

Analiza uzdužne čvrstoće velikog putničkog broda za kružna putovanja u konceptualnoj fazi projekta

Daničić, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2013

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:235:831932>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Daničić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Domagoj Daničić

Zagreb, 2013.

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

Posebno se zahvaljujem mentoru Doc. dr. sc. Jerolimu Andriću na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se mojim roditeljima i obitelji na strpljenju, razumijevanju i podršci.

Domagoj Daničić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	8
1.1. Veliki putnički brodovi za kružna putovanja (Cruise ships).....	8
2. PRORAČUN STRUKTURNIH ELEMENATA PREMA PRAVILIMA DNV-a	10
2.1. Proračun prema pravilima DNV-a[3]	10
3. MKE MODEL	12
3.1. Izrada MKE modela	12
3.2. Rubni uvjeti.....	16
3.3. Model opterećenja.....	17
4. ANALIZA PODOBNOSTI PROTOTIPNE KONSTRUKCIJE I PRIJEDLOGA RJEŠENJA	22
4.1. Podobnost konstrukcije	22
4.2. Analiza podobnosti prototipne konstrukcije, prijedlog rješenja i podobnost prijedloga rješenja	25
5. ANALIZA DISTRIBUCIJE PRIMARNIH NAPREZANJA PO VISINI TRUPA UNUTAR 0,4L.....	36
5.1. Analiza distribucije primarnih naprezanja po visini trupa unutar 0,4L	36
5.2. Proračun efikasnosti paluba nadgrađa.....	44
ZAKLJUČAK	49
LITERATURA.....	50
Prilog	51

POPIS SLIKA

Slika 1. Razvoj suvremenih putničkih brodova za kružna putovanja [1]	8
Slika 2. Predložak nacrtu glavnog rebra s proračunom dobivenim rasporedom tlakova[4]	11
Slika 3. Prikaz čvorova glavnog rebra MKE modela	14
Slika 4. Jedan od modula parcijalnog MKE modela s prikazom pozicija (lijevo) i debljina (desno)	15
Slika 5. Parcijalni ekstrudirani grubi MKE model cijelog broda	15
Slika 6. Rubni uvjeti	16
Slika 7. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj pregiba - LC1	18
Slika 8. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj progiba – LC2	18
Slika 9. Distribucija ukupnih vertikalnih valnih momenata savijanja za LC1 i LC2.....	20
Slika 10. Distribucija ukupnih poprečnih sila duž broda za LC1 i LC2	20
Slika 11. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela u pregibu- LC1.....	27
Slika 12. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela u progibu- LC2.....	27
Slika 13. Postignuti faktori sigurnosti PCCB za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2	28
Slika 14. Postignuti faktori sigurnosti PCSB za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2.....	28

Slika 15. Postignuti faktori sigurnosti PCSF za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2	29
Slika 16. Postignuti faktori sigurnosti PFLB za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC.....	29
Slika 17. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC1.....	30
Slika 18. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC1, pogled na dno.....	30
Slika 19. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC2.....	31
Slika 20. Postignuti faktori sigurnosti PCCB za prijedlog rješenja konstrukcije.....	32
Slika 21. Postignuti faktori sigurnosti PCSB za prijedlog rješenja konstrukcije.....	32
Slika 22. Postignuti faktori sigurnosti PFLB za prijedlog rješenja konstrukcije.....	33
Slika 23. Postignuti faktori sigurnosti PCSF za prijedlog rješenja konstrukcije za oba slučaja naprezanja, lijevo LC2, desno LC1.....	33
Slika 24. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1.....	34
Slika 25. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1, pogled od dolje.....	34
Slika 26. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC2	35
Slika 27. Raspored smičnih naprezanja u prijedlogu rješenja konstrukcije.....	35
Slika 28. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 1 u slučaju opterećenja LC1.....	38

Slika 29. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 1 u slučaju opterećenja LC.....	39
Slika 30. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 2 u slučaju opterećenja LC1.....	40
Slika 31. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 2 u slučaju opterećenja LC2.....	41
Slika 32. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 3 u slučaju opterećenja LC1.....	42
Slika 33. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 2 u slučaju opterećenja LC2.....	43
Slika 34. Rspored uzdužnih naprezanja na palubi 7.....	47
Slika 35. Rspored uzdužnih naprezanja na palubi 8.....	47
Slika 36. Rspored uzdužnih naprezanja na palubi 9.....	48
Slika 37. Rspored uzdužnih naprezanja na palubi 10.....	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Slučajevi opterećenja	19
Tablica 2. Vertikalni momenti savijanja.....	19
Tablica 3 . Biblioteka kriterija programa MAESTRO i faktori sigurnosti prema DN....	23
Tablica 4. Dozvoljena naprezanja prema Pravilima DNV [2]	24
Tablica 5. Tablica s lokacijama oštećenja, prototipnim vrijednostima, tipovima oštećenja, prijedlogom rješenja i postignutim kriterijima.....	26
Tablica 6. Vrijednosti pri neefikasnom nadgrađu za slučajeve LC1 i LC2.....	37
Tablica 7. Usporedba momenata otpora inercije i otpora presjeka glavnog rebra.....	37
Tablica 8. Vrijednosti σ_{x0} i σ_{x1} za slučaj opterećenja LC1.....	45
Tablica 9. Vrijednosti σ_{x0} i σ_{x1} za slučaj opterećenja LC2.....	45
Tablica 10. Vrijednosti σ_x i η_s na B/2 Pozicije 1 za LC1 i LC2.....	45
Tablica 11. Vrijednosti σ_x i η_s na B/2 Pozicije 2 za LC1 i LC2.....	45
Tabela 12. Vrijednosti σ_x i η_s na B/2 Pozicije 3 za LC1 i LC2.....	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
g_o	m/s^2	akceleracija gravitacije
a_v	m/s^2	vertikalna komponenta akceleracije
q	t/m^2	teret na palubama, ovisi o duljini broda
L	m	duljina broda
B	m	širina broda
V	m	visina broda
T	m	gaz broda
f_l	/	faktor materijala
s	mm	razmak okvira
M_t	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja
M_s	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja u progibu
M_h	kNm	ukupni vertikalni moment savijanja u pregibu
I_{zz}	cm^4	moment inercije presjeka
g	/	faktor podobnosti
η_P	mm	udaljenost palube od neutralne linije
η_D	mm	udaljenost dna od neutralne linije
σ_{xD}	N/mm^2	normalna naprezanja u dnu
σ_{xP}	N/mm^2	normalna naprezanja u palubi
σ_x	N/mm^2	normalno naprezanje
t	mm	debljina
W	cm^3	moment otpora

SAŽETAK

Završni rad se bavi analizom uzdužne čvrstoće velikog putničkog broda (Post-Panamax klase) za kružna putovanja u konceptualnoj fazi projekta.

U uvodu je dan kratki opis problematike uzdužne čvrstoće kod velikih putničkih brodova.

Za zadanu geometriju i topologiju glavnog rebra (prema sličnom brodu) napravljen je proračun strukturnih elemenata glavnog rebra prema pravilima DNV (Det Norske Veritas) te se sa dobivenim rezultatima izradio MKE model prototipa korištenjem programa MAESTRO. Slijedeći korak je definiranje slučajeva opterećenja, te ocjena podobnosti prototipne konstrukcije i izmjene pojedinih elemenata u svrhu zadovoljavanja zahtjeva čvrstoće. Na osnovu dobivenih rezultat dan je prijedlog rješenja za elemente koji ne zadovoljavaju zahtjevima.

Zatim je napravljena analiza i odziv strukture nakon predloženih izmjena. Predmet analize je raspodjela uzdužnih normalnih naprezanja po visini trupa unutar 0.4L broda.

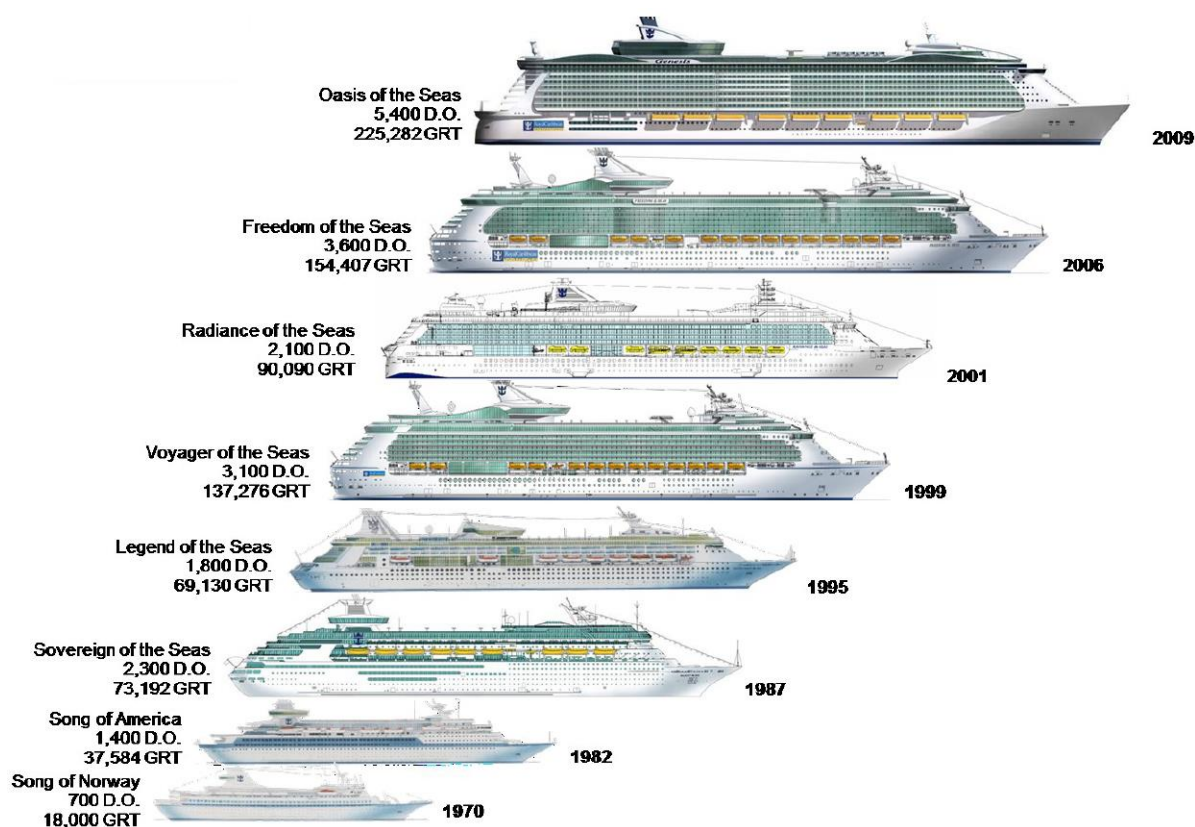
Distribucija primarnih naprezanja detaljno je analizirana na tri različite pozicije na modelu, za dva stanja opterećenja (maksimalni pregib i maksimalni progib) .

U prilogu su dani proračun glavnog rebra prema Pravilima DNV, izrađen u MS Excell i nacrt glavnog rebra, s predloženim finalnim strukturnim dimenzijama.

1. UVOD

1.1. Veliki putnički brodovi za kružna putovanja (Cruise ships)

Ideja krstarenja tj. kružnih putovanja za kakvu danas znamo je začeta ranih 1970ih godina. Koncept transporta putnika prekoceanskih putničkih brodova (*liners*) je nestao, te je putnik na brodu samo radi odmora, obilazaka i zabave. Suvremeni putnički brodovi za kružna putovanja su se razvili, a njihove glavne izmjere i volumen rasli su s razvojem tehnologije, zahtjevima tržišta i zahtjevima brodovlasnika (vidi Sliku 1) [1]. Povećanjem njihovih glavnih izmjera (duljina, širina, gaz...), vidi Sliku 1, povećava se i složenost konstrukcije, na račun što raznovrsnije ponude putnicima, te se javlja problem kako to konstrukcijski izvesti.



Slika 4. Razvoj suvremenih putničkih brodova za kružna putovanja [1]

Problematika uzdužne čvrstoće velikih putničkih brodova za kružna putovanja je u njihovim konstrukcijskim zahtjevima, visina nadgrađa (visina nadgrađa je često jednaka visini broda[2]), otvorene gornje palube (balkoni, prozori), veliki recesi (diskontinuitet strukture), te velike prostorije kao što su velike dvorane, kina, kazališta... Svi ti zahtjevi čine brod projektiranje brodske konstrukcije izrazito složenim zadatkom. Kako ti brodovi imaju

relativno plitak gaz, oko $8 \div 8,5$ m, uzimajući u obzir njihovu visinu, problem dolazi kod zahtjeva za stabilitetom. Da bi se zadovoljili zahtjevi za stabilitetom tj. da se težište sistema ne bi previše podiglo gornje palube moraju biti što lakše. Kako je utjecaj nadgrađa na uzdužnu čvrstoću broda vrlo izražen, iz razloga visine broda, kompromis između stabiliteta i zahtjeva za čvrstoćom se mora pronaći. To znači da elementi tih paluba moraju biti tanji i imati što je moguće manje dimenzije ukrepa od nižih paluba, ali da istodobno udovoljavaju zahtjevima uzdužne čvrstoće. Veliki problem predstavljaju prozori i otvori na bokovima gornjih paluba nadgrađa, palube iznad recesa. Reces na brodu uzrokuje diskontinuitet strukture i uzrokuje nepovoljne globalne efekte [2], a to su: djelomična efektivnost paluba nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda, smanjena smična krutost bokova uslijed velikih otvora, komplicirani transfer sila između trupa i nadgrađa, povećana smična naprezanja u predjelu recesa, veličina aksijalnih sila u sustavu upora, problem izvijanja [2]. Daljnji problemi su visine određenih paluba koje su zamišljene kao javni prostori i mjesta za opuštanje i zabavu jer su kod njih veliki nepoduprti rasponi. Rješenja za takve probleme su da se pri projektiranju brod projektira tako da je tokom plovidbe u laganom pregibu (*hogg*) čime se gornje palube opterećuju na vlak, a u slučaju kad brod dođe na valni dol da bude na ravnoj vodnoj liniji ili u laganom progibu (*sagg*) jer je su u suprotnome gornje palube u opasnosti od savijanja uslijed progiba. Problem nepoduprtog raspona sponja i podveza kod paluba se rješava postavljanjem upora na mjestu gdje prolaze podveze. Najviša paluba obično se projektira od čelika povišene čvrstoće ako je pod velikim vlačnim naprezanjima. Kod velikih prostora se cilja da upore u palubama iznad takvih prostora budu u vlaku i tako nose donju strukturu [2]. Dno, dvodno, palube i nadgrađa se redovito uzdužno orebruju, dok bok trupa može biti poprečno ili uzdužno orebren. Kod paluba iznad recesa oko sredine broda postavlja se uzdužna pregrada koja nosi opterećenja, a proteže se kroz cijelu duljinu broda, jer bokovi gornjih paluba zbog velikih otvora (balkoni) nisu u mogućnosti preuzeti opterećenja koja nastaju uslijed male smične krutosti.

Metoda ispitivanja uzdužne čvrstoće unutar 0,4L broda je usporedba rezultata klasične teorije grede [2], gdje se brodski trup idealizira gredom složenog presjeka i daje prihvatljive rezultate za jednopalubne brodove (tankeri, brodovi za rasuti teret...) s rezultatima dobivenim metodom konačnih elemenata u programu MAESTRO polovinskog simetričnog MKE modela pretpostavljenog samo kao ekstrudirano glavno rebro zadane geometrije tipičnog *Post-Panamax* putničkog broda.

2. PRORAČUN STRUKTURNIH ELEMENATA PREMA PRAVILIMA DNV-a

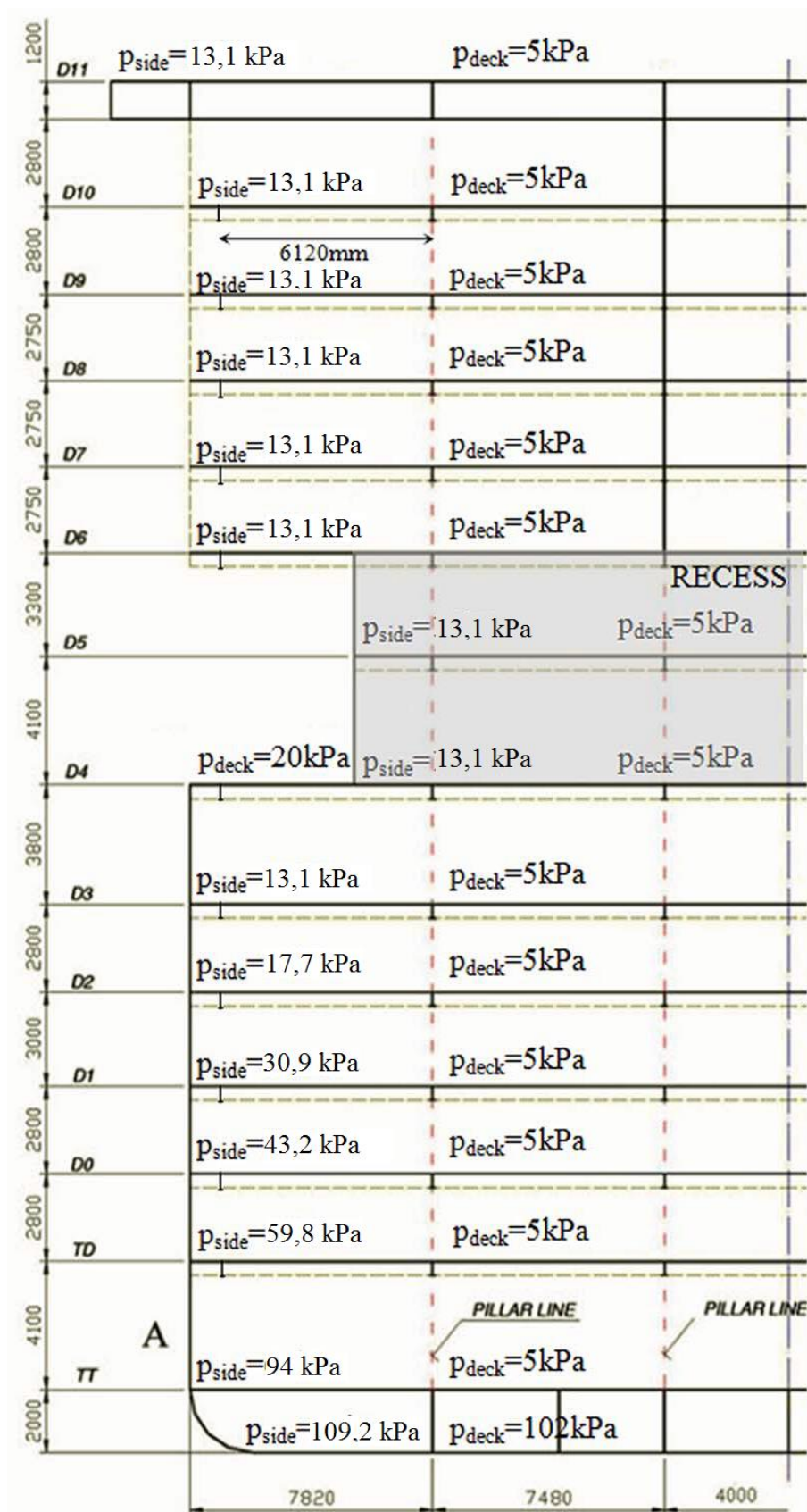
2.1. Proračun prema pravilima DNV-a[3]

Prema zadanoj geometriji i topologiji glavnog rebra sličnog broda proračunavali su se elementi uzdužne i poprečne čvrstoće. Dimenzionirale su se debljine oplata dna, dvodna, boka i paluba, uzdužno jaki nosači, podveze paluba, ukrepe te poprečno okviri boka i paluba, koljena i upore.

Glavne dimenzije broda su:

Duljina:	273 m
Širina:	38,6 m
Visina:	43,75 m
Gaz:	7,07 m
Razmak okvira:	2730 mm
Koeficijent punoće:	0,6
Ukupni moment savijanja u pregibu:	8 400 000 kNm
Ukupni moment savijanja u progibu:	-4 400 000 kNm

Konceptualni nacrt prema kojem se proračun izveo dan je predloškom prikazan Slikom 2[4]. Unatoč što su na predlošku već tlakovi bili proračunati, oni nisu uzeti u obzir kod proračuna već ih se nanovo proračunavalo te je prikazan na Slici 2. Odrađen je proračun strukturnih elemenata glavnog rebra s obzirom na zahtjeve lokalne čvrstoće prema pravilima *DNV-Hull structure Design, Part 3, Ch.1., July 2011*. Cijeli proračun glavnog rebra s nacrtom finalne varijante je dan u prilogu.



Slika 5. Predložak nacrtu glavnog rebra s proračunom dobivenim rasporedom tlakova[4]

3. MKE MODEL

Cilj izrade MKE modela je direktan proračun strukture metodom konačnih elemenata (MKE) čime se dobiva odgovor da li konstrukcija zadovoljava zahtjeve za čvrstoćom jer se u proračunu prema Pravilima DNV [3] dobivaju vrijednosti za izolirana opterećenja dok se ovdje uzima u obzir interakciju elemenata i naprezanja koja su im narinuta. U programu MAESTRO [5] izrađen je polovični 3D MKE model koji je simetričan oko YX ravnine u MAESTRO [5] koordinatnom sustavu. Ovakvi polovični modeli, ako se dobro izrade i sa pravilnim rubnim uvjetima daju rezultate zadovoljavajuće točnosti u usporedbi s cijelim 3D MKE modelima [5].

3.1. Izrada MKE modela

Program MAESTRO[5] ima koordinatni sustav koji je definiran na idući način:

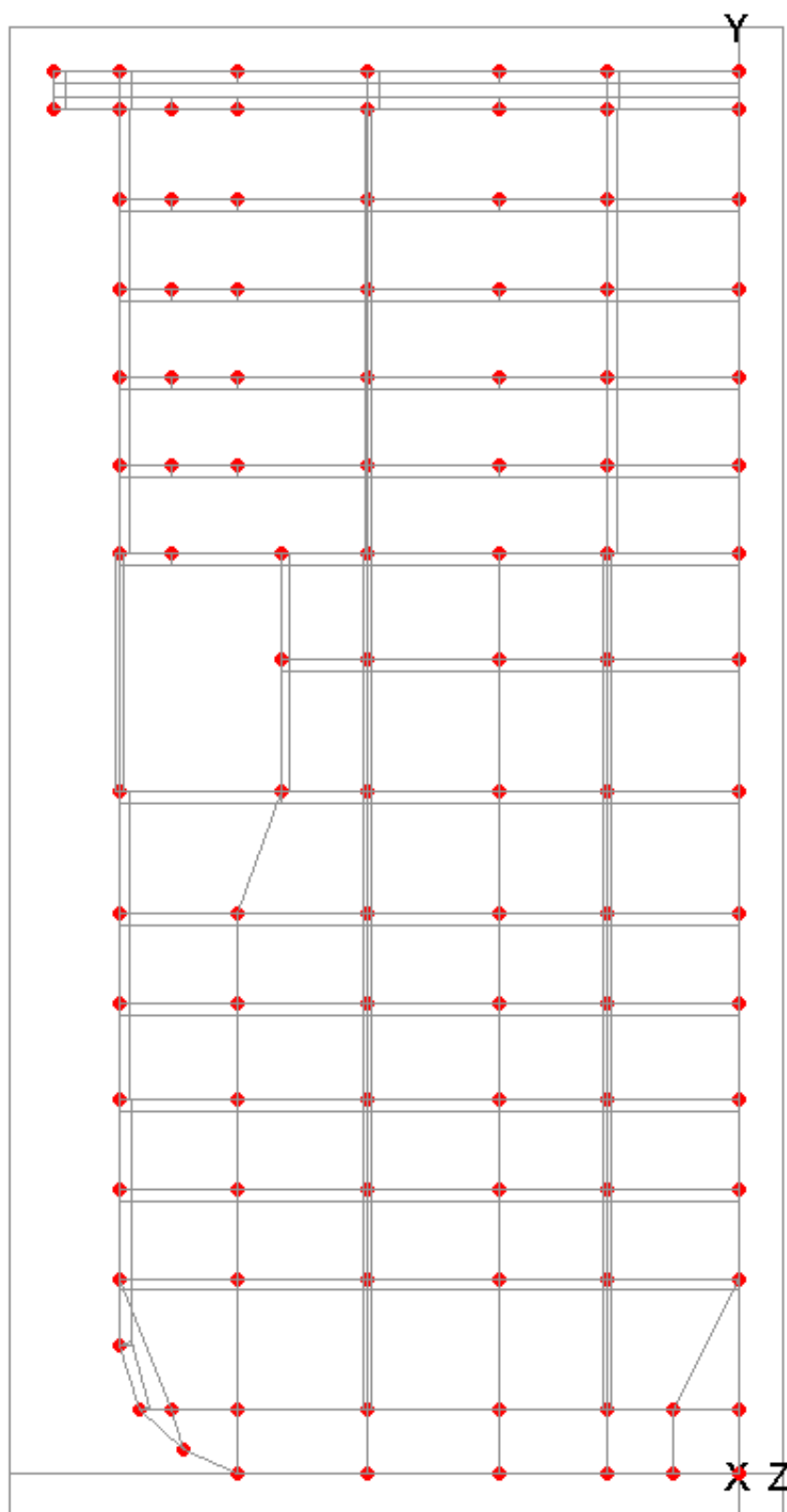
- ishodište koordinatnog sustava definirano je u sjecištu centralne ravnine i osnovice;
- globalna os X definirana je u smjeru uzdužne ravnine broda i pozitivna je prema naprijed;
- globalna os Z definirana je u poprečnom smislu i pozitivna je prema desno od osi X;
- globalna os Y je definirana u vertikalnom smjeru, okomita je na XZ ravninu, prolazi kroz sjecište osi X i osi Z te je pozitivna prema gore.

Prvi korak je definiranje čvorova glavnog rebra u prostoru pomoću prostornih koordinata (x,y,z) uzimajući u obzir definiciju koordinatnog sustava [5]. Čvorovi se postavljaju na mjesta spajanja konačnih elemente te se dobiva model glavnog rebra. Prema dimenzijama strukturnih elemenata dobivenih iz proračuna po DNV-u se izradio parcijalni model cijelog broda na razini grube mreže, bez promjene forme, ekstrudirajući glavno rebro.

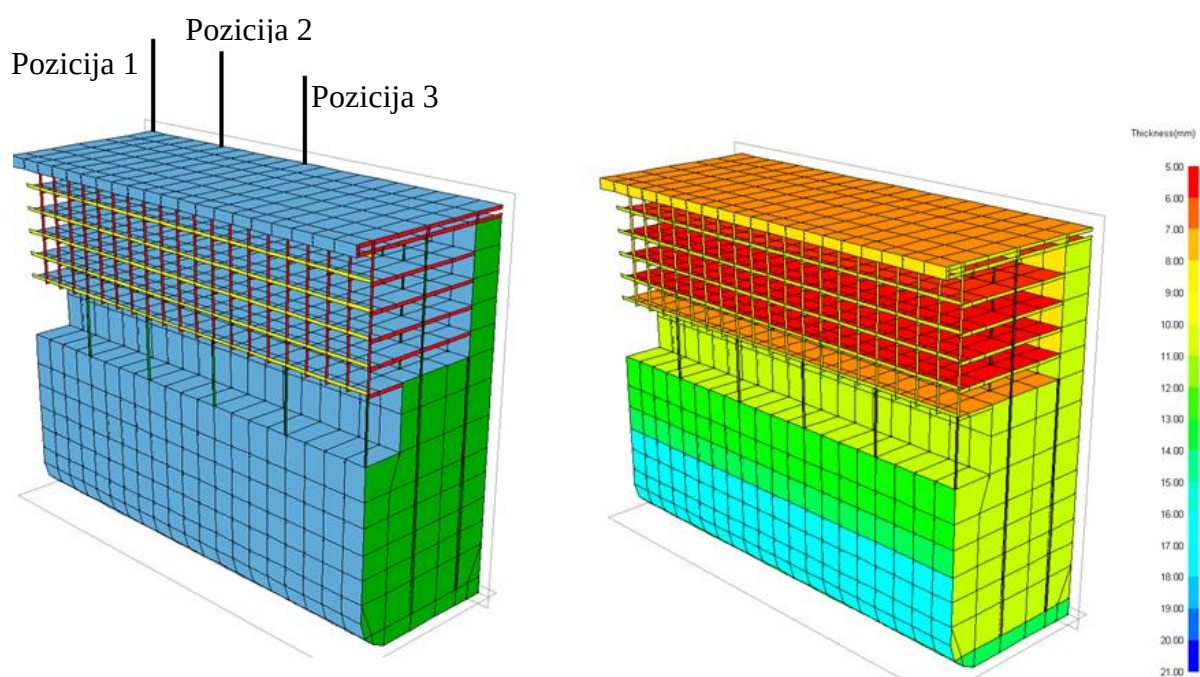
Model se izradio slijedećim postupkom:

- postavljanje čvorova u prostoru, Slika 3;
- povezivanje odgovarajućih čvorova konačnim elementima u vidu vojeva na kojima su definirana svojstva materijala, paneli, ukrepe, sponje, podveze, upore, rebrenice i pregrade, Slika 4;
- tako dobiveno glavno rebro se ekstrudiralo do duljine od 20 razmaka rebara te se dobio modul, Slika 4;
- spajanjem 5 takvih modula je dobiven cijeli model, Slika 5.

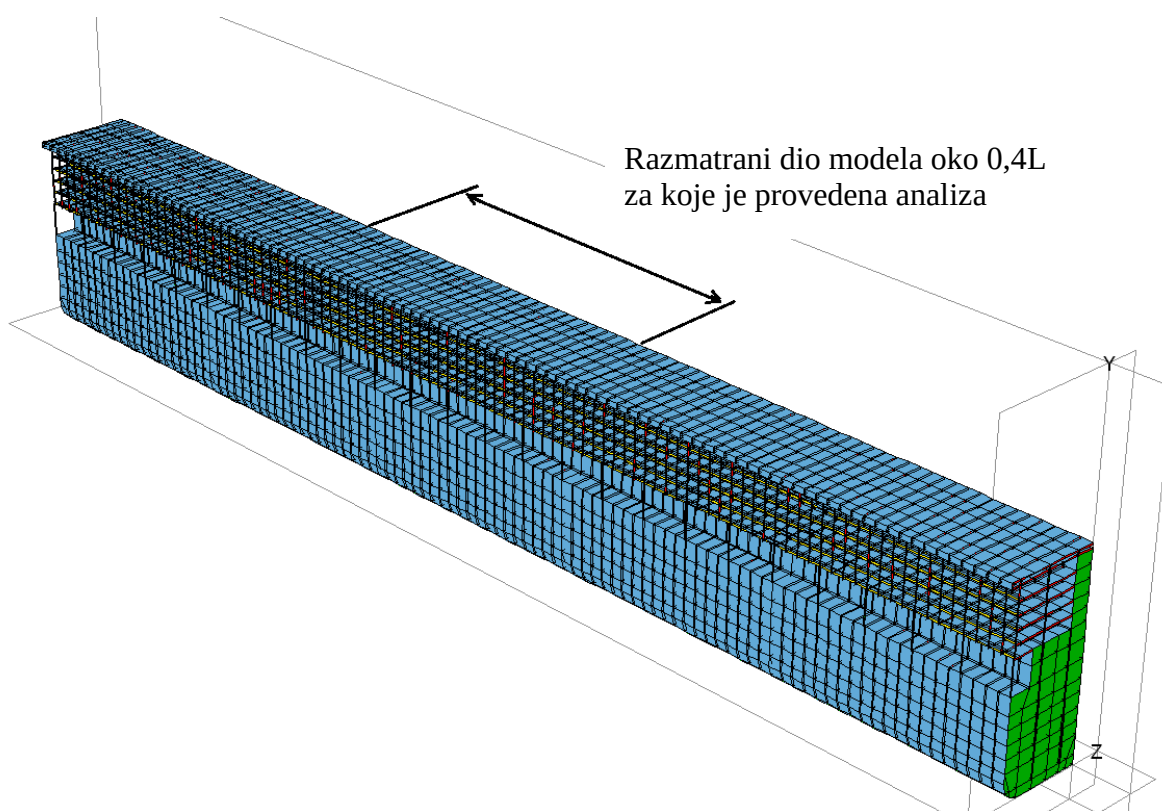
Orebreni paneli, pregrade i rebrenice su modelirani ukrepljenim četverokutnim pločastim makroelementima, dok su rebrenice, podveze i sponje modelirani kao gredni elementi, detaljnije u [6]. S tako definiranim elementima omogućava se brzo i lako modeliranje raznih projektnih formi broda ili njihovih djelomičnih modela te zbog potreba brojnih iteracija (raznih optimizacija projekta) moguće im je svojstva brzo mijenjati. Naprezanja uslijed opterećenja jakih nosača na tlak i na vlak se mjere u 3 točke (1. Čvor, 2. Čvor i sredina) te se tako dobiva bolja slika naprezanja i bolji je uvid u dobivene rezultate. Također se brzo dobivaju odgovori o podobnosti konstrukcije u vidu broja zadovoljenih sigurnosnih kriterija.



Slika 6. Prikaz čvorova glavnog rebra MKE modela



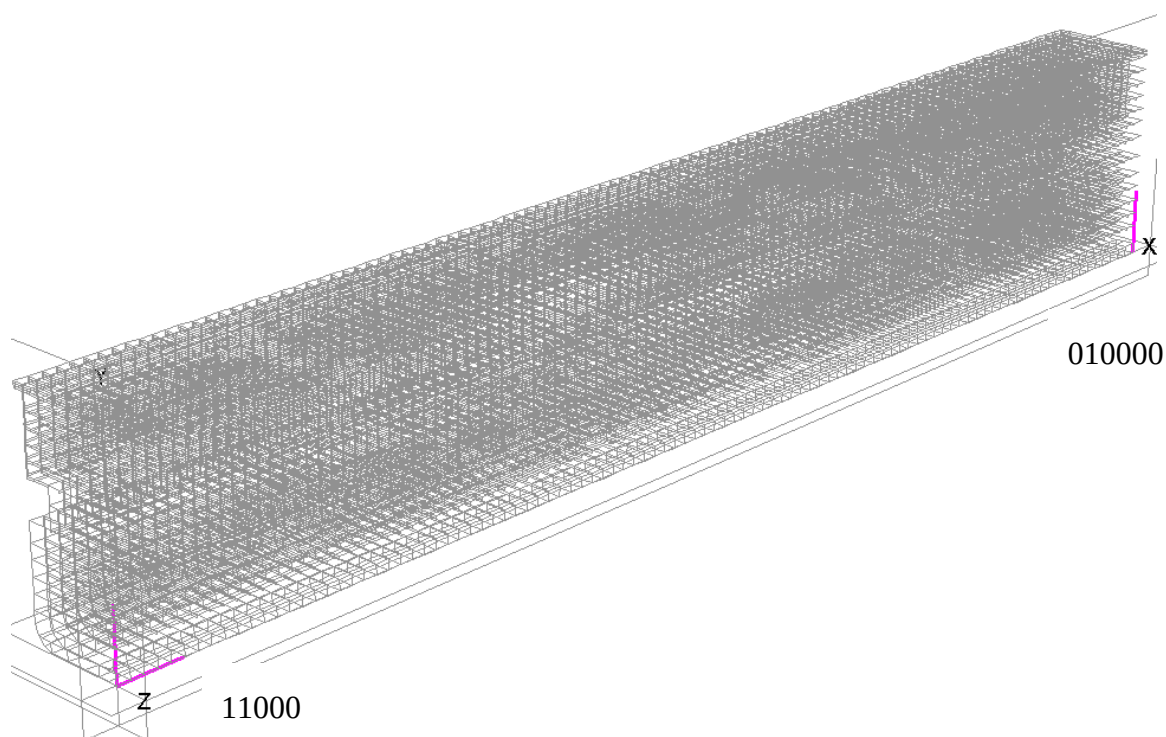
Slika 4. Jedan od modula parcijalnog MKE modela s prikazom pozicija (lijevo) i debljina (desno)



Slika 5. Parcijalni ekstrudirani grubi MKE model cijelog broda

3.2. Rubni uvjeti

Kod ovakvih modela broj rubnih uvjeta je minimalan, što znači sprječavanje kretanja konstrukcije koji nisu dijelom razmatranog problema, a u ovo slučaju to je pomak modela kao krutog tijela. Definiraju se u osloncima preko pomaka, sila ili kombinacijom navedenog. Oslonci su postavljeni na jake poprečne strukture (poprečne pregrade), da bi moguće sile reakcija na oslonce imale što manji utjecaj na proračun. Rubni uvjeti su propisane vrijednosti translacijskih i rotacijskih pomaka, te su u programu [5] te vrijednosti definirane kao 0-slobodno i 1-spriječeno. Zapis pomaka je šifriran te prve tri znamenke označuju translacijske pomake u smjeru osi X, Y i Z, dok druge tri znamenke označuju rotacijske pomake oko navedenih osi. Pomaci u smjeru osi Z i rotacije oko osi X i osi Y kod polovinskog simetričnog modela su spriječene od strane programa (001110).



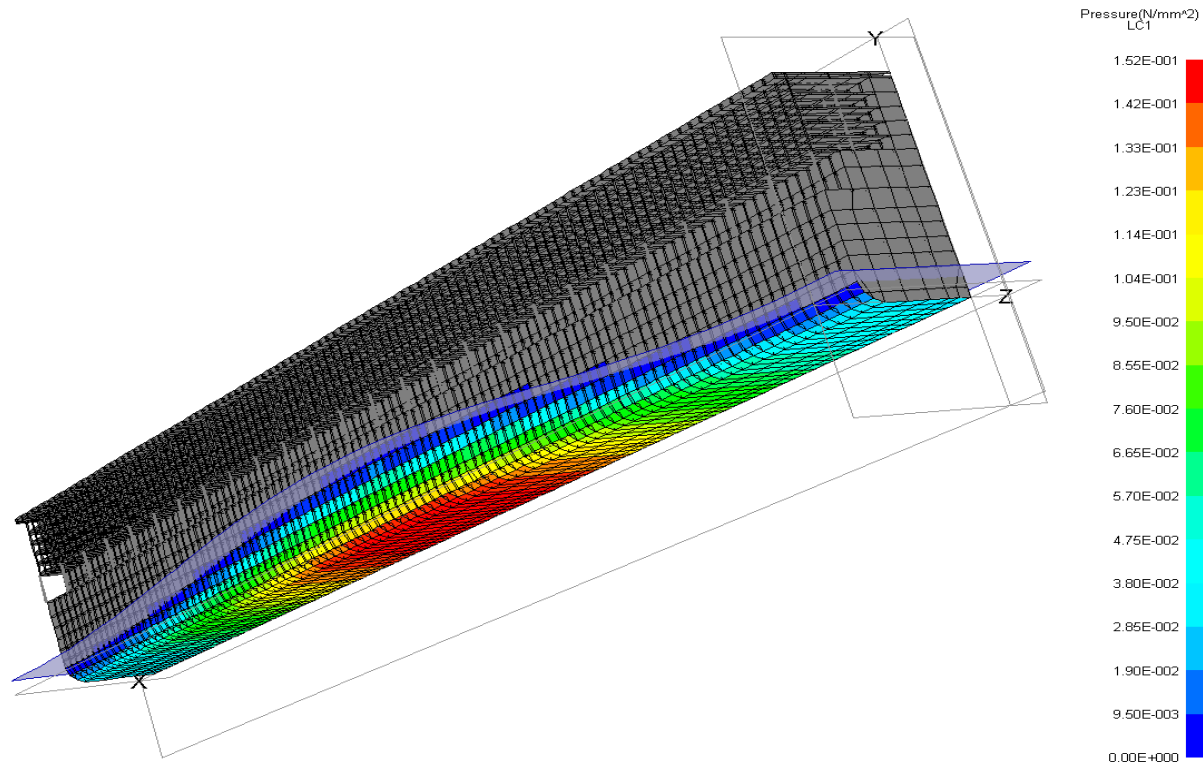
Slika 6. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti su implementirani na početnom rubu modela i na krajnjem rubu modela (vidi Sliku 6).

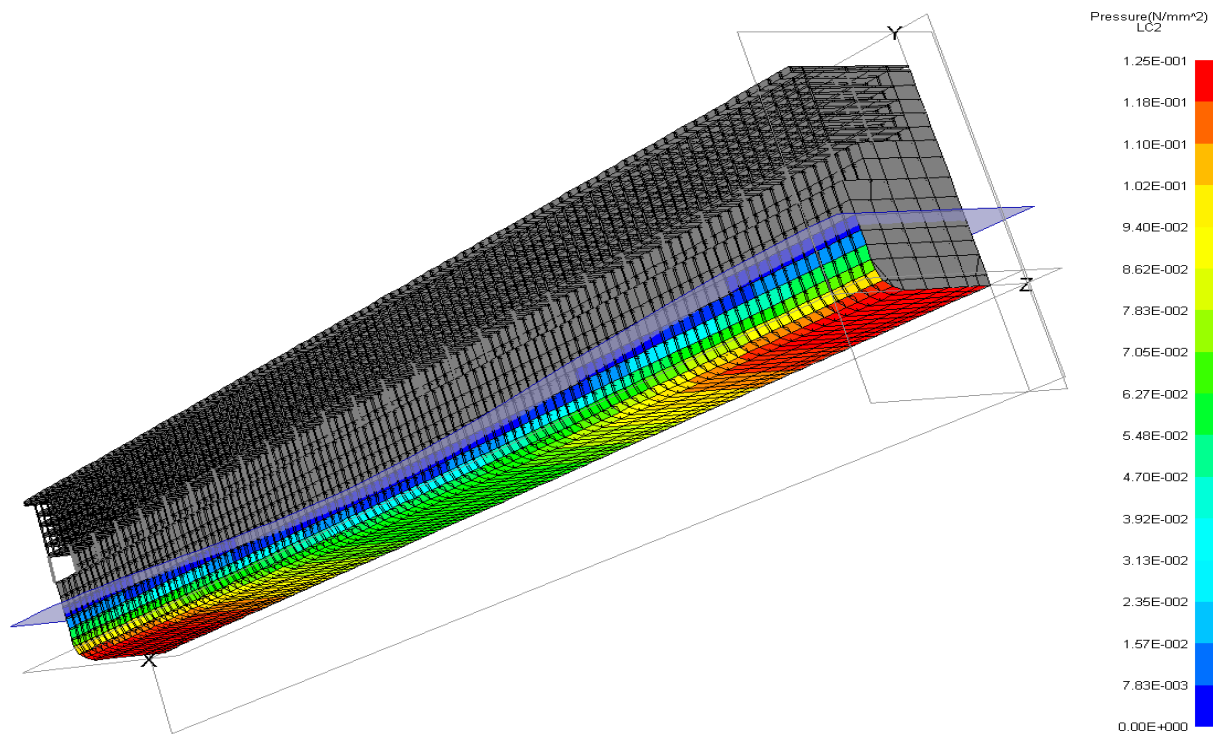
3.3. Model opterećenja

Forma razmatranog broda je fina forma sa blok koeficijentom oko $C_B = 0,6$ i ima relativno kontinuiran raspored vlastite težine i tereta (na kretanje putnika po brodu i palubama se ne može puno utjecati). To rezultira da je brod na mirnoj vodi u stanju pregiba tj. da ima višak težine na krajevima, a višak uzgona na sredini. Uslijed takve distribucije statičkog opterećenja, dobiveni statički momenti pregiba su vrlo visoki. Kombinacija maksimalnog statičkog (na mirnoj vodi) pregibnog momenta savijanja i maksimalnog valnog pregibnog momenta za rezultat daje najveća moguća uzdužna naprezanja. Suprotno tome kombinacija maksimalnog valnog progibnog momenta i minimalnog statičkog (na mirnoj vodi) pregibnog momenta savijanja daje mogućnost pojave tlačnih naprezanja na gornjim palubama. Dovođenje broda u takvo stanje se po svaku cijenu izbjegava jer tlačna naprezanja u gornjim palubama nadgrađa, koje su izrađene od tankih limova, mogu dovesti do izvijanja konstrukcije. Iz tog razloga promatrani brod se projektira tako da u najnepovoljnijoj kombinaciji momenata bude u pregibu ili u minimalnom progibu.

Zbog forme modela (ekstrudirani model izgleda poput grede, vidi Sliku 5.) koja nema izmodeliranu krmu i pramac, maksimalni momenti pregiba i progiba su simulirani pomoću sinusoidalnog vala kojemu se mijenjanjem dobivao valni brijeg i valni dol. Da bi se postigao maksimalni pregibni moment modelu je narinut val kojemu se valni brijeg nalazi na polovici modela, a valni dolovi se nalaze na krajevima modela, Slika 7. Tako se uspio dobiti predloškom zahtijevani maksimalni moment u pregibu. Za postizanje maksimalnog progibnog momenta zadanog u zadatku, modelu narinuti val sad ima valne brjegovе na početku i na kraju modela, a valni dol se nalazi na polovici modela, Slika 8. Vlastitu težinu modela program sam računa te je implementira kao silu u čvorovima. Slučajevi opterećenja su napravljeni u skladu sa Pravilima DNV-a za direktne kalkulacije [7].



Slika 7. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj pregiba - LC1



Slika 8. Distribucija tlaka po oplakanoj površini za slučaj progiba – LC2

Tablica 1. Slučajevi opterećenja

SLUČAJ OPTEREĆENJA	KRATKI OPIS
LC1	Maksimalni pregibni moment + puno opterećenje po palubama
LC2	Maksimalni progibni moment + puno opterećenje po palubama

Za direktni proračun metodom konačnih elemenata ukupni vertikalni moment savijanja za progib i pregib se računa po Pravilima DNV [3] prema izrazu:

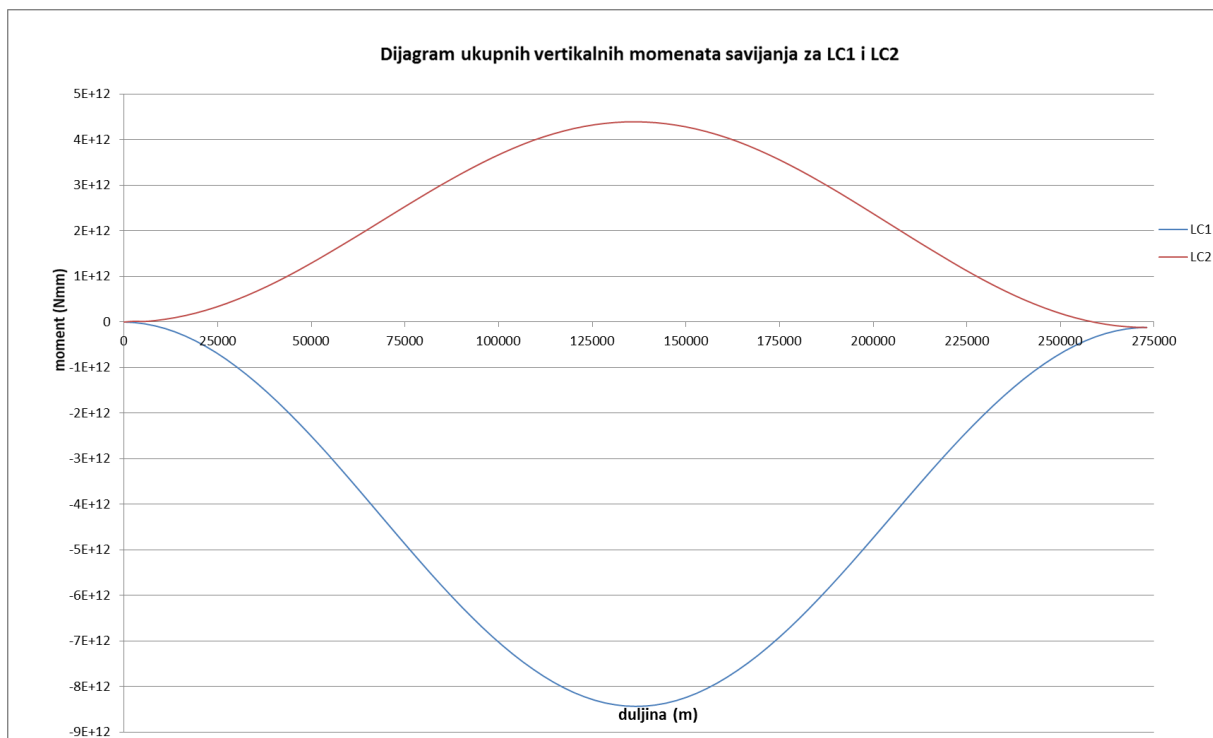
$$M_t = M_s + M_w \quad [\text{Nm}] \quad (3.1)$$

Proračun valnih momenata dan je u prilogu A. Prikaz komponenti vertikalnih momenata savijanja postignutog u proračunu, zadanih i postignutih dan je Tablicom 2

Tablica 2. Vertikalni momenti savijanja

Slučaj opterećenja	Slučaj krcanja	M_t prema DNV [kNm]	M_t korišten prema predlošku [kNm]	M_t MAESTRO postignuti [kNm]
LC1	Maks. Pregib	7 847 383	8 400 000	8 434 620
LC2	Maks. Progib	-4 932 641	-4 400 000	- 4 394 980

Vertikalni momenti savijanja korišteni u proračunu su vertikalni momenti prema predlošku. Dijagram ukupnih vertikalnih momenata savijanja za oba slučaja opterećenja (LC1 i LC2) prikazan je na Slici 9, dok je dijagram ukupnih vertikalnih poprečnih sila za oba slučaja opterećenja dan Slikom 10.

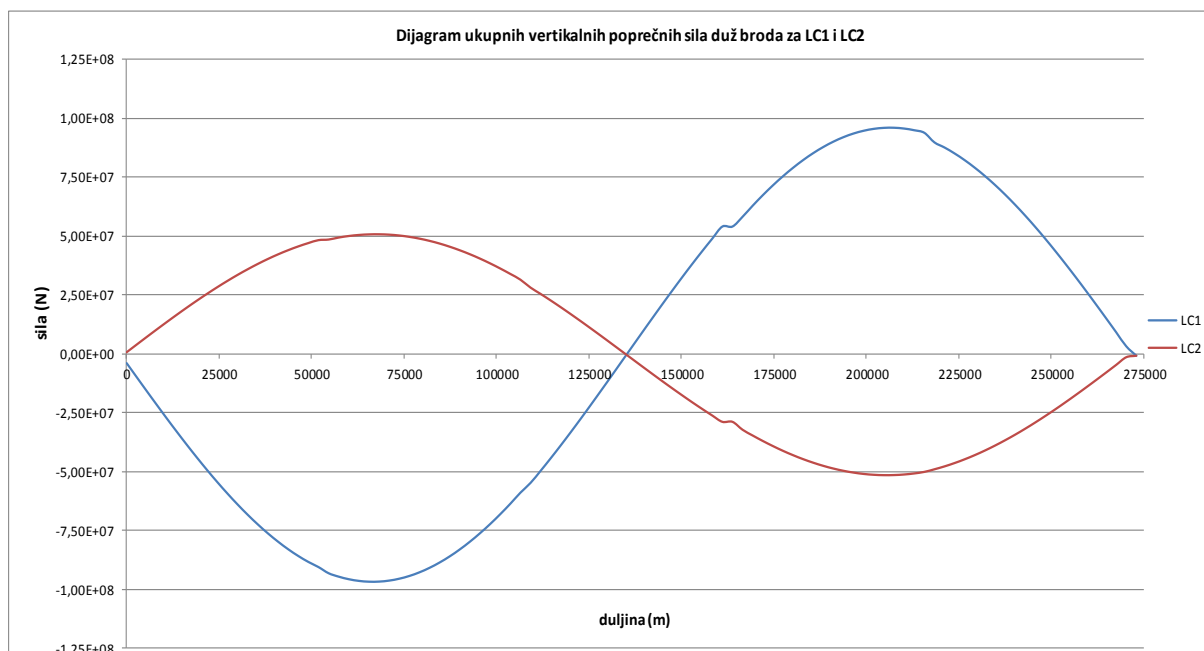


Slika 9. Distribucija ukupnih vertikalnih valnih momenata savijanja za LC1 i LC2

Predznak momenata u MAESTRO numeraciji je:

PROGIB pozitivan (+),

PREGIB negativan (-)



Slika 10. Distribucija ukupnih poprečnih sila duž broda za LC1 i LC2

Vertikalna opterećenja po akomodacijskim palubama su dobivena proračunom prema Pravilima DNV [5] izrazom:

$$p_5 = 0.35(g_0 + 0.5a_v) \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.2)$$

Gdje su

g_0 - akceleracija gravitacije [m/s^2]

a_v – vertikalna komponenta akceleracije [m/s^2]

Dok je vertikalno opterećenje na izloženom dijelu reces palube dobiveno prema Pravilima DNV [5] izrazom:

$$p_2 = (g_0 + 0.5a_v)q \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (3.3)$$

Gdje su :

g_0 - akceleracija gravitacije [m/s^2]

a_v – vertikalna komponenta akceleracije [m/s^2]

q – teret na palubama [t/m^2], ovisi o duljini broda

Detaljan proračun opterećenja po akomodacijskim palubama dan je u prilogu A.

4. ANALIZA PODOBNOSTI PROTOTIPNE KONSTRUKCIJE I PRIJEDLOGA RJEŠENJA

4.1. Podobnost konstrukcije

Za provođenje analize uzdužne čvrstoće unutar $0.4L$ po visini prvi korak je bila provjera podobnosti uzdužnih elemenata konstrukcije. U ovom koraku smo izrađenom MKE modelu narinuli slučajeve opterećenja LC1 i LC2, te smo odzivom konstrukcije, u vidu proračunom dobivenih naprezanja i deformacija, mogli uviditi koji elementi strukture ne zadovoljavaju kriterije podobnosti. Elementi koji ne zadovoljavaju će biti redimenzionirani, tj. odabirati će se prikladniji elementi za taj dio konstrukcije s većim momentom otpora W (uzdužnjaci) i/ili većom debljinom oplata nego postojeći. Model podobnosti nam daje informaciju o prekoračenju odziva konstrukcije i o nedovoljnoj sigurnosti elemenata strukture. Predstavljen je bibliotekom analitički zadanih projektnih kriterija – BIBLIOTEKA OGRANIČENJA koja ograničava izbor projektnih varijabli samo na one za koje će projekt konstrukcije biti podoban, odnosno koje će zadovoljiti sve projektne kriterije ograničenja. Biblioteku ograničenja čini matematička formulacija projektnih kriterija u formi projektnih ograničenja kao funkcije projektnih varijabli. Izlazne rezultate BIBLIOTEKE OGRANIČENJA predstavljaju, za pojedine kriterije ograničenja, vrijednosti za IZDRŽLJIVOST – C (*Capability*), ZAHTJEV – D (*Demand*) i PARAMETAR PODOBNOSTI – g (*adequacy parameter*). Odnos gore navedenih vrijednosti prikazan je u normaliziranom obliku, izrazom:

$$g = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D}$$

Gdje je:

g – faktor podobnosti $-1 \leq g \leq 1$

C – izdržljivost (*Capability*)

D – naprezanje (*Demand*)

γ – faktori sigurnosti

Parametar podobnosti g je rangiran između vrijednosti $+1$ ÷ -1 . Granični slučajevi su:

$$g \rightarrow 1 \quad \text{ako } D \rightarrow 0 \quad ; \quad g \rightarrow -1 \quad \text{ako } C \rightarrow 0$$

Sigurnost elemenata strukture je zadovoljena ako se vrijednosti parametra podobnosti nalaze između 0 i 1 ($g \geq 0$). U slučaju da pojedini element nije sposoban podnijeti opterećenje, faktor podobnosti g će biti negativan ($g < 0$). Model kriterija strukturne podobnosti prikazan je kroz Tablicu 3, a koristi se kao standardni set kriterija u programu MAESTRO [5], s tim da su faktori sigurnosti definirani prema zahtjevima DNV [3].

Kroz Tablicu 4 prikazana su dozvoljena naprezanja prema Pravilima DNV [3], gdje je σ dopušteno naprezanje, a f_1 faktor materijala koji iznosi:

$f_1 = 1,0$ za obični brodograđevni čelik

$f_1 = 1,28$ za čelik povišene čvrstoće AH32

Tablica 3 . Biblioteka kriterija programa MAESTRO i faktori sigurnosti prema DNV

Br.	Kriterij	Opis kriterija	γ_{DNV}
1	PCSF	Panel Collapse – Stiffener Flexure	1.04
2	PCCB	Panel Collapse – Combined Buckling (Biaxial+Shear)	1.04
3	PCMY	Panel Collapse – Membrane Yield	1.00
4	PCSB	Panel Collapse – Stiffener Buckling	1.04
5	PYTF	Panel Yield – Tension Flange	1.04
6	PYTP	Panel Yield – Tension Plate	1.04
7	PYCF	Panel Yield – Compression Flange	1.04
8	PYCP	Panel Yield – Compression Plate	1.04
9,10	PSPB	Panel Serviceability – Plate Bending	1.04
11	PFLB	Panel Failure – Local Buckling	1.10
12	GCT	Girder Collapse Tripping	1.18
13	GCCF	Girder Collapse Compression in Flange	1.18
14	GCCP	Girder Collapse Compression in Plate	1.18
15	GYCF	Girder Yield Compression in Flange	1.24
16	GYCP	Girder Yield Compression in Plate	1.24
17	GYTF	Girder Yield Tension in Flange	1.24
18	GYTP	Girder Yield in Tension in Plate	1.24
19-21	FCPH	Frame Collapse, Plastic Hinge	1.50
22-24	FYCF	Frame Yield, Compression in Flange	1.31
25-27	FYTF	Frame Yield, Tension in Flange	1.31
28-30	FYCP	Frame Yield, Compression in Plate	1.31
31-33	FYTP	Frame Yield, Tension in Plate	1.31

Tablica 4. Dozvoljena naprezanja prema Pravilima DNV [3]

Structure	Seagoing or harbour condition	Type of stress				Normal stress σ (N/mm ²)	Shear stress τ (N/mm ²)		Equivalent stress σ_e (N/mm ²)
		Hull girder stresses	Transverse bottom, side or deck girder stresses	Longitudinal bottom, side or deck girder stresses	Local stiffener bending stresses		One plate flange	Two plate flanges	
Longitudinal girders	Seagoing	X ¹⁾		X		190 f_1	90 f_1	100 f_1	
	Harbour	X ¹⁾		X		190 f_1	100 f_1	110 f_1	
Transverse and vertical girders	Seagoing		X			160 f_1	90 f_1	100 f_1	180 f_1
	Harbour		X			180 f_1	100 f_1	110 f_1	200 f_1
Girder brackets	Seagoing		(X)	(X)		200 f_1 ²⁾			
	Harbour		(X)	(X)		220 f_1 ²⁾			
Longitudinal stiffeners	Seagoing and harbour				X	160 f_1			
	Seagoing and harbour			X	X	180 f_1	90 f_1		
	Seagoing and harbour	X ¹⁾		X	X	245 f_1			
Transverse and vertical stiffeners	Seagoing and harbour		(X)	(X)	X	180 f_1			
Stiffener brackets	Seagoing and harbour		(X)	(X)	X	225 f_1			
X Stress component to be included (X) Stress component to be included when relevant 1) Includes the hull girder stresses at a probability of exceedance of 10^{-4} , see 406. 2) Shows allowable stress in the middle of the bracket's free edge. For brackets of unproven design, additional stress analysis in way of stress concentration areas may be required. Reference is made to acceptance criteria for local structure analysis, F300.									

Na osnovu dozvoljenih naprezanja definirani su faktori sigurnosti γ za MAESTRO kriterije popuštanja, vidi Tablicu 3. Zadani faktori sigurnosti uključuju i nepravilnosti u geometriji i zaostala naprezanja, budući da njihov utjecaj nije direktno uključen u formule.

Da bi se ostvarila željena podobnost konstrukcije, promatrani na razini ukrepljenog panela, posebna pažnja se obratila kriterijima izvijanja PCSF, PCCB, PFLB i PCSB.

PCSF – ovaj kriterij razmatra tri načina kolapsa panela koji su uzrokovani savijanjem i uzdužnom kompresijom ukrepe;

I način: oštećenje ukrepe uslijed izvijanja

II način: oštećenje oplata uslijed izvijanja

III način : kombinirano oštećenje ukrepe i oplata uslijed izvijanja

PCCB –elastično izvijanje ukrepljenog panela nastalo uslijed uzdužnih, poprečnih, smičnih naprezanja u vidu interakcijske formule.

PFLB – lokalno izvijanje (plastično ili elastično) oplata između ukrepa zbog kombiniranog naprezanja

PCSB – izvijanje ukrepa (lateralno- torzijsko)

Nakon što su pronađeni nezadovoljavajući elementi strukture predlažu se korekcije. One se sastoje od povećanja debljina oplata, ukrepa ili postavljanja ukrepa protiv izvijanja (*anti-buckling*).

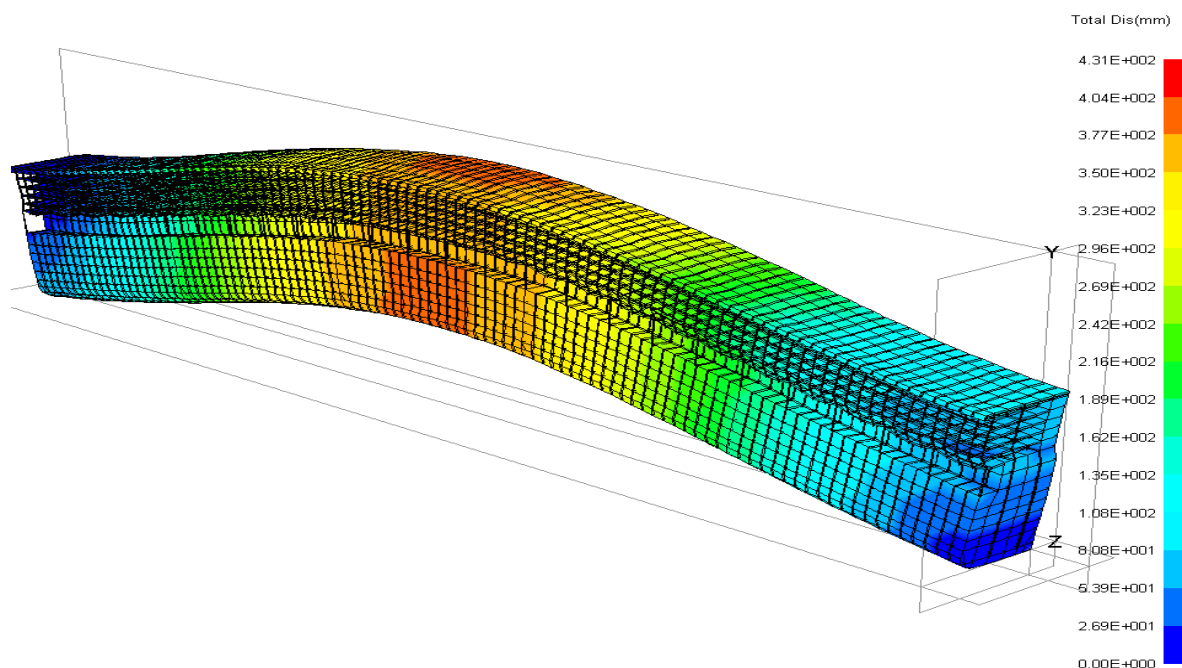
4.2. Analiza podobnosti prototipne konstrukcije, prijedlog rješenja i podobnost prijedloga rješenja

Nakon implementiranja slučajeva opterećenja prototipnoj konstrukciji u odzivu su pronađeni strukturni elementi konstrukcije koji ne zadovoljavaju kriterije dane Tablicom 3. Deformacija konstrukcije unutar 0,4L vidljiva je za LC1 na Slici 12, a za LC2 na Slici 13. Dijelovi strukture koji ne zadovoljavaju su najgornje i najdonje palube, palube oko recesa (D7 i D9), te uzdužna pregrada (LBHD) između paluba D9 i D11. Gornje palube i palube recesa nisu zadovoljavale kriterije u slučaju LC2 (progib) dok donje palube i navedeni dio uzdužne pregrade nisu zadovoljavali kriterijima u slučaju LC1 (pregib). Lokacija elemenata, njihove inicijalne dimenzije, načini oštećenja i prijedlog rješenja dani su Tablicom 5. Primjeri strukturnih elemenata inicijalne konstrukcije koji ne zadovoljavaju kriterije dani su Slikama 13 ÷ 16, a elementi finalne varijante konstrukcije dani su Slikama 20 ÷ 23. Slike 13 ÷ 16 i 20 ÷ 23 predstavljaju dio unutar 0,4L, radi lakšeg uvida u nepodobne elemente strukture samo su nepodobni elementi vidljivi. Slike 17 ÷ 19 i 24 ÷ 26 prikazuju cijeli model zbog prikaza distribucija primarnih naprezanja duž cijelog modela.

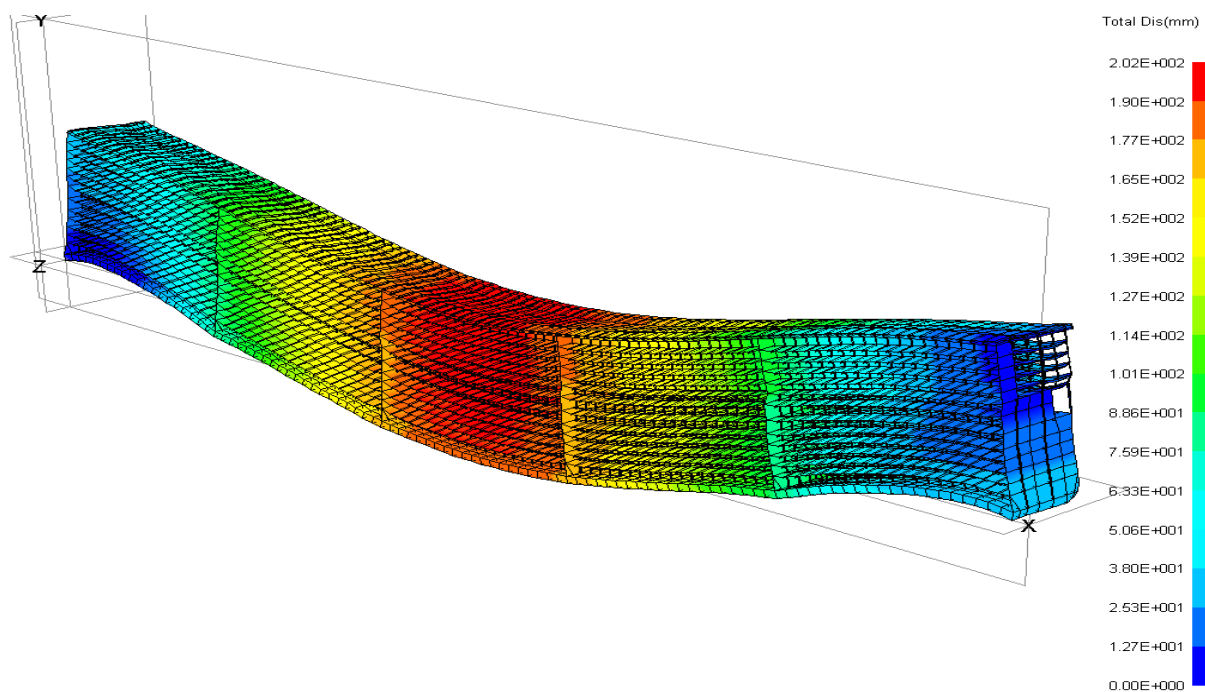
Tablica 5. Tablica s lokacijama oštećenja, prototipnim vrijednostima, tipovima oštećenja, prijedlogom rješenja i postignutim kriterijima

Lokacija	Prototip	Tip oštećenja i vrijednost kriterija (prototip)	Prijedlog rješenja	Tip oštećenja i vrijednost kriterija (prijedlog)
Paluba 15 -D15	t = 5 mm HP 80x7	PCCB = - 0.06 PCSB = -0.29 PCSF = - 0.272 PFLB = -0. 066	t = 7 mm HP 120x8	PCCB = 0.433 PCSB = 0.096 PCSF = 0.143 PFLB = 0.158
Paluba 14 - D14	t = 5 mm HP 80x7	PCCB = - 0.05 PCSF = -0.18 PCSB = - 0.257 PFLB = -0. 033	t = 6 mm HP 120x7	PCCB = 0.461 PCSF = 0.121 PCSB = 0.16 PFLB = 0.157
Paluba 13 - D13	t = 5 mm HP 80x7	PCSF = -0.114 PCSB = - 0.105	t = 6 mm HP 100x7	PCSF = 0.17 PCSF = 0.206
Paluba 9 - D9 (krajevi uz pop. pregradu)	t = 5 mm HP 80x7	PCCB = - 0.4 PCSF = -0.313 PCSB = -0.093	t = 7 mm HP 120x7	PCCB = 0.413 PCSF = 0.519 PCSB = 0.222
Paluba 7 - D7 (krajevi uz pop. pregradu)	t = 5 mm HP 80x7	PCCB = - 0.213 PCSF = -0.247	t = 7 mm HP 120x7	PCCB = 0.311 PCSF = 0.657
Paluba 4 -D4	t = 5 mm	PCSF = -0.247	t = 6 mm	PCSF = 0.052
Paluba 3 - D3	t = 5 mm HP 80x7	PCCB = - 0.334 PCSF = -0.372 PFLB = -0.152	t = 8 mm HP 120x7	PCCB = 0.225 PCSF = 0.765 PFLB = 0.225
Paluba 2 - D2	t = 5 mm HP 80x7	PCCB = - 0.365 PCSF = -0.456 PCSB = - 0.093 PFLB = -0. 243	t = 9 mm HP 140x7	PCCB = 0.276 PCSF = 0.154 PCSB = 0.382 PFLB = 0.194
Dno – D0	t = 16 mm HP 260x12	PCSF = -0.077 PFLB = -0.087	t = 17.5 mm HP 280x12	PCSF = 0.047 PFLB = -0.014
Uzdužna pregrada LBHD D9-D10	t = 8 mm HP 120x8	PCCB = -0,334 PCSF = -0.259 PFLB = -0.258	t = 10.5 mm HP 140x8	PCCB = 0.027 PCSF = 0.032 PFLB = -0.008
Uzdužna pregrada LBHD D10-D11	t = 8 mm HP 120x8	PCSF = -0.161 PFLB = -0.123	t = 9 mm HP 140x8	PCSF = 0.059 PFLB = -0.018

Da bi se riješili problemi prema kriteriju PFLB za izvijanje oplata uzdužne pregrade (LBHD) na poziciji između palube 9 ÷ 11 postavljaju se interkostalne ukrepe FB 100x10. Ovi problemi su vidljivi na Slici 23.

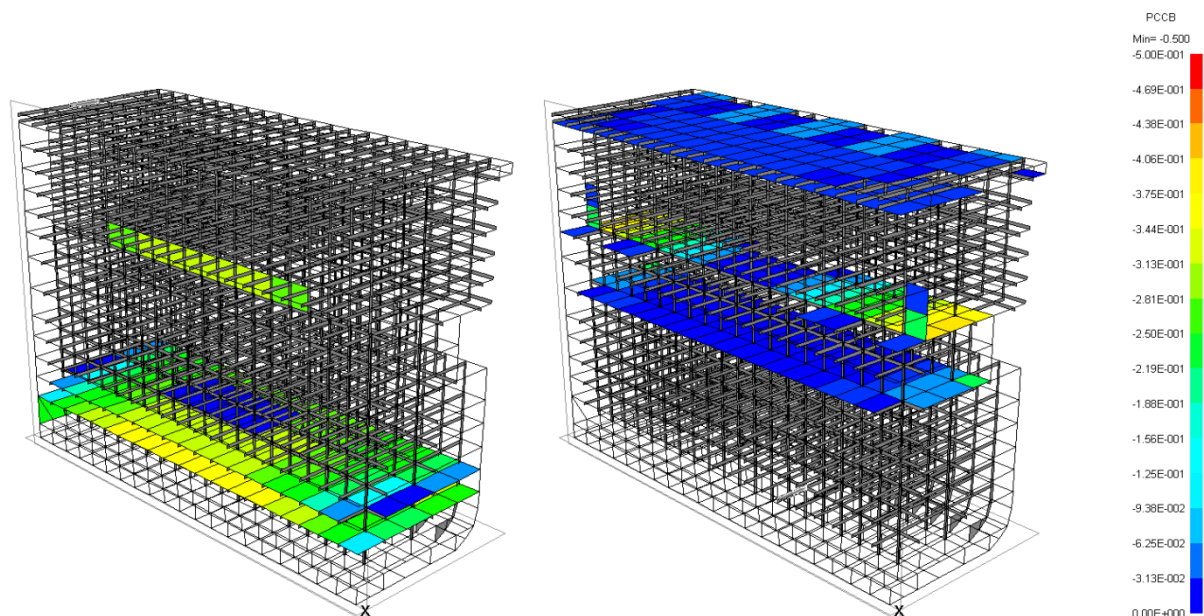


Slika 11. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela u pregibu-LC1

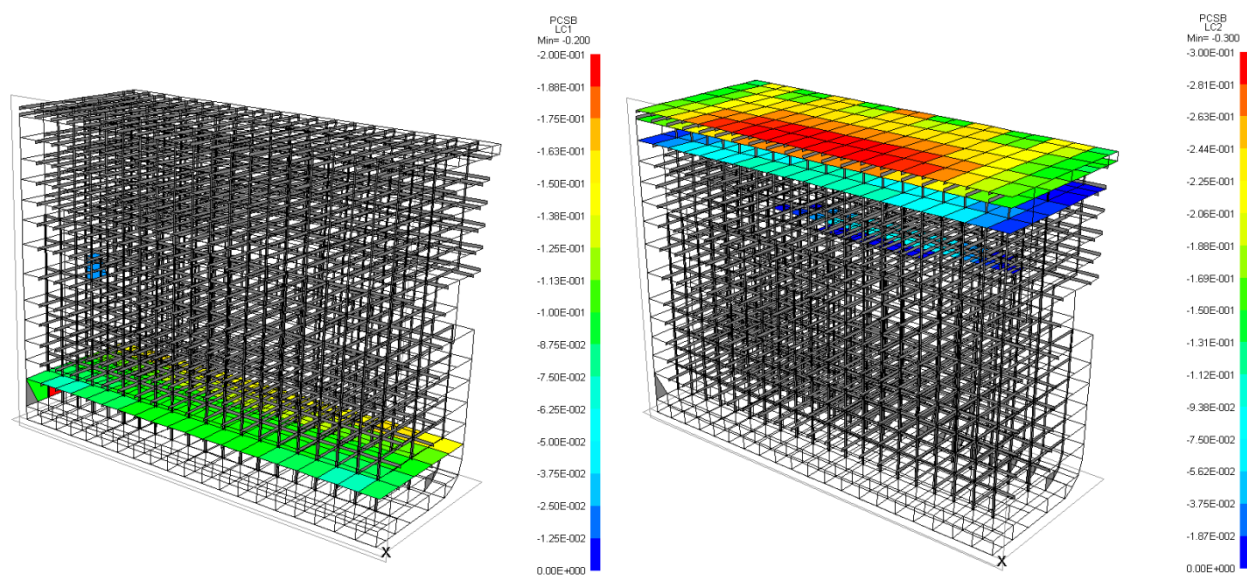


Slika 12. Prikaz pomaka promatranog prototipnog modela u progibu-LC2

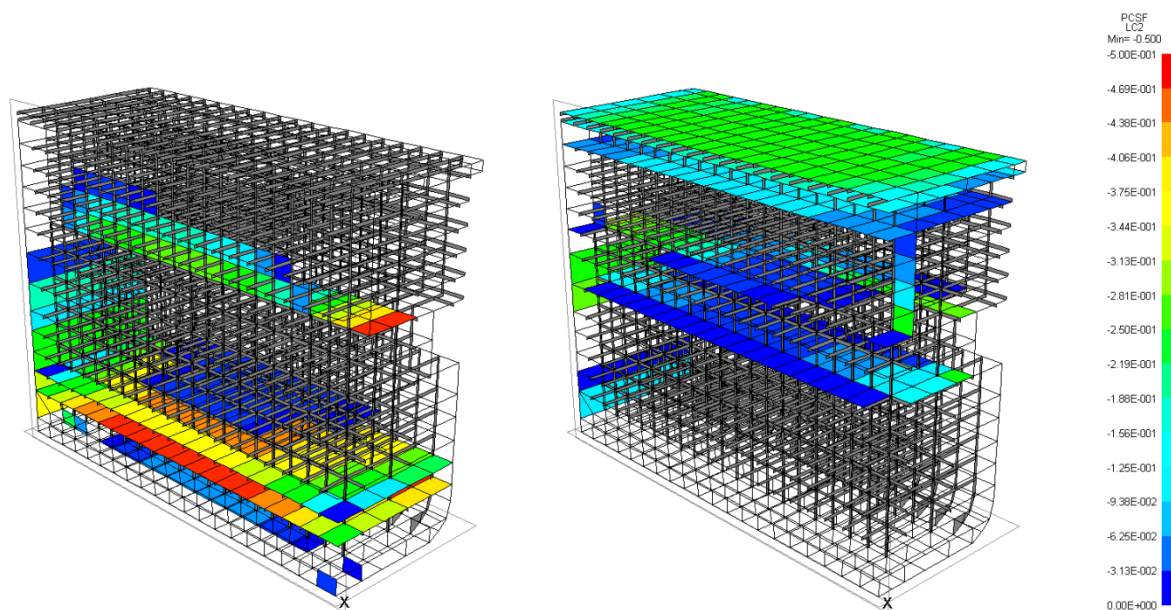
Najveće vertikalni pomaci promatranog prototipa modela su na sredini, za pregib $\delta = 404$ mm, a za progib $\delta = 202$ mm.



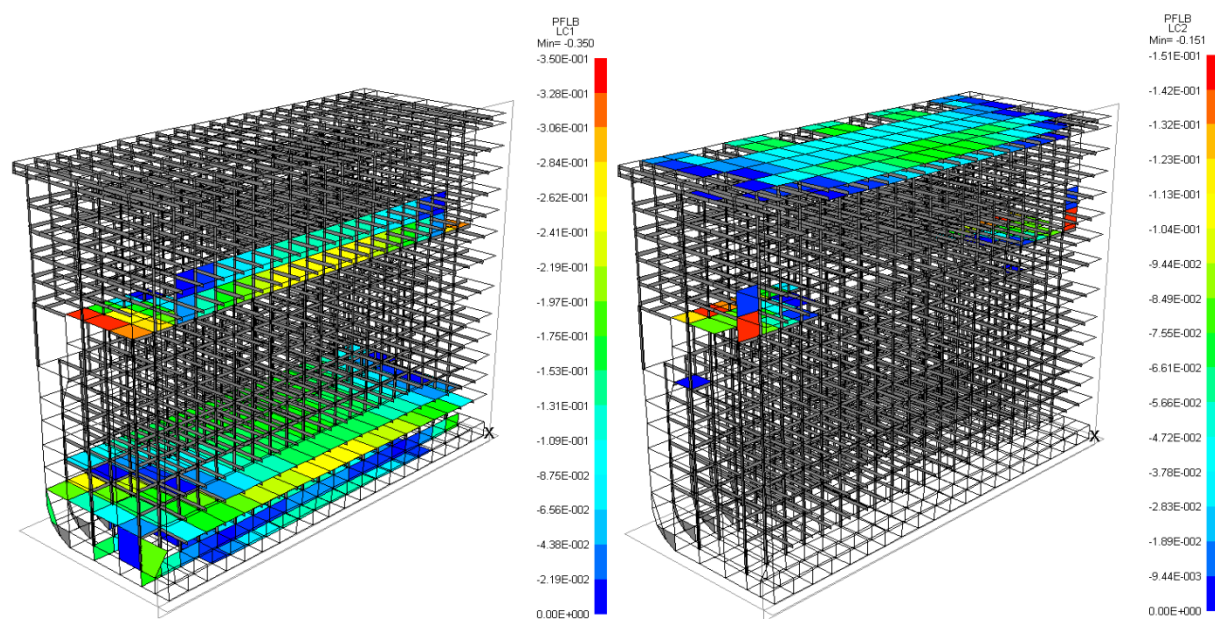
Slika 13. Postignuti faktori sigurnosti PCCB za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2



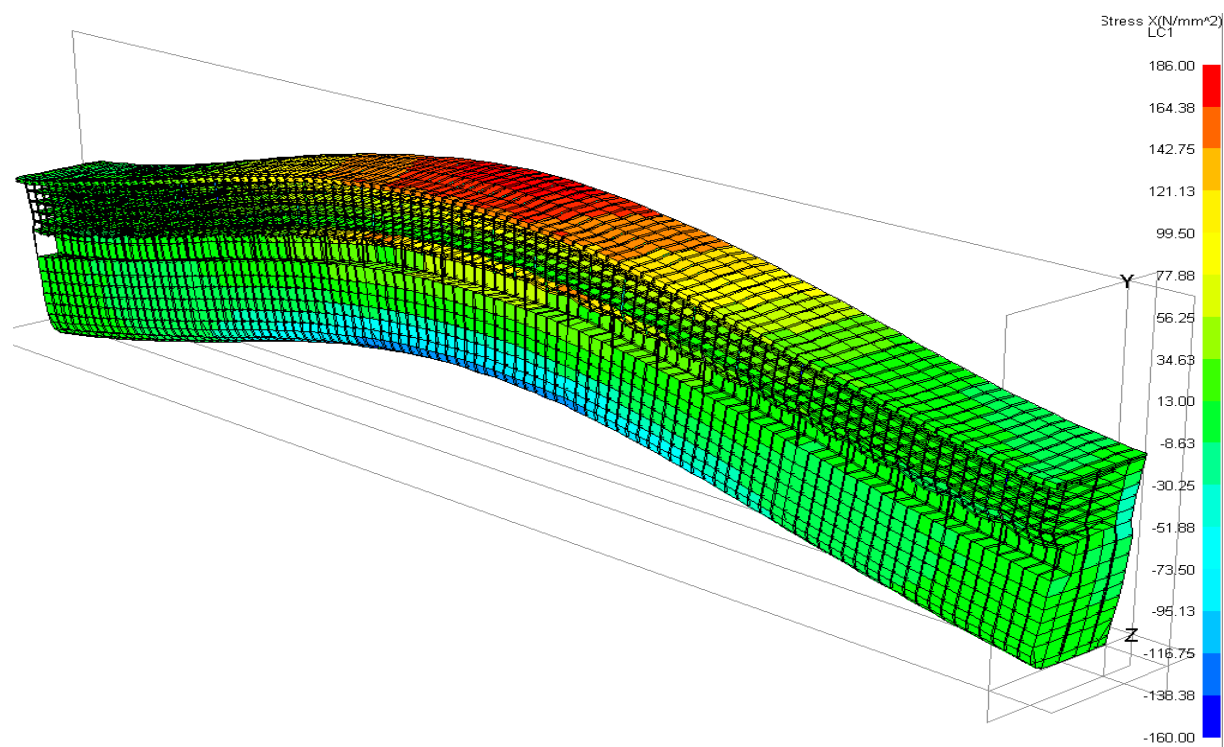
Slika 14. Postignuti faktori sigurnosti PCSB za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2



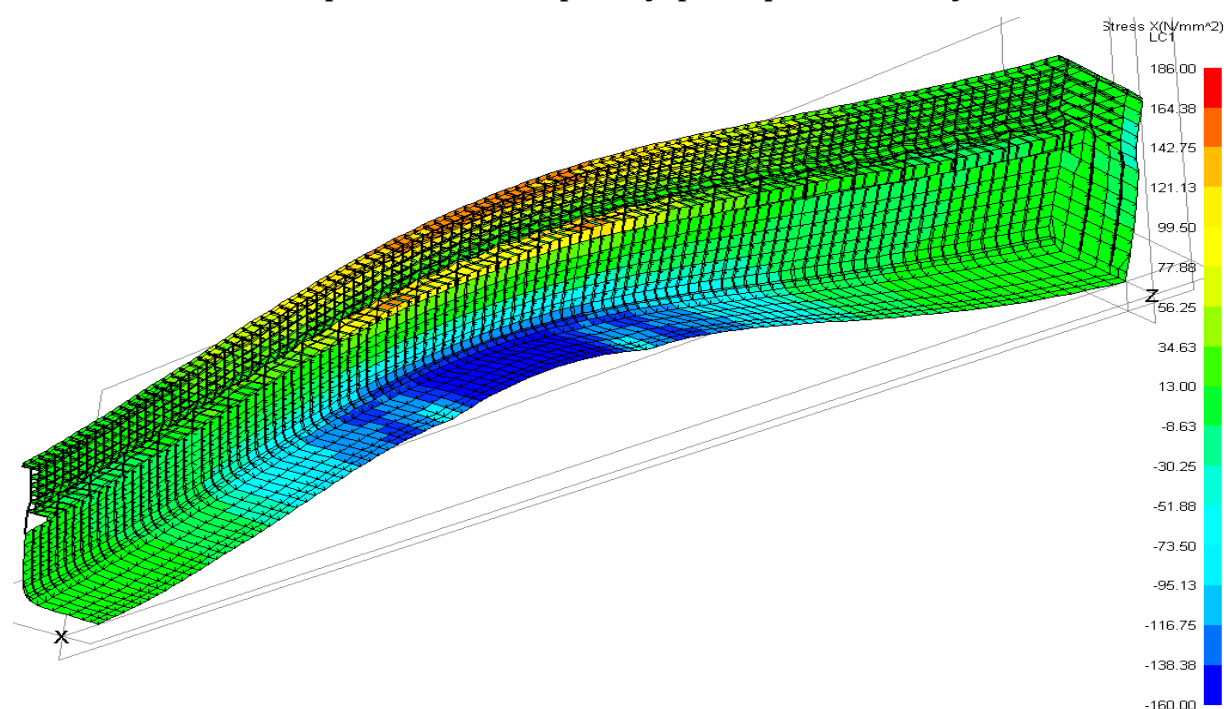
Slika 15. Postignuti faktori sigurnosti PCSF za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2



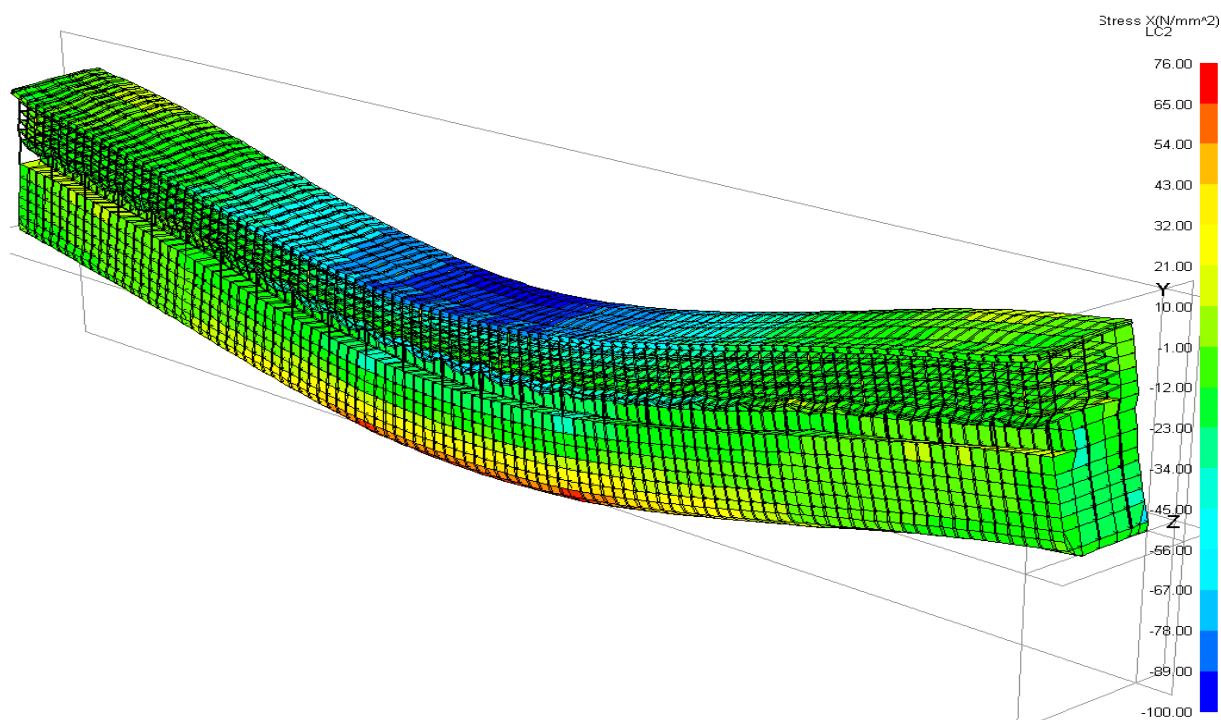
Slika 16. Postignuti faktori sigurnosti PFLB za prototipnu konstrukciju; lijevo LC1, desno LC2



Slika 17. Raspored uzdužnih naprežanja prototipne konstrukcije za LC1

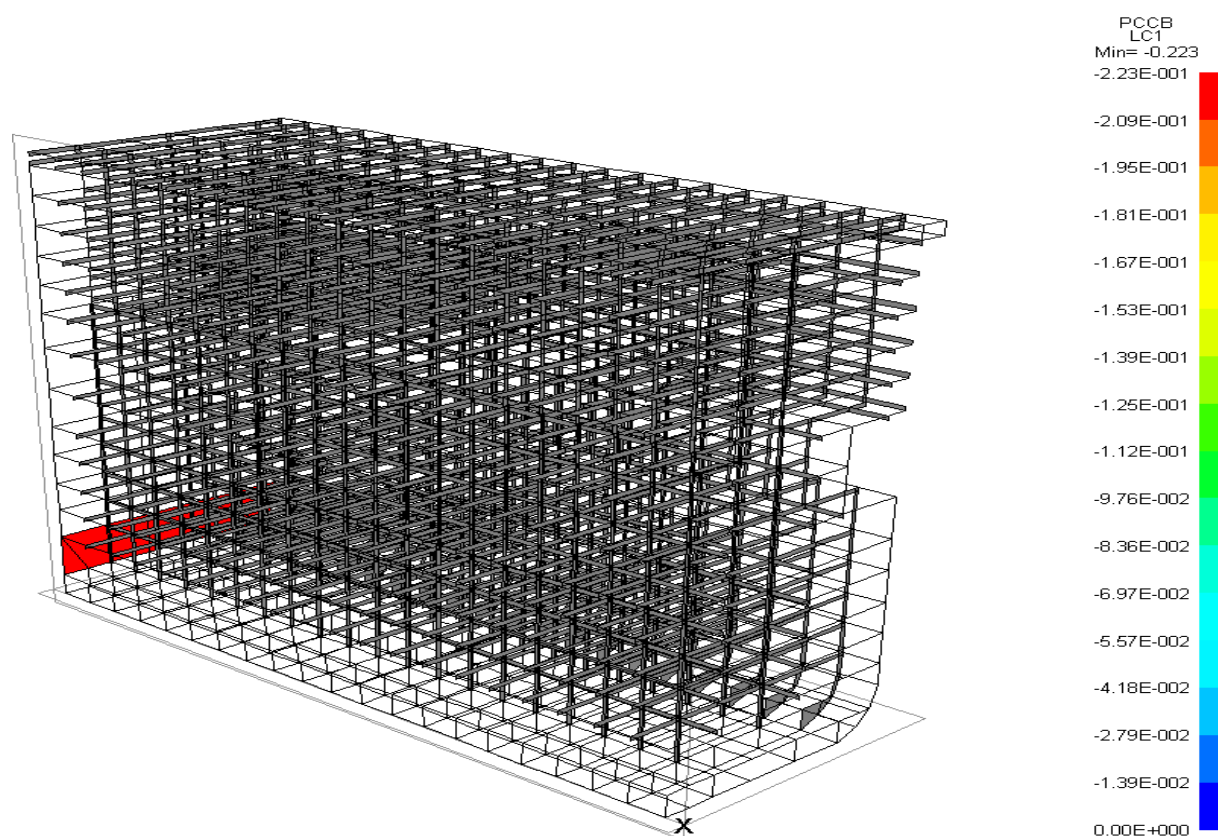


Slika 18. Raspored uzdužnih naprežanja prototipne konstrukcije za LC1, pogled na dno

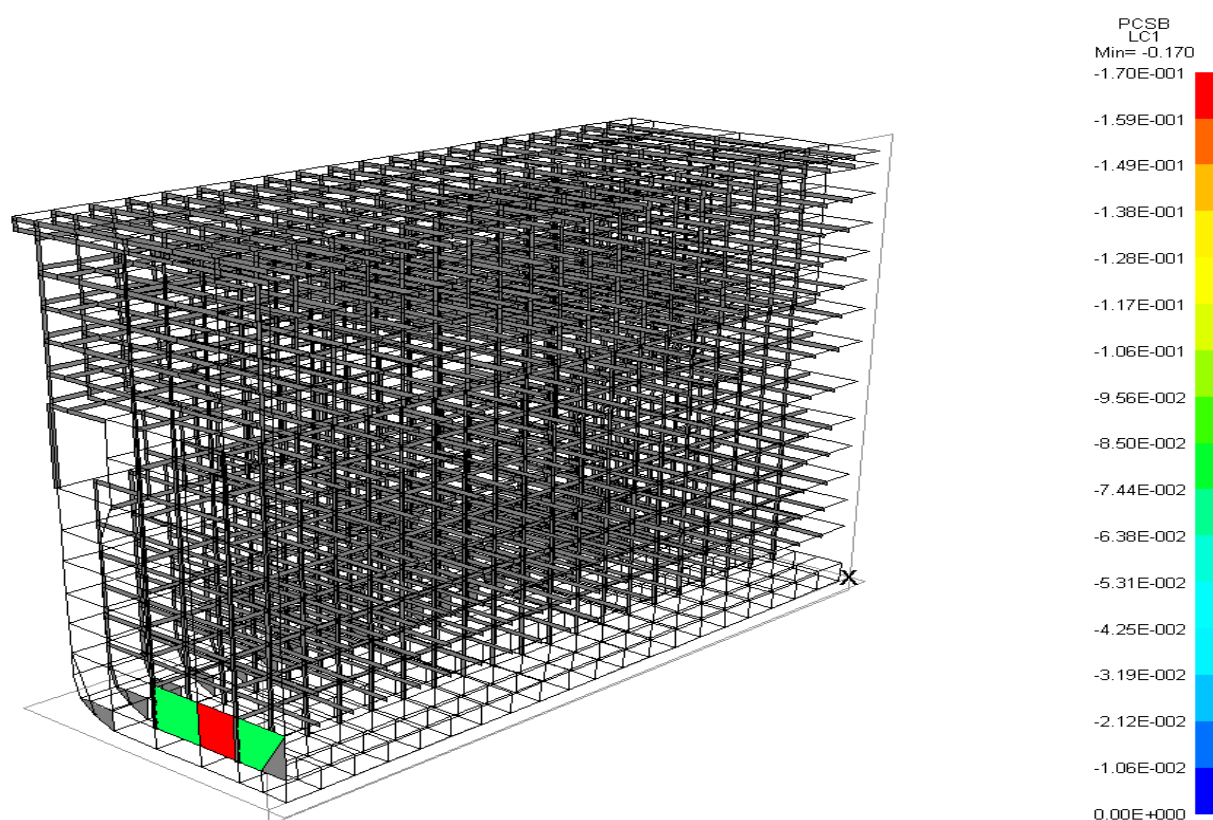


Slika 19. Raspored uzdužnih naprezanja prototipne konstrukcije za LC2

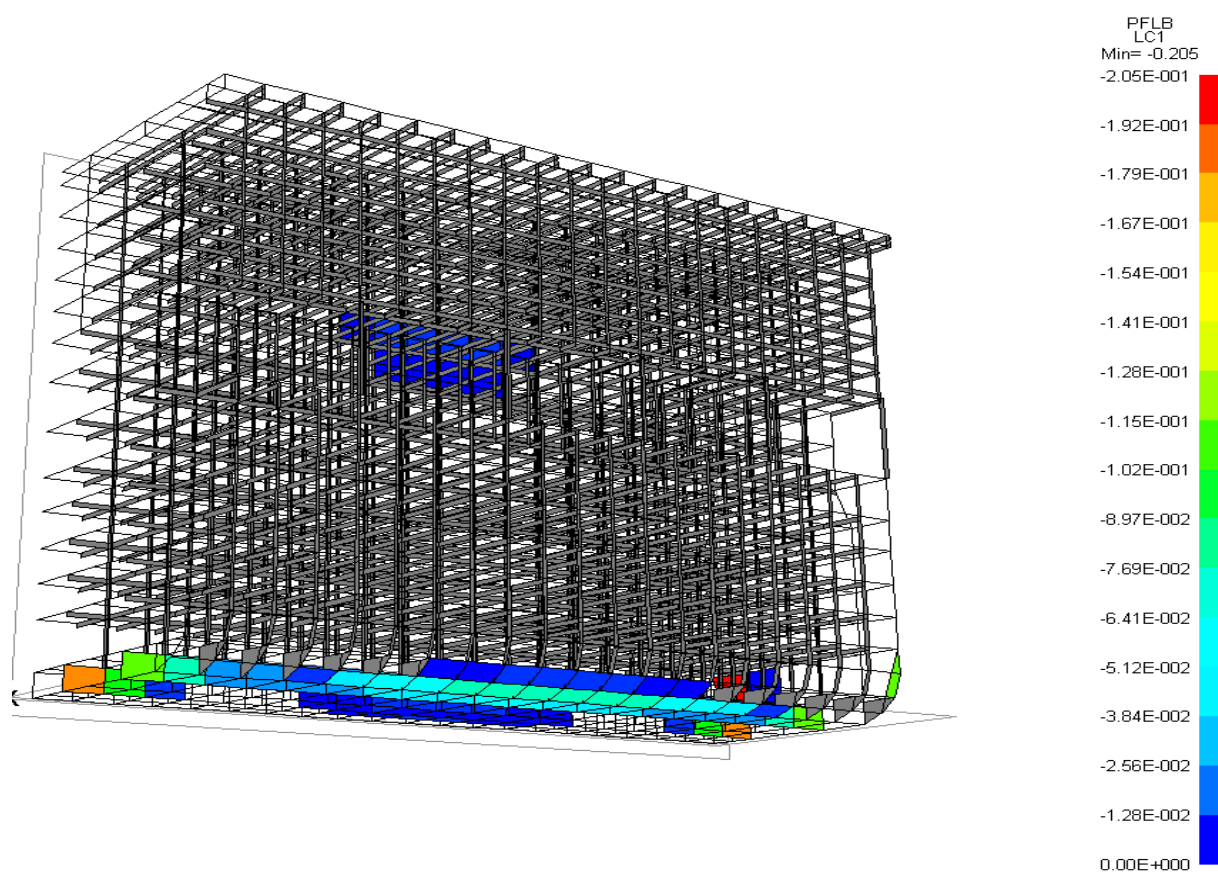
Pošto su u dnu naprezanja mala nema potrebe za slikom rasporeda naprezanja inicijalne konstrukcije sa pogledom na dno. Kod slika odziva finalne varijante konstrukcije za kriterije PCCB, PCSB i PFLB (Slika 20, 21, 22) nepodobni elementi su na poprečnoj pregradi, a to je zbog velikih smičnih naprezanja i to samo u slučaju opterećenja LC1. U slučaju opterećenja LC2, za iste kriterije PCCB, PCSB i PFLB, naprezanja koja se javljaju u konstrukciji su mala pa nema nepodobnih elemenata, stoga slike s njihovim prikazima nisu dane. Raspored smičnih naprezanja u finalnoj varijanti konstrukcije prikazana su Slikom 27. Nositelji smičnih naprezanja su poprečne i uzdužne pregrade, bok i palube koje zatvaraju konstrukciju, a maksimalna smična naprezanja su u spojevima navedenih nositelja.



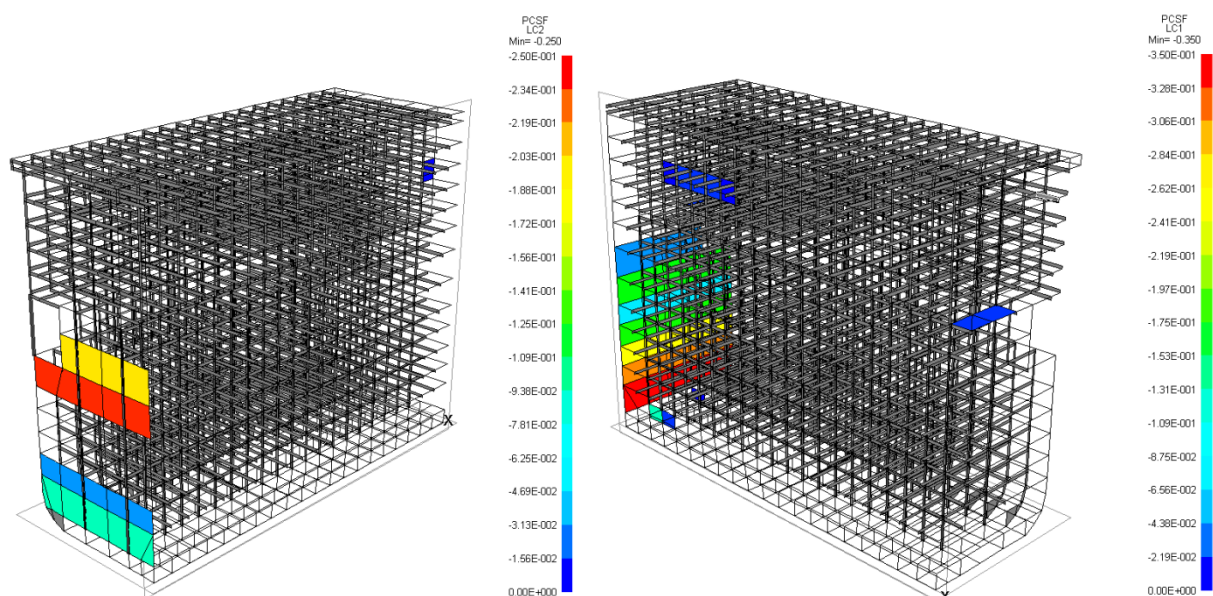
Slika 20. Postignuti faktori sigurnosti PCCB za prijedlog rješenja konstrukcije



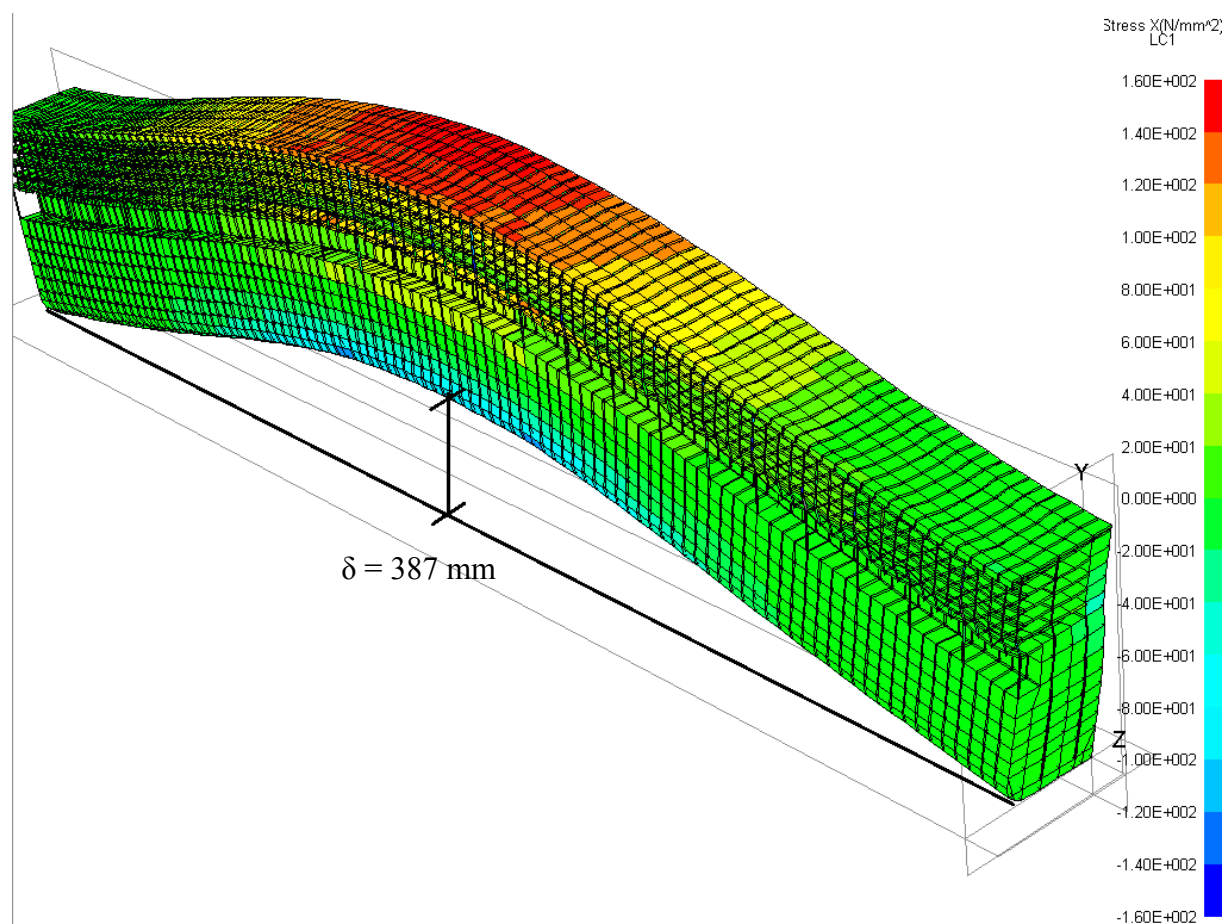
Slika 21. Postignuti faktori sigurnosti PCSB za prijedlog rješenja konstrukcije



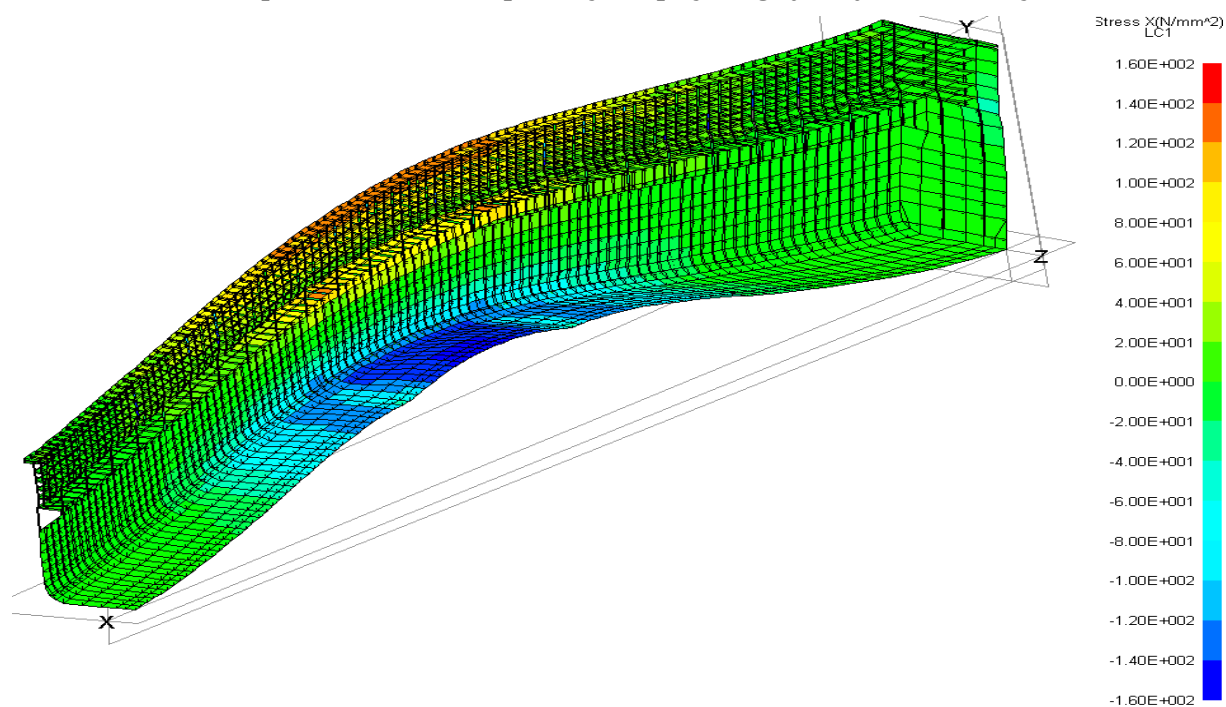
Slika 22. Postignuti faktori sigurnosti PFLB za prijedlog rješenja konstrukcije



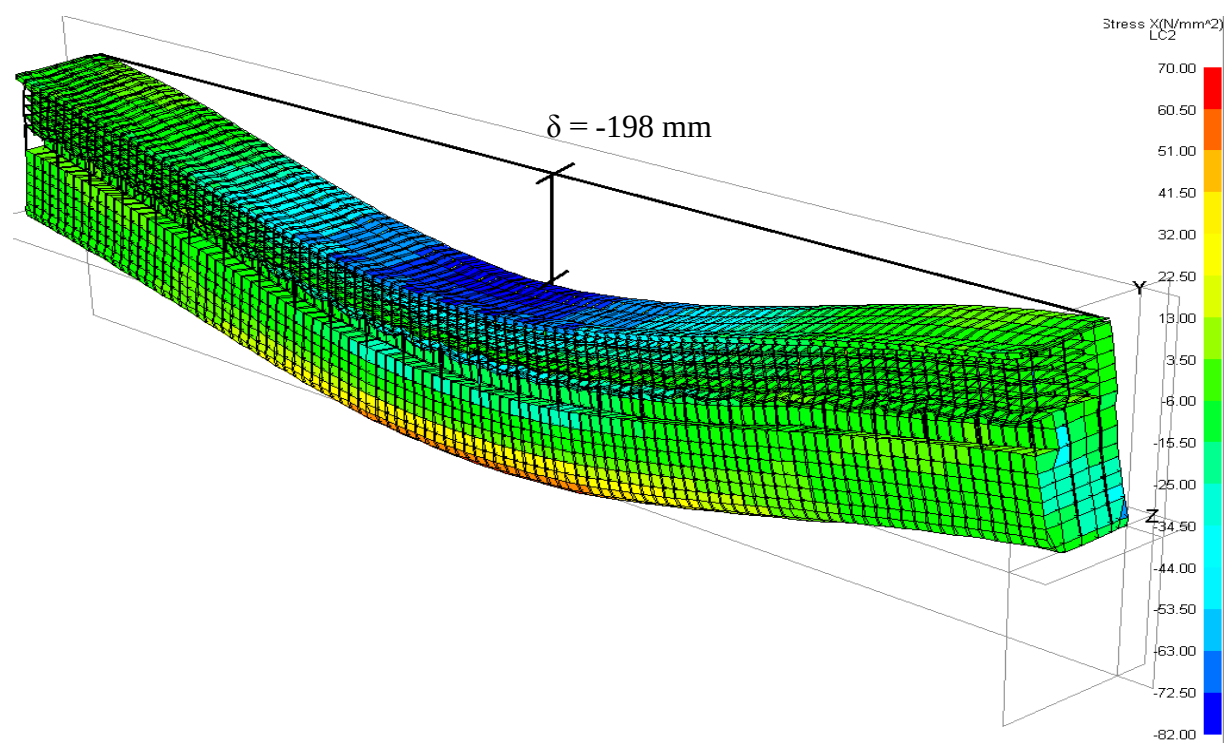
Slika 23. Postignuti faktori sigurnosti PCSF za prijedlog rješenja konstrukcije za oba slučaja naprežanja, lijevo LC2, desno LC1



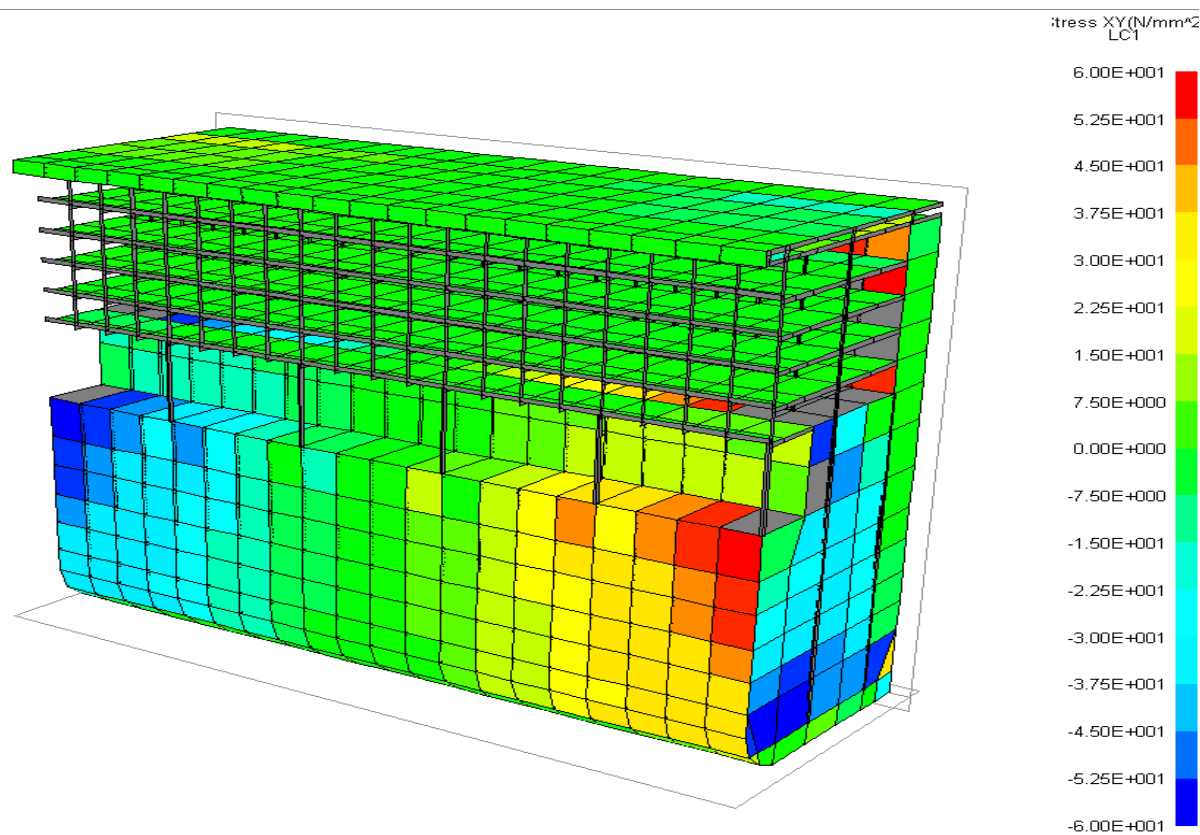
Slika 24. Raspored uzdužnih napreznja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1



Slika 25. Raspored uzdužnih napreznja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC1, pogled od dolje



Slika 26. Raspored uzdužnih naprezanja za prijedlog rješenja konstrukcije za LC2



Slika 27. Raspored smičnih naprezanja u prijedlogu rješenja konstrukcije

5. ANALIZA DISTRIBUCIJE PRIMARNIH NAPREZANJA PO VISINI TRUPA UNUTAR 0,4L

5.1. Analiza distribucije primarnih naprezanja po visini trupa unutar 0,4L

Za analizu naprezanja po visini uspoređivali smo očitana normalna σ_x naprezanja po visini trupa na CL, B/4 i B/2 za oba slučaja opterećenja, LC1 i LC2, na tri različite pozicije, Pozicija 1, Pozicija 2 i Pozicija 3, vidi sliku 4. Rezultati su prikazani dijagramima na Slikama 28 ÷ 33. U dijagrame je unesena i teoretska raspodjela normalnih σ_x naprezanja prema teoriji grede za slučajeve da nadgrađe iznad palube D9 ne pridonosi uzdužnoj čvrstoći (0% efikasnosti) i da potpuno sudjeluje (100% efikasnosti).

Za slučaj od 0% efikasnosti nadgrađa računata su normalna naprezanja u palubi D9 i u dnu, prema izrazu:

$$\sigma_{xP} = \frac{M_t}{I_{zz}} \eta_P \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (5.1)$$

$$\sigma_{xD} = \frac{M_t}{I_{zz}} \eta_D \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (5.2)$$

Gdje je :

M_t – ukupni vertikalni moment savijanja na promatranom presjeku

I_{zz} – moment inercije poprečnog presjeka trupa do palube D9

η_P, η_D – udaljenost palube D9, odnosno dna od neutralne linije

U palubama iznad palube D9 pretpostavlja se da su normalna naprezanja jednaka nuli.

Za slučaj 100% efikasnosti nadgrađa računata su normalna naprezanja u najgornjoj palubi nadgrađa (palubi 15), odnosno dnu prema gornjim izrazima uz:

I_{zz} – moment inercije poprečnog presjeka trupa do palube D9

η_P, η_D – udaljenost palube D15, odnosno dna od neutralne linije

U Tablicama 6 dane su sve gore spomenute vrijednosti za sve tri pozicije, u oba slučaja opterećenja, za slučajeve 0% efikasnosti nadgrađa i potpune efikasnosti. Veličine momenata inercije dobivene su iz programa MAESTRO, a iznos momenta inercije do palube 9 dobiven je uklanjanjem iz modela svih paluba iznad palube 9. Momenti savijanja iščitani su iz dijagrama ukupnih vertikalnih momenata savijanja (Slika 12).

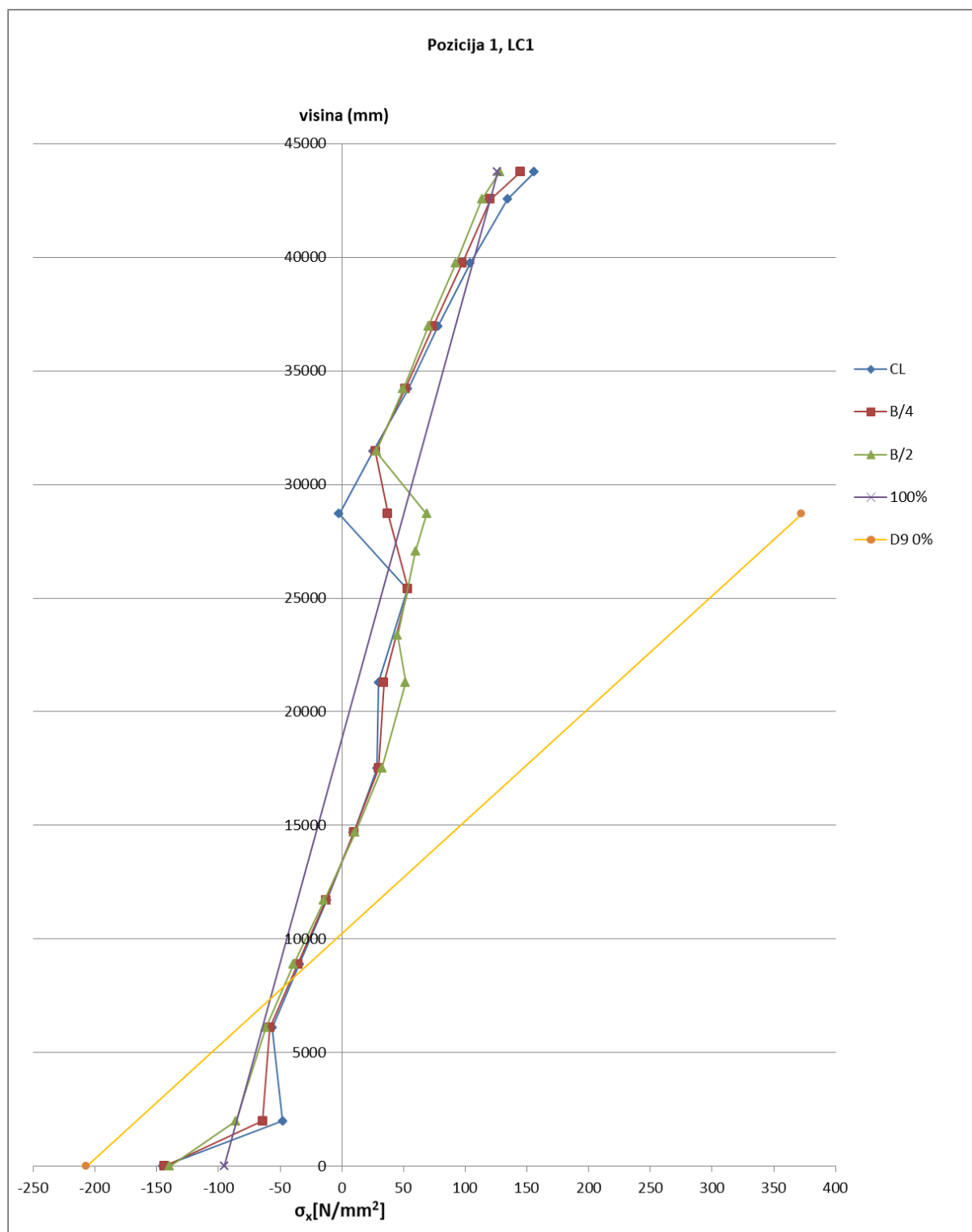
Tablica 6. Vrijednosti pri neefikasnom nadgrađu za slučajeve LC1 i LC2

LC1	I_{zz} [mm ⁴]	η_D [mm]	η_P [mm]	M_t [Nmm]	σ_{xD} [N/mm ²]	σ_{xP} [N/mm ²]
Pozicija 1	4,17467E+14	10254,6	18445,4	8,43E+12	-207,07	372,47
Pozicija 2	4,17467E+14	10254,6	18445,4	8,223E+12	-201,98	363,31
Pozicija 3	4,17467E+14	10254,6	18445,4	7,62E+12	-187,18	336,68
LC2	I_{zz} [mm ⁴]	η_D [mm]	η_P [mm]	M_t [Nmm]	σ_{xD} [N/mm ²]	σ_{xP} [N/mm ²]
Pozicija 1	1,66528E+15	10254,6	18445,4	-4,4E+12	108,08	-194,41
Pozicija 2	1,66528E+15	10254,6	18445,4	-4,225E+12	103,78	-186,68
Pozicija 3	1,66528E+15	10254,6	18445,4	-3,985E+12	97,89	-176,07

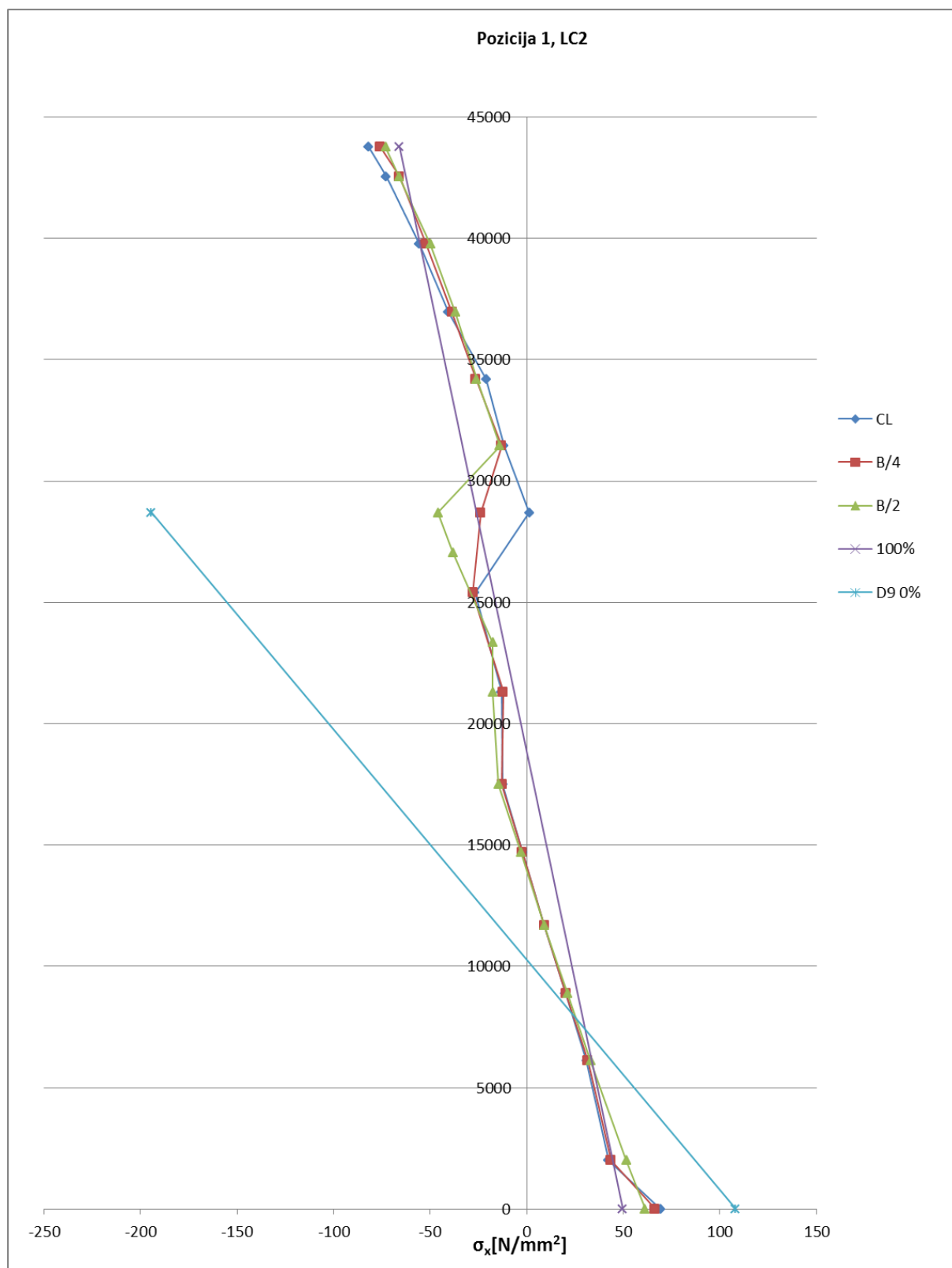
Tablica 7. Usporedba momenata otpora inercije i otpora presjeka glavnog rebra

Zahtjev DNV		Projektirana konstrukcija		
			0% efikasnosti nadgrađa iznad D9	100 % efikanosti nadgrađa do D15
I_{min} [cm ⁴]	3,25 E+10	I_{min} [cm ⁴]	4,17 E+10	1,60 E+11
W_{min} [cm ³]	3,97 E+7	W_{DNA} [cm ³]	4,07 E+7	1,60 E+8
		W_{PALUBA} [cm ³]	2,22 E+7	6,60 E+7

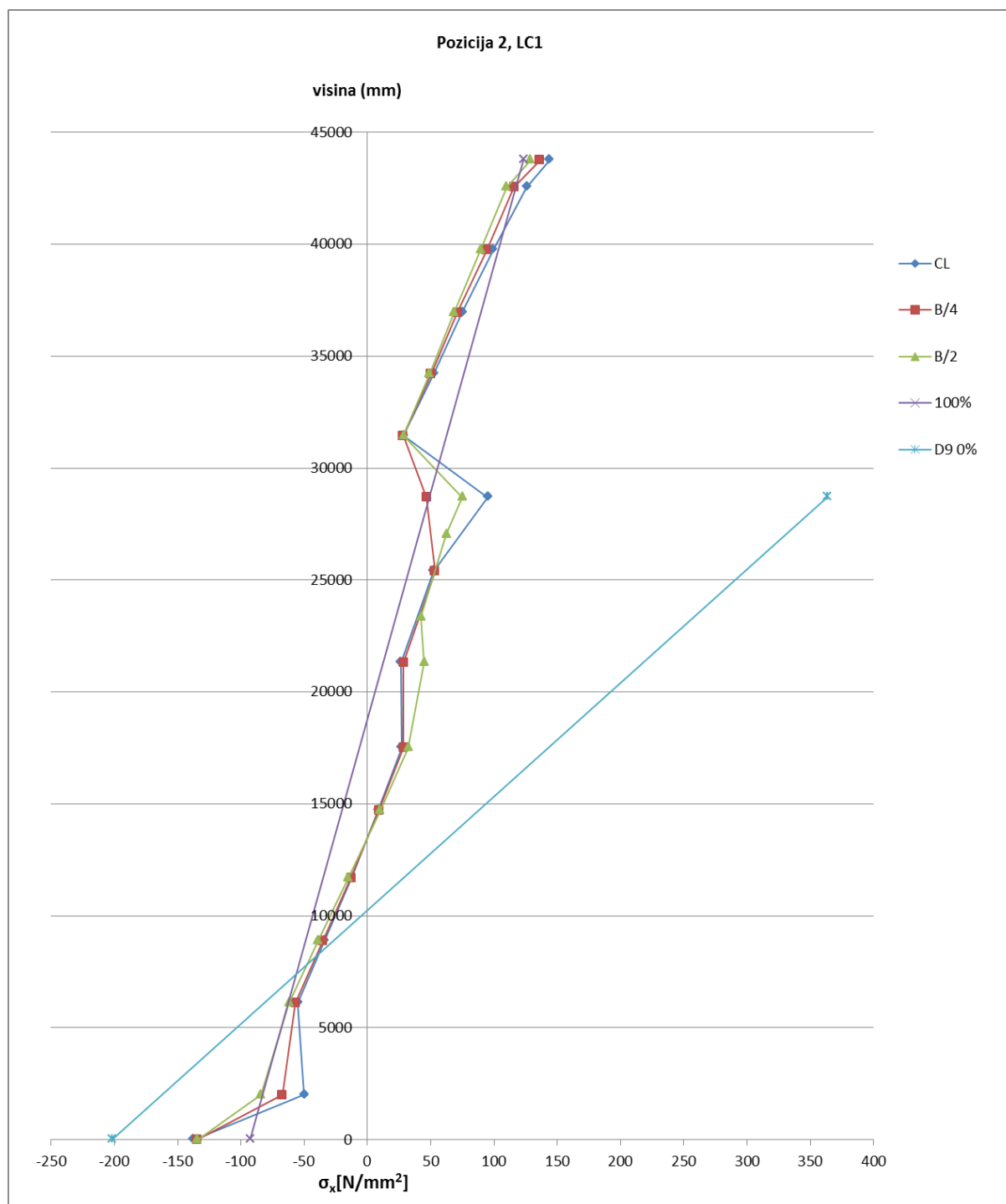
U Tablici 7 dana je usporedba minimalnog zahtjevanog momenta inercije i momenta otpora po Pravilima DNV [3] i dobivenog u konstrukciji za 0% i 100% efikasnosti nadgrađa iznad palube D9.



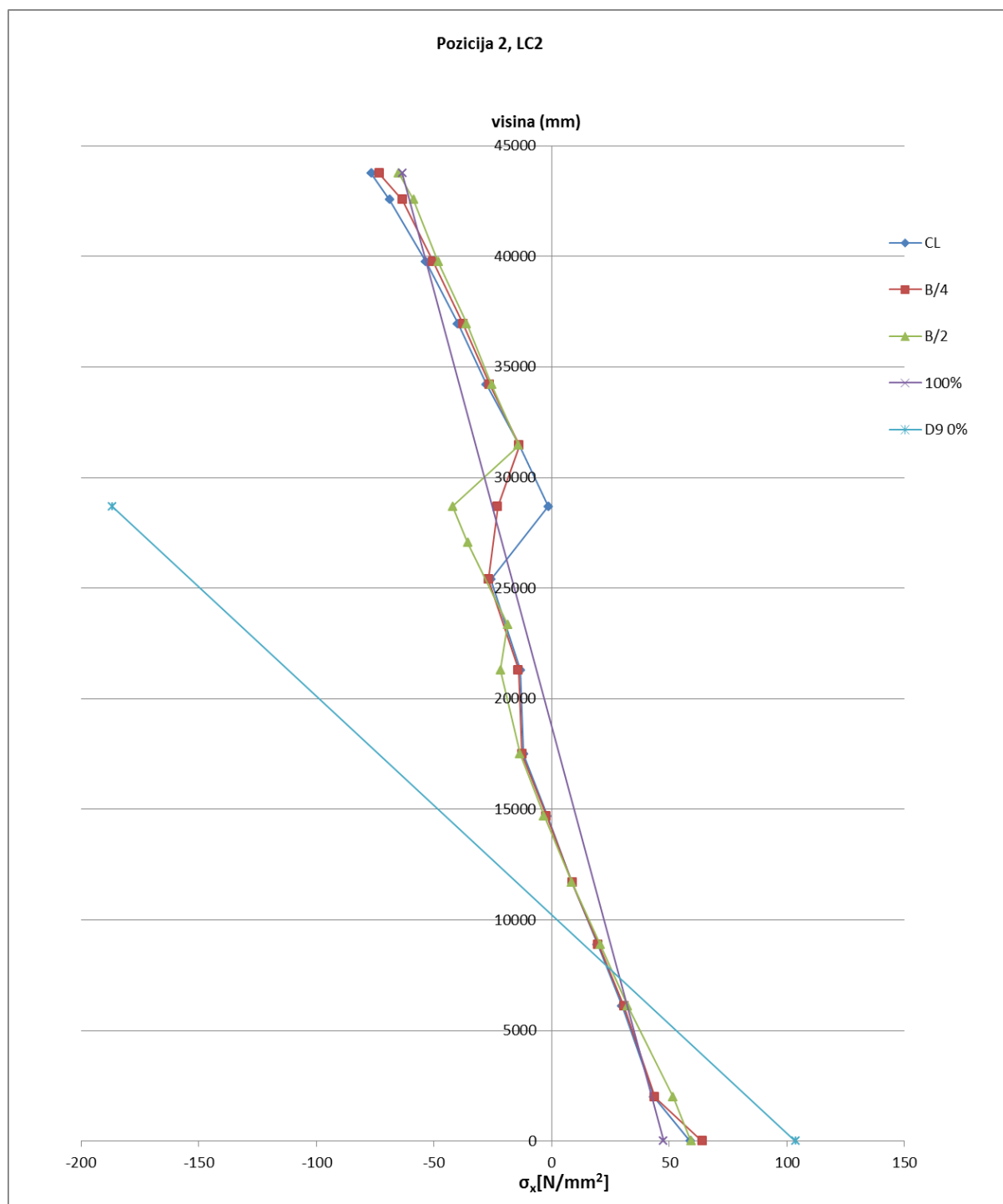
Slika 28. Prikaz rasporeda uzdužnih napreznja po visini trupa broda na poziciji 1 u slučaju opterećenja LC1



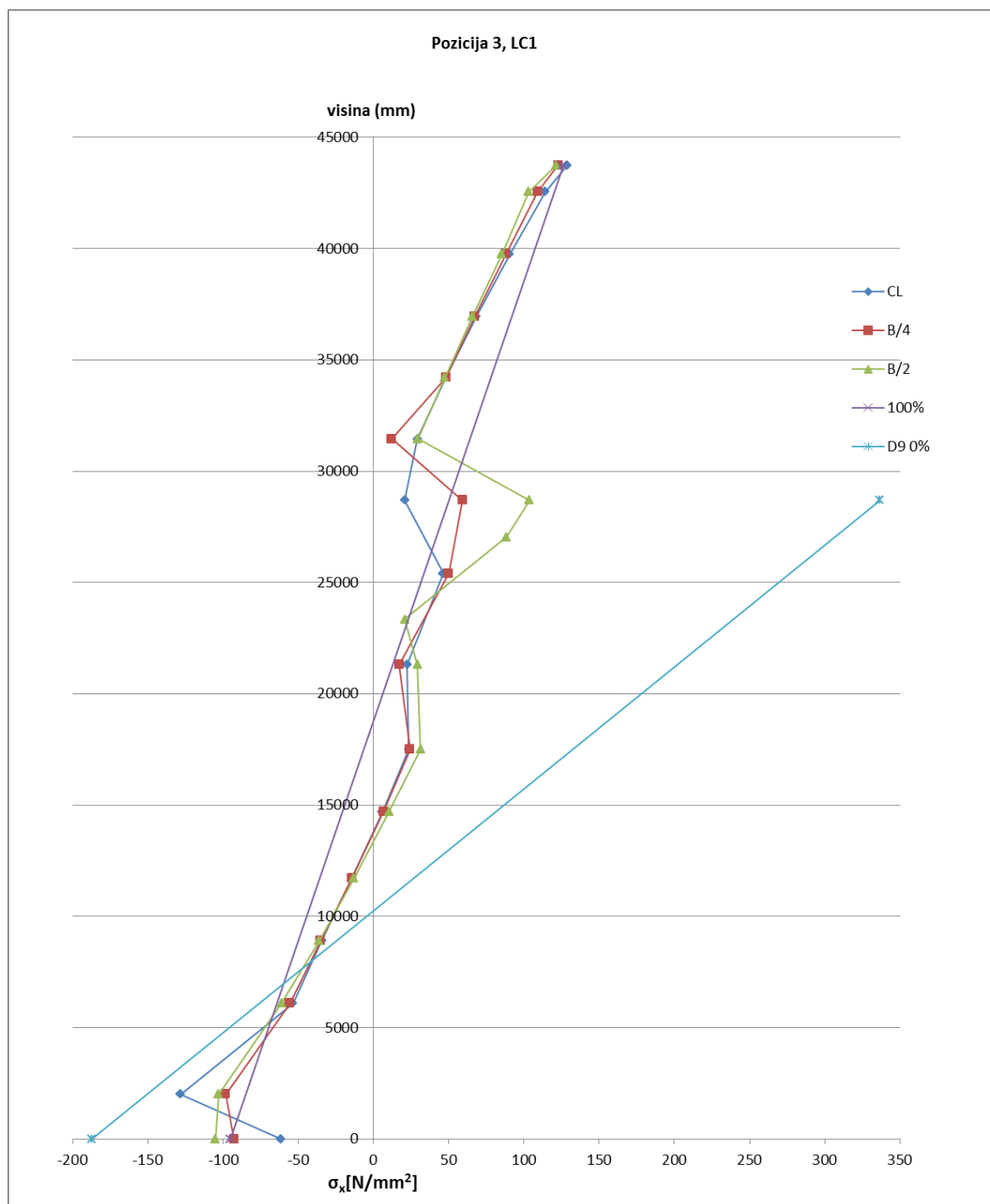
Slika 29. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 1 u slučaju opterećenja LC2



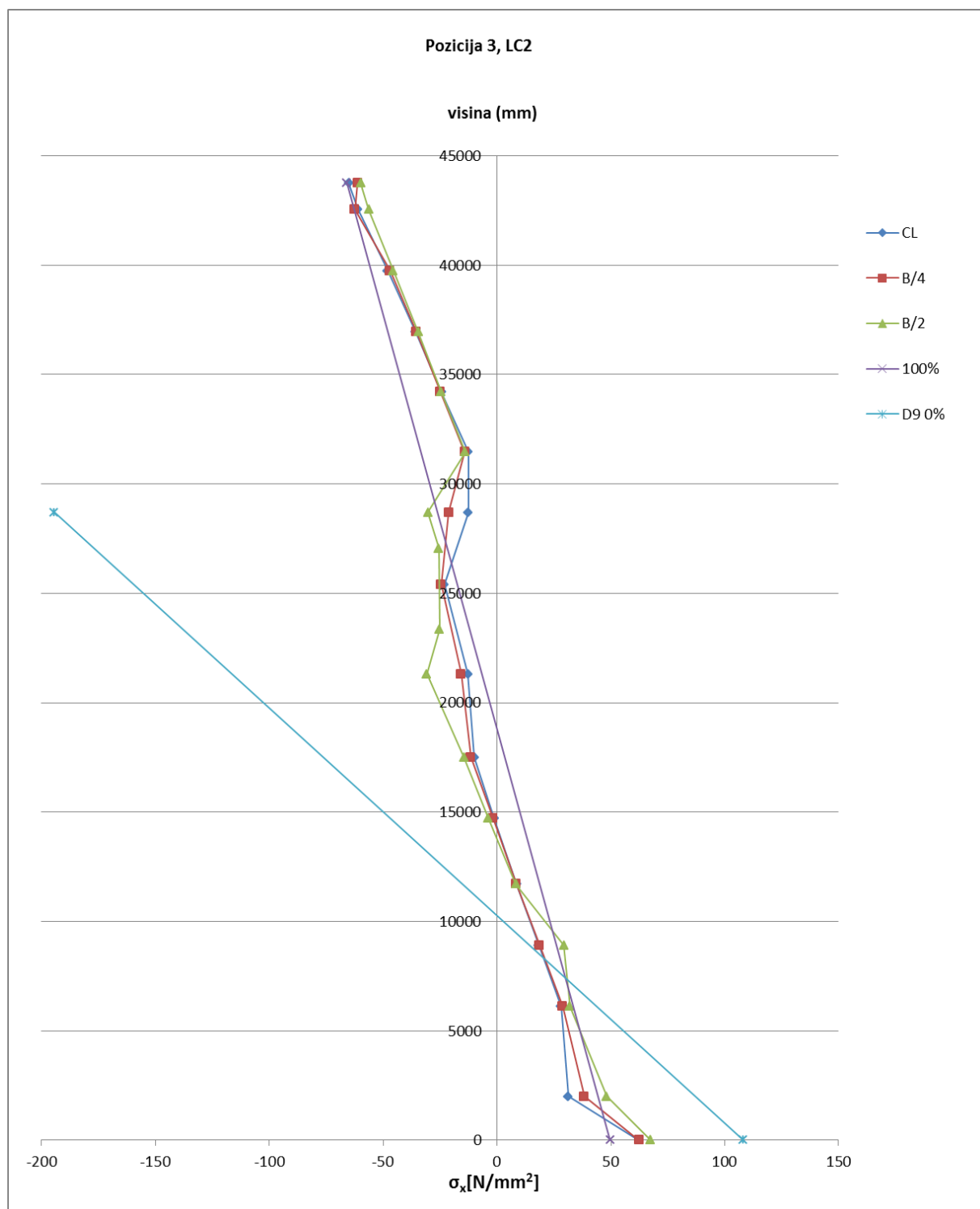
Slika 30. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 2 u slučaju opterećenja LC1



Slika 31. Prikaz rasporeda uzdužnih napreznja po visini trupa broda na poziciji 2 u slučaju opterećenja LC2



Slika 32. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 3 u slučaju opterećenja LC1



Slika 33. Prikaz rasporeda uzdužnih naprezanja po visini trupa broda na poziciji 2 u slučaju opterećenja LC2

Prema prikazanim rezultatima na sve tri pozicije, u oba slučaja opterećenja primjećuje se porast naprezanja od CL do B/2 u palubi 9, što je i očekivano pošto je tu diskontinuitet u strukturi i transfer sila između trupa i nadgrađa. Na Slici 29 u palubi 9 također se vidi da normalno naprezanje u CL ima negativan predznak što znači da u tom dijelu nadgrađe prati zakrivljenost trupa. Radi lakšeg uvida u raspodjelu naprezanja na Slikama 34 ÷ 37 su prikazani samo 3 srednja modula od njih ukupno 5.

Oblik krivulja naprezanja u dnu na Slikama 28 ÷ 33 se objašnjava sekundarnim savijanjem roštilja dvodna, dok kod Slike 32 oblik krivulje naprezanja je uvjetovan ponašanjem konstrukcije kao da je u tom dijelu roštilj dvodna upet sa poprečnom pregradom.

5.2. Proračun efikasnosti paluba nadgrađa

Efikasnost paluba nadgrađa će se izraziti stupnjem efikasnosti η_s koji je *Caldwell* [2] definirao omjerom između stvarnog opterećenja koje nadgrađe prenosi i teoretskog opterećenja koje bi nadgrađe nosilo u slučaju potpune efikasnosti [2]:

$$\eta_s = \frac{\sigma_{x0} - \sigma_x}{\sigma_{x0} - \sigma_{x1}} \quad (5.1)$$

Gdje je

σ_{x0} – max. naprezanja na gornjoj palubi trupa izračunata teorijom grede pod pretpostavkom 0% efikasnosti nadgrađa;

σ_x – maksimalna izračunata (npr. MKE) naprezanja na gornjoj palubi trupa s nadgrađem;

σ_{x1} – max. naprezanja na gornjoj palubi trupa izračunata teorijom grede pod pretpostavkom 100% efikasnosti nadgrađa

U ovoj analizi gornja paluba trupa (paluba čvrstoće) smatra se paluba D9.

Tablicama 8 i 9 dane su vrijednosti σ_{x0} i σ_{x1} za sve tri pozicije u oba slučaja opterećenja na B/2, a Tablicama 10 - 12 prikazane su vrijednosti normalnih naprezanja na palubi D9 za poprečne presjeke na uzetim pozicijama i vrijednost stupnja efikasnosti η_s .

Tablica 8. Vrijednosti σ_{x0} i σ_{x1} za slučaj opterećenja LC1

LC1	σ_{x1} [N/mm ²]	σ_{x0} [N/mm ²]
pozicija 1	50,14	372,47
pozicija 2	49,94	363,31
pozicija 3	45,30	336,68

Tablica 9. Vrijednosti σ_{x0} i σ_{x1} za slučaj opterećenja LC2

LC2	σ_{x1} [N/mm ²]	σ_{x0} [N/mm ²]
pozicija 1	-26,16	-194,41
pozicija 2	-26,10	-193,97
pozicija 3	-23,71	-176,07

Tablica 10. Vrijednosti σ_x i η_s na B/2 Pozicije 1 za LC1 i LC2

B/2	Pozicija 1	
	σ_x	η_s
	[N/mm ²]	-
LC1	68,69	0,94
LC2	-45,97	0,88

Tablica 11. Vrijednosti σ_x i η_s na B/2 Pozicije 2 za LC1 i LC2

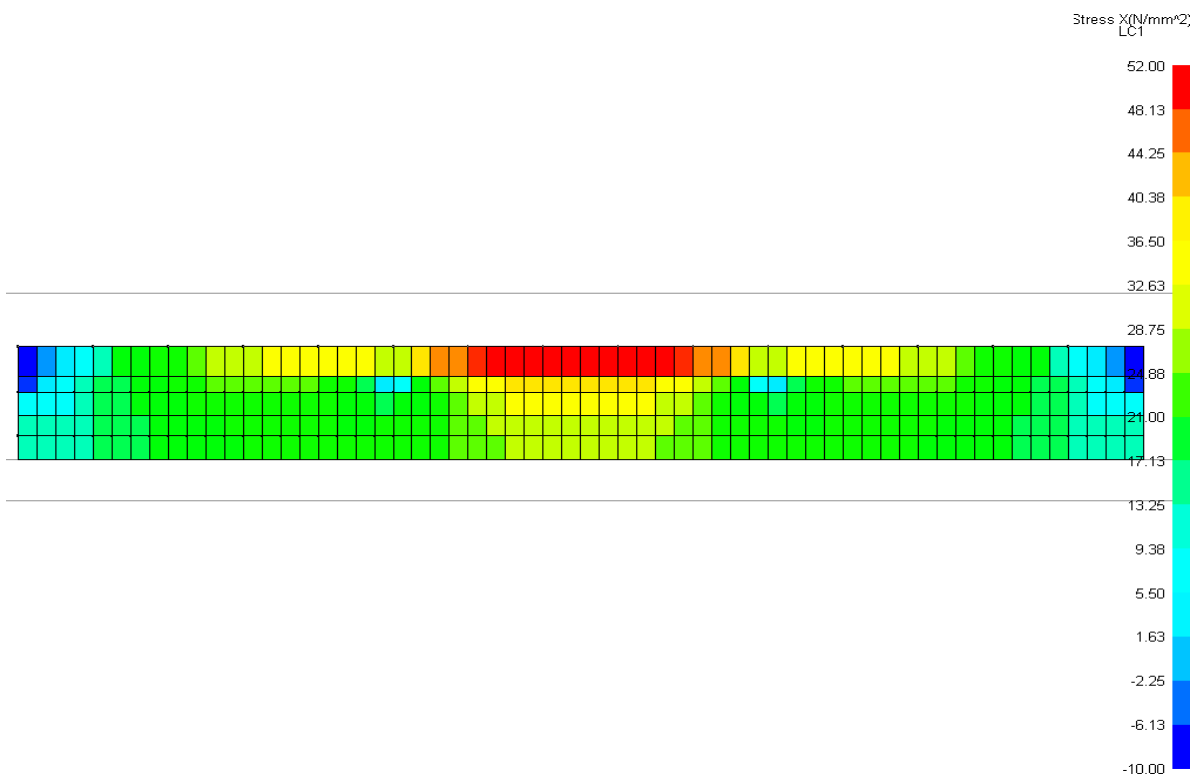
B/2	Pozicija 2	
	σ_x	η_s
	[N/mm ²]	-
LC1	75,1	0,92
LC2	-41,95	0,91

Tablica 12. Vrijednosti σ_x i η_s na B/2 Pozicije 3 za LC1 i LC2

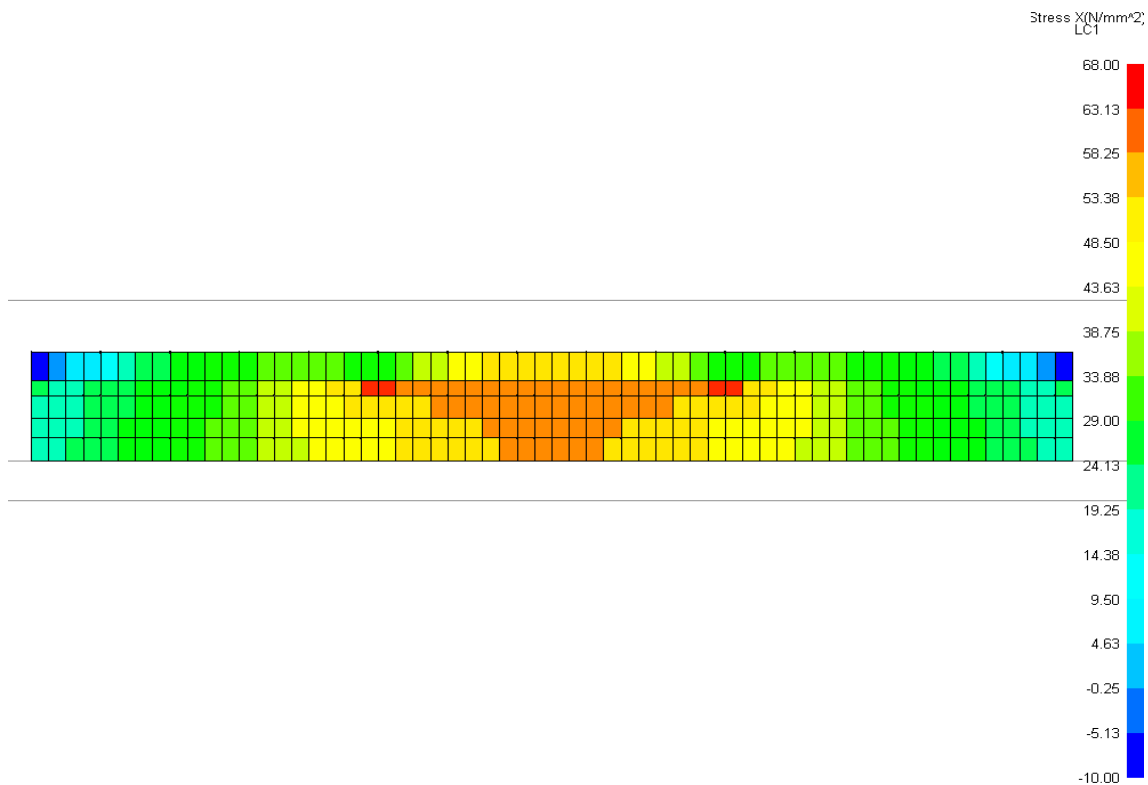
B/2	Pozicija 3	
	σ_x	η_s
	[N/mm ²]	-
LC1	88,25	0,85
LC2	-30,3	0,96

Dobiveni rezultati pokazuju da je stupanj efikasnosti nadgrađa na svim trima pozicijama, u oba slučaja opterećenja visok (od 0,85 do 0,96) što ukazuje da nadgrađe iznad palube D9 s velikim stupnjem efikasnosti sudjeluje u uzdužnoj čvrstoći broda. Pošto je *Caldwellov* stupanj efikasnosti nadgrađa prvenstveno namijenjen brodovima sa jasnije definiranom palubom čvrstoće (npr. ratni brodovi) ove rezultate bi trebao uzeti sa *rezervom*. Razlog tome leži u tome da suvremeni putnički brodovi nemaju jasno definiranu palubu čvrstoće, palube nadgrađa su im otvorene i postojanje uzdužne pregrade i upora koje nose palube nadgrađa.

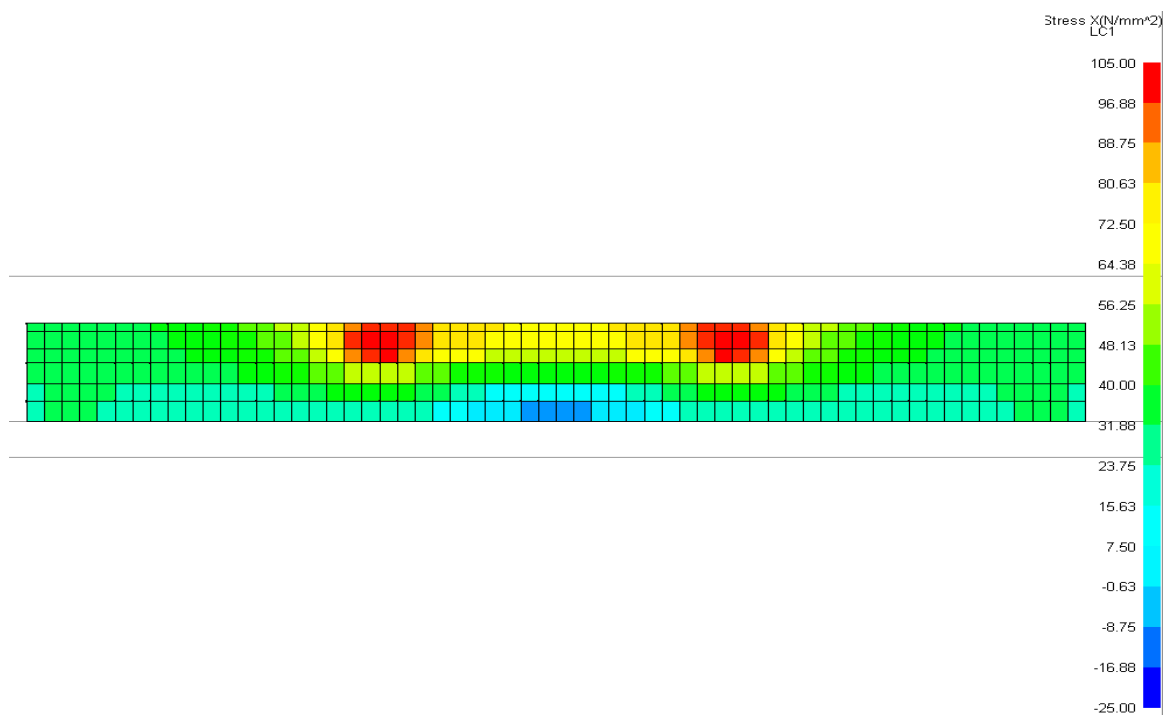
Prikaz rasporeda primarnih naprezanja u palubama koje povezuje reces dan je Slikama 34 ÷ 37. Uočljiva je složena distribucija uzdužnih normalnih naprezanja te je identificirano značajno variranje naprezanja po širini paluba (D7-D9) koje uzdužna pregrada recesa povezuje.



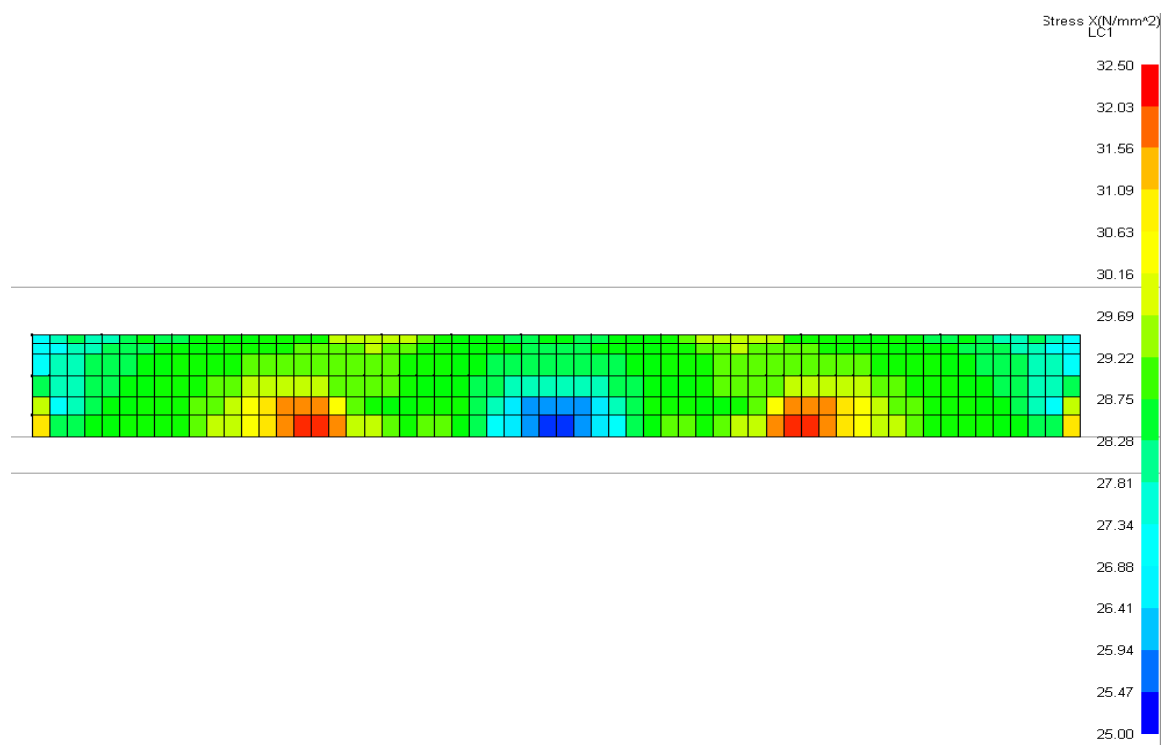
Slika 34. Raspored uzdužnih naprezanja na palubi 7



Slika 35. Raspored uzdužnih naprezanja na palubi 8



Slika 36. Raspored uzdužnih naprezanja na palubi 9



Slika 37. Raspored uzdužnih naprezanja na palubi 10

ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad dimenzionirani su strukturni elementi glavnog rebra tipičnog *Post-Panamax* putničkog broda u dvije faze. Prvo je proveden proračun po Pravilima DNV te su generirane strukturne dimenzije prototipne konstrukcije, a zatim je izvršeno redimenzioniranje nepodobnih dijelova konstrukcije prototipa koristeći rezultate odziva *grubog* globalnog MKE modela. Početni prijedlog rješenja na razini dopuštenih naprezanja i kriterija izvijanja nije u određenim zonama zadovoljavao kriterije podobnosti, te je dan prijedlog rješenja koji zadovoljava sve kriterije (popuštanja i izvijanja) za uzdužne elemente strukture.

U sklopu rada dana je detaljna analiza rezultata uzdužnih normalnih naprezanja unutar 0,4L broda, za konstrukciju s predloženim finalnim strukturnim dimenzijama. Rezultati dobiveni metodom konačnih elemenata korištenjem $\frac{1}{2}$ simetričnog MKE modela su uspoređeni s rezultatima dobivenim metodom klasične teorije grede.

Analizom rezultata unutar 0,4L broda pokazano je da primarna naprezanja u dobroj mjeri slijede raspored primarnih naprezanja dobivenih klasičnom teorijom grede izuzev u području recesa gdje postoji složena interakcija trupa i nadgrađa, preko uzdužne pregrade u recesu i uzdužne pregrade nadgrađa. U tom području prisutna je složena distribucija uzdužnih normalnih naprezanja te je identificirano značajno variranje naprezanja po širini paluba (D7-D9) koje uzdužna pregrada recesa povezuje.

U dvodnu konstrukcije uzdužna normalna naprezanja dobivena pomoću MKE u većini slučajeva su veća nego što je dobiveno metodom klasične teorije grede, izuzev za poziciju uz poprečnu pregradu u slučaju pregiba (LC1). Razlog tome je sekundarno savijanje konstrukcije roštilja dvodna, te je u MKE modelu prisutna superpozicija sekundarnih i primarnih naprezanja. Za izuzetu poziciju konstrukcija roštilja dvodna se ponaša kao da je upeta zbog postojanja poprečne pregrade te se naprezanja uslijed suprotnog predznaka primarnih i sekundarnih naprezanja na mjestu upetosti smanjuju.

Usporedbom odziva grubog ekstrudiranog MKE modela s detaljnim MKE modelom cijelog broda koji vjerno prati formu broda dodatno bi se verificirao provedeni MKE proračun.

LITERATURA

- [1] Kulovaara, H. "Nurturing Innovation in Cruise Ship Design", 11th International Marine Design Conference-IMDC 2012, Vol.1, pp.3-18, Glasgow, Scotland.
- [2] Andrić, J. "Metodologija konceptualnog projektiranja brodskih konstrukcija s interakcijom trup-nadgrađe", doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
- [3] ..., Det Norske Veritas: „Rules for Classification of Ships, Newbuildings: Hull Structural Design – Ships with Length 100 Meters and Above“, July 2011.
- [4] H. Remes, J. Romanoff, P. Varsta, J. Jelovica, A. Klanac, A. Niemelä, S. Bralic, H. Naar. „Hull/superstructure-interaction in optimized passenger ships“, MARSTRUCT 2011 Conference, pp.625-632, Hamburg, Germany, 2011.
- [5] ..., MAESTRO Version 8.9.3: „Program documentation“, Proteus Engineering, Stevensville, MD, USA.
- [6] Hughes, O. F.: „Ship Structural Design: A Rationaly-Based, Computer-Aided Optimization Approach“, John Wiley & Sons, New York, 1983
- [7] ..., Det Norske Veritas: Classification Notes No. 31.8, Direct Strength Analysis of Hull Structures in Passenger Ships, October 2007.

Prilog

Prilog A – Proračun u MS Excell

Prilog B – Nacrt glavnog rebra