti $E_{R\text{mke}}$, što je inače karakteristika izotropnih materijala. To se može objasniti činjenicom da je pletenje lanenih vlakana podjednako u oba smjera pletenja, a ispitivanje koje se provodilo uzrokuje jednoosno stanje naprezanja. Ono što čudi jest da je u eksperimentu savojni modul naglo rastao sa brojem korištenih slojeva u laminatu, pa je stoga najgora bila korelacija pri 9 korištenih slojeva gdje je $E_{S\text{mke}}$ bio za čak 42,5% manji od eksperimentalno određenog $E_{S\text{exp}}$. Usprkos tomu što su i savojni i rastezni moduli elastičnosti određeni pomoću simulacije metodom konačnih elemenata ispali znatno niži nego što su eksperimentalno izmjereni, proračunate krutosti elemenata trupa izrađenih od biokompozita su se konzistentno pokazivale višima nego kod ekvivalentnih laminata izrađenih od stakloplastike, pa je tako i cijeli trup izrađen od biokompozita uz 15% manju masu opterećen na progib i pregib ispao 17% krući nego trup od stakloplastike. U globalnom proračunu utvrđeni su nedostaci pojednostavljene metode gdje se pojedini konstituenti trupa: ploče i ukrute zasebno proračunavaju kako bi odredili potreban broj slojeva korištenih za izradu pojedinog laminata, budući da su neki segmenti poput uzdužnjaka dna ispali veoma poddimenzionirani, a i globalni je proračun otkrio da interakcijom više elemenata trupa: uzdužnjaka, rebra i oplata može doći do nedozvoljeno visokih naprezanja u dijelovima geometrije koja se jednostavnijim proračunima u potpunosti previdi. Jedna takva značajka su izrezani utori u okvirnim rebrima kako bi kroz njih prolazio uzdužnjak što izrazito oslabljuje njihovu čvrstoću budući da je onda presjek rebra najmanji na sredini plohe gdje je naprezanje najveće. Taj problem može riješiti

povećavanjem broja slojeva laminata, no takvo rješenje dolazi na uštrp povećanja mase i u konačnici cijene izrade, stoga je bolje razmotriti drugačija konstrukcijska rješenja. U svakom slučaju, u radu je pokazano da usprkos tomu što su korištena elastična svojstva biokompozita na strani sigurnosti, i što je geometrija nije optimirana za korištenje lanenih vlakana u punom potencijalu trup može zadovoljiti sve uvjete opterećenja koji su propisani od strane registra.

LITERATURA

- [1] R. A. Shenoj, J. M. Dulieu-Barton, S. Quinn, J. I. R. Blake, and S. W. Boyd, "Composite Materials for Marine Applications: Key Challenges for the Future," *Composite Materials*, pp. 69–89, 2011, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-166-0_3.
- [2] J. J. Andrew and H. N. Dhakal, "Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review," *Composites Part C: Open Access*, vol. 7, p. 100220, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>.
- [3] S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 3, pp. 371–376, Mar. 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.
- [4] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, "Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, Jul. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00096-4).
- [5] L. Yan, Nawawi Chouw, and K. Jayaraman, "Flax fibre and its composites – A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 296–317, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>.
- [6] A. Gomez-Campos, C. Vialle, A. Rouilly, C. Sablayrolles, and L. Hamelin, "Flax fiber for technical textile: A life cycle inventory," *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, p. 125177, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125177>.
- [7] "EU projects," Marservis, Jan. 20, 2020. <https://marservis.hr/en/eu-projekti/> (accessed Sep. 26, 2023).
- [8] "Rules for the classification of ships Part 34 – Rules for the classification of vessels of less than 24 meters in length," Jul. 01, 2021. https://www.crs.hr/Portals/0/adam/KlasifikacijskaPravila/hGAdpDWXV6aX1Sw4UFWWA/Dokument/Rules%20for%20the%20classification%20of%20ships,%20Pt.%2034,%20Vessels%20of%20less%20than%2024%20meters%20in%20length,%2007_2021.pdf (accessed Sep. 26, 2023)
- [9] *Rules for the classification of ships; Part 24 – Non-metallic materials, 2017.*, http://www.crs.hr/Portals/0/HRB%20CRS%20pravila/PART%2024,%202017_07.pdf?ver=2017-07-12-083503-253

- [10] D. Grgorinić, “Analiza čvrstoće katamarana izrađenog od biokompozita,” repozitorij.fsb.unizg.hr, Mar. 02, 2023. <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:9056> (accessed Sep. 26, 2023).
- [11] “NR600 Hull structure and arrangement for the classification of cargo ships less than 65 m and non-cargo ships less than 90 m | Marine & Offshore,” marine-offshore.bureauveritas.com. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr600-hull-structure-and-arrangement-classification-cargo-ships-less-65-m-and-non-cargo-ships-less> (accessed Sep. 26, 2023).
- [12] “ComposeIT Software Design assessment of composite ship structure | Marine & Offshore,” marine-offshore.bureauveritas.com, May 11, 2023. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/composeit-software-design-assessment-composite-ship-structure> (accessed Sep. 26, 2023).
- [13] T. Filetin, F. Kovačićek, and J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2002.
- [14] I. Smojver, *Mehanika kompozitnih materijala*, Interna skripta. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
- [15] A. Rudin, *The Elements of Polymer Science and Engineering*, Third Edition. Elsevier, 2012, pp. 521–535.
- [16] Y. Deng and Y. Tian, “Assessing the Environmental Impact of Flax Fibre Reinforced Polymer Composite from a Consequential Life Cycle Assessment Perspective,” *Sustainability*, vol. 7, no. 9, pp. 11462–11483, 2015, doi: <https://doi.org/10.3390/su70911462>.
- [17] L. Yan, B. Wang, and B. Kasal, “Can Plant-Based Natural Flax Replace Basalt and E-Glass for Fiber-Reinforced Polymer Tubular Energy Absorbers? A Comparative Study on Quasi-Static Axial Crushing,” *Frontiers in Materials*, vol. 4, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2017.00042>.
- [18] M. Assarar, W. Zouari, H. Sabhi, R. Ayad, and J.-M. Berthelot, “Evaluation of the damping of hybrid carbon–flax reinforced composites,” *Composite Structures*, vol. 132, pp. 148–154, Nov. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.016>.
- [19] D. U. Shah, P. J. Schubel, and M. J. Clifford, “Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 52, pp. 172–181, Sep. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.027>.

- [20] “‘The marine industry is very open to natural fibres materials’ - JEC,”
<https://www.jeccomposites.com/>, Jun. 15, 2023.
<https://www.jeccomposites.com/news/the-marine-industry-is-very-open-to-natural-fibres-materials/> (accessed Sep. 26, 2023).
- [21] “Baltic 68 Café Racer Pink Gin Verde,” Baltic Yachts.
<https://www.balticyachts.fi/yachts/baltic-68-cafe-racer/> (accessed Sep. 26, 2023).
- [22] J. Sorić, *Metoda konačnih elemenata, II. izmjenjeno i dopunjeno izdanje*. Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga, 2021, p. 31.
- [23] “Simcenter Femap,” Siemens Digital Industries Software.
<https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/mechanical-simulation/femap/> (accessed Sep. 26, 2023).
- [24] T. Haramina, *Svojstva kompozita lan/epoksid za primjenu u brodogradnji*. Zagreb: Zavod za materijale FSB, 2021.
- [25] K. Pintur, “Mehanička svojstva kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana i njihova primjena u brodogradnji,” *repozitorij.fsb.unizg.hr*, Mar. 02, 2022.
<https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:7774> (accessed Sep. 26, 2023).
- [26] M. Tuškan, “Svojstva polimernih kompozita ojačanih različitim brojem slojeva lanenih vlakana pri savojnom opterećenju,” *repozitorij.fsb.unizg.hr*, Mar. 02, 2022.
<https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:7771> (accessed Sep. 26, 2023).
- [27] Determination of tensile properties of plastics Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. DIN EN ISO 527-4, 1997.
- [28] Plastics - Determination of flexural properties. EN ISO 178, 2003.
- [29] Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method. EN ISO 14130, 1997.
- [30] H. Bos, P. A. A.J.M, L. P. J, and J. Loos, “The Potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials,” Wageningen University and Research, Netherlands, 2004. Available: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/328415>
- [31] J. Parunov, I. Senjanovi, and M. Paviaeeviae, “Use of Vertical Wave Bending Moments From Hydrodynamic Analysis In Design of Oil Tankers,” *International Journal of Maritime Engineering* INT J MARIT ENG, vol. 146, Jan. 2004, doi:
<https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2004.a4.5204>.

PRILOZI

I. CD-R disc