

# Analiza čvrstoće različitih topoloških rješenja konstrukcije broda za prijevoz žive stoke

---

**Kovačević, Franko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:235:057012>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Franko Kovačević**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Student:

Franko Kovačević

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentoru Izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću na savjetima, strpljenju i stručnoj pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju i podršci tijekom cijelog studija.

Franko Kovačević



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Franko Kovačević** Mat. br.: 0023086381

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA ČVRSTOĆE RAZLIČITIH TOPOLOŠKIH RJEŠENJA KONSTRUKCIJE BRODA ZA PRIJEVOZ ŽIVE STOKE**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL ANALYSIS OF DIFFERENT TOPOLOGY CONCEPTS OF LIVESTOCK CARRIER SHIP**  
Opis zadatka:

Brodovi za prijevoz žive stoke (*livestock carrier*) pripadaju specifičnim tipovima visoko specijaliziranih brodova koji iako se grade u malim serijama značajan su proizvod hrvatske brodograđevne industrije. Takvi tipovi brodova projektiraju se s izrazito velikim nadgrađima i mnogobrojnim palubama koje se proteže duž cijelog broda. Kako se radi o vrlo velikim i složenim brodskim konstrukcijama koje karakterizira kompleksna strukturna interakcija nadgrađa i donjeg trupa broda potrebno je detaljno razmotriti primarnu čvrstoću brodske konstrukcije.

Različiti topološki koncepti nadgrađa i povezanost nadgrađa s donjim trupom broda mogu rezultirati bitno drugačijom distribucijom primarnih napreznja po visini broda, a time i različitim projektnim rješenjima.

U radu je potrebno predložiti nekoliko različitih topoloških koncepata broda za prijevoz žive stoke te je za predložene koncepte potrebno provesti:

- lokalno dimenzioniranje po Pravilima na razini glavnog rebra,
- proračun primarne čvrstoće na razini pojednostavljenog MKE modela cijelog broda.

U radu je potrebno usporediti strukturni odziv (primarna napreznja, smična napreznja i deformacije) predloženih koncepata konstrukcije, te istražiti senzitivnost utjecajnih topoloških parametara na primarni odziv trupa broda i efektivnost nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda. Kao programsku podršku za proračun metodom konačnih elemenata (MKE) koristiti program MAESTRO dostupan na FSB-u.

Zadatak zadan: Rok predaje rada: Predviđeni datumi obrane:  
29. rujna 2016. 1. prosinca 2016. 7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Izv.prof. dr.sc. Jerolim Andrić

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	2
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA .....	6
SAŽETAK.....	7
SUMMARY .....	8
1. UVOD .....	9
2. INICIJALNO LOKALNO DIMENZIONIRANJE NA RAZINI GLAVNOG REBRA .....	10
2.1. Uvod.....	10
2.2. Lokalno dimenzioniranje pomoću programa MARS .....	14
2.3. Proračun poprečne strukture.....	22
3. GENERIČKI MODELI.....	27
3.1. Uvod.....	27
3.2. Generički strukturni 3D MKE modeli.....	28
3.3. Opterećenje modela.....	31
3.4. Modeliranje prozora .....	34
3.5. Modeliranje ventilacijskih kutija.....	36
3.6. Usporedba primarnog odziva generičkog i detaljnog MKE modela.....	40
4. ISTRAŽIVANJE RAZLIČITIH TOPOLOŠKIH KONCEPATA .....	46
4.1. Utjecaj geometrijskih karakteristika ventilacijskih kutija na efikasnost nadgrađa .....	46
4.2. Utjecaj zatvaranja boka na efikasnost nadgrađa.....	51
4.3. Teorija eksperimenata .....	53
4.4. Primjena metodologije istraživanja utjecaja topoloških parametara.....	58
4.5. Potpuno zatvoren bok.....	75
5. ZAKLJUČAK .....	77
6. LITERATURA.....	78

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Dijagram toka.....	9
Slika 2. Dijagram primarnih naprežanja po visini broda .....	12
Slika 3. Detaljni MKE model cijelog broda [7] .....	13
Slika 4. Kriteriji vezani za debljinu opločenja voja .....	15
Slika 5. Kriteriji vezani za ukrepe .....	17
Slika 6. Jedan od modula MKE modela broda za prijevoz žive stoke .....	29
Slika 7. Generički 3D MKE model broda za prijevoz stoke .....	29
Slika 8. Rubni uvjeti.....	30
Slika 9. Distribuirana masa po duljini modela .....	32
Slika 10. Slučaj opterećenja 1 - pregib.....	33
Slika 11. Slučaj opterećenja 2 - progib .....	33
Slika 12. Dimenzije otvora i njihov položaj na boku [6] .....	34
Slika 13. Dijagrami za određivanje ekvivalentne debljine membrane za modeliranje oplata boka s otvorima po metodi ekvivalentne smične krutosti [1] .....	35
Slika 14. Usporedba distribucije primarnih naprežanja na rebru 50 .....	36
Slika 15. Usporedba distribucije primarnih naprežanja na rebru 100 .....	37
Slika 16. Usporedba ventilacijskih kutija modeliranih (a) grednim i (b) pločastim konačnim elementima .....	39
Slika 17. Usporedba distribucije naprežanja na CL .....	42
Slika 18. Usporedba distribucije naprežanja na boku modela .....	43
Slika 19. Usporedba distribucije usrednjenih naprežanja .....	44
Slika 20. Usporedba distribucije primarnih naprežanja na rebru 50 .....	47
Slika 21. Usporedba distribucije primarnih naprežanja na rebru 100 .....	48
Slika 22. Usporedba krajnjih modela na rebru 50 .....	49
Slika 23. Odzivna ploha efektivnosti nadgrađa.....	50
Slika 24. Odzivna ploha efektivnosti nadgrađa.....	50

---

Slika 25. Usporedba distribucije primarnih naprezanja - pregib.....	51
Slika 26. Usporedba distribucije primarnih naprezanja - progib .....	52
Slika 27. Geometrijski prikaz 23 projekta [1] .....	54
Slika 28. Geometrijski prikaz interakcija $2^3$ projekta [1].....	55
Slika 29. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 60 za LC1 .....	62
Slika 30. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 60 za LC2 .....	63
Slika 31. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 100 za LC1 .....	64
Slika 32. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 100 za LC2 .....	65
Slika 33. Dijagramski prikaz glavnih efekata .....	69
Slika 34. Usporedba distribucije srednjih naprezanja na rebru 100 za LC1 .....	73
Slika 35. Usporedba distribucije naprezanja na rebru 100 za LC1 .....	75
Slika 36. Usporedba distribucije naprezanja na rebru 100 za LC2 .....	76



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Primarna naprezanja po visini broda na poziciji glavnog rebra .....	11
Tablica 2. Glavne dimenzije broda .....	14
Tablica 3. Razlike dimenzija pojedinih elemenata.....	19
Tablica 4. Kritična naprezanje za izvijanje limova i uzdužnjaka.....	21
Tablica 5. Kriteriji sponja.....	22
Tablica 6. Aksijalna sila u uporama .....	24
Tablica 7. Geometrijske karakteristike različitih upora .....	25
Tablica 8. Eulerova i kritična naprezanja .....	25
Tablica 9. Eulerova i kritična naprezanja .....	26
Tablica 10. Kriteriji za izvijanje upora.....	26
Tablica 11. Slučajevi opterećenja.....	32
Tablica 12. Debljine ekvivalentne membrane .....	35
Tablica 13. Očitavanja naprezanja modela s različito modeliranim ventilacijama.....	38
Tablica 14. Usporedba naprezanja modela s različito modeliranim ventilacijama.....	39
Tablica 15. Očitavanje naprezanja na rebru 100 .....	41
Tablica 16. Usrednjena naprezanja na rebru 100 .....	41
Tablica 17. Usporedba naprezanja generičkog i referentnog modela .....	45
Tablica 18. Varijante modela ovisno o geometriji ventilacija .....	46
Tablica 19. Efikasnosti modela .....	49
Tablica 20. Tablični prikaz 2 <sup>3</sup> projekta [1] .....	54
Tablica 21. Prikaz raznih tipova ortogonalnih polja [1].....	56
Tablica 22. Opis odabranih parametara i vrijednosti na određenom nivou .....	59
Tablica 23. Pridruživanje parametara stupcima ortogonalnog polja L18 .....	60
Tablica 24. Rezultati proračuna odzivne varijable i SN omjeri .....	66
Tablica 25. Usporedba masa i deformacija .....	67
Tablica 26. Analiza varijance za jedan factor .....	68

---

Tablica 27. SNs vrijednosti glavnih efekata parametara .....	69
Tablica 28. ANOVA tablica nakon pridruživanja grešci nesigifikantnih parametara .....	70
Tablica 29. Projekt s parametrima na najutjecajnijim nivoima.....	71
Tablica 30. Projekti iz L18 poredani po veličini SN omjera.....	72
Tablica 31. Rezultati projekta s parametrima na najutjecajnijim nivoima.....	72
Tablica 32. Varijante modela potpuno zatvorenog boka.....	75

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
L	m	Duljina broda
B	m	Širina broda
H	m	Visina broda
T	m	Gaz broda
C <sub>b</sub>	/	Koeficijent istisnine
η	/	Efikasnost nadgrađa
σ <sub>x</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Normalna naprezanja
W	mm <sup>3</sup>	Moment otpora
I	mm <sup>4</sup>	Aksijalni moment tromosti
A	mm <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka
y	mm	Udaljenost od neutralne linije
M	Nm	Ukupni vertikalni moment savijanja
z <sub>NL</sub>	m	Položaj neutralne linije
σ <sub>E</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Eulerovo naprezanje
σ <sub>c</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Kritično naprezanje
t	mm	Debljina oplata
E	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
R <sub>eh</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
p	kN/m <sup>2</sup>	Pritisak
F <sub>A</sub>	kN	Aksijalna sila

## **SAŽETAK**

U radu je analizirana čvrstoća različitih topoloških rješenja konstrukcije broda za prijevoz stoke. Za geometriju i topologiju glavnog rebra odabranog koncepta proveo se proračun prema pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Posebno je analizirana problematika efikasnosti nadgrađa ovog tipa broda. Za analizu problematike korišteni su generički 3D MKE modeli izrađeni programom MAESTRO. Napravljeno je nekoliko različitih varijanti modela, te su uspoređivana različita konstrukcijska rješenja na odziv broda i na efikasnost nadgrađa. Također, provedbom teorije eksperimenata istražena je senzitivnosti utjecajnih topoloških parametara na primarni odziv trupa broda i efikasnost nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći broda.

Ključne riječi: Brod za prijevoz žive stoke; uzdužna čvrstoća broda; efikasnost nadgrađa; metoda konačnih elemenata; MAESTRO

## **SUMMARY**

This master thesis analyses strength of different topological structural concepts for livestock carrier. Main frame geometry and topology of selected concept is calculated according to the rules of Bureau Veritas classification society. Special attention was paid to superstructure efficiency for this type of a ship. Software package MAESTRO was used for building and analyzing 3D FEM models. Different variations of models were built. Structural response and superstructure efficiency of those structural solutions were analyzed. Also, the implementation of the theory of experiments investigated the sensitivity of influential topological parameters on the primary response of the hull and superstructure.

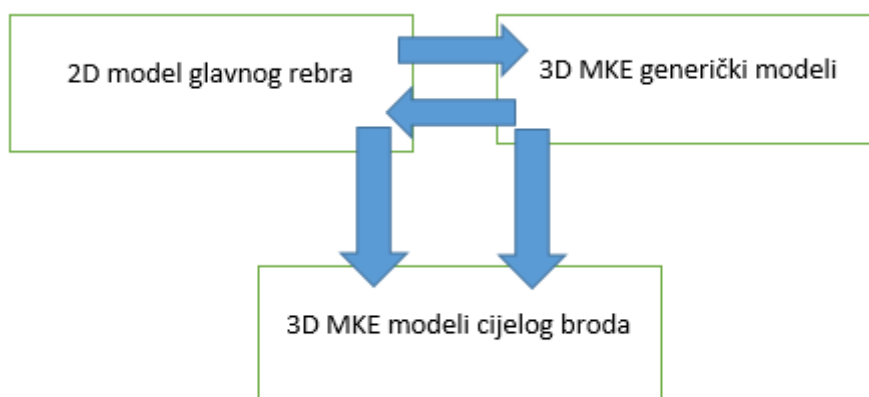
Keywords: Livestock carrier ship; longitudinal strength; superstructure efficiency; finite element method; MAESTRO

## 1. UVOD

Brodovi za prijevoz žive stoke (*livestock carrier*) pripadaju specifičnim tipovima visoko specijaliziranih brodova koji iako se grade u malim serijama značajan su proizvod hrvatske brodograđevne industrije. Takvi tipovi brodova projektiraju se s izrazito velikim nadgrađima i mnogobrojnim palubama koje se protežu duž cijelog broda. Kako se radi o vrlo velikim i složenim brodskim konstrukcijama koje karakterizira kompleksna strukturna interakcija nadgrađa i donjeg trupa broda potrebno je detaljno razmotriti primarnu čvrstoću broskog trupa kao temelj racionalnog projekta brodske konstrukcije.

Različiti topološki koncepti nadgrađa i povezanost nadgrađa s donjim trupom broda mogu rezultirati bitno drugačijom distribucijom primarnih naprezanja po visini broda, a time i različitim projektnim rješenjima.

U realnom projektnom postupku prvo se provodi dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata glavnog rebra pomoću 2D model glavnog rebra, pa se sa projektnog stanovišta kod ovakvog tipa broda javlja problem jer u tom trenutku nemamo MKE model cijelog broda, pa tako ni realistične distribucije primarnih naprezanja prikazane na slici 2. Upravo iz tog razloga će se u ovom radu ispitati može li se u početnoj fazi projektiranja doći do približno realne distribucije primarnih naprezanja modeliranjem generičkih MKE modela. Ukoliko možemo dobiti približnu distribuciju primarnih naprezanja, moguće je u ranijoj fazi točnije dimenzionirati dimenzija pojedinih konstrukcijskih elemenata potrebnih za 3D MKE detaljni model cijelog broda.



Slika 1. Dijagram toka

## 2. INICIJALNO LOKALNO DIMENZIONIRANJE NA RAZINI GLAVNOG REBRA

### 2.1. Uvod

Kod brodova za prijevoz žive stoke susrećemo se sa problemom efikasnosti nadgrađa. Naime, ovakav tip broda je u potpunosti zatvoren vanjskom oplatom samo do glavne palube trupa broda, što je u našem primjeru paluba 6, dok je do jedanaeste palube povezan samo na okvirnim rebrima te ima velike otvore (prozore). Zbog takve konstrukcije, palube koje se nalaze iznad šeste palube ne sudjeluju potpuno u uzdužnoj čvrstoći, tj. efikasnost nadgrađa je manja od 100%. Uslijed ovakvog slučaja, distribucija primarnih naprezanja po visini broda nije linearna.

Efikasnost nadgrađa je veličina koja nam pokazuje koliko nadgrađe sudjeluje u ukupnoj uzdužnoj čvrstoći broda. Što je efikasnost nadgrađa veća, nadgrađe više prati zakrivljenost trupa broda. Također povećavajući efikasnost nadgrađa broda, smanjujemo maksimalna naprezanja na glavnoj palubi trupa broda (u našem slučaju palubi 6), te povećavamo naprezanja u palubama nadgrađa. Samim time možemo bolje optimizirati konstrukciju broda, naročito glavnu palubu trupa broda, jer ukoliko ne znamo efikasnost nadgrađa ili je ono malo, glavna paluba će biti predimenzionirana u odnosu kad imamo veću efikasnost nadgrađa. S obzirom da već postoje palube nadgrađa sa svojim konstrukcijskim elementima zbog potrebne nosivosti, logično je da ih iskoristimo u najvećoj mogućoj mjeri.

Efikasnost nadgrađa izračunata je po *Caldwell*-ovom izrazu. *Caldwell* [1] je efikasnost nadgrađa definirao kao omjer između stvarnog opterećenja koje prenosi nadgrađe i teoretskog opterećenja koje bi nadgrađe prenosilo kada bi bilo potpuno efikasno [1].

$$\eta_e = \frac{\sigma_{x0} - \sigma_x}{\sigma_{x0} - \sigma_{x1}} \quad (2.1.)$$

Gdje su:

$\eta_e$  - efikasnost nadgrađa

$\sigma_{x0}$  - maksimalna naprezanja na gornjoj palubi trupa, za slučaj kada nadgrađe nema utjecaj efikasnosti [N/mm<sup>2</sup>],

$\sigma_x$  - maksimalna naprezanja izračunata na gornjoj palubi trupa [N/mm<sup>2</sup>],

$\sigma_{x1}$  - maksimalna naprezanja na gornjoj palubi trupa, za slučaj kada je nadgrađe potpuno efikasno [N/mm<sup>2</sup>].

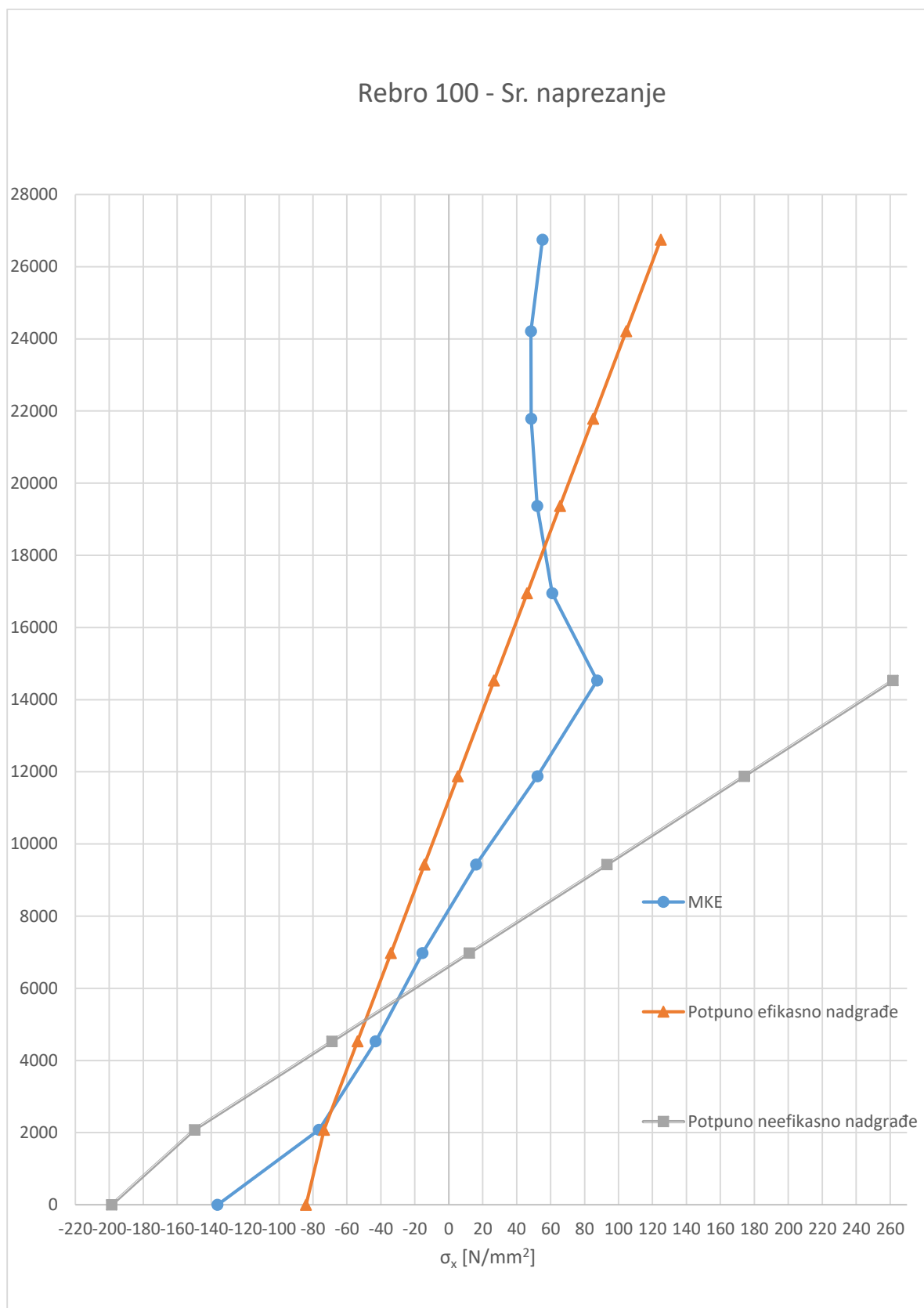
Efikasnost nadgrađa detaljnog MKE modela broda je izračunata po *Caldwell*-ovoj formuli (2.1.). Očitavanja naprezanja iz detaljnog MKE modela možemo vidjeti u tablici 1, dok su naprezanja na palubi 6 za potpuno neefikasno i potpuno efikasno nadgrađe dobivena iz programa MARS [2], gdje je model izgrađen po nacrtu glavnog rebra.

Tablica 1. Primarna naprezanja po visini broda na poziciji glavnog rebra

Rebro 100				
Deck	From BL	$\sigma_{MKE}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Potpuno neefikasno nadgrađe	Potpuno efikasno nadgrađe
11	26750	55.2		124.9
10	24210	48.4		104.5
9	21790	48.6		85.0
8	19370	52.1		65.6
7	16950	61.0		46.1
6	14530	87.4	261.7	26.7
5	11880	52.3	174.1	5.4
4	9430	16.1	93.1	-14.3
3	6980	-15.5	12.2	-34.0
2	4530	-43.1	-68.8	-53.7
1	2080	-76.4	-149.7	-73.4
0	0	-136.3	-198.6	-84.1

Naprezanja detaljnog MKE modela su očitana na području sredine broda i na boku broda te su usrednjena, pa postoji mogućnost greške. Grafički prikaz naprezanja možemo vidjeti na slici 2.





Slika 2. Dijagram primarnih naprezanja po visini broda

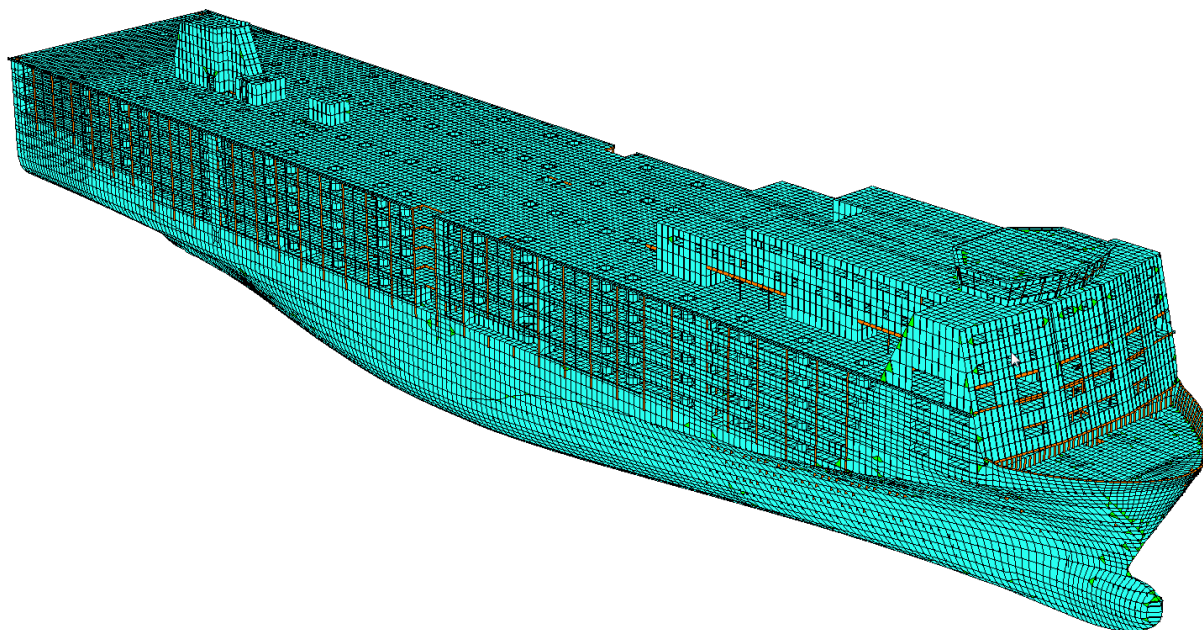
Kao što se može vidjeti i u ovom slučaju, iznad palube čvrstoće (palube 6) dolazi do pada naprezanja zbog toga što uslijed efikasnosti manje od 100% nadgrađe ne slijedi zakrivljenost trupa. Iz ovog dijagrama je vidljivo da se povećanjem efikasnosti nadgrađa smanjuju naprezanja na palubi čvrstoće a povećavaju na palubama nadgrađa, dok smanjivanjem efikasnosti dobivamo suprotni efekt.

Efikasnost nadgrađa ovog modela iznosi:

$$\eta_e = \frac{\sigma_{x0} - \sigma_x}{\sigma_{x0} - \sigma_{x1}} = \frac{261.66 - 87.415}{261.66 - 26.66} = 0.74$$

U realnom projektnom postupku prvo se radi 2D model glavnog rebra, pa se sa projektnog stanovišta javlja problem jer u tom trenutku nemamo MKE model cijelog broda, pa tako ni realistične distribucije primarnih naprezanja prikazane na slici 2. Upravo iz tog razloga će se u ovom radu ispitati može li se u početnoj fazi projektiranja doći do približno realne distribucije primarnih naprezanja modeliranjem generičkih MKE modela.

Prikaz MKE modela cijelog broda možemo vidjeti na slici 3.



Slika 3. Detaljni MKE model cijelog broda [7]

## 2.2. Lokalno dimenzioniranje pomoću programa MARS

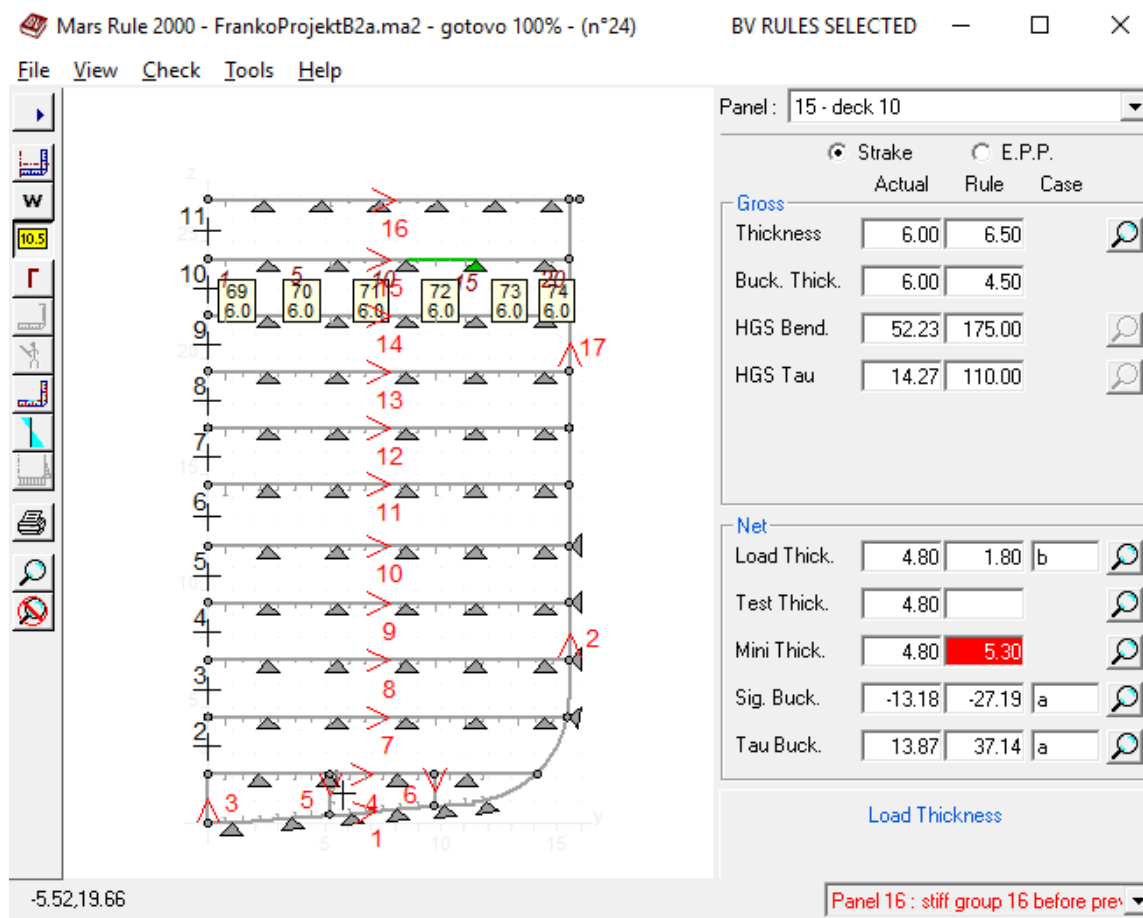
Uzdužni elementi konstrukcije broda proračunati su prema nacrtu geometrije glavnog rebra programom MARS klasifikacijskog društva Bureau Veritas, dok su poprečne dimenzije proračunate ručno u programu MS Excel. Distribucija naprezanja dana iz MKE modela cijelog broda korištena je kao ulazni podatak za definiranje efikasnosti u MARS modelu (2D modelu glavnog broda).

Osnovni model je izgrađen zadavanjem općih dimenzija broda, kao i njegove namjene. Kako program MARS nema mogućnost zadavanja broda za prijevoz žive stoke za tip broda, prvotno smo radili kao *Ro-Ro passanger ship*. Međutim taj tip broda za sve palube zadaje minimalna opterećenja od cca.  $14 \text{ kN/m}^2$ , a stvarna minimalna opterećenja na najgornjim palubama iznose  $4 \text{ kN/m}^2$  te smo morali raditi model s tipom putničkog broda. Glavne dimenzije broda su dane u tablici 2.

Tablica 2. Glavne dimenzije broda

Dimenzije		
Proračunska duljina	L	170 m
Širina	B	31,1 m
Visina	H	26,75 m
Gaz	T	8,7 m
Koeficijent istisnine	$C_b$	0,549
Razmak okvira	s	4250 mm
Razmak rebrenica	$s_r$	2125 mm

Proračuni su provedeni u programu MARS, gdje nakon provedenog proračuna program predloži minimalne dimenzije pojedinih elemenata. Varijable su: debljina oplata, mijenjanje tipa/veličine uzdužnjaka i materijala po zonama i po glavnom rebru.



Slika 4. Kriteriji vezani za debljinu opločenja voja

Prvi stupac nam prikazuje vrijednosti za pojedini kriterij aktualnog modela / projekta. Te su veličine karakteristike predložene konstrukcije. Sljedeći stupac nam prikazuje zahtijevane vrijednosti pojedinog kriterija. Jedan od najvažnijih kriterija koji se mora zadovoljiti je debljina opločenja koja mora biti veća ili jednaka od zahtijevane. Osim toga, bitno je da stvarna naprezanja budu manja od zahtijevanih (dopuštenih) naprezanja.

Primjerice, ako neki voj na palubi ne zadovoljava lokalna primarna naprezanja, to znači da je naprezanje u određenom voju veće od dopuštenog i potrebno ga je smanjiti. Promjena se provodi na način da se poveća debljina voja ili da se pojača profil uzdužnjaka. Ukoliko nam globalno model ne zadovoljava moment otpora, tada se pojačavaju elementi na najgornjoj palubi li na dnu, ovisno o potrebi, koji su najudaljeniji od neutralne linije. Poznata relacija iz nauke o čvrstoći glasi [3]:

$$W = \frac{I}{y} \quad (2.2.)$$

Gdje su:

$W$  - moment otpora presjeka [ $\text{mm}^3$ ],

$I$  - aksijalni moment tromosti [ $\text{mm}^4$ ],

$y$  - je udaljenost pojedinog voja od neutralne linije [mm].

Naprezanje je izraženo pomoću momenta savijanja i momenta otpora i dobiva se [3]:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (2.3.)$$

Gdje su:

$\sigma$  - primarno naprezanje [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ],

$M$  - ukupni vertikalni moment savijanja na promatranom presjeku [Nmm]

Odnosno preko aksijalnog momenta tromosti [3] :

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y \quad (2.4.)$$

Iz jednadžbe (1.4.) vidljivo je da približavanje voja neutralnoj osi uzrokuje smanjenje naprezanja uslijed savijanja, budući da su naprezanja linearna po visini presjeka prema *Euler-Bernoullijevoj* teoriji grede. Položaj neutralne linije dobije se prema [3]:

$$z_{NL} = \frac{\sum z_e A_e}{\sum A_e} \quad (2.5.)$$

Gdje su:

$z_{NL}$  - položaj neutralne linije [mm],

$z_e$  - udaljenost pojedinog elementa od osnovice [mm],

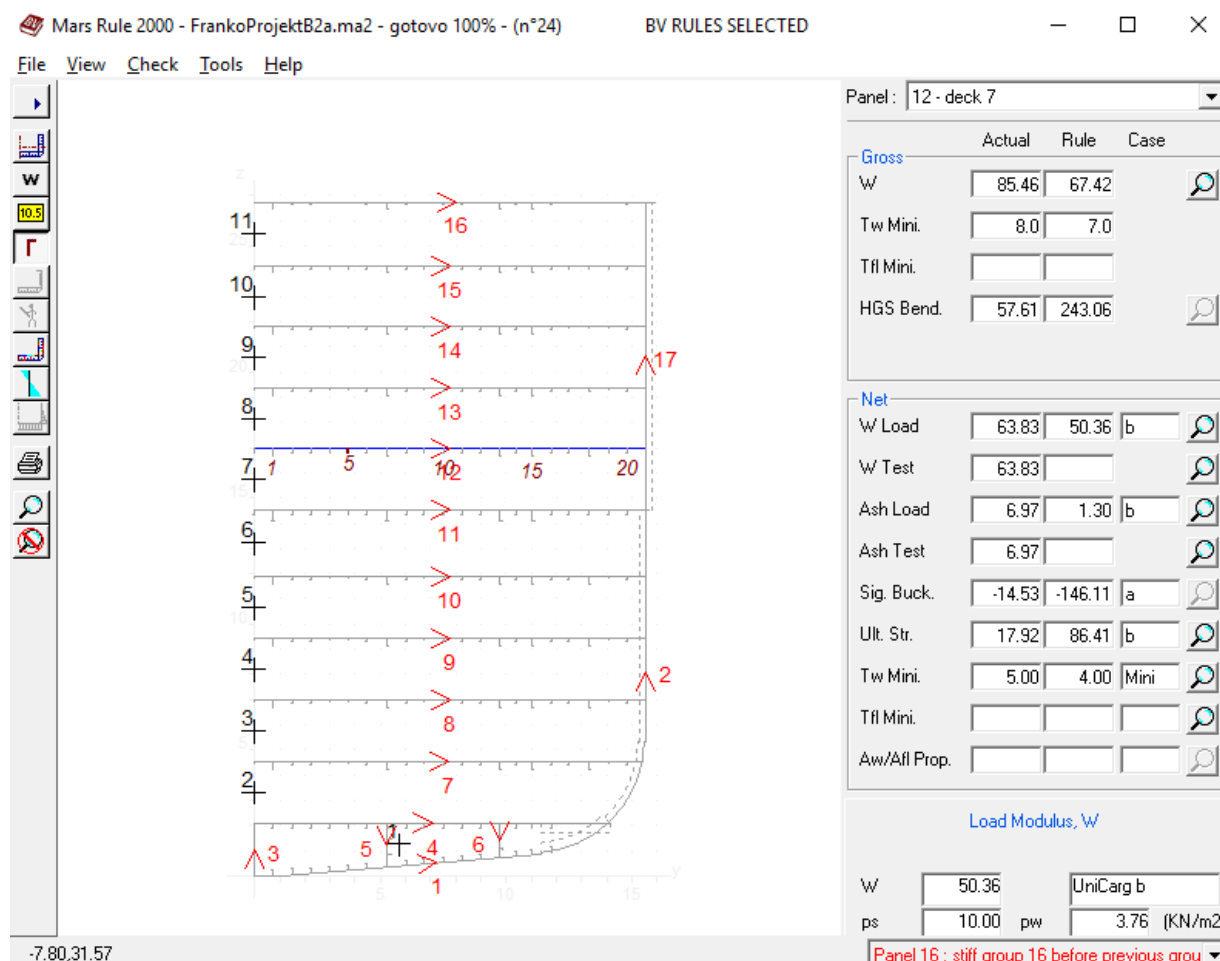
$A_e$  - površina pojedinog elementa [ $\text{mm}^2$ ].

Kako je već prije spomenuto djelomično efikasna konstrukcija nadgrađa uzrokuje nelinearnu distribuciju primarnih naprezanja po visini presjeka, vidi Sliku 2. Da bi se dobila otprilike realistična distribucija primarnih naprezanja korištena je opcija u okviru programa MARS gdje se površine tih elemenata množi sa koeficijentom efikasnosti  $\eta$ , te dalje računa sa tom efektivnom površinom. Na temelju toga MARS izračuna novu neutralnu liniju (samim tim dobijemo novu udaljenost presjeka od neutralne osi), i novi aksijalni moment inercije, te onda dobijemo nova primarna naprezanja.

Izraz za naprezanje se sada računa:

$$\sigma_1 = \frac{M}{I_1} \cdot y_1 \cdot \eta \tag{2.6.}$$

Drugi bitan kriterij kojeg je potrebno zadovoljiti kod dimenzioniranja glavnog rebra je odabir profila koji će zadovoljiti potrebne kriterije koje zahtijeva program MARS.



Slika 5. Kriteriji vezani za ukrepe

Najbitniji kriteriji vezani za ukrepe, odnosno uzdužnjake je da stvarni moment otpora  $W$  bude veći od zahtijevanog i da stvarna minimalna debljina struka bude veća od zahtijevane.

Kao što smo mogli vidjeti na slici 4 neki elementi nisu zadovoljili proračun, te smo morali mijenjati dimenzije. Svi elementi koji nisu zadovoljili ili koji su bili predimenzionirani su se reprojektirali kako bi masa bila što manja a da su zadovoljeni svi kriteriji. U tablici 3 su prikazane razlike između prototipne konstrukcije projektirane prema pravilima klasifikacijskog društva Lloyd registra LR, i dimenzija projektiranih po pravilima Bureau Veritasa BV provedenih kroz ovaj rad.

Tablica 3. Razlike dimenzija pojedinih elemenata

Pozicija	LR	BV
<b>Oplata limova (mm)</b>		
Oplata dna od 0 do 1 m od Cl	15.0	16.0
Oplata dna od 1 do 6.05 m od Cl	13.0	13.0
Oplata dna od 10.2 m do 1 m od Cl	12.5	12.5
Oplata dna od 10.4 m - 12.5 m od CL	16.0	17.5
Uzvoj od dna do palube 1	17.5	17.5
Uzvoj od palube 1 do palube 2	16.0	16.5
Oplata boka od palube 2 do palube 3	14.0 AH36	14.0 AH36
Oplata boka od palube 3 do palube 6	12.5 AH36	12.5 AH36
Paluba 1	11.5 AH36	11.5 AH36
Paluba 1 - zadnji lim od CL	17.5	20.0
Paluba 2	8.0	8.5
Paluba 3	8.0	8.0
Paluba 4	8.0	8.0
Paluba 5	8.0	8.0
Paluba 6	8.0	8.0
Paluba 7	8.0	8.0
Paluba 8	8.0	8.0
Paluba 9	6.0	6.5
Paluba 10	6.0	6.5
Paluba 11	6.0	6.5
<b>Ukrepe</b>		
Paluba 0	HP220x10	HP220x10
Paluba 1	HP200x9	HP200x9
Paluba 2	HP140x7 AH36	HP140x7 AH36
Paluba 3	HP140x7 AH36	HP140x7 AH36
Paluba 4	HP140x7 AH36	HP140x7 AH36
Paluba 5	HP140x7 AH36	HP140x7 AH36
Paluba 6	HP200x9	HP200x9
Paluba 7	HP140x7 AH36	HP140x8 AH36
Paluba 8	HP140x7 AH36	HP140x7 AH36
Paluba 9	HP 120x6	HP 120x8
Paluba 10	HP 120x6	HP 120x8
Paluba 11	HP 100x7	HP 100x8



Također je potrebno izračunati kritično naprežanje, čijim premašivanjem dolazi do izvijanja oplata i uzdužnjaka. Prilikom opterećivanja najgornjih paluba, zbog svojih karakterističnih malih dimenzija, moramo paziti da nam se one u najnepovoljnijem slučaju ne izviju. Kod tankih limova najnepovoljniji slučaj je tlak, a taj slučaj opterećenja ćemo dobiti kada se brod nalazi u stanju progibu. Zbog specifičnosti ovog broda, za vrijeme plovidbe na mirnoj vodi on se uvijek nalazi u stanju pregiba, te se najveća naprežanja i javljaju upravo kada brod dođe u maksimalni pregeb, ali najosjetljiviji konstrukcijski dijelovi su na najgornjim palubama, kada je brod u stanju progiba. Brod se može naći u stanje progiba kada je maksimalni valni moment veći od pregebnog momenta savijanja na mirnoj vodi.

Kritična naprežanja se računaju prema sljedećim izrazima [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_c = \sigma_E & \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \\ \sigma_c = R_{eH} \left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_E}\right) & \quad \text{za } \sigma_E \geq \frac{R_{eH}}{2} \end{aligned} \quad (2.7.)$$

Gdje su:

$\sigma_c$  - kritično naprežanje

$R_{eH}$  - granica razvlačenja, (za obični brodograđevni čelik  $R_{eH}=235 \text{ N/mm}^2$ )

$\sigma_E$  - kritično Eulerovo naprežanje za izvijanje, koje se računa prema sljedećim izrazima:

a) za oplatu

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 K_1 \varepsilon 10^{-6} \quad (2.8.)$$

Gdje su:

$E$  - modul elastičnosti, (za obični brodograđevni čelik  $E=204000 \text{ N/mm}^2$ )

$\nu$  - Poissonov koeficijent,  $\nu=0,3$

$t$  - debljina oplata, [mm]

$b$  - kraća stranica ploče, mm

$K_1$  - faktor izvijanja,  $K_1=4$  za omjer stranica  $\frac{a}{b} \geq 4$

$\varepsilon$  - koeficijent,  $\varepsilon=1$  za omjer stranica  $\frac{a}{b} \geq 4$

b) za uzdužnjake

$$\sigma_E = \pi^2 E \left( \frac{I_e}{A_e l^2} \right)^2 10^{-4} \quad (2.9.)$$

Gdje su:

$I_e$  - moment inercije, [mm<sup>4</sup>]

$A_e$  - poprečni presjek, [mm<sup>2</sup>]

$l$  - duljina uzdužnjaka [m]

Kritična naprezanja na izvijanje su prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Kritična naprezanje za izvijanje limova i uzdužnjaka

Limovi				
tp [mm]	b [mm]	$\sigma_E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
6	800	41.48	41.48	
7	800	56.47	56.47	
8	800	73.75	73.75	
Uzdužnjaci				
Profil	$I$ [mm <sup>4</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
100x6	76.1	7.74	109.60	109.60
120x6	133	9.31	159.24	148.30

### 2.3. Proračun poprečne strukture

Kako program Mars proračunava samo uzdužne konstrukcijske elemente, poprečni elementi su izračunati po pravilima BV [4] koristeći programski paket MS Excel. Proračunate su palubne sponje, te su upore provjerene na izvijanje, ali isti elementi nisu optimirani već su samo provjereni zadovoljavaju li kriterije klasifikacijskog društva.

U sljedećoj tablici su prikazani stvarni i zahtijevani kriteriji koji trebaju biti zadovoljeni.

Tablica 5. Kriteriji sponja

Sponje					
Paluba	Tlak (kn/m <sup>2</sup> )	Zahtijevani moment otpora (cm <sup>3</sup> )	Stvarni moment otpora (cm <sup>3</sup> )	Tip profila	Zadovoljava
2	8.08	307.86	576.24	T 280x7/100x10	DA
3	8.08	307.86	576.24	T 280x7/100x10	DA
4	8.08	307.86	576.24	T 280x7/100x10	DA
5	8.08	307.86	576.24	T 280x7/100x10	DA
6	16	609.63	1147.45	T 450x7/150x10	DA
7	8.08	307.86	576.24	T 280x7/100x10	DA
8	8.08	307.86	576.24	T 280x7/100x10	DA
9	4.04	153.93	475.87	T 250x6/150x10	DA
10	4.04	153.93	475.87	T 250x6/150x10	DA
11	2.26	86.11	475.87	T 250x6/150x10	DA

## Upore

Upore su poprečni elementi koje je potrebno proračunati na izvijanje. Potrebno je izračunati aksijalnu silu u upori prema formuli [4]:

$$F_A = A_D(\gamma_{s2} \cdot p_s + \gamma_{w2} \cdot p_w) + \sum_{i=1}^N r_i(\gamma_{s2} \cdot Q_{i,s} + \gamma_{w2} \cdot Q_{i,w}) \quad (2.10.)$$

Gdje su:

$F_A$  - aksijalna sila u upori, [kN]

$A$  - površina palube koja je poduprta uporom, ( $A=21,9 \text{ m}^2$  za najnepovoljniji slučaj kada imamo jedan red ventilacija)

$\gamma_{s2}, \gamma_{w2}$  - koeficijenti,  $\gamma_{s2}=1, \gamma_{w2}=1$

$p_s$  - statički pritisak,  $p_s$  (ovisno o palubi, varira od 2,26 do 16 kN/m<sup>2</sup>)

$p_w$  - valni pritisak,  $p_w=0$

$r_i$  - koeficijent koji ovisi o relativnom položaju upore,  $r_i=0,9^i$  (ne uzima se manji od 0,478)

$Q_{i,s}$  - statičko opterećenje koje se prenosi od i-te upore iznad opterećene upore, [kN]

$Q_{i,w}$  - valno opterećenje koje se prenosi od i-te upore iznad opterećene upore, [ $Q_{i,w}=0$  kN]

Tablica 6. Aksijalna sila u uporama

ri	ri-uzeto		Ps [kN/m <sup>2</sup> ]	Qi [kN]	γS2	ri*Q*γS2	Fa [kN]
0.9	0.9	upora 10-11	2.26	49.47	1	0	49.47
0.81	0.81	upora 9-10	4.04	88.43	1	71.62	160.05
0.73	0.73	upora 8-9	4.04	88.43	1	64.46	224.51
0.66	0.66	upora 7-8	8.08	176.85	1	116.03	428.97
0.59	0.59	upora 6-7	8.08	176.85	1	104.43	533.40
0.53	0.53	upora 5-6	16.00	350.20	1	186.11	892.86
0.48	0.48	upora 4-5	8.08	176.85	1	84.59	804.10
0.43	0.48	upora 3-4	8.08	176.85	1	84.53	888.63
0.39	0.48	upora 2-3	8.08	176.85	1	84.53	973.17
0.35	0.48	upora 1-2	8.08	176.85	1	84.53	1057.70

### Izvijanje upore

Eulerovo naprezanje za izvijanje upora se računa prema izrazu [4]:

$$\sigma_{E1} = \pi^2 E \frac{I}{A(fl)^2} 10^{-4} \quad (2.11.)$$

Gdje su:

$E$  - modul elastičnosti, (za obični brodograđevni čelik  $E=204000 \text{ N/mm}^2$ )

$A$  - poprečni presjek upore, [ $\text{mm}^2$ ]

$f$  - koeficijent,  $f=1$

$I$  - moment inercije, [ $\text{mm}^4$ ]

$l$  - duljina upore, [m]

Tablica 7. Geometrijske karakteristike različitih upora

	A [mm <sup>2</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> ]
Upora 250x250x8	7744	75669205
Upora 250x250x10	9600	92320000

Kritična naprezanja se računaju prema izrazu (2.7.)

Tablica 8. Eulerova i kritična naprezanja

	l [m]	f	$\sigma_{EI}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{cB}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
upora 1-2	2.45	1	3225.69	230.72
upora 2-3	2.45	1	3277.57	230.79
upora 3-4	2.45	1	3277.57	230.79
upora 4-5	2.45	1	3277.57	230.79
upora 5-6	2.65	1	2801.51	230.07
upora 6-7	2.42	1	3359.33	230.89
upora 7-8	2.42	1	3359.33	230.89
upora 8-9	2.42	1	3359.33	230.89
upora 9-10	2.42	1	3359.33	230.89
upora 10-11	2.54	1	3049.41	230.47

Lokalno izvijanje upora

Eulerovo naprezanje se izračunava prema sljedećem izrazu [4]:

$$\sigma_{E3} = 32 \left( \frac{t_f}{b_f} \right)^2 10^4 \quad (2.12.)$$

Gdje su:

$t_f$  - debljina stijenke

$b_f$  - širina upore

Kritična naprezanja se računaju prema izrazu (2.7.)

Tablica 9. Eulerova i kritična naprezanja

	$\sigma_{E3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{cL}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Upora 250x250x8	327.68	234.18
Upora 250x250x10	512.00	234.11

Moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti [4]:

$$\frac{\sigma_{CB}}{\gamma_R \gamma_m} \leq 10 \frac{F_A}{A} \quad (2.13.)$$

$$\frac{\sigma_{cL}}{\gamma_R \gamma_m} \leq 10 \frac{F_A}{A}$$

Gdje su:

- $\gamma_r$  - koeficijent za izvijanje upore,  $\gamma_r=1,15$   
 $\gamma_m$  - koeficijent za lokalno izvijanje,  $\gamma_m=1,05$

Tablica 10. Kriteriji za izvijanje upora

	$F_A$	$\sigma_{cB}/(\gamma_R \gamma_m)$	$\sigma_{cL}/(\gamma_R \gamma_m)$	$10 \cdot F_A/A$	Zadovoljava
upora 1-2	1057.70	196.69	218.59	110.18	DA
upora 2-3	973.17	196.75	218.65	125.67	DA
upora 3-4	888.63	196.75	218.65	114.75	DA
upora 4-5	804.10	196.75	218.65	103.83	DA
upora 5-6	892.86	196.14	218.65	115.30	DA
upora 6-7	533.40	196.84	218.65	68.88	DA
upora 7-8	428.97	196.84	218.65	55.39	DA
upora 8-9	224.51	196.84	218.65	28.99	DA
upora 9-10	160.05	196.84	218.65	20.67	DA
upora 10-11	49.47	196.48	218.65	6.39	DA

### 3. GENERIČKI MODELI

#### 3.1. Uvod

Kroz ovo poglavlje predloženi su generički 3D MKE modeli na razini strukturnog modela i modela opterećenja primjenjivih u konceptualnoj fazi projekta. Usporedba odziva predloženog generičkih modela s 3D MKE modelom cijelog broda provedena je u poglavlju 3.5.

Količina informacija koja je na raspolaganju projektantu konstrukcije, te kratkoća vremena bitno definiraju mogućnosti i zahtjeve na projektni model u konceptualnoj fazi. Postavljena su određena ograničenja i zahtjevi koje generički projektni model treba ispunjavati [1]:

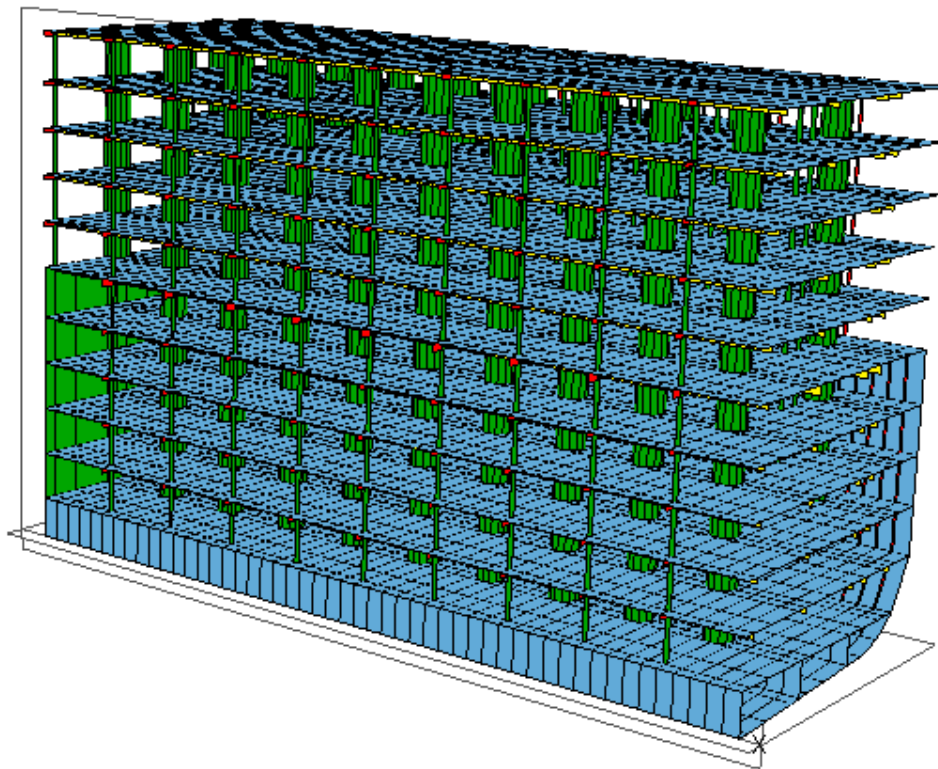
- Brzo generiranje strukturnog modela i modela opterećenja (kroz 1 čovjek/dan) na osnovu skice glavnog rebra s inicijalnim dimenzijama i rasporedom prostora definiranog kroz generalni plan, te brzo generiranje topološki različitih varijanti konstrukcije.
- Projektni model mora biti takav da na objektivan način omogućava izbor najprikladnije topologije, te provjeru strukturnih dimenzija u području oko glavnog rebra ( $0.4 L$ ) za uzdužnu i poprečnu čvrstoću.
- Odziv konstrukcije (naprezanja i pomaci) s obzirom na uzdužnu čvrstoću, prvenstveno u strukturi nadgrađa predloženog modela, moraju biti u okviru 10-15% rezultata koji bi se dobili u kasnijoj fazi s 3D MKE modelom cijelog broda za iste slučajeve opterećenja u području oko glavnog rebra ( $0.4 L$ ).
- Krivulja distribucije primarnih naprezanja generičkog modela po visini poprečnog presjeka mora kvalitativno odgovarati onoj koja bi se dobila s 3D MKE modelom cijelog broda za iste slučajeve opterećenja u području oko glavnog rebra ( $0.4 L$ ).
- Projektni model mora biti prikladan za formalnu optimizacijsku proceduru, tj. za automatizirano redimenzioniranje strukturnih elemenata u cilju postizanja određenog cilja (minimalna cijena i težina, maksimalna sigurnost, itd.).
- Projektni model nije namijenjen rješavanju lokalnih detalja, koncentracija naprezanja, zamora, itd. (takvi detalji rješavaju se u sljedećoj, preliminarnoj fazi projekta).
- Projektni model mora biti takav da bude prikladan za daljnju izgradnju, modifikaciju, profinjene mreže i definiranje raznih lokalnih detalja, te predstavlja početni korak u izgradnji detaljnog strukturnog MKE modela cijelog broda za završnu evaluaciju podobnosti konstrukcije kao nužnog koraka koji slijedi.



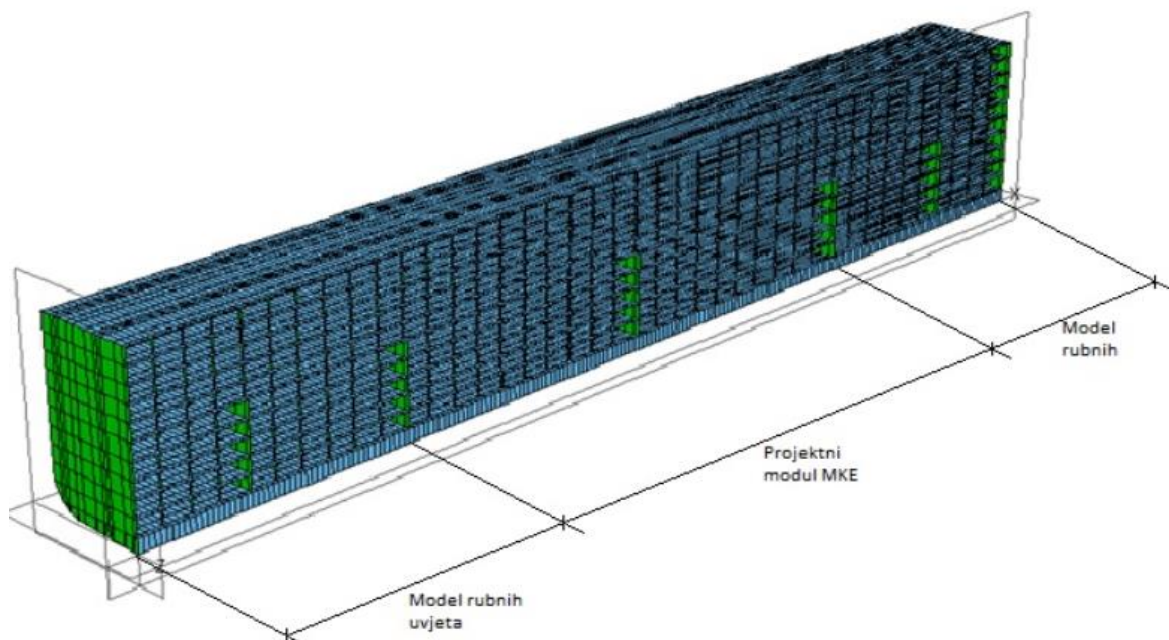
### 3.2. Generički strukturni 3D MKE modeli

Predloženi generički 3D MKE model općenito ima sljedeće karakteristike [1]:

- duljina modela otprilike odgovara duljini nadgrađa,
- prizmatičnog je oblika, dobiven ekstruzijom glavnog rebra → moguće je raditi i promjene forme ili topologije po duljini modela ovisno o raspoloživom vremenu,
- strukturne dimenzije modela uniformne su duž modela → moguće je raditi i promjene po duljini modela,
- gustoća mreže slijedi topologiju primarnog orebrenja, roštilja:
- uzdužno, barem jedan element između poprečnih okvira;
- vertikalno, barem jedan red elemenata između paluba;
- poprečno, dovoljan broj elemenata da se zadrži omjer stranica makroelementa,
- modelirane su sve strukturno značajne uzdužne i poprečne pregrade s ekvivalentnom krutosti i duljinom/visinom/širinom protezanja,
- orebreni panel modelira se membranskim/pločastim konačnim elementima ili pak makroelementima, dok sekundarno orebrenje može biti uključeno bilo kao dio makroelementa orebrenog panela ili kao linijski štapni konačni element u čvorovima,
- sponje i rebra (poprečni okvir), te palubne podveze modelirani su grednim konačnim elementom,
- upore na koje se oslanjaju bočni zidovi nadgrađa modelirani su grednim elementima,
- jake ventilacijske cijevi su modelirane i grednim i pločastim konačnim elementima, te je napravljena usporedba, vidi poglavlje 3.3.

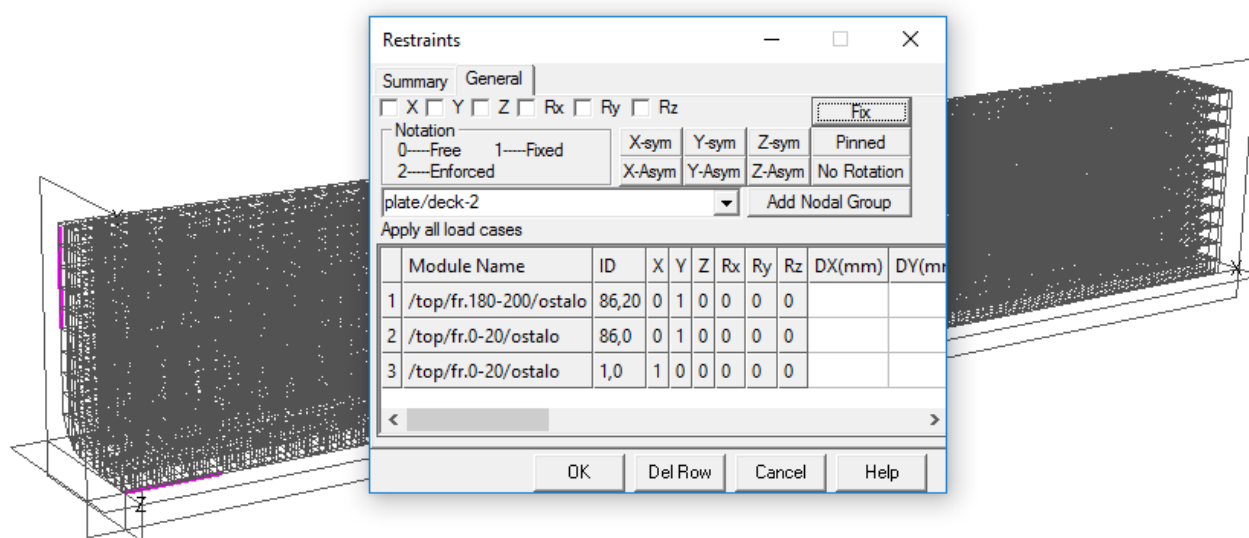


Slika 6. Jedan od modula MKE modela broda za prijevoz žive stoke



Slika 7. Generički 3D MKE model broda za prijevoz stoke

Duljina modela otprilike odgovara duljina broda između perpendikulara ili od pramčane do krmene kolizijske pregrade. Topološka istraživanja provodimo na način da model prilagođavamo po cijeloj duljini, dok je za rezultate naprezanja i strukturnu optimizaciju relevantan dio 0.4L oko glavnog modela (PROJEKTNI MODEL, slika 7). Modeli rubnih uvjeta namijenjeni su simuliranju ekvivalentne krutosti. Zbog nedovoljno točnog modeliranja, čiji detalji u konceptualnoj fazi najčešće nisu ni dostupni (forma, detalji, strukture strojarnice, pikova, itd.) nisu prikladni za točniju procjenu odziva. Spriječen je samo minimalni broj stupnjeva slobode modela koji onemogućavaju pomak modela kao krutog tijela. Rubni uvjeti su propisane vrijednosti translacijskih i rotacijskih pomaka, te su definirani kao 0 (slobodni) i 1 (spriječeni). Prva tri broja označavaju translacijske pomake u smjeru osi X, Y i Z, a zadnje tri broja označavaju rotacijske pomake oko istih osi. Pomaci u smjeru osi Z i rotacije oko X i Y su kod polovičnog simetričnog modela automatski spriječeni u MAESTRU [5].

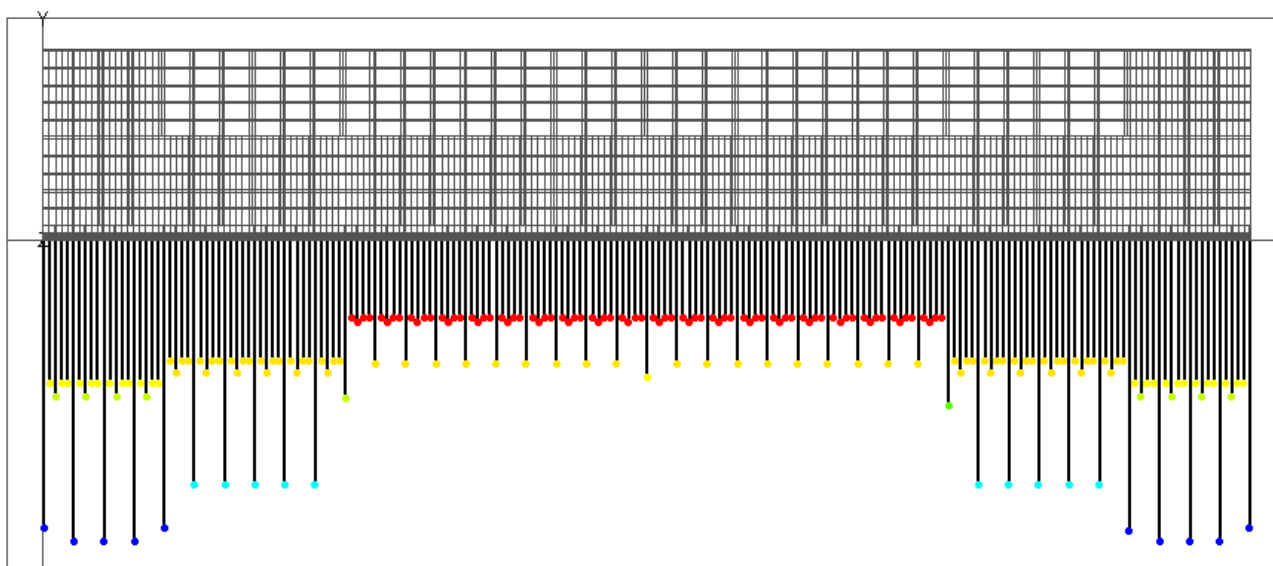


Slika 8. Rubni uvjeti

### 3.3. Opterećenje modela

Ovakav tip broda ima finu formu sa blok koeficijentom  $C_B=0,549$  te ima relativno kontinuiran raspored vlastite težine i tereta. S obzirom da se forma broda sužava prema pramcu i krmi, ovaj brod je na mirnoj vodi u stanju pregiba, što znači da ima višak težine na krajevima a višak uzgona na sredini. Uslijed takve distribucije statičkog opterećenja, dobiveni statički momenti pregiba su vrlo veliki. Zbog toga nam se najveća moguća uzdužna naprezanja javljaju u kombinaciji maksimalnog statičnog pregibnog momenta savijanja i maksimalnog valnog pregibnog savijanja. Kada nam se brod nađe u situaciju da je na maksimalnom progibnom valnom momentu i minimalnom statičkim pregibnim momentom, postoji vjerojatnost da se brod dođe u stanje progiba. To se svakako pokušava izbjeći jer se tada javljaju tlačna naprezanja u palubama nadgrađa, što zbog tankih limova može prouzrokovati izvijanje palube. Kritična naprezanja za izvijanje pojedinih paluba su izračunata u poglavlju 2.4. Upravo zbog navedenih razloga se teži da se brod ne nađe u stanje progiba, te se na taj način i projektira.

Generički model je rađen, kako je ranije i navedeno, ekstruzijom glavnog rebra, a vlastitu težinu modela program sam računa te ju implementira u čvorovima. Teži se dovesti model što bliže pravom projektu, pa zadajemo opterećenja po palubama preko masa tereta žive stoke iz knjige trima i stabiliteta, a pregib na mirnoj vodi može postići dodavanjem mase u modulima na pramcu i na krmi, što je prikazano na slici 9. Zahtijevani momenti u pregibu i progibu se dobiju simulacijom sinusoidalnog vala, kojem se mijenja faza kako bi se dobio valni brijeg ili dol, te potrebna visina vala da bi se dobilo zahtijevani ukupni moment. Slučajevi opterećenja su prikazani u tablici 11 i na slikama 10 i 11.



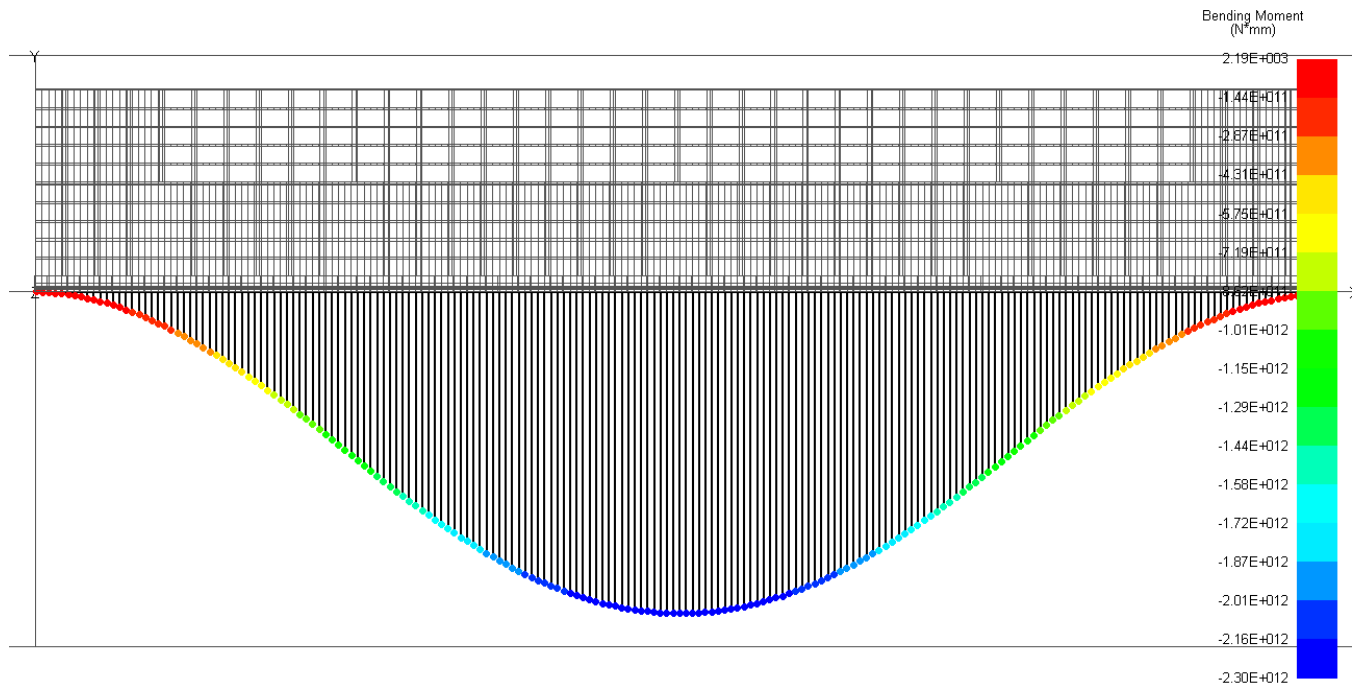
Slika 9. Distribuirana masa po duljini modela

Tablica 11. Slučajevi opterećenja

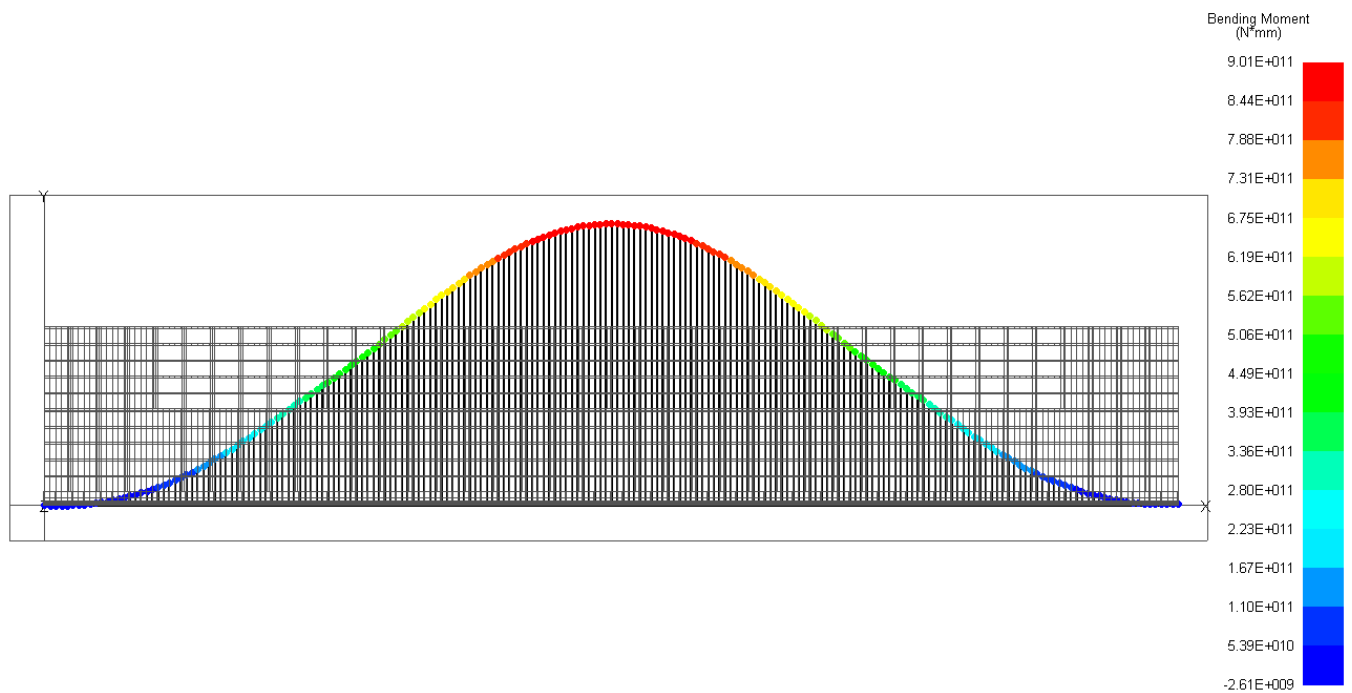
Slučaj opterećenja	Stanje krcanja	Duljina vala (mm)	Faza vala (°)	Amplituda vala (mm)	Ukupni vertikalni moment (Nmm)
LC1	Maksimalni pregib	170000	180	2935	-2.30E+12
LC2	Maksimalni progib	170000	0	4140	9.00E+11

Napomena: U programu Maestro pregibni momenti imaju negativni, a progibni momenti pozitivan predznak.

Također, bitno je napomenuti kako se u daljnjem radu amplituda vala mijenjala ovisno o pojedinom modelu, da bi bio zadovoljen potrebn moment.



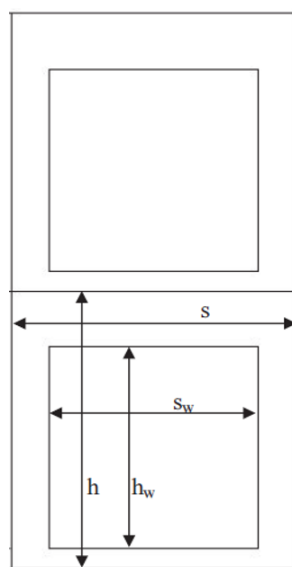
Slika 10. Slučaj opterećenja 1 - pregib



Slika 11. Slučaj opterećenja 2 - progib

### 3.4. Modeliranje prozora

Bočni otvori su se modelirali pomoću Fransmanove metode membrane ekvivalentne debljine [1]. Metoda membrane ekvivalentne debljine je analitički postupak za proračun ekvivalentne krutosti bočnih otvora, temeljenog na grednoj teoriji smicanja i savijanja. Kao rezultat postupka dobiva se ekvivalentna debljina membrane koja ima smičnu krutost jednaku panelu sa otvorom. Prikaz prozora s pripadajućim dimenzijama je prikazan na slici 12.



Slika 12. Dimenzije otvora i njihov položaj na boku [6]

Gdje su:

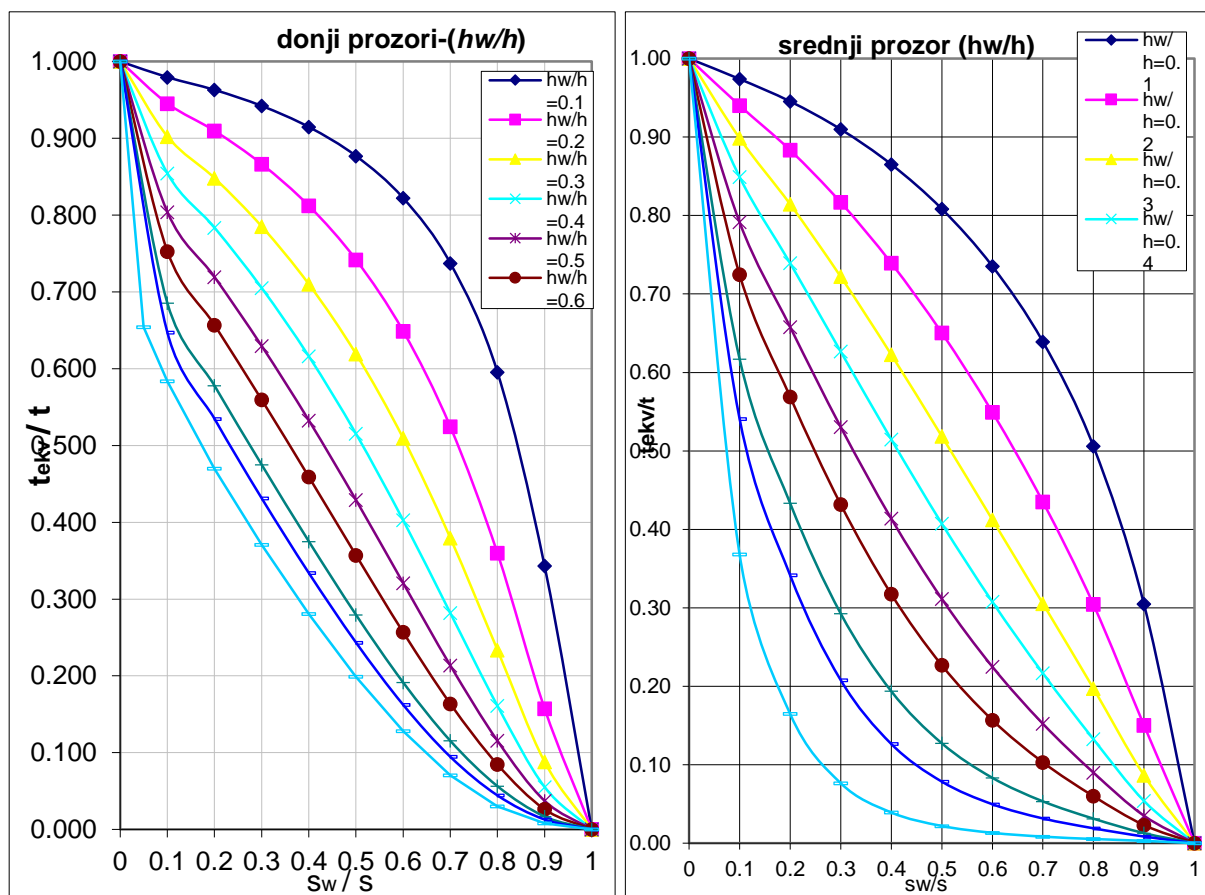
$s$  - razmak između okvira

$h$  - visina između paluba

$s_w$  - širina otvora

$h_w$  - visina otvora

Za proračun elemenata bočnog otvora čija je ekvivalentna debljina određena korištenjem Fransmanove metode korišteni su dijagrami prikazani na slici 13.



Slika 13. Dijagrami za određivanje ekvivalentne debljine membrane za modeliranje oplata boka s otvorima po metodi ekvivalentne smične krutosti [1]

Za provedenu usporedbu vrijednosti ekvivalentnih debljina membrane za pripadajuće omjere otvora koji su korišteni u ovom diplomskom radu, dane su u tablici 12.

Glavne dimenzije otvora u modelu su:

$s = 4250 \text{ mm}$

$h = 2420 \text{ mm}$

$t = 10 \text{ mm}$

Tablica 12. Debljine ekvivalentne membrane

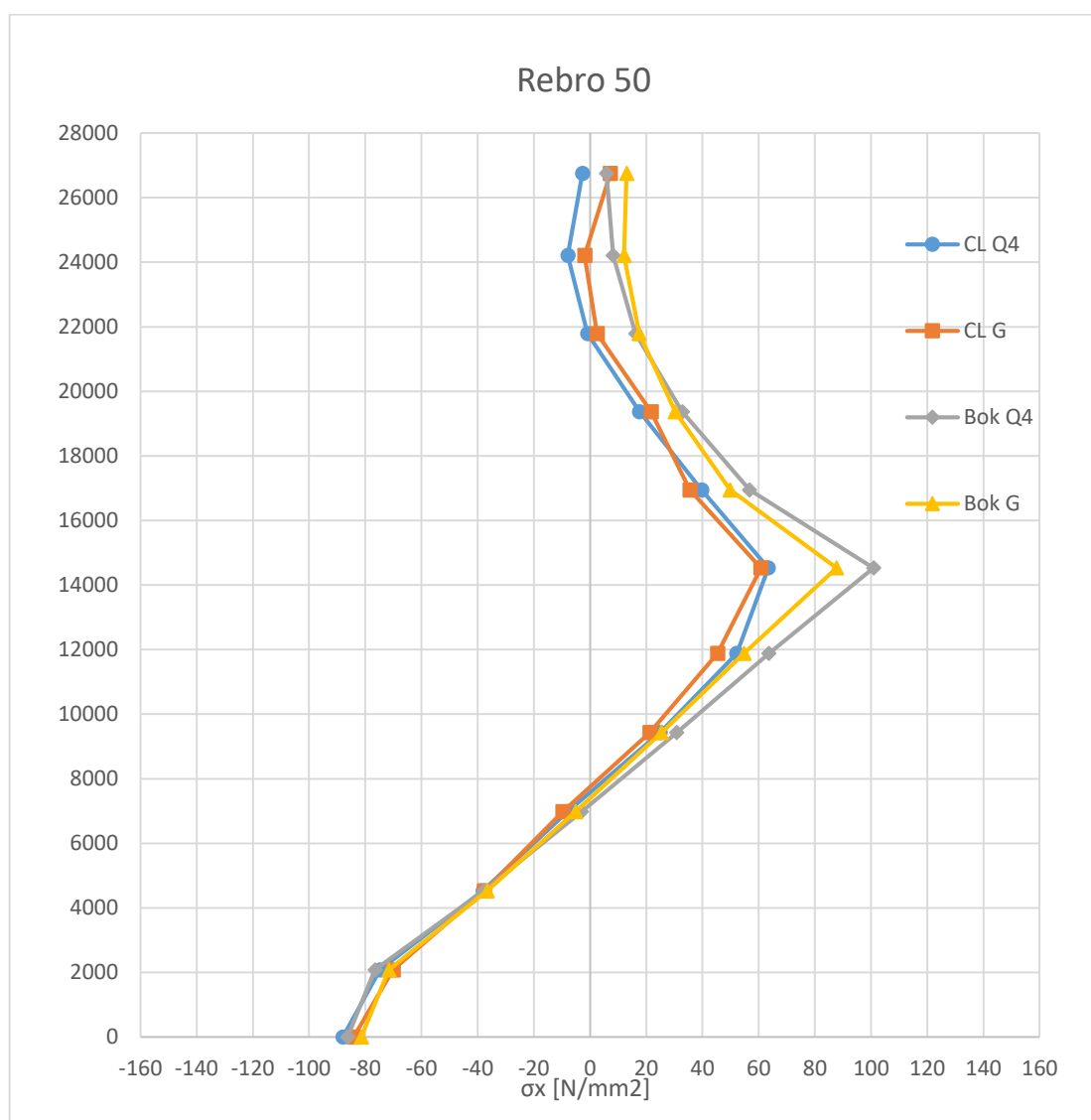
		omjer otvora ( $h_w/h$ ; $s_w/s$ ;) )					
		0.5; 0.5	0.6; 0.6	0.7; 0.7	0.8; 0.8	0.9; 0.9	$h_w/h=0.4$ ; $s_w/s=0.9$
t(mm)	donji prozor	4.29	2.57	1.15	0.44	0.08	0.55
	ostali prozori	3.1	1.6	0.5	0.2	0.03	0.5



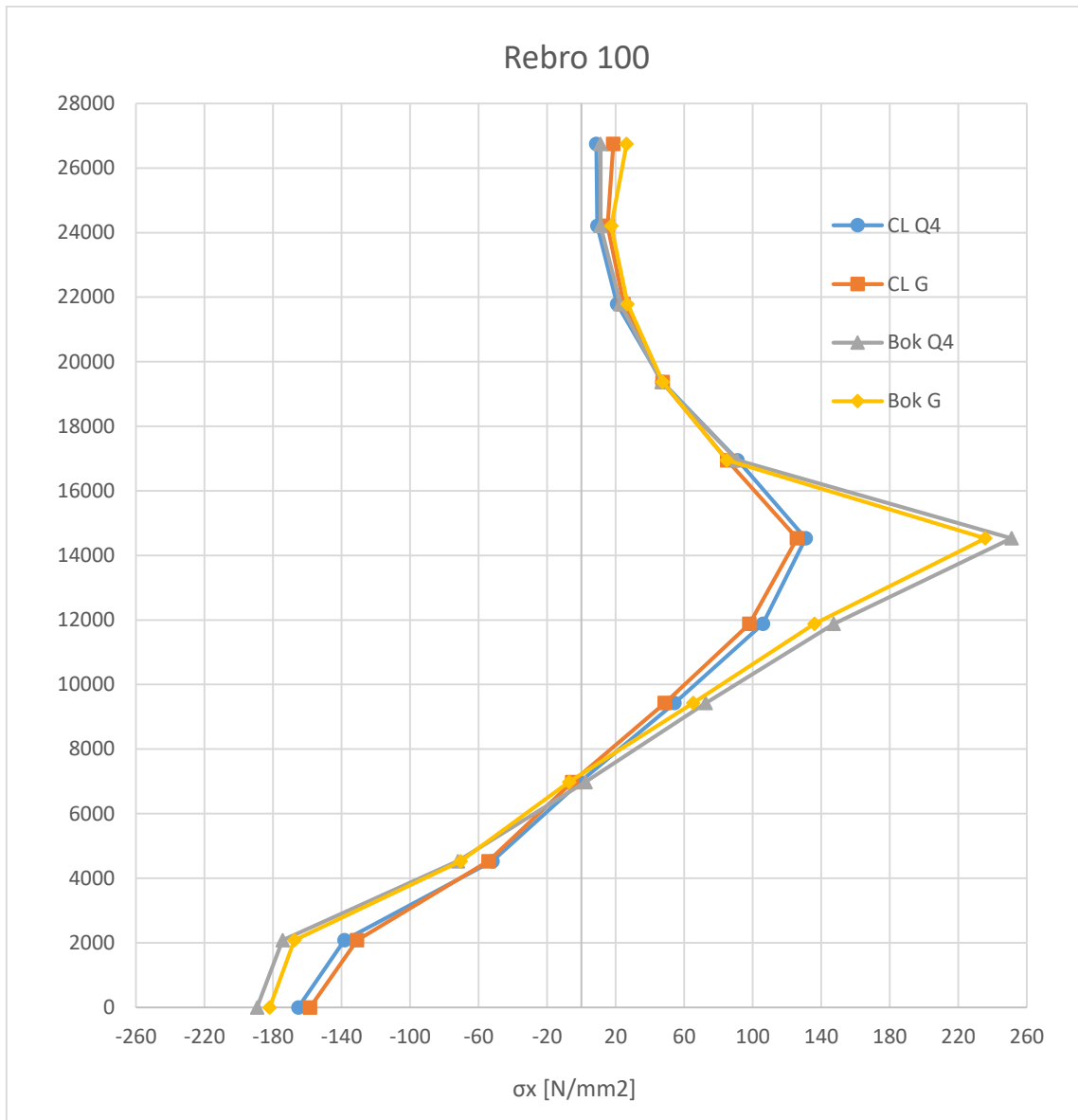
### 3.5. Modeliranje ventilacijskih kutija

Kad je napravljen generički model uspoređen je isti model u varijanti gdje su ventilacije izrađene grednim konačnim elementom i u varijanti gdje su ventilacije izrađene pločastim konačnim elementom. Razlog ove usporedbe je da bi vidjeli u kojoj mjeri su naprezanja slična različitim metodama modeliranja.

Dijagrame primarnih naprezanja modela s grednim konačnim elementom (G) i modela pločastim konačnim elementom (Q4) na rebrima 50 i 100 možemo vidjeti na sljedećim slikama.



Slika 14. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 50



Slika 15. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 100

Uspoređen je odziv ta dva modela na dva presjeka, rebru 50 i rebru 100. Očitana naprezanja za te modele po palubama možemo vidjeti u tablici 3.6, a odstupanja u naprezanju možemo vidjeti u tablici 3.7, gdje su greške izražene u postotku po sljedećoj formuli [1]:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{x,ref} - \sigma_{x,gen}}{\sigma_{x,ref}} \cdot 100\% \quad (3.1.)$$

U ovom primjeru je za referentni model odabran model gdje su ventilacije modelirane pločastim konačnim elementima (Q4), a generički model gdje su modelirane grednim konačnim elementima (G).

Također, greška naprezanja je izračunata na 3 nivoa:

- 1) srednje naprezanje u palubama nadgrađa
- 2) srednje naprezanje u palubama trupa
- 3) srednje naprezanje preko cijele visine presjeka

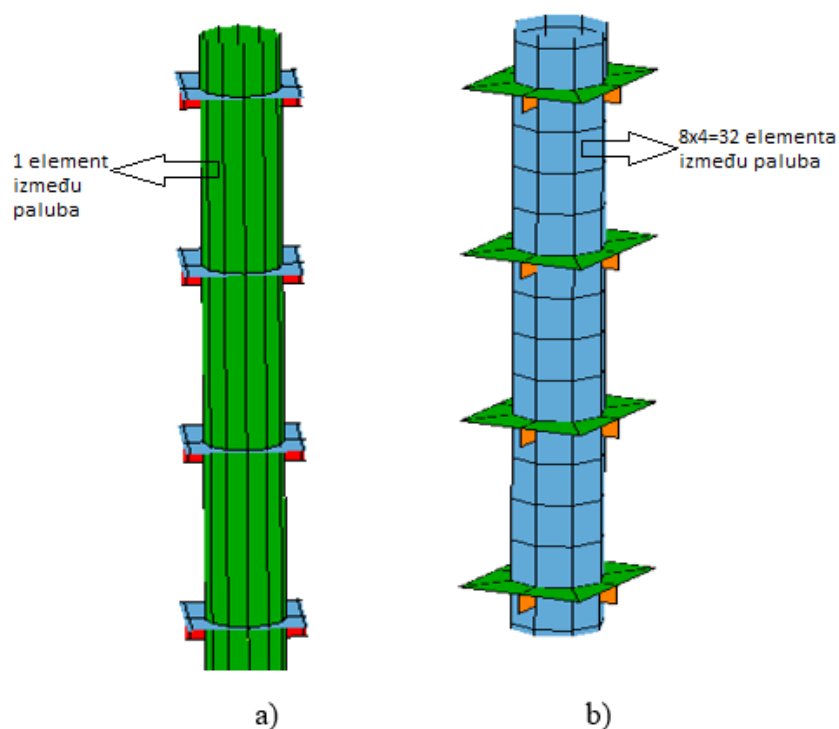
Tablica 13. Očitavanja naprezanja modela s različito modeliranim ventilacijama

		$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]							
Deck	From BL	Rebro 50				Rebro 100			
		Pločasti		Gredni		Pločasti		Gredni	
		Cl	Bok	Cl	Bok	Cl	Bok	Cl	Bok
11	26750	-2.7	5.9	7.2	13	8.7	11.2	18.6	26.4
10	24210	-7.9	8.2	-1.9	12.1	9.3	11.2	15.3	17.5
9	21790	-0.9	16.2	2.5	17.5	20.9	22.7	24.6	26.9
8	19370	17.6	32.8	21.7	30.26	47.3	46.9	47.4	47.5
7	16950	39.7	56.7	35.5	49.8	91.2	90.8	85.1	84.9
6	14530	63.4	100.9	60.8	87.7	130.9	251.1	125.9	235.8
5	11880	52.2	63.6	45.4	54.75	106.0	147.3	98.1	136.1
4	9430	24.9	30.8	21.3	25.4	54.4	72.6	48.7	65.25
3	6980	-8.1	-3.1	-9.7	-5.2	-0.9	2.4	-5.3	-7.1
2	4530	-38.1	-37.8	-37.6	-36.6	-51.9	-72.1	-54.2	-70.4
1	2080	-74.8	-76.6	-70.1	-71.6	-138.3	-174.4	-131.0	-167.49
0	0	-88.0	-86.3	-84.2	-81.4	-165.2	-189.3	-158.4	-181.9

Tablica 14. Usporedba naprezanja modela s različito modeliranim ventilacijama

	Greška naprezanja $\Delta\sigma_x$ (%)	
	Rebro 50	Rebro 100
Srednje naprezanje u palubama nadgrađa	2%	2%
Srednje naprezanje u palubama trupa	3%	4%
Srednje naprezanje preko cijelog presjeka	2%	1%

Kao što se može vidjeti model gdje se koriste gredni konačni elementi vrlo dobro prate model gdje su ventilacije izgrađene pločastim konačnim elementima sa greškom manjom od 5%. To nam daje veliku fleksibilnost u daljnjem istraživanju jer se modeli s grednim konačnim elementima puno brže i lakše modificiraju i variraju. Na slici 16 možemo vidjeti ventilacije modeliranim grednim i pločastim konačnim elementima.



Slika 16. Usporedba ventilacijskih kutija modeliranih (a) grednim i (b) pločastim konačnim elementima

### 3.6. Usporedba primarnog odziva generičkog i detaljnog MKE modela

Kako bi bili sigurni da nam naš generički model daje prihvatljive rezultate, s kojim možemo u ovoj početnoj fazi vidjeti i utjecaj različitih zanimljivih parametara na odziv, potrebno ga je usporediti sa detaljnim MKE modelom cijelog broda prikazanim na slici 3 [7].

Uspoređen je odziv ta dva modela na rebru 100, za slučaj opterećenja 1 (maksimalni pregib). Očitana napreznja za te modele po palubama možemo vidjeti u tablici 15, a odstupanja u napreznju možemo vidjeti u tablici 16, gdje su greške izražene u postotku po izrazu (3.1.).

U ovom primjeru je za referentni model odabran detaljni MKE model cijelog broda, a generički model je modeliran tako da je:

- 1) izrađen model na temelju nacrtu glavnog rebra, te ekstrudiran po cijeloj duljini
- 2) modelirane su sve strukturno značajne uzdužne i poprečne pregrade s ekvivalentnom krutosti i duljinom/visinom/širinom protezanja
- 3) bočni otvori su modelirani kako je prikazano poglavlju 3.4.

Također, greška napreznja je izračunata na tri nivoa:

- 1) Srednje apsolutno odstupanje u palubama nadgrađa
- 2) Srednje apsolutno odstupanje u palubama trupa
- 3) Srednje apsolutno odstupanje po cijeloj visini presjeka

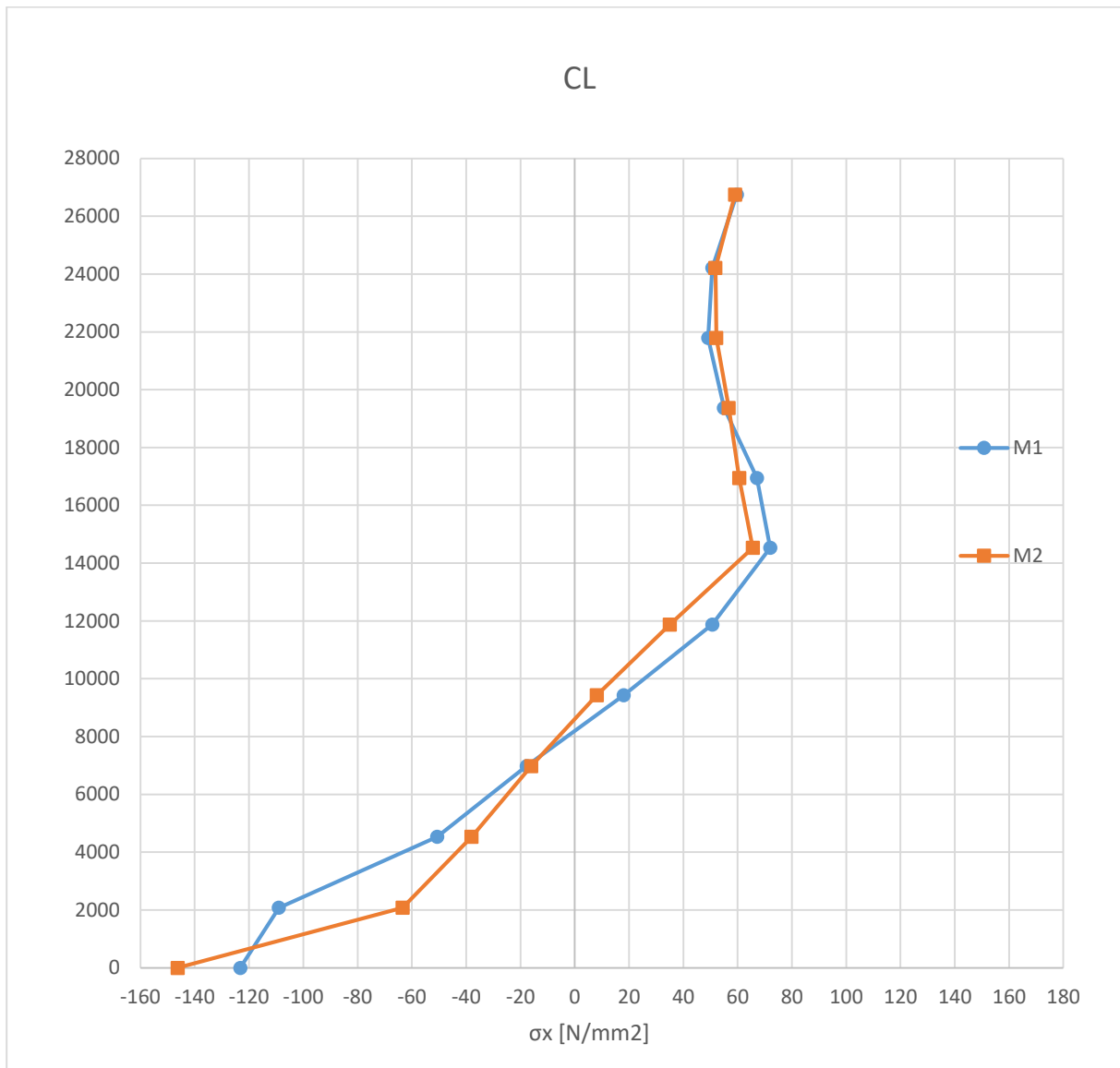
Tablica 15. Očitavanje naprezanja na rebru 100

Rebru 100					
Deck	From BL	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]			
		M1 – generički model		M2 – model cijelog broda	
		Cl	Bok	Cl	Bok
11	26750	59.7	60.7	59.0	51.4
10	24210	50.7	53.4	51.8	45.0
9	21790	49.1	50.9	52.2	45.0
8	19370	55.0	57.5	56.8	47.4
7	16950	67.1	81.9	60.6	61.4
6	14530	72.0	163.8	65.6	109.2
5	11880	50.7	87.7	35.0	69.5
4	9430	18.0	35.1	8.1	24.1
3	6980	-17.7	-13.6	-16.0	-14.9
2	4530	-50.7	-66.0	-38.0	-48.1
1	2080	-109.0	-145.6	-63.4	-89.4
0	0	-123.2	-152.7	-146.3	-126.2

Tablica 16. Usrednjena naprezanja na rebru 100

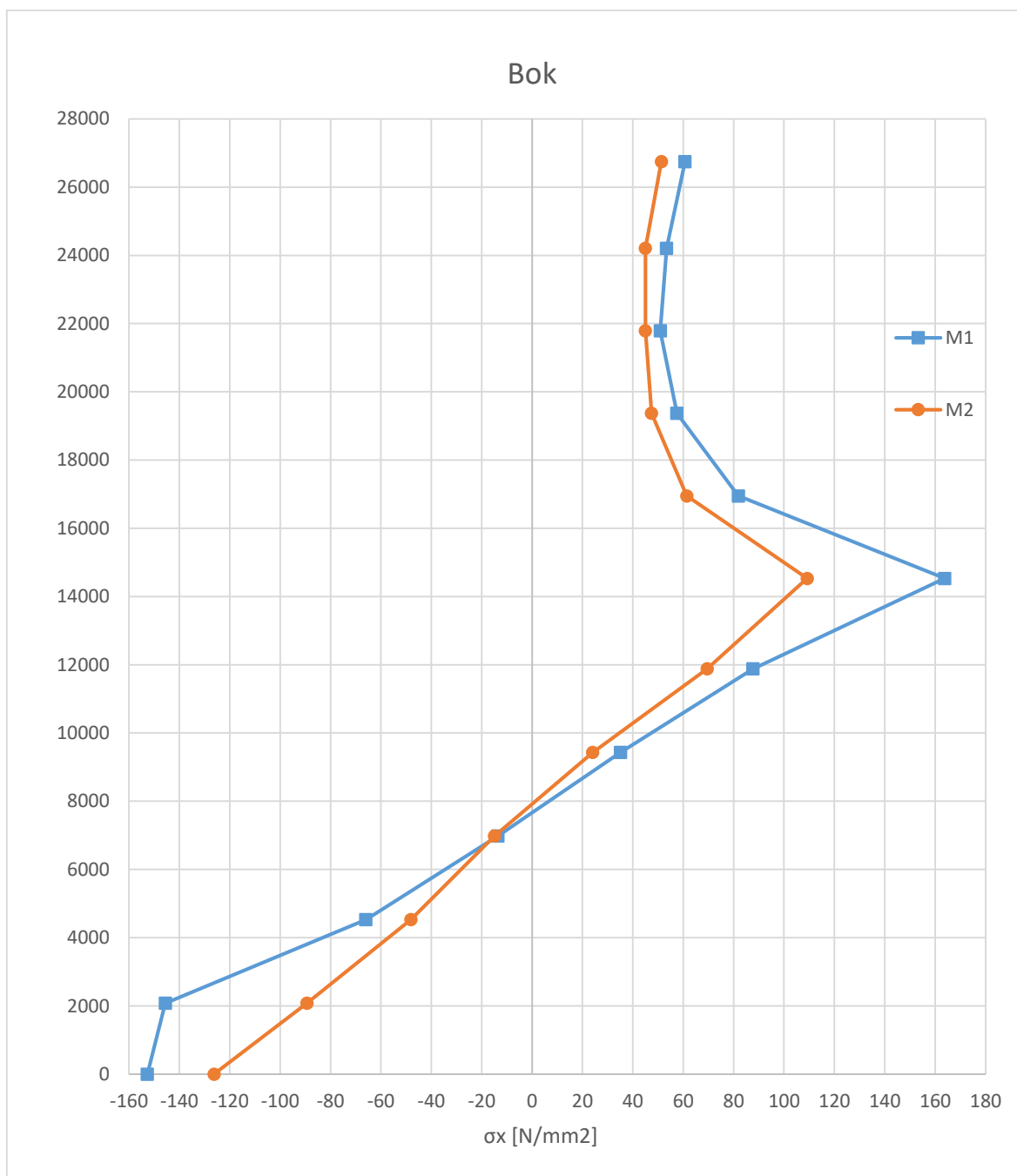
Frame 100			
Deck	From BL	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ] – sr. naprezanja	
		M1	M2
		$\sigma_{sr}$	$\sigma_{sr}$
11	26750	60.2	55.2
10	24210	52.1	48.4
9	21790	50.0	48.6
8	19370	56.3	52.1
7	16950	74.5	61.0
6	14530	117.9	87.4
5	11880	69.2	52.3
4	9430	26.6	16.1
3	6980	-15.7	-15.5
2	4530	-58.4	-43.1
1	2080	-127.3	-76.4
0	0	-138.0	-136.3

Grafički prikaz naprežanja je prikazan na slikama 17, 18 i 19.



Slika 17. Usporedba distribucije naprežanja na CL

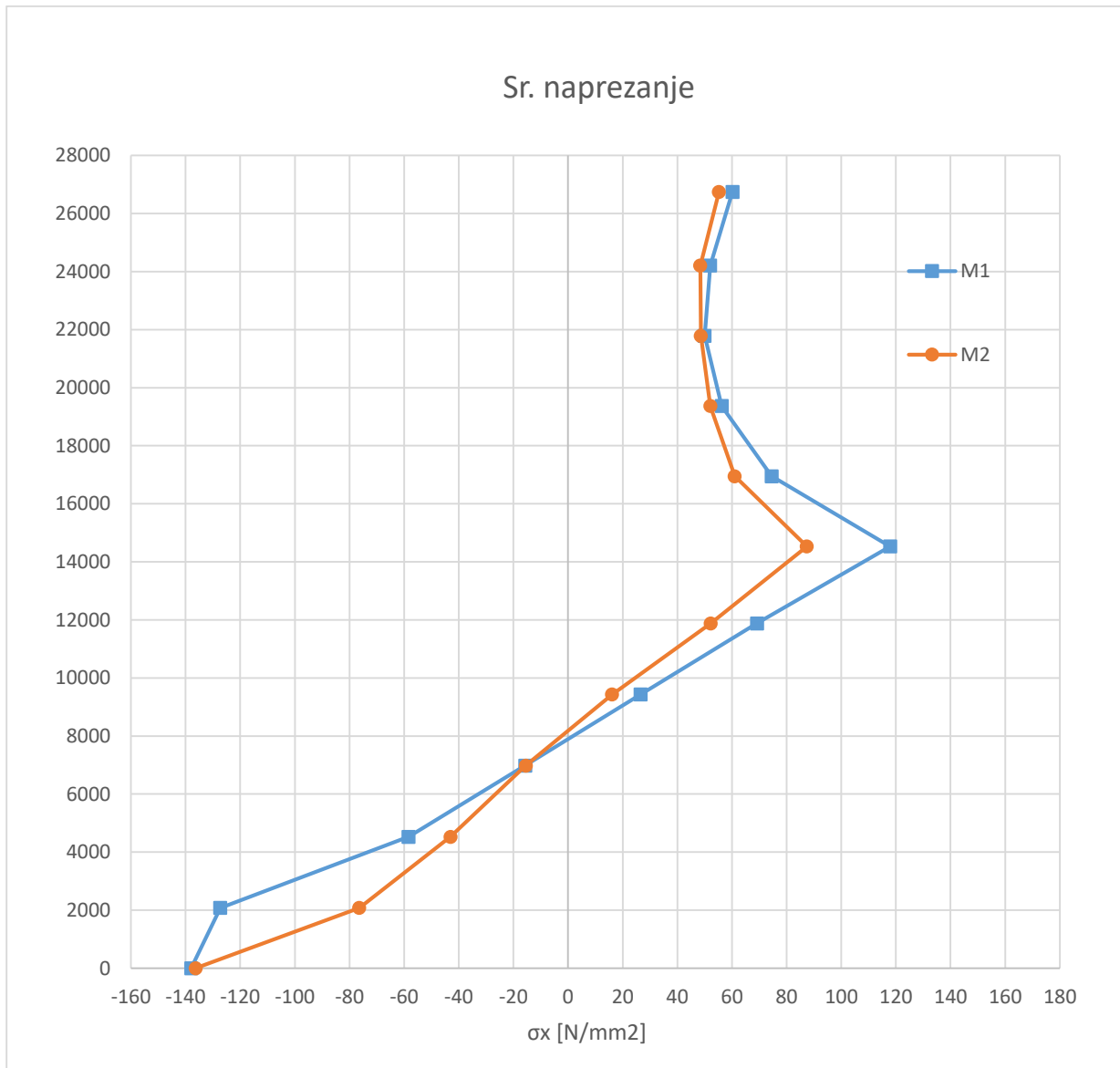
Na ovoj slici vidimo usporedbu generičkog modela M1, i detaljnog MKE cijelog broda M2. Može se primijetiti kako je trend jako dobar i naprežanja vrlo malo odstupaju jedna od drugih, a naročito u području nadgrađa. Jedino se malo veća razlika naprežanja može primijetiti na palubi 1 što je utjecaj promijenjenih dimenzija u MKE modelu ali i vitkosti forme, tj. generički model je nepromjenjive forme preko cijele duljine modela, dok je forma MKE modela jako vitka, te ima samo na kraćem dijelu sredine broda paralelne presjeke a prema pramcu i krmi se forma mijenja. Greške u odstupanjima se mogu vidjeti u tablici 17.



Slika 18. Usporedba distribucije napreznja na boku modela

Na ovoj slici može se primijetiti malo veća odstupanja u području palube 6 i palube 1. Na palubi 1 imamo isti slučaj kao i na prethodnoj slici. Na palubi 6 je vidljivo odstupanje koje najvjerojatnije dolazi zbog toga što su napreznja na MKE modelu M2 očitana nekoliko rebara iza glavnog rebra pa možda već dolazi do mijenjanja forme, a razlog očitavanja iza glavnog rebra je što u području oko glavnog rebra imamo izrez na palubi. Greške u odstupanjima se mogu vidjeti u tablici 17.





Slika 19. Usporedba distribucije usrednjenih naprezanja

Iz usrednjenih naprezanja se može vidjeti da je trend jako dobar i naprezanja vrlo malo odstupaju u području nadgrađa, što je bitno za analizu efikasnosti u ovom diplomskom radu. Jedino se malo veća odstupanja mogu primijetiti na palubi 1 i palubi 6 što je objašnjeno prethodno u tekstu. Greške u odstupanjima se mogu vidjeti u tablici 17.

Tablica 17. Usporedba naprezanja generičkog i referentnog modela

		M1 -generički model	M2 – MKE model cijelog broda	Greška
		$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
CL	Područje nadgrađa	58.94	57.67	2%
	Područje trupa	-38.65	-36.76	5%
	Preko cijelog presjeka	10.15	10.45	3%
Bok	Područje nadgrađa	78.03	59.91	30%
	Područje trupa	-42.52	-30.83	38%
	Preko cijelog presjeka	17.76	14.54	22%
Usrednjena naprezanja	Područje nadgrađa	68.49	58.79	17%
	Područje trupa	-40.58	-33.80	20%
	Preko cijelog presjeka	13.95	12.50	12%

Kao što se može vidjeti iz priloženih dijagrama i tablice ukupna greška preko cijele visine presjeka iznosi  $\Delta\sigma = 12\%$ , što nam je zadovoljavajuće jer smo u poglavlju 3.1. naveli kako je potrebno da odstupanje ne bude veće od 15%. Međutim ukoliko uzmemo u obzir razloge odstupanja na području paluba 1 i 6, može se zaključiti da bi greška odstupanja bila puno manja. Također, iz tablice 16 može se primijetiti kako generički model uvijek daje veća naprezanja u odnosu na MKE model cijelog broda, što je također prednost u ovoj fazi jer smo na strani sigurnosti.

## 4. ISTRAŽIVANJE RAZLIČITIH TOPOLOŠKIH KONCEPATA

### 4.1. Utjecaj geometrijskih karakteristika ventilacijskih kutija na efikasnost nadgrađa

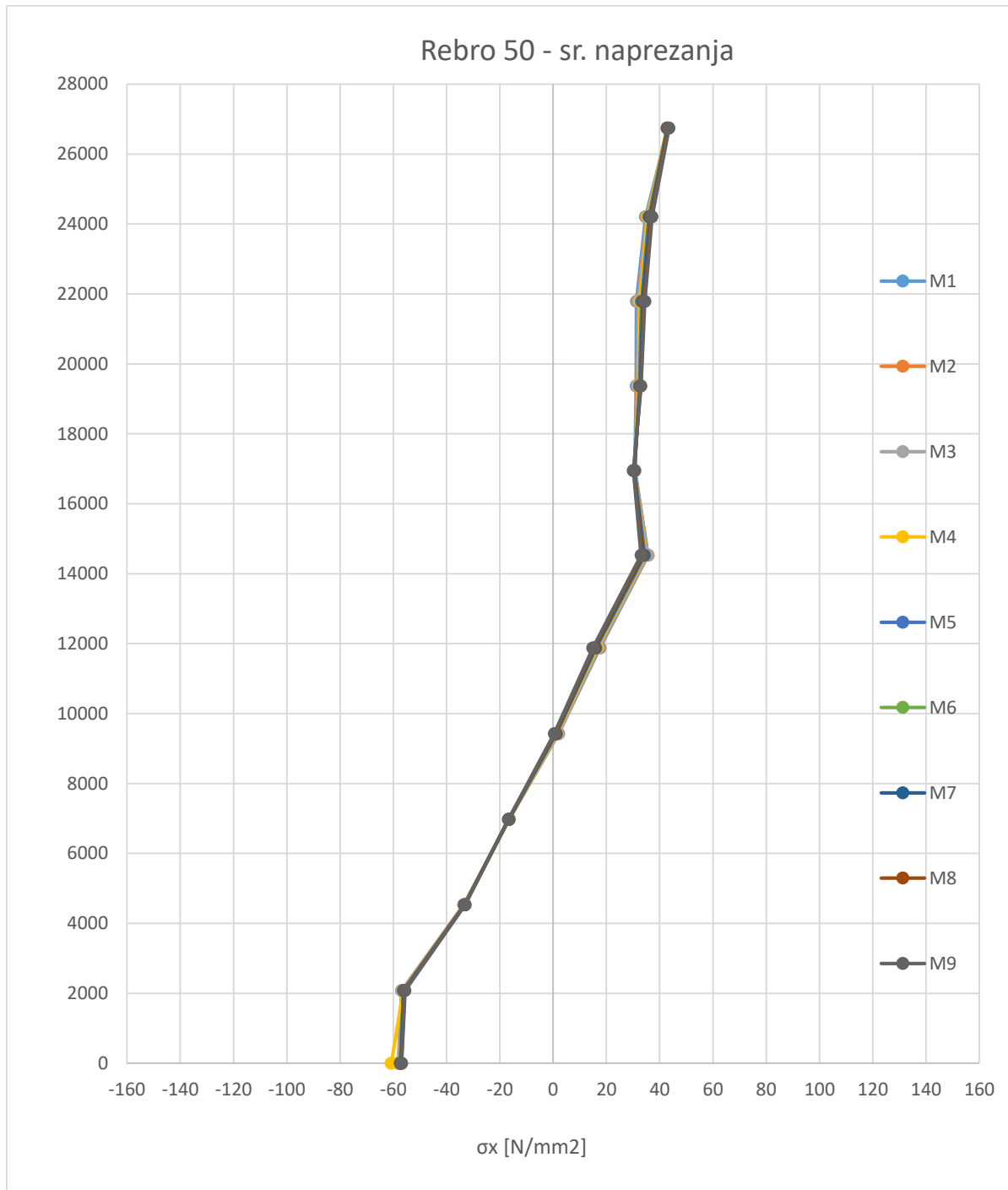
Kroz ovo poglavlje razmatrani su utjecaji geometrija ventilacija na naprezanja broda a samim time i na efikasnost nadgrađa. Varirane su dva geometrijska parametara i to promjer ventilacijske kutija i debljina stijenke. Ukupno je izrađeno devet različitih modela, te su oni analizirani na rebru 50 i rebru 100.

Modeli su napravljeni tako da su ventilacije modelirane grednim konačnim elementima, dok je bok zatvoren u područjima od rebra 0-20 te od rebra 180-200.

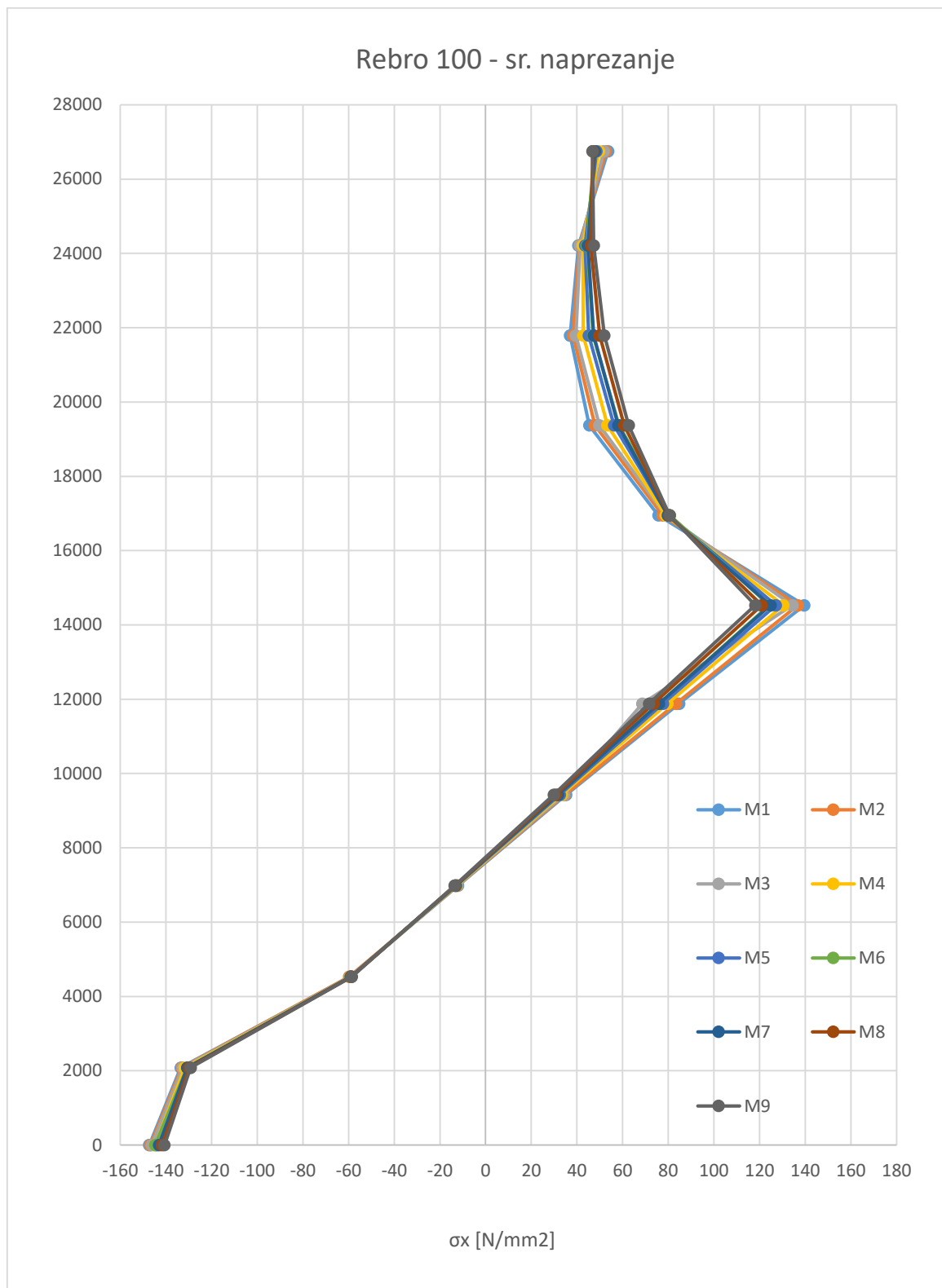
Tablica 18. Varijante modela ovisno o geometriji ventilacija

Varijanta modela	Dimenzije ventilacije		Geometrijske karakteristike			
	D [mm]	t [mm]	A [cm <sup>2</sup> ]	I [cm <sup>4</sup> ]	W [cm <sup>3</sup> ]	i [cm]
M1	1000	6	187.36	231412.13	4628.24	35.14
M2	1000	8	249.32	306699.55	6133.99	35.07
M3	1000	10	311.02	381074.40	7621.49	35.00
M4	1400	6	262.76	638274.51	9118.21	49.29
M5	1400	8	349.85	847387.25	12105.53	49.22
M6	1400	10	436.68	1054694.70	15067.07	49.15
M7	1700	6	319.31	1145399.01	13475.28	59.89
M8	1700	8	425.25	1521810.78	17903.66	59.82
M9	1700	10	530.93	1895549.83	22300.59	59.75

Dijagram srednjih naprezanja ovisan o dimenzijama ventilacija na rebrima 50 i 100 možemo vidjeti na slikama 20 i 21.



Slika 20. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 50



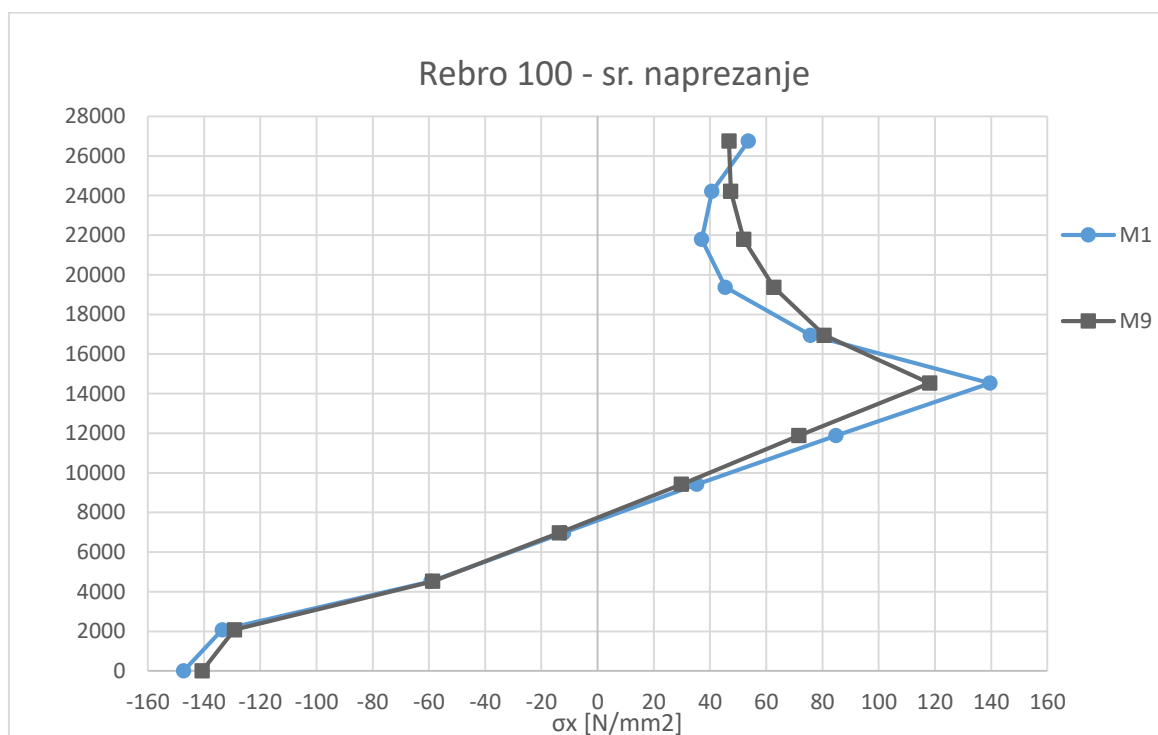
Slika 21. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebro 100

Efikasnost nadgrađa je izračunata po Caldwell-ovom izrazu (1.1.), na razini glavnog rebra, te su iznosi efektivnosti nadgrađa prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 19. Efikasnosti modela

Varijanta modela	$\eta$
M1	0.5194
M2	0.5313
M3	0.5416
M4	0.5583
M5	0.5726
M6	0.5845
M7	0.5824
M8	0.5987
M9	0.6107

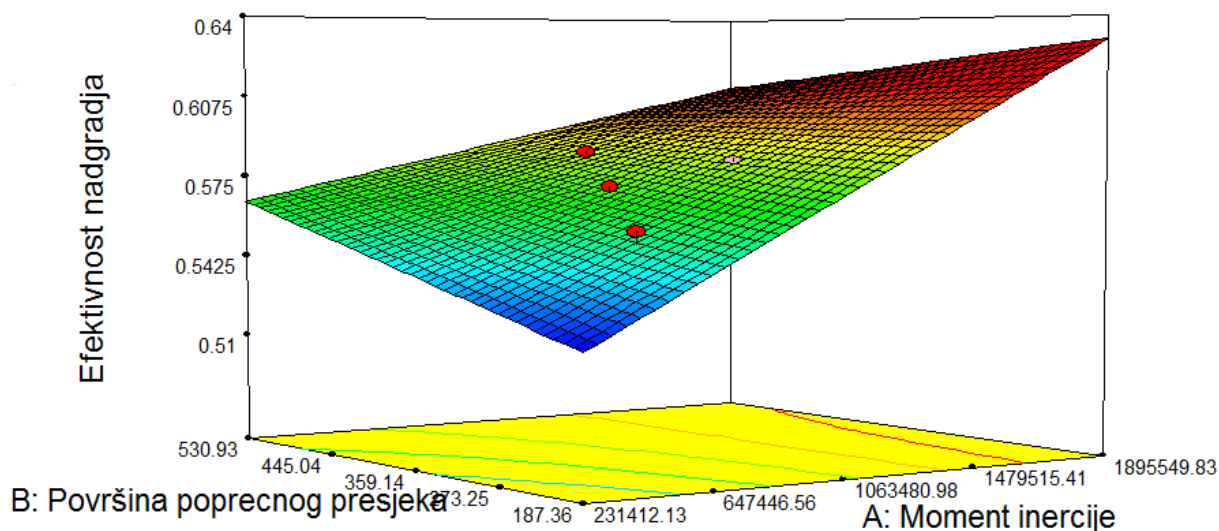
Zbog preglednosti dijagrama naprezanja na sljedećoj slici su prikazana očitavanja za dva krajnja modela M1 i M9.



Slika 22. Usporedba krajnjih modela na rebro 50

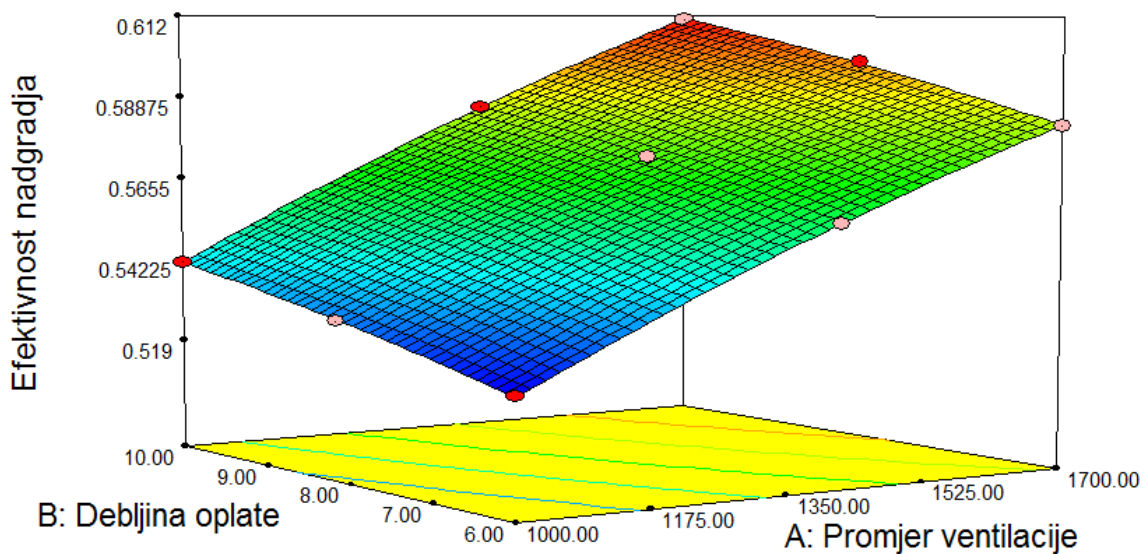
Rezultati su očekivani jer smo mogli i pretpostaviti da veća krutost ventilacija više prenosi naprezanja na nadgrađe, a samim tim i smanjuje naprezanja na palubi 6.

U programu *Design Expert* je napravljena odzivna ploha utjecaja momenta inercije i površine poprečnog presjeka na efektivnost nadgrađa prikazana na slici 23, dok je odzivna ploha utjecaja promjera ventilacije i debljine stijenke ventilacije na efektivnost nadgrađa prikazana na slici 24.



Slika 23. Odzivna ploha efektivnosti nadgrađa

Iz ovog 3D prikaza se može primijetiti kako moment inercije ventilacijskih kutija ima veći utjecaj na efektivnost nadgrađa u odnosu na površinu poprečnog presjeka.



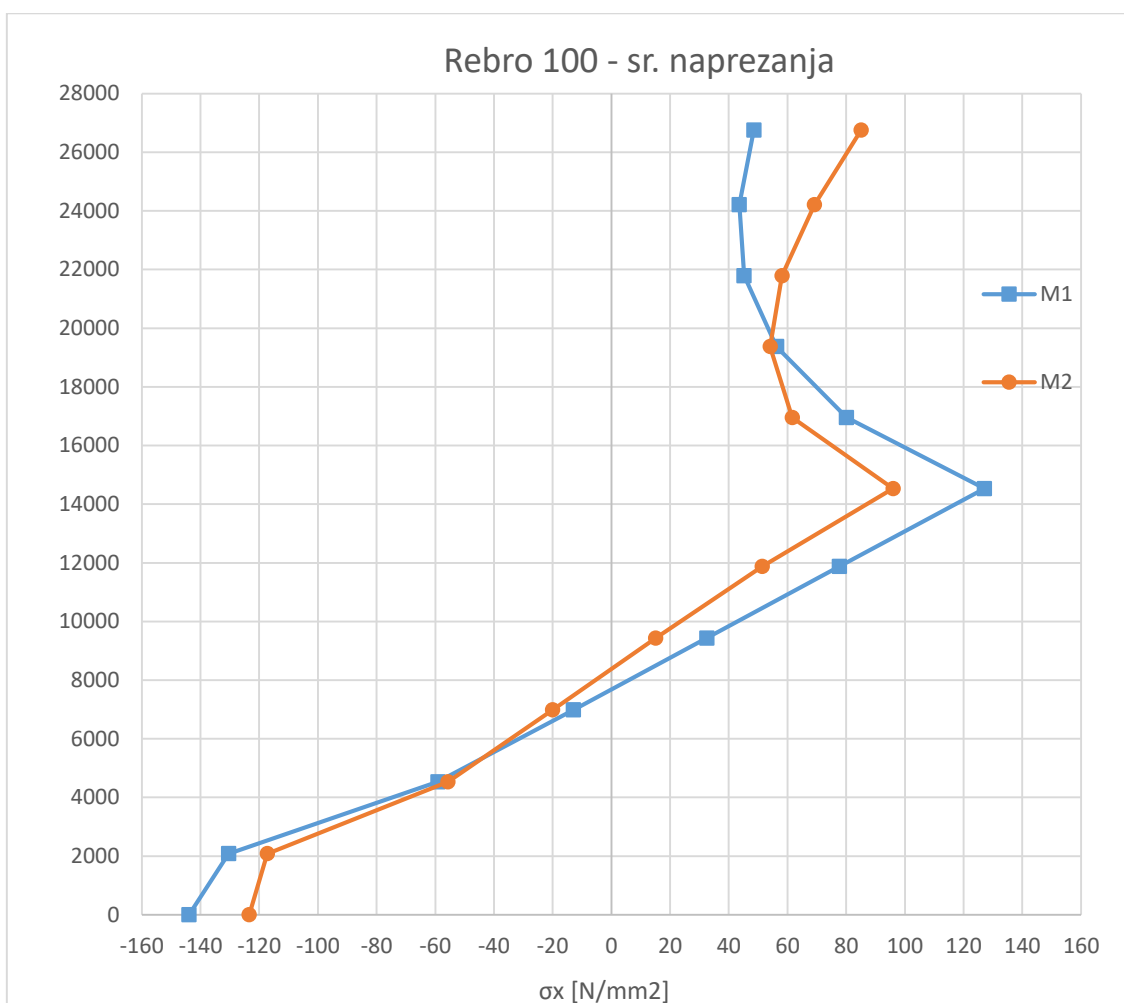
Slika 24. Odzivna ploha efektivnosti nadgrađa

Iz ove slike može se primijetiti kako promjer ventilacije ima puno veći utjecaj na efektivnost nadgrađa u odnosu na debljinu stijenke ventilacije.

## 4.2. Utjecaj zatvaranja boka na efikasnost nadgrađa

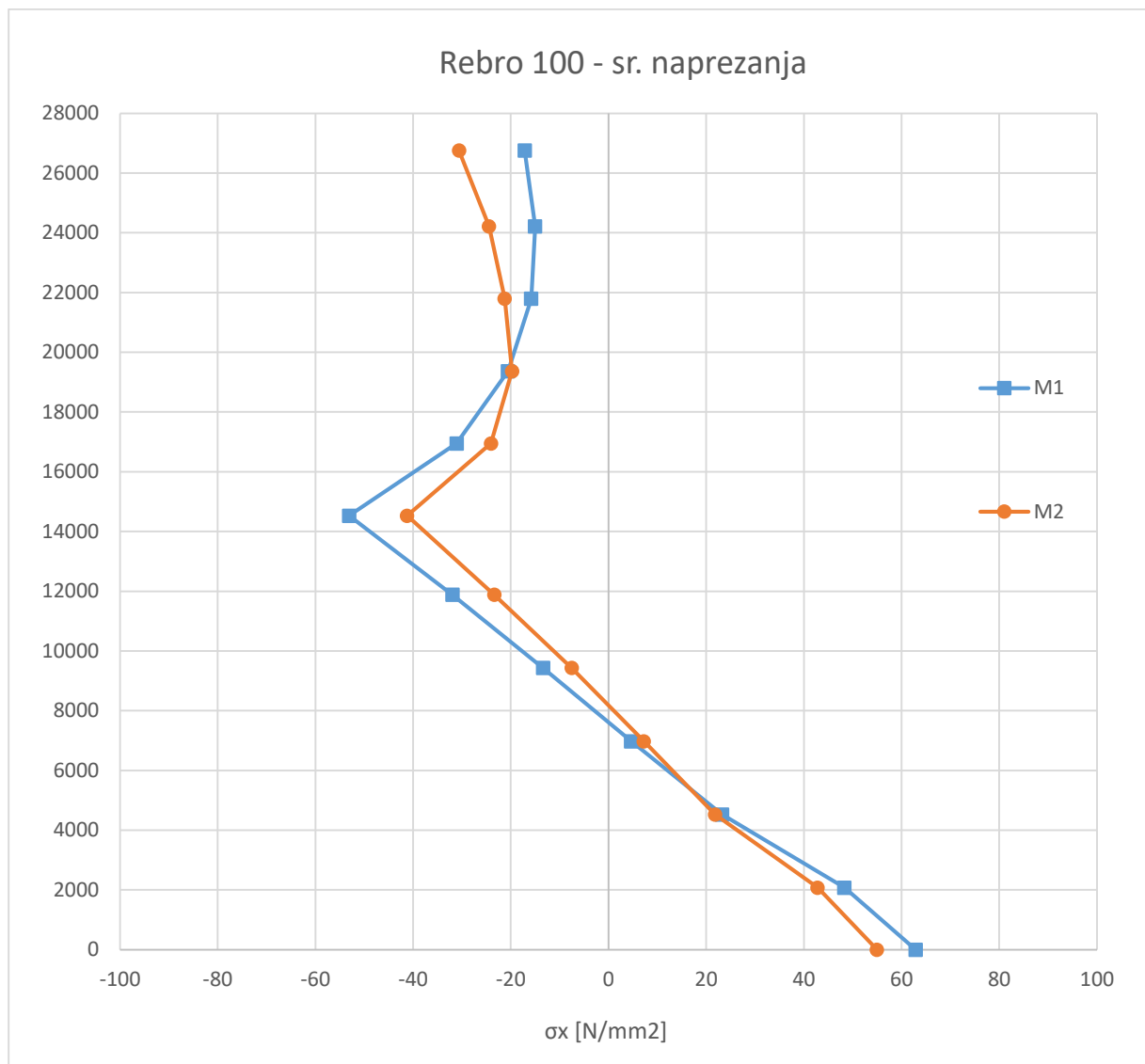
Kroz ovo poglavlje će biti prikazano koliko zatvaranje boka utječe na efikasnost nadgrađa, a za tu analizu su napravljena dva različita modela.

Oba modela su napravljena s dva reda ventilacija koje su modelirane grednim konačnim elementima, s tim da model M1 ima zatvoren bok od rebra 0 do 20 i od rebra 180 do 200, dok model M2 ima zatvoren bok od rebra 0 do 50 i od rebra 150 do 200. Dijagrami napreznja za dva slučaja opterećenja su prikazani na slikama 25 i 26.



Slika 25. Usporedba distribucije primarnih napreznja - pregib





Slika 26. Usporedba distribucije primarnih naprezanja - progib

Prema Caldwell-ovom izrazu za efikasnost za model M1 smo dobili  $\eta=0,573$ , dok smo za model M2 dobili  $\eta=0,703$ , iz čega možemo vidjeti da zatvaranje boka pridonosi povećanju efikasnosti nadgrađa, što je i bilo za očekivati. Iz priložene slike 26 vidimo da je razina tlačnih naprezanja u palubama nadgrađa ispod kritičnog naprezanja za izvijanje oplata lima i uzdužnjaka (tablica 4).

### 4.3. Teorija eksperimenata

Metodologija za istraživanje utjecaja topoloških parametara na interakciju trup-nadgrađe provedena je kroz ovo poglavlje. Njenom primjenom moguće je istražiti kako različiti topološki parametri ili različite značajke istog parametra utječu na strukturni odziv konstrukcije [1].

Metode teorije eksperimenata koriste se gotovo u svim područjima ljudske djelatnosti u razvoju proizvoda, procesa ili pak u istraživanju određenih pojava, zakonitosti. Projektiranje putem eksperimenata zapravo znači organizirano provođenje određenog broja testova (i/ili serije testova) mijenjanjem ulaznih parametara sa svrhom identifikacije njihova utjecaja na odziv sustava/procesa. Cilj eksperimenta u načelu bi trebao obuhvatiti sljedeće korake [1]:

1. Određivanje koji parametri ( $x$ ) su najutjecajniji na promatranu mjeru odziva ( $y$ ).
2. Određivanje vrijednosti skupa parametara ( $x$ ) takvog da je vrijednost odziva ( $y$ ) gotovo uvijek blizu željene ili pak najbolje moguće (min/max).
3. Određivanje vrijednosti skupa parametara ( $x$ ) takvog da je varijabilnost vrijednost odziva ( $y$ ) što manja.
4. Određivanje vrijednosti skupa parametara ( $x$ ) takvog da je utjecaj parametara koji se ne mogu kontrolirati ( $z$ ) na vrijednost odziva ( $y$ ) minimalna.

Točke 3 i 4 dovodi nas do pojma *robustnog projekta* → projekta koji je minimalno senzitiv na nekontrolirane parametre što je česti cilj u razvoju proizvoda tehnikama projektiranja pomoću eksperimenata. Eksperimenti se u razvoju projekta najčešće koriste za evaluaciju i usporedbu različitih projektnih varijanti te identifikaciju utjecajnih projektnih parametara.

Dva su aspekta bitna u provođenju samog eksperimenta: projektiranje eksperimenta i statistička obrada dobivenih rezultata. Procedura za provođenje eksperimenta u načelu se svodi na sljedeće korake:

1. Prepoznavanje i identifikacija problema
2. Identifikacija i odabir utjecajnih parametara i pridruživanje vrijednosti na određenom nivou
3. Odabir odzivnih varijabli (projektnih atributa)
4. Metoda provođenja eksperimenta

## 5. Analiza podataka

## 6. Postupak potvrđivanja- provođenje eksperimenta za odabranu kombinaciju parametara

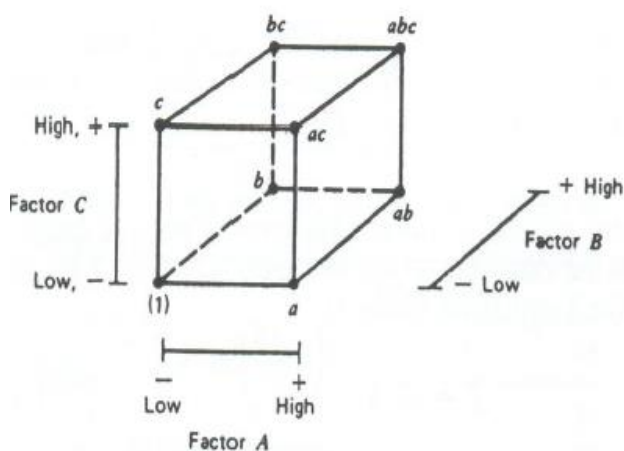
## 7. Zaključci

Radi ilustracije problema prikazan je  $2^3$  projekt. Takva vrsta projekta kombinira 3 faktora (A, B, C) na 2 nivoa te je vrlo jednostavna za vizualno predstavljanje u obliku kocke i za razumijevanje samih pojmova, slika 27. Kroz Tablicu 20 ilustriran je broj kombinacija s raznim nivoima gdje

(-) predstavlja prvi nivo, a (+) drugi nivo pojedinog parametra.

Za označavanje kombinacije nivoa prema tablici 20, vrijedi sljedeća konvencija:

(1) predstavlja sve faktore na prvom nivou, *a* predstavlja faktor A na drugom nivou i sve ostale faktore na prvom nivou, i tako redom kako je definirano u tablici.

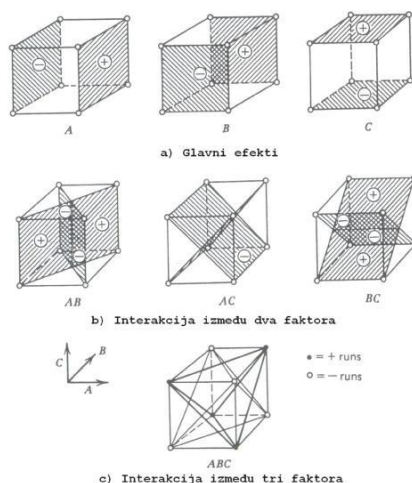


Broj pokusa	A	B	C	Kombinacije nivoa
1	-	-	-	(1)
2	+	-	-	<i>a</i>
3	-	+	-	<i>b</i>
4	+	+	-	<i>ab</i>
5	-	-	+	<i>c</i>
6	+	-	+	<i>ac</i>
7	-	+	+	<i>bc</i>
8	+	+	+	<i>abc</i>

Slika 27. Geometrijski prikaz  $2^3$  projekta [1]

Tablica 20. Tablični prikaz  $2^3$  projekta [1]

Postoji 7 stupnjeva slobode između 8 mogućih kombinacija. Tri stupnja slobode u svezi glavnih efekata A, B i C te 4 stupnja slobode vezanih za interakciju AB, AC, BC, ABC, slika 28.



Slika 28. Geometrijski prikaz interakcija  $2^3$  projekta [1]

Kada broj parametara raste broj mogućih eksperimenata vrlo brzo postaje jako velik. Tako npr. ako imamo 6 parametara na 2 nivoa tada je mogući broj pokusa  $n = 2^6 = 64$ . U takvom projektu samo 6 od 63 stupnja slobode predstavljaju *glavni efekt* pojedinog parametra, 15 stupnjeva slobode predstavljaju interakciju između 2 parametra, dok preostalih 43 stupnja slobode predstavljaju interakciju između više parametara. *Glavni efekt* određenog faktora (parametra) je srednja vrijednost efekta tog faktora na promatranom nivou uzeta u kombinaciji s drugim faktorima na različitim nivoima. U slučaju da interakciju višeg reda (između više faktora) možemo zanemariti, što je najčešći slučaj, tada je efikasnije projektirati eksperiment tako da sadrži samo dio od ukupnog broja pokusa. Za problem s npr. 5 parametara na 3 nivo problem prevelikog broja pokusa postaje još očitiji (ukupan broj pokusa bio bi,  $n = 3^5 = 243$ ). Kombinacije parametara moguće je tako definirati da se omogući ortogonalnost pokusa. Ortogonalnost se očituje u činjenici da se efekt pojedinog parametra može promatrati neovisno tj. efekt jednog parametra ne utječe na procjenu efekta drugih parametara. Jedna od karakteristika ortogonalnosti je balansiranošć pokusa, svi parametri su stavljeni u jednaku poziciju tako da nema favoriziranja

pojednog od njih. Ako je eksperiment postavljen u matričnoj formi tada se polja kojima je definiran pokus nazivaju *ortogonalna polja* (OA).

### Ortogonalna polja [1]

Osnovna ideja korištenja ortogonalnih polja u teoriji eksperimenata je dramatično smanjenje broja potrebnih pokusa, tj. istodobna evaluacija efekata više faktora s minimalnim brojem pokusa, tablica 21.

Tablica 21. Prikaz raznih tipova ortogonalnih polja [1]

Ortogonalno polje	Broj mogućih faktora	Broj nivo po faktoru	Broj potrebnih pokusa primjenom ortogonalnih polja	Broj mogućih pokusa ( <i>full factorial design</i> )
$L_4(2^3)$	3	2	4	8
$L_8(2^7)$	7	2	8	128
$L_9(3^4)$	4	3	9	81
$L_{12}(2^{11})$	11	2	12	2 048
$L_{16}(2^{15})$	15	2	16	32 768
$L_{18}(2^1) \times (3^8)$	1	2	18	13 122
	8	3		
$L_{27}(3^{13})$	13	3	27	1 594 323
$L_{36}(2^{11}) \times (3^{12})$	11	2	36	1 088 391 168
	12	3		

Karakteristika ortogonalnih polja je da se svaki nivo svakog parametra pojavljuje jednak broj puta i po redcima i po stupcima, tako da se jednaka važnost daje svim parametrima. Ranija istraživanja utjecaja parametara na kvalitetu projekta često su se svodila na variranje različitih vrijednosti parametra koji ispitujemo, dok su se ostali parametri držali fiksni. Takva metoda se naziva i kombinacijska tehnika. Nedostatak takve metode leži u tome da ne postoji garancija da će se efekt nekog faktora biti isti ako promijenimo nivo drugih faktora koji su do tada bili fiksni. Kvaliteta ortogonalnih polja je u tome da se efekt određenog parametra npr. *A* ispituje za razne niveoe drugih parametra *B*, *C*, *D*. Ako je efekt faktora *A* jako izražen i za različite niveoe drugih faktora možemo biti sigurni da je taj efekt prilično pouzdan.

Tehnike analize varijance (ANOVA) omogućuju nam istraživanja temeljena na statističkim osnovama. Bitno je istaknuti da je u sami proces istraživanja potrebno uključiti, pogotovo u početku, sve one parametre koje identificiramo kao potencijalno zanimljive, utjecajne na razmatrani problem. To traži dobro fizikalno poznavanje samog problema. Ipak, budući da je veličina broja pokusa relativno nesenzitivna na broj parametara ortogonalnog polja bolje je uključiti u proces istraživanja i one parametre koji se poslije pokažu nebitni nego izostaviti neke koji mogu ispasti jako značajni.

Stupanj slobode eksperimenta ( $v_{exp}$ ) predstavlja količinu informacija koje je moguće saznati iz eksperimenta u matričnoj formi. Stupanj slobode je za jedan manji od broja kombinacija/projekata koji se generiraju u ortogonalnom polju (broj redova u OA):

$$v_{exp} = \text{broj projekata} - 1$$

Problem rješavanja skupa jednadžbi s određenim brojem nepoznanica predstavlja dobru matematičku analogiju s matrično definiranim eksperimentom. Broj jednadžbi analogan je stupnju slobode eksperimenta ( $v_{exp}$ ). Broj nepoznanica analogan je s ukupnim brojem stupnjeva slobode svih parametara  $m$  koji se u eksperimentu razmatraju:

$$v_{exp} = \sum_{f=1}^m v_f$$

Stupanj slobode potreban da se opiše efekt određenog parametra (doprinos parametra na rezultat eksperimenta) je za jedan manji od broja nivoa koji se testiraju za određeni parametar ( $v_f$ ):

$$v_f = \text{broj nivoa} - 1$$

Stupanj slobode potreban je da se odabere prikladno ortogonalno polje (OA). Opće pravilo je da odabrano ortogonalno polje, s kojim će se provesti eksperiment, generira broj projekata (broj redova u OA) barem za jedan više od ukupnog stupnja slobode svih faktora:

$$L_N = v_{exp} + 1$$

Detaljnije o ovoj metodi se nalazi u [1].

#### 4.4. Primjena metodologije istraživanja utjecaja topoloških parametara

##### KORAK 1: Identifikacija problema i definiranje cilja

Cilj provedenog istraživanja bio je:

- ispitati kako se mijenjaju primarna normalna naprezanja konstrukcije (trup+nadgrađe) promjenom odabranih topoloških karakteristika konstrukcije;
- identificirati topološke parametre koji dominantno utječu na uniformnost distribucije primarnih naprezanja po visini u palubama nadgrađa (D6-D11).

Komponente naprezanja prema kojima se izračunava vrijednosti odzivnih varijabli dobivaju se kao rezultati prethodno provedenih MKE proračuna na predloženim generičkim modelima. Primarna naprezanja korigirana su za utjecaj sekundarnih naprezanja uslijed savijanja jakih uzdužnih nosača. Kao odzivna varijabla (projektni atribut) koristio se sljedeći izraz:

$$Y = \Delta\sigma = \sqrt{\sum_i^m (\sigma_{s,i} - \bar{\sigma})^2} \quad (4.1.)$$

Gdje su:

$$\sigma_{s,i} = \frac{\sum_j^n A_j \cdot \sigma_{j,i}}{\sum_j^n A_j}; \quad \bar{\sigma} = \frac{\sum_i^m \sigma_{s,i}}{m} \quad (4.2.)$$

$\sigma_{s,i}$  - srednje primarno naprezanje na pojedinoj  $i$ -toj palubi nadgrađa,  $j=1,..n$ ; ( $n$ =broj vojeva po širini palube  $i$ ),

$\sigma_{j,i}$  - primarno naprezanje u voju  $j$  na palubi  $i$ ,

$\bar{\sigma}$  - srednje primarno naprezanje između svih paluba nadgrađa,  $i=1..m$ ; ( $m=6$ , palube od D6 do D11)

Cilj nam je odabirom prikladnih nivoa izabranih parametara minimizirati vrijednost projektnog atributa, čime se postiže uniformnosti primarnih naprezanja po visini strukture nadgrađa. Ideja uniformnosti je da su nam sve palube nadgrađa jednako napregnute kako bi što je više moguće iskoristili nadgrađe.

## KORAK 2: Identifikacija i odabir utjecajnih parametara te pridruživanje vrijednosti na određenom nivou

Ovaj korak pretpostavlja vrlo dobro poznavanje fizike problema kako bi se uvrstili svi relevantni parametri ovisno o specifičnosti problema. Kod topoloških problema obično su zbog logike konstrukcije varijable diskretne. U razmatranje je uzeto sedam parametara na 3 nivoa te jedan parametar na dva nivoa, tablica 22.

Tablica 22. Opis odabranih parametara i vrijednosti na određenom nivou

	Opis parametara	Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3
A	Zatvorenost boka po duljini	Fr. 0-20 i Fr. 180-200	Fr. 0-50 i Fr. 150-200	
B	Krutost stijenke boka D6-D8	oplata bez otvora; t=8mm (HP100x6)	hw/h=sw/s=0.5	hw/h=sw/s=0.6
C	Krutost stijenke boka D8-D10	hw/h=sw/s=0.6	hw/h=sw/s=0.7	hw/h=sw/s=0.8
D	Krutost stijenke boka D10-D11	hw/h=sw/s=0.8	hw/h=sw/s=0.9	nema oplata
E	Uzdužna pregrada na 5250mm od CL; D6-D11	nema je	Fr. 75-125	Fr. 50-150
F	Krutost stijenke uzdužne pregrade D6-D8	oplata bez otvora; t=8mm (HP100x6)	hw/h=sw/s=0.6	hw/h=sw/s=0.7
G	Krutost stijenke uzdužne pregrade D8-D11	hw/h=sw/s=0.7	hw/h=sw/s=0.8	hw/h=sw/s=0.9
H	Ventilacija	nema je, obična upora 250x250x8	1 red ventilacija φ1400x8	2 reda ventilacija φ1400x8



**KORAK 3: Odabir ortogonalnog polja OA**

Odabir vrste ortogonalnog polja prvenstveno ovisi o broju parametara/interakcija i broju nivoa (vidi poglavlje 6.1.2). Za odabir prikladnog ortogonalno polje (OA) potrebno je razmotriti broj stupnjeva slobode eksperimenta. Stupanj slobode parametra je jedan manje od odabranog broja nivoa za taj parametar:  $v_f = \text{broj nivoa} - 1 = 3 - 1 = 2$

Opće pravilo je da odabrano ortogonalno polje s kojim će se provesti eksperiment generira broj kombinacija/projekata (broj redova u OA) barem jedan više od ukupnog stupnja slobode svih faktora :  $L_N = (\text{broj parametara} \cdot v_f) + 1 = (8 \cdot 2) + 1 = 17$

Prilikom pridruživanja odabranih parametara stupcima ortogonalnog polja korišteni su linearni grafovi preko koji su definirani odnosi glavnih efekata i interakcija tj. njihova pozicija u kolonama ortogonalnog polja. Za razmatrani problem u prvom koraku uzeto je ortogonalno polje  $L_{18}$ , s tim da su slučajnim odabirom pridruženi stupci ortogonalnog polja odabranim parametrima (sedam parametara na tri nivoa- $3^7$  i jedan parametar na dva nivoa- $2^1$ ), tablica 23.

Tablica 23. Pridruživanje parametara stupcima ortogonalnog polja L18

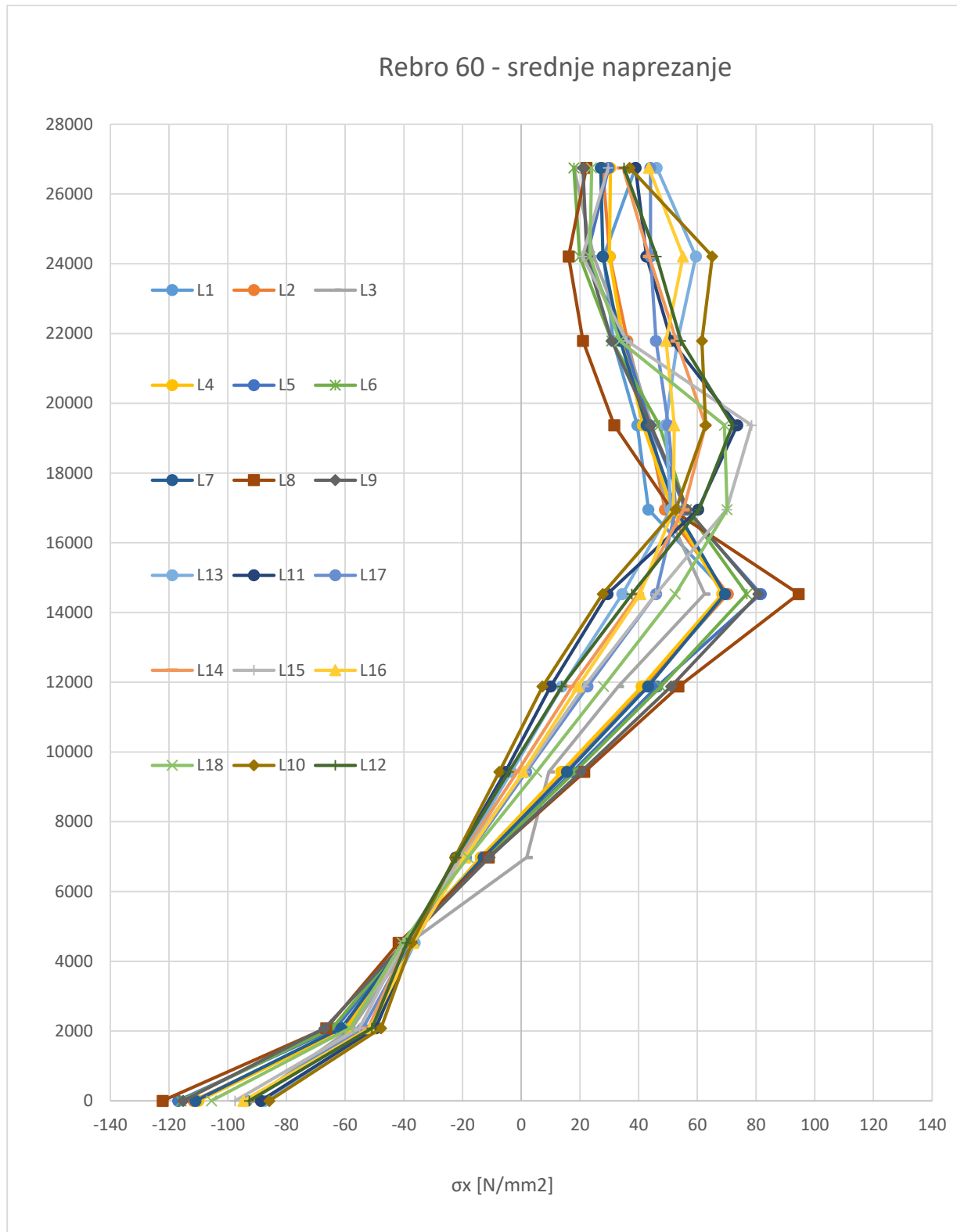
Projekti	Parametri							
	A	B	C	D	E	F	G	H
L <sub>1</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
L <sub>2</sub>	1	1	2	2	2	2	2	2
L <sub>3</sub>	1	1	3	3	3	3	3	3
L <sub>4</sub>	1	2	1	1	2	2	3	3
L <sub>5</sub>	1	2	2	2	3	3	1	1
L <sub>6</sub>	1	2	3	3	1	1	2	2
L <sub>7</sub>	1	3	1	2	1	3	2	3
L <sub>8</sub>	1	3	2	3	2	1	3	1
L <sub>9</sub>	1	3	3	1	3	2	1	2
L <sub>10</sub>	2	1	1	3	3	2	2	1
L <sub>11</sub>	2	1	2	1	1	3	3	2
L <sub>12</sub>	2	1	3	2	2	1	1	3
L <sub>13</sub>	2	2	1	2	3	1	3	2
L <sub>14</sub>	2	2	2	3	1	2	1	3
L <sub>15</sub>	2	2	3	1	2	3	2	1
L <sub>16</sub>	2	3	1	3	2	3	1	2
L <sub>17</sub>	2	3	2	1	3	1	2	3
L <sub>18</sub>	2	3	3	2	1	2	3	1

## KORAK 4: Provođenja eksperimenta

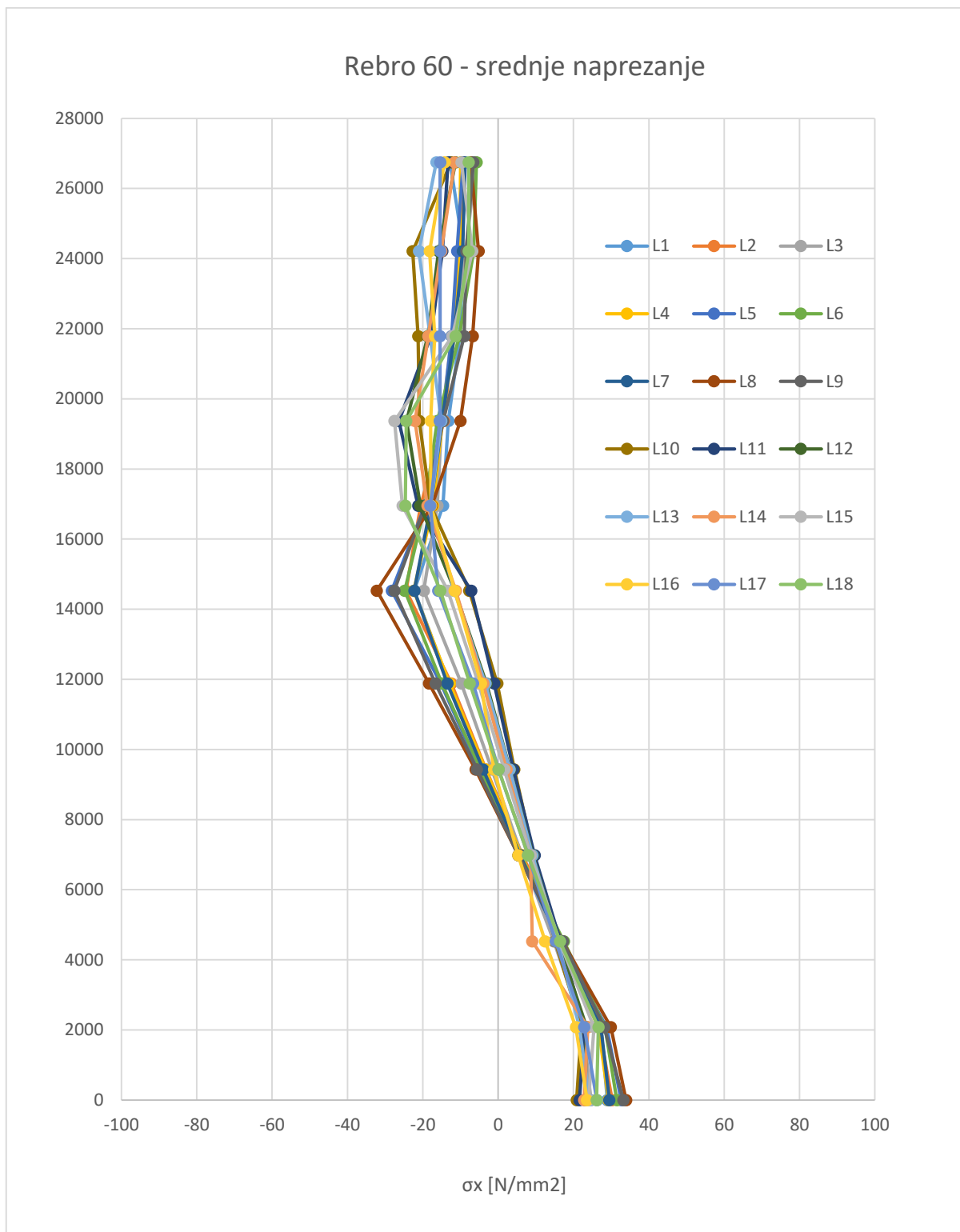
18 projekata u ortogonalnom polju  $L_{18}$  u biti predstavljaju različite generičke 3D MKE modele. Zahvaljujući mogućnostima današnjih predprocesora za modeliranje, generički modeli vrlo lako se generiraju iz osnovnog modela. S obzirom da se radi o korištenju teorije eksperimenata u projektne svrhe, provođenje samog eksperimenta zapravo predstavlja izvršenje niza od osamnaest numeričkih MKE proračuna. Kao rezultat generiraju se svi podaci potrebni za proračun projektnog atributa  $Y$ . Prilikom provođenja numeričkog proračuna pretpostavlja se stabilnost samog rješavača MKE problema. Proračun strukturnog odziva u ovom primjeru proveden je korištenjem programskog paketa MAESTRO [6]. Osnovni presjek kopiran je duž cijele dužine modela. Bočni otvori su modelirani metodom ekvivalentne smične krutosti (poglavlje 3.4.). Strukturne dimenzije svih varijanti bile su fiksirane prema izvornim dimenzijama prototipa. Razmatrana su dva slučaja opterećenja progib i pregib čije se karakteristike mogu vidjeti u tablici 11 u poglavlju 3.3.

Za razmatrani projektni problem razne komponente opterećenja mogli bi se identificirati kao *parametre šuma*. Ipak, brojni provedeni testovi strukturnog odziv u elastičnom području pokazali su da veličina i predznak vertikalnog momenta savijanja ne utječu na stupanj efikasnosti paluba nadgrađa u uzdužnoj čvrstoći [1].

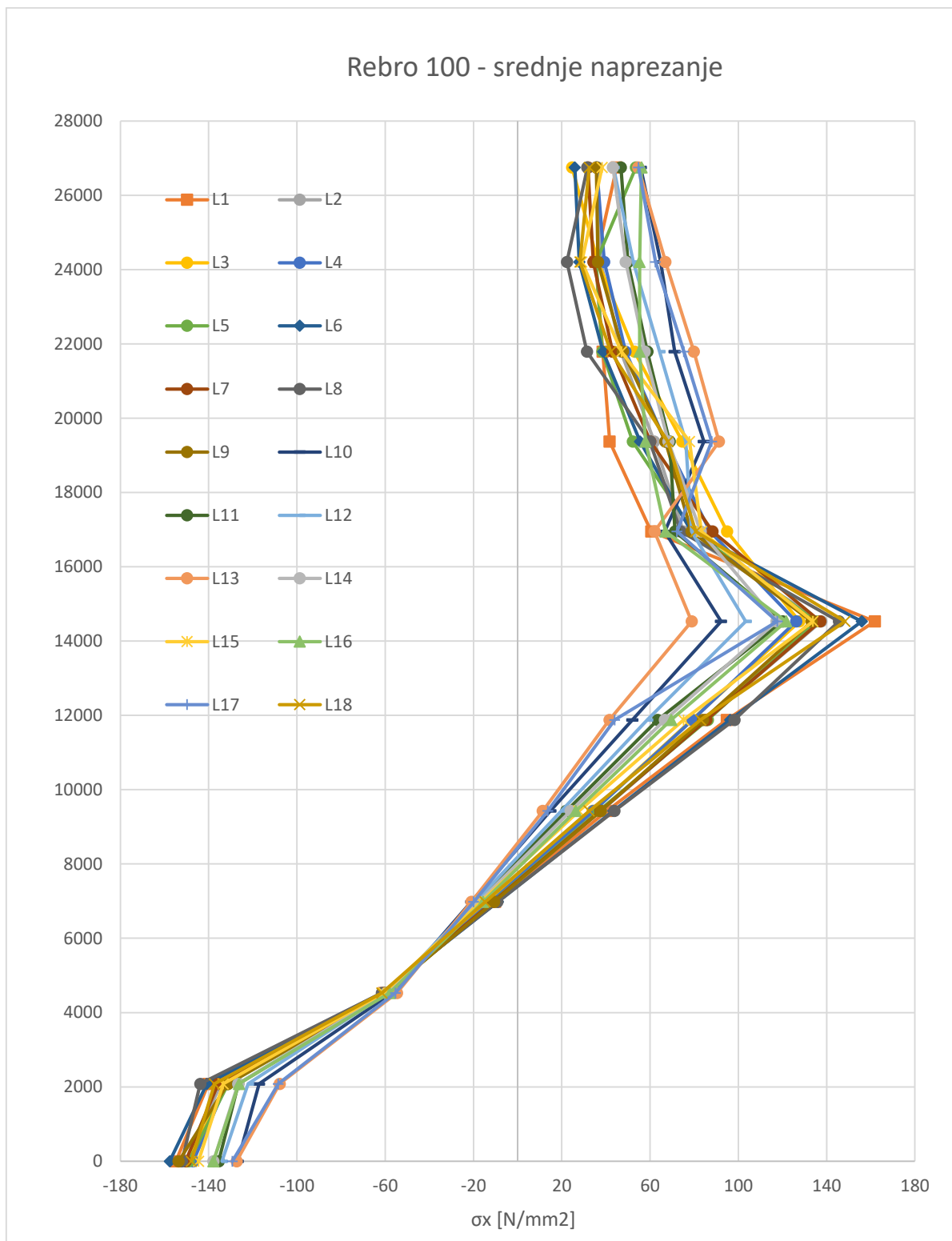
Obrađeni su rezultati s dva različita presjeka i to na (R.60 i 100) za oba slučaja opterećenja. Različita naprezanja po širini pojedine palube su usrednjena poštujući princip jednakosti sila prema izrazu (4.2). Na slikama 29, 30, 31 i 32 prikazane su distribucije primarnih naprezanja po visini za svih 18 projekata, za LC1 i LC2 na poziciji rebra 60 i rebra 100.



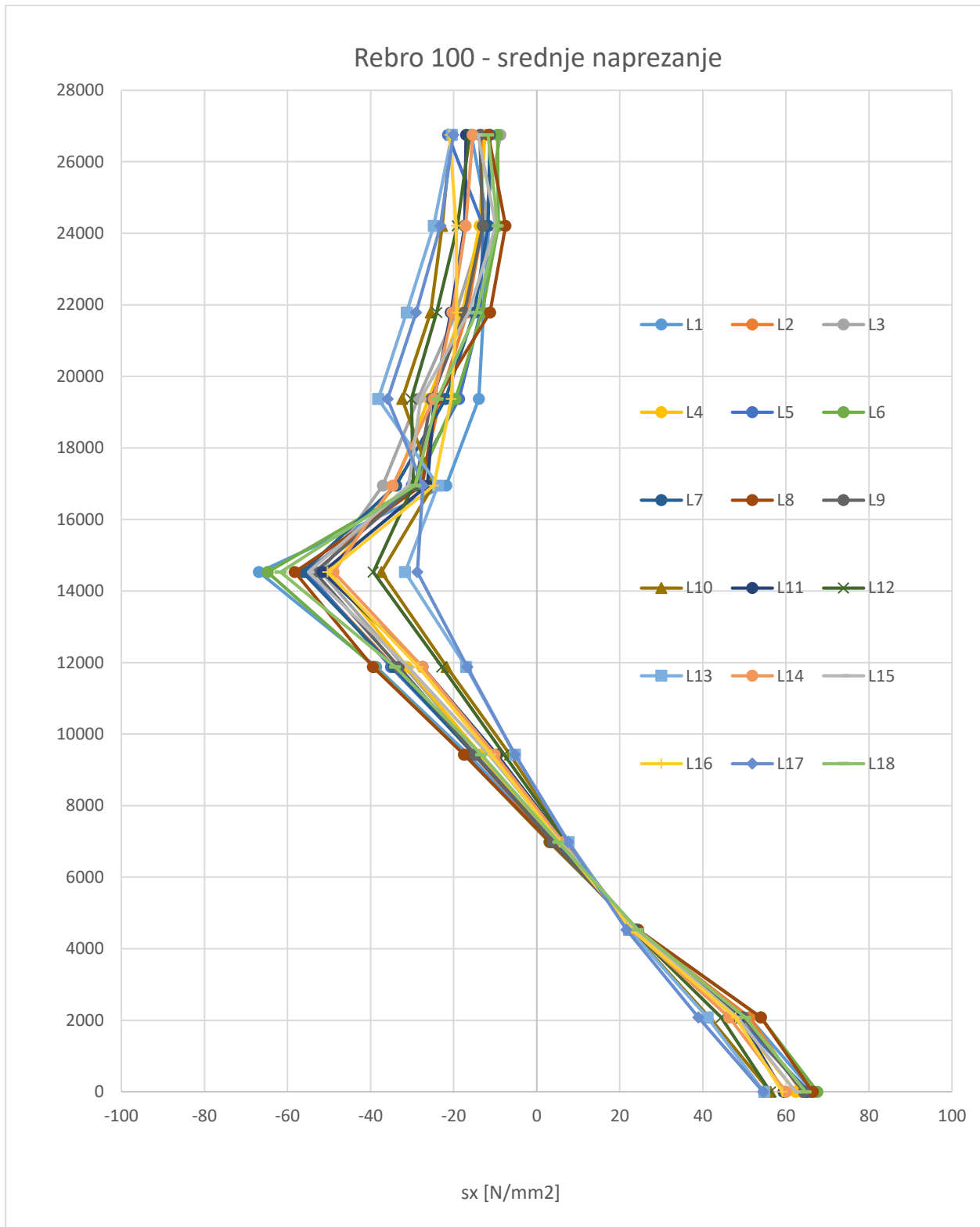
Slika 29. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 60 za LC1



Slika 30. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 60 za LC2



Slika 31. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 100 za LC1



Slika 32. Usporedba distribucije primarnih naprezanja na rebru 100 za LC2

Rezultati naprezanja tablično su obrađeni za dva presjeka ( $n_s=2$ ) i dva slučaja opterećenja ( $n_l=2$ ) te je generirana odzivna varijabla  $Y_i$  i izračunat  $SN_S$  (*signal-to-noise*) omjer manje je bolje, tablica 24.

$$SN_S = -10 \log \frac{1}{4} \sum_1^{n=4} Y_i^2 \tag{4.3.}$$

Gdje je ( $n=n_s \cdot n_l=2 \cdot 2=4$ )

Tablica 24. Rezultati proračuna odzivne varijable i SN omjeri

Projekti	Parametri								Y-LC1	Y-LC1	Y-LC2	Y-LC2	SN omjer
	A	B	C	D	E	F	G	H	R. 60	R. 100	R. 60	R. 100	
L <sub>1</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	33.52	109.18	10.41	47.88	-35.87
L <sub>2</sub>	1	1	2	2	2	2	2	2	35.06	85.34	13.73	36.20	-33.98
L <sub>3</sub>	1	1	3	3	3	3	3	3	36.69	86.15	11.37	36.24	-34.07
L <sub>4</sub>	1	2	1	1	2	2	3	3	33.44	77.36	10.85	32.16	-33.15
L <sub>5</sub>	1	2	2	2	3	3	1	1	48.05	83.79	15.71	35.79	-34.34
L <sub>6</sub>	1	2	3	3	1	1	2	2	51.31	110.16	17.00	47.50	-36.36
L <sub>7</sub>	1	3	1	2	1	3	2	3	36.82	91.03	11.75	39.18	-34.52
L <sub>8</sub>	1	3	2	3	2	1	3	1	66.44	102.74	23.07	42.08	-36.35
L <sub>9</sub>	1	3	3	1	3	2	1	2	51.68	82.51	17.98	34.02	-34.38
L <sub>10</sub>	2	1	1	3	3	2	2	1	34.51	30.05	13.20	14.21	-27.91
L <sub>11</sub>	2	1	2	1	1	3	3	2	35.53	59.78	14.87	28.97	-31.69
L <sub>12</sub>	2	1	3	2	2	1	1	3	31.67	47.67	11.53	18.92	-29.74
L <sub>13</sub>	2	2	1	2	3	1	3	2	18.76	30.01	7.06	14.59	-25.78
L <sub>14</sub>	2	2	2	3	1	2	1	3	23.69	61.03	9.71	28.64	-31.14
L <sub>15</sub>	2	2	3	1	2	3	2	1	51.27	86.60	19.11	36.89	-34.72
L <sub>16</sub>	2	3	1	3	2	3	1	2	12.53	58.67	5.94	27.16	-30.39
L <sub>17</sub>	2	3	2	1	3	1	2	3	7.85	49.89	2.30	12.19	-28.30
L <sub>18</sub>	2	3	3	2	1	2	3	1	48.11	100.50	17.28	43.53	-35.63

U tablici 25 je su prikazane usporedba projekata po vertikalnim pomacima na glavnom rebtu i po masama modula.

Tablica 25. Usporedba masa i deformacija

Projekti	Masa [t]	Vertikalni pomak [mm]
L <sub>1</sub>	7518.82	326.59
L <sub>2</sub>	7803.74	320.2
L <sub>3</sub>	8281.58	322.92
L <sub>4</sub>	8289.85	313.6
L <sub>5</sub>	7550.40	328.37
L <sub>6</sub>	7771.15	345.55
L <sub>7</sub>	8270.79	326.82
L <sub>8</sub>	7513.32	358.86
L <sub>9</sub>	7829.19	336.34
L <sub>10</sub>	7604.93	244.09
L <sub>11</sub>	7836.90	266.4
L <sub>12</sub>	8359.35	265.13
L <sub>13</sub>	7877.21	237.91
L <sub>14</sub>	8310.02	277.4
L <sub>15</sub>	7563.85	297.1
L <sub>16</sub>	7841.27	279.49
L <sub>17</sub>	8374.78	252.51
L <sub>18</sub>	7529.99	316.01



**KORAK 5: Obrada rezultata, ANOVA**

Na osnovu podataka iz tablice 29 provedena je analiza varijance i identifikacija dominantnih parametra. Kao prvi korak izračunati su glavni efekti svih parametara. *Glavni efekt* određenog parametra je srednja vrijednost efekta tog faktora na promatranom nivou uzeta u kombinaciji s drugim faktorima na različitim nivoima. Za npr. parametar B računa se na način:

Parametar **B**, nivo 1:  $(-35.87-33.98-34.07-27.91-31.69-29.74)/6 = -32.21$

Parametar **B**, nivo 2:  $(-33.15-34.34-36.36-25.78-31.14-34.72)/6 = -32.58$

Parametar **B**, nivo 3:  $(34.52-36.35-34.38-30.39-28.30-35.63)/6 = -33.26$

Vrijednosti svih glavnih parametara dani su kroz tablicu 27. Suma kvadrata između nivoa ( $SS_N$ ) svih parametara je izračunata prema izrazu iz tablice 26.

Tablica 26. Analiza varijance za jedan faktor [1]

Izvor varijacije	Suma kvadrata	Stupanj Slobode	Srednja vrijednost sume kvadrata	$F_0$
Efekt nivoa (između nivoa)	$SS_N = \sum_{i=1}^{a=4} \frac{y_i^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$a - 1$	$MS_N = \frac{SS_N}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_N}{MS_E}$
Efekt greške (unutar greške)	$SS_E = SS_T - SS_N$	$N - a$	$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$	
Ukupno	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$N - 1$		

Gdje su;

$y_i$  - odziv za promatrani parametar na promatranom nivou

$n$  - broj ponavljanja nivoa za sve parametre; za parametar A ( $n=9$ ), za ostale parametra ( $n=6$ )

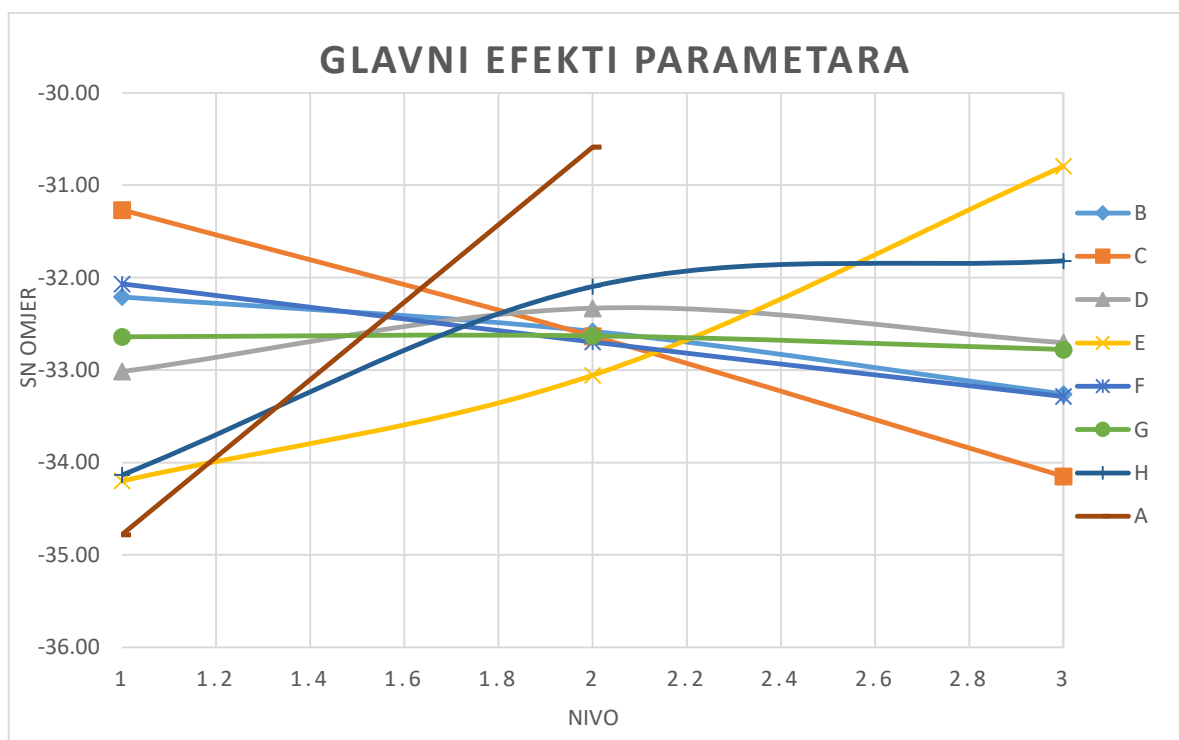
y - ukupna vrijednost odziva za sve nivoe

N - ukupan broj ponavljanja; N=18

Tablica 27.  $SN_S$  vrijednosti glavnih efekata parametara

Nivo	Parametri							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-34.78	<b>-32.21</b>	<b>-31.27</b>	-33.02	-34.20	<b>-32.07</b>	-32.64	-34.13
2	<b>-30.59</b>	-32.58	-32.63	<b>-32.33</b>	-33.05	-32.70	<b>-32.63</b>	-32.10
3	0.00	-33.26	-34.15	-32.70	<b>-30.80</b>	-33.29	-32.78	<b>-31.82</b>
Ukupna suma	-65.37	-98.05	-98.05	-98.05	-98.05	-98.05	-98.05	-98.05
Suma kvadrata nivoa $SS_N$	79.08	3.41	24.92	1.41	35.99	4.45	0.08	19.19

Grafički prikaz glavnih efekata svih parametara na svim nivoima dan je na slici 33. Potrebno je napomenuti da razmak između nivoa kod određenih parametara nije uniforman. Takav prikaz daje nam samo grubu vizualnu sliku promjene glavnog efekta po nivoima.



Slika 33. Dijagramski prikaz glavnih efekata

Analiza varijance (ANOVA) provedena je kroz tablicu 28, prema izrazima danim u tablici 26. Parametri koji u sumi kvadrata sudjeluju ispod 3 % (B, D, F i G) proglašeni su neutjecajni na razmatranu odzivnu varijablu te su pridruženi grešci.

Tablica 28. ANOVA tablica nakon pridruživanja grešci nesignifikantnih parametara

Parametar	suma kvadrata	suma kvadrata (%)	d.o.f.	srednja vrijednost sume kvadrata	F0	Fa, v1, v2
A	79.08	<b>46.61</b>	1.00	79.08	137.66	
B	3.41	2.01	2.00	1.70	2.96	greška
C	24.92	14.69	2.00	12.46	21.69	
D	1.41	0.83	2.00	0.71	1.23	greška
E	35.99	<b>21.21</b>	2.00	18.00	31.33	
F	4.45	2.62	2.00	2.22	3.87	greška
G	0.08	0.05	2.00	0.04	0.07	greška
H	19.19	11.31	2.00	9.59	16.70	
Greška	1.15	0.68	2.00	0.57	1.00	0.76
Uk. Suma	169.68	100.00	17.00			

## KORAK 6: Interpretacija rezultata i odabir optimalnog nivoa parametara

Odabir optimalnog nivoa parametra može se utvrditi na osnovi najveće vrijednosti glavnog efekta na nekom nivou. Kako je  $SN_S$  omjer prilagođen da vrijedi pravilo veće je bolje, najbolju kombinaciju nivoa parametara moguće je dobiti iz tablice 27 kao najveći iznos na nekom nivou. Prema tablici 27 kombinacija parametar-nivo koja maksimizira iznos  $SN_S$  omjer je sljedeća:

Tablica 29. Projekt s parametrima na najutjecajnijim nivoima

Parametri	A	B	C	D	E	F	G	H
Opt. nivo	2	1	1	2	3	1	2	3

Ovakvu dobivenu kombinaciju parametara potrebno je kritički razmotriti pošto su vrijednosti glavnog efekta pojedinih parametara vrlo blizu za različite nivoe, što vodi nesenzitivnosti takvih parametara (B, D, F i G). Metodom rangiranja svrstavamo projekte u redoslijed po uspješnosti, od najboljeg naniže (tablica 30), te tražimo određenu zakonitost u nivoima raznih parametara. Ako je određeni nivo nekog parametra uglavnom pozicioniran među uspješnim projektima može se zaključiti da na specificirani nivo promatranog parametra doprinosi kvaliteti rješenja. Iz Tablice 30 moguće je donijeti sljedeće zaključke u svezi najbolje kombinacije nivoa ako razmotrimo npr. prva tri najbolja projekta:

- parametar A: nivo 2;
- parametar B: na svim nivoima, nesenzitivan → greška;
- parametar C: nivo 1 ili 2;
- parametar D: na svim nivoima, nesenzitivan → greška
- parametar E: nivo 3;
- parametar F: nivo 1 ili 2; nesenzitivan → greška.
- parametar G: nivo 2 ili 3, nesenzitivan → greška.
- parametar H: nivo 1, 2 ili 3;

Tablica 30. Projekti iz L18 poredani po veličini SN omjera

Projekti	Parametri								SN omjer	$\eta$	uk. Masa	Pomaci
	A	B	C	D	E	F	G	H				
L <sub>13</sub>	2	2	1	2	3	1	3	2	-25.78	0.78	7877.21	237.91
L <sub>10</sub>	2	1	1	3	3	2	2	1	-27.91	0.72	7604.93	244.09
L <sub>17</sub>	2	3	2	1	3	1	2	3	-28.30	0.61	8374.78	252.51
L <sub>12</sub>	2	1	3	2	2	1	1	3	-29.74	0.67	8359.35	265.13
L <sub>16</sub>	2	3	1	3	2	3	1	2	-30.39	0.60	7841.27	279.49
L <sub>14</sub>	2	2	2	3	1	2	1	3	-31.14	0.61	8310.02	277.40
L <sub>11</sub>	2	1	2	1	1	3	3	2	-31.69	0.60	7836.90	266.40
L <sub>4</sub>	1	2	1	1	2	2	3	3	-33.15	0.58	8289.85	313.60
L <sub>2</sub>	1	1	2	2	2	2	2	2	-33.98	0.53	7803.74	320.20
L <sub>3</sub>	1	1	3	3	3	3	3	3	-34.07	0.57	8281.58	322.92
L <sub>5</sub>	1	2	2	2	3	3	1	1	-34.34	0.54	7550.40	328.37
L <sub>9</sub>	1	3	3	1	3	2	1	2	-34.38	0.55	7829.19	336.34
L <sub>7</sub>	1	3	1	2	1	3	2	3	-34.52	0.53	8270.79	326.82
L <sub>15</sub>	2	2	3	1	2	3	2	1	-34.72	0.54	7563.85	297.10
L <sub>18</sub>	2	3	3	2	1	2	3	1	-35.63	0.48	7529.99	316.01
L <sub>1</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	-35.87	0.42	7518.82	326.59
L <sub>8</sub>	1	3	2	3	2	1	3	1	-36.35	0.49	7513.32	358.86
L <sub>6</sub>	1	2	3	3	1	1	2	2	-36.36	0.45	7771.15	345.55

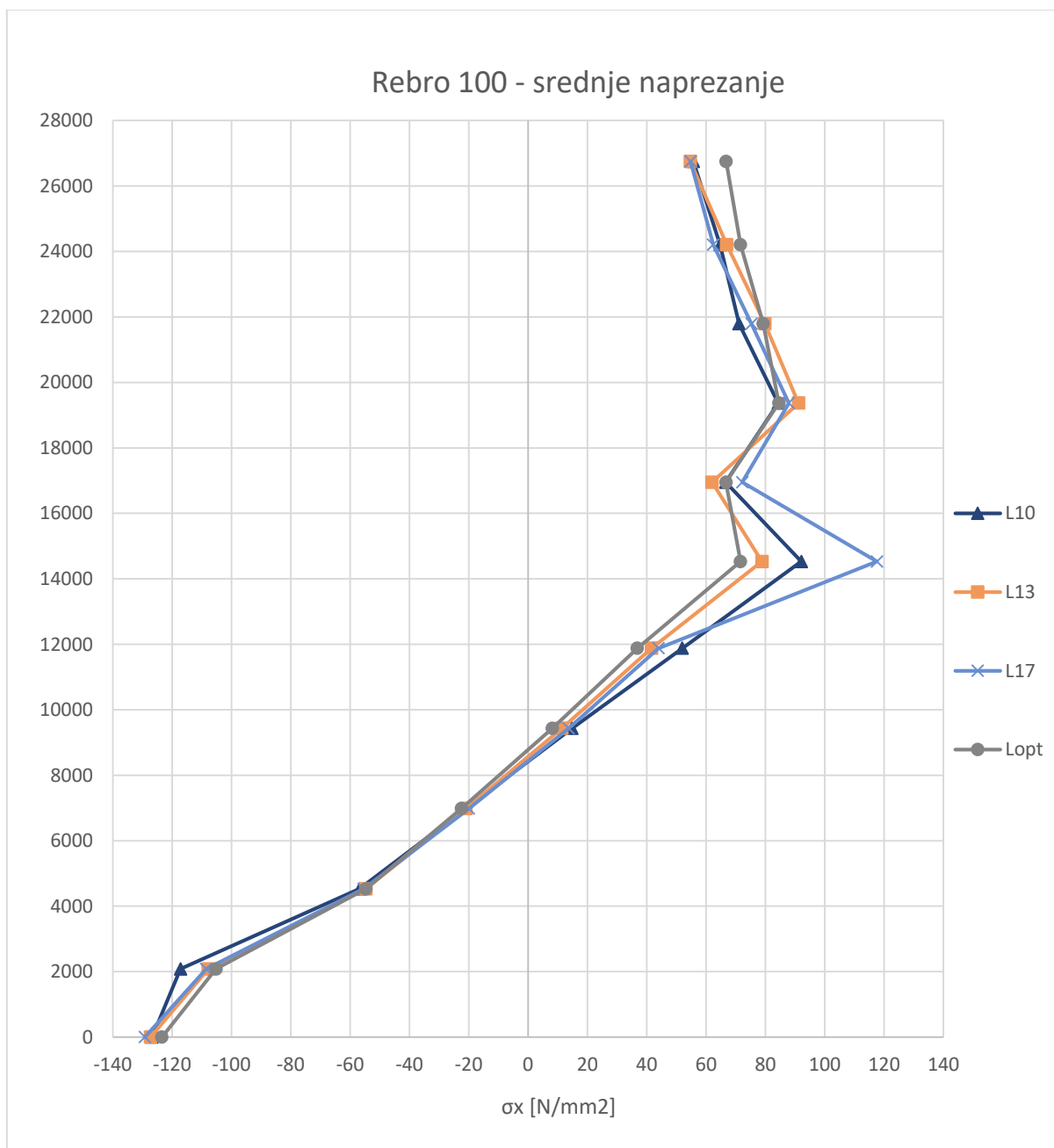
Analizirajući tablicu koja je rangirana po SN omjeru može se zaključiti da najbolje rezultate daju projekti u kombinaciji parametra A na drugom nivou i parametra E na trećem nivou. Još se može primijetiti da nam najlošije rezultate daju projekti s parametrom A na prvom nivou te parametrom E također na prvom nivou ili u slučaju L8 na drugom nivou, a upravo ti projekti nam daju i najveće vertikalne pomake. Također se može zaključiti da usprkos tome što nam je parametar H u globalu senzitivniji, on u kombinaciji s parametrom A na drugom i parametrom E na trećem nivou gubi na senzitivnosti.

Tablica 31. Rezultati projekta s parametrima na najutjecajnijim nivoima

Projekt	Parametri								SN omjer	$\eta$	Masa	Pomaci
	A	B	C	D	E	F	G	H				
Lopt	2	1	1	2	3	1	2	3	-26.01	0.81	8401.18	225.09

Kada bi usporedili model koji je napravljen s parametrima na najboljim razinama s modelima rangiranim po SN omjeru možemo vidjeti da bi se on našao na drugom mjestu po SN omjeru. Međutim ukoliko gledamo efikasnost nadgrađa, vidimo da nam je najbolji upravo model s parametrima na optimalnom nivou.

Radi jasnijeg prikaza na slici 34 će biti prikazana distribucija naprezanja Lopt i tri najbolja projekta prema SN omjeru, što se može vidjeti u tablici 30.



Slika 34. Usporedba distribucije srednjih naprezanja na rebru 100 za LC1

Gledajući masu i SN omjer, projekt L10 nam je na prvi pogled bolji jer je lakši cca. 250 tona, međutim s obzirom da on umjesto ventilacija ima obične upore, ventilacija treba biti riješena na neki drugi način, te će se masa projekta sigurno izjednačiti a vjerojatno i premašiti „najbolji“ projekt L13.

Isto tako uspoređujući Lopt s L13, možemo primijetiti da je SN omjer vrlo blizu kod oba projektna rješenja. Gledajući masu ona je veća kod Lopt zbog toga jer taj projekt ima dva reda ventilacija u odnosu na L13 koji ima jedan red ventilacija. Ipak, bez konkretnih podataka o potrebnoj količini izmijenjenog zraka, teško je u ovoj fazi odlučiti koji projekt je bolji, jer gledajući razliku među nivoima parametara, od svih senzitivnih parametara jedino se projekti razlikuju po parametru H gdje je kod projekta L13 jedan red ventilacija a kod projekta Lopt dva reda. Upravo ta činjenica je uzrok razlike među masama ta dva projekta. Uz sve to je i efikasnost nadgrađa nešto veća kod projekta Lopt.

Ova analiza predstavlja samo prvi korak teorije eksperimenata, što nam daje „grubu“ sliku utjecaja pojedinih parametara. Moguće je u daljnjim koracima još raditi optimizaciju modela, te analizirati međusobne utjecaje pojedinih parametara. Iz ove analize smo primijetili kako parametar H postaje nesenzibilan u kombinaciji s parametrom A na drugom i parametrom E na trećem nivou. Daljnjim analizama bi mogli iskristalizirati međusobnu ovisnost pojedinih parametara.

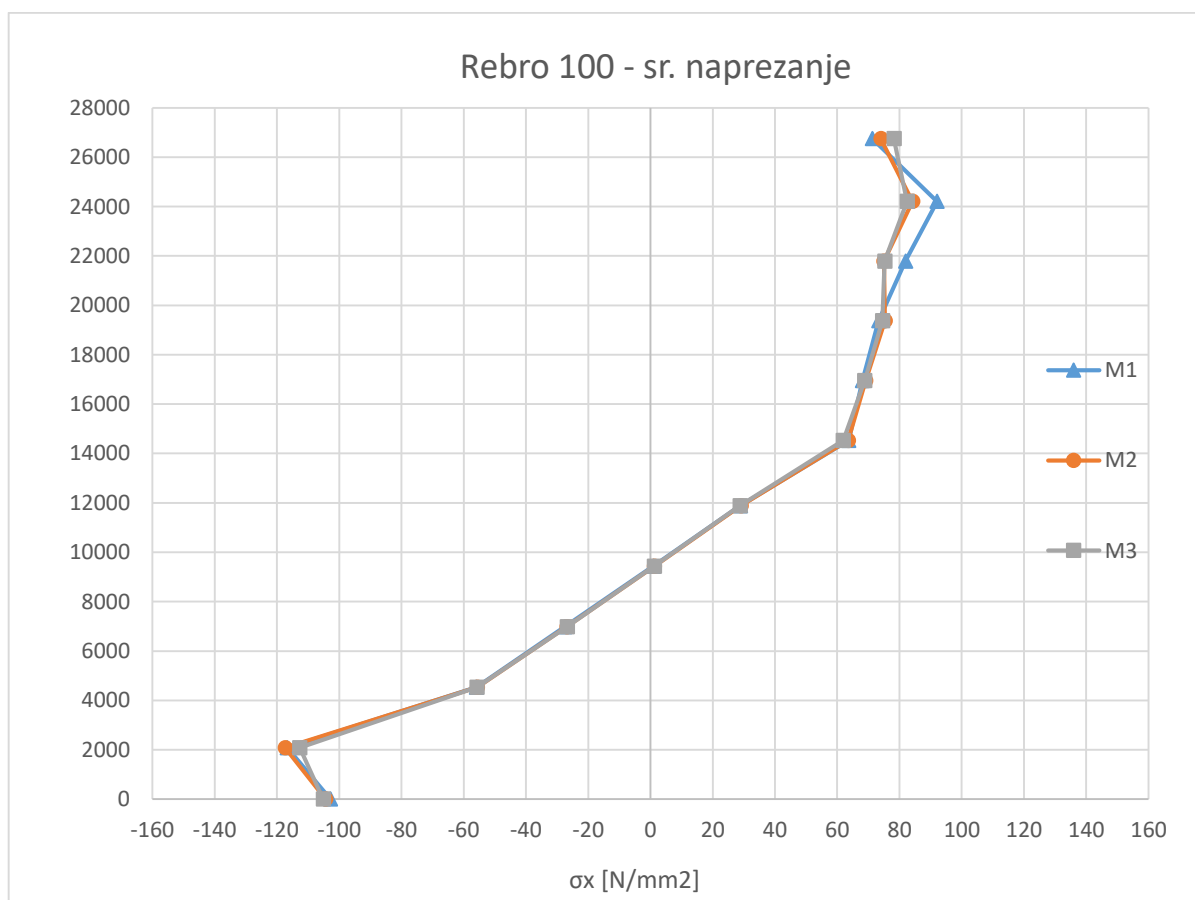
## 4.5. Potpuno zatvoren bok

U završnoj analizi je zatvoren cijeli bok broda kako bi dodatno potvrdili utjecaj zatvaranja boka na senzitivnost ventilacija. Izgrađene su tri varijante modela s parametrima na sljedećim nivoima:

Tablica 32. Varijante modela potpuno zatvorenog boka

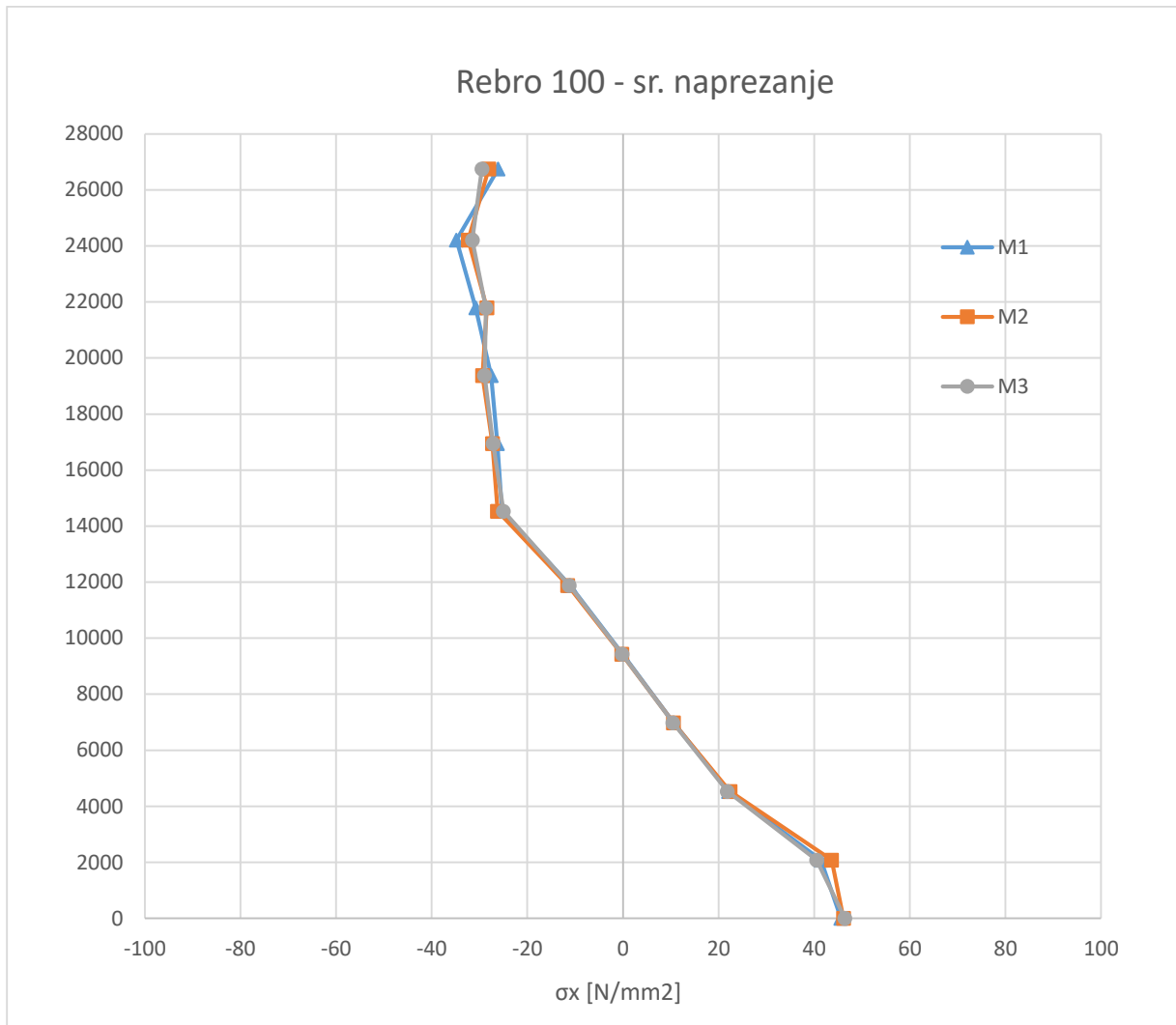
Projekti	Parametri								SN	Masa [t]
	A	B	C	D	E	F	G	H		
M <sub>1</sub>	3	2	1	1	1	/	/	1	-24.37	7519.14
M <sub>2</sub>	3	2	1	1	1	/	/	2	-22.73	7810.65
M <sub>3</sub>	3	2	1	1	1	/	/	3	-23.27	8302.52

Na sljedećim slikama možemo vidjeti usporedbe distribucija naprezanja na rebru 100 za oba slučaja opterećenja.



Slika 35. Usporedba distribucije naprezanja na rebru 100 za LC1





Slika 36. Usporedba distribucije naprezanja na rebru 100 za LC2

Iz priloženih dijagrama vidljivo je da u slučaju potpuno zatvorenog boka broda ventilacije potpuno gube na senzitivnosti. U teoriji eksperimenata se moglo primijetiti da iako nismo imali potpuno zatvoren bok, zbog uzdužne pregrade je postojao kontinuitet preko cijele duljine broda te u tom slučaju ventilacijski sustav nije senzitivan. U tom slučaju kada imamo kontinuitet po duljini možemo pribjeći nekom drugom rješenju, kako bi što je više smanjili masu konstrukcijskih dijelova, a osigurali potrebnu izmjenu zraka. Međutim to zahtijeva daljnju analizu koja u ovom radu nije rađena zbog vremenskog ograničenja.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analizirana primarna čvrstoća različitih topoloških rješenja broda za prijevoz žive stoke.

Kod ovog tipa broda, zbog svoje konstrukcije, javlja se problem strukturne efikasnosti konstrukcije nadgrađa. Efikasnost nadgrađa je veličina koja pokazuje koliko nadgrađe sudjeluje u uzdužnoj čvrstoći broda. Kako se nadgrađe kod ovog tipa broda prostire duž cijele duljine broda te obuhvaća pet gornjih paluba (D7-D11) njegov utjecaj u primarnoj čvrstoći jako je velik. Povećanjem efikasnosti nadgrađa smanjujemo maksimalna naprezanja na glavnoj palubi trupa broda, te povećavamo naprezanja u palubama nadgrađa. Time se može racionalnije projektirati konstrukcija broda, u smislu smanjivanja konstrukcijskih dimenzija glavne palube trupa (D6), dok su palube nadgrađa u većoj mjeri napregnute.

Za analizu su korišteni generički 3D modeli koji se mogu vrlo brzo generirati na osnovu skice glavnog rebra s inicijalnim dimenzijama i rasporedom prostora definiranog kroz generalni plan. Usporedbom odziva s 3D MKE detaljnim modelom cijelog broda dobivena su odstupanja u iznosu od oko 12%, što je zadovoljavajuće u ovoj fazi projektiranja. To daje mogućnost da se u kratkom vremenu provedu analize velikog broja različitih topoloških rješenja.

Usporedba modela gdje su ventilacijske kutije modelirane grednim konačnim elementima s modelom gdje su modelirane pločastim konačnim elementima, daje grešku odstupanja manju od 5%, što dodatno doprinosi brzini variranja različitih modela. Bočni otvori su modelirani prema *Fransmanovoj* metodi ekvivalentne debljine membrane što pridonosi brzini modeliranja.

Zbog svoje namjene ovaj tip broda ima jake ventilacijske kutije, čijim se povećanjem dimenzija može dobiti veća efikasnost nadgrađa. Također je zapaženo da zatvaranje boka uvelike pridonosi povećanju efikasnosti nadgrađa.

Teorijom eksperimenata je istražen utjecaj topoloških parametara na distribuciju primarnih naprezanja po visini. Razmatrano je ukupno osam parametara a kao dominantni parametri su se pokazali:

- zatvorenost boka po duljini broda
- postojanje uzdužne pregrade

Kao utjecajni parametar, pri određenim topološkim varijantama se pokazala krutost ventilacijskih kutija. Daljnjim istraživanjem bi trebalo analizirati međusobni utjecaj pojedinih parametara te provesti optimizaciju strukturnih dimenzija odabranih topoloških rješenja kako bi se dobilo preferirano projektno rješenje, s obzirom na efikasnost nadgrađa, masu, sigurnost i cijenu projekta.

## 6. LITERATURA

- [1] Andrić, J. „metodologija konceptualnog projektiranja brodskih konstrukcija s interakcijom trup-nadgrađe“, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2007.
- [2] MARS 2000., Bureau Veritas.
- [3] Alfirević, I., Nauka o čvrstoći, DD. Zagreb, Tehnička knjiga, 1995.
- [4] Bureau Veritas: „Rules for the Classification of Steel Ships“, July 2014. with Amendments January 2016.
- [5] MAESTRO Version 11.3.0: „Program documentation“, Proteus Engineering, Stevensville, MD, USA.
- [6] Daničić, D. „Analiza čvrstoće različitih topoloških koncepata broda za kružna putovanja“, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [7] Andrić, J., Pirić, K., Prebeg, P., Bicač, M., *Full-Ship 3D FEM Analysis of Livestock Carrier Yard 526: Structural Design Assessment (Part A)*, Tehnički izvještaj za brodogradilište ULJANIK, 2016.