

Projektiranje brodske konstrukcije izložene opterećenju od leda

Perašin, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:491881>

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

ZAVRŠNI RAD

Antonio Perašin

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Antonio Perašin

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se profesoru Jerolimu Andriću na pruženoj pomoći pri izradu ovog završnog rada i životnim savjetima koji su bili od velike važnosti. Zahvaljujem se svojim roditeljima, obitelji i prijateljima koji su bili uz mene i vjerovali u mene nekad više nego ja sam.

„Čovječe, pazi da ne ideš malen ispod zvijezda!“

A.B.Šimić

Antonio Perašin



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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Perašin** Mat. br.: 0035200393

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE BRODSKE KONSTRUKCIJE IZLOŽENE OPTEČENJU OD LEDA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **SHIP STRUCTURAL DESIGN EXPOSED TO ICE LOAD**

Opis zadatka:

U posljednje vrijeme raste broj različitih tipova brodova (jahte, istraživački brodovi, trgovački brodovi, itd.) koji povremeno svoju funkciju obavljaju u zaleđenim vodama. Projektiranje konstrukcije takvih tipova brodova uz primjenu standardnih pravila klasifikacijskih društava zahtjeva i primjenu posebnih pravila kojima su specifičirana opterećenja izazvana ledom i način dimenzioniranja elemenata brodske konstrukcije.

U radu je potrebno:

- 1) Upoznati se s relevantnim pravilima za dimenzioniranje brodske konstrukcije izložene opterećenju od leda kao što su *Finnish-Swedish Ice Class Rules* i *IACS Polar Rules*.
- 2) Na primjeru konstrukcije boka broda prema zadanom predlošku provesti lokalno dimenzioniranje početne topologije prema relevantnim pravilima.
- 3) Istražiti utjecaj različite kategorije klase leda (PC6, PC7, itd.) na dimenzije konstrukcijskih elemenata.
- 4) Istražiti utjecaj promjene različitih topoloških parametara (razmak rebara, broj proveze, tip materijala, itd.) na dimenzije konstrukcijskih elemenata (debljina oplata, moment otpora rebara, itd.) te generirati prikladne projektne dijagrame.
- 5) Za konačno odabranu topologiju provesti kontrolu podobnosti konstrukcije putem direktnog proračuna koristeći metodu konačnih elemenata u skladu s relevantnim zahtjevima u Pravilima (dopuštena naprezanja, progibi i sl.) te po potrebi provesti redimenzioniranje elemenata brodske konstrukcije.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. Pregled zahtjeva pravila za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata	3
2.1. Polarne klase	3
2.2. Gornja i donja ledena vodna linija	3
2.3. Područja trupa	4
2.4. Projektno opterećenje.....	5
2.4.1. Područje trupa izvan pramca.....	5
2.5. Projektna površina opterećenja	6
2.6. Projektni tlak unutar površine opterećenja.....	6
2.7. Debljina oplate	7
2.8. Orebrenje.....	9
3. Lokalno dimenzioniranje i analiza senzitivnosti	11
3.1. Primjer konstrukcije	12
3.2. Tablični prikaz rezultata analize senzitivnosti	13
3.3. Grafički prikaz rezultata analize senzitivnosti	19
4. Direktni proračun korištenjem metode konačnih elemenata	25
4.1. Opis prototipa.....	26
4.2. Rubni uvjeti.....	27
4.3. Površina opterećenja	28
4.4. Analiza naprezanja	30
4.5. Opis redimenzioniranog modela	34
4.6. Površina opterećenja redimenzioniranog modela	35
4.7. Analiza naprezanja redimenzioniranog modela	37
5. ZAKLJUČAK.....	41

LITERATURA.....	42
PRILOZI.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1. Polarni kruzer HONDIUS izgrađen u brodogradilištu BRODOSPLIT 2019. godine ..	1
Slika 2. Raspored zona [3]	4
Slika 3. Kut između rebara i vodne linije [3]	8
Slika 4. Dimenzije nosača [3]	10
Slika 5. Nacrt primjera prototipne konstrukcije	12
Slika 6. Ovisnost mase oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete.....	19
Slika 7. Ovisnost mase rebara o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, primjer konstrukcije	19
Slika 8. Ovisnost mase rebara o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, dvije proveze....	20
Slika 9. Ovisnost mase rebara o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, jedna proveza na sredini dvoboka	20
Slika 10. Ovisnost mase rebara i oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, primjer konstrukcije	21
Slika 11. Ovisnost mase rebara i oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, dvije proveze jednoliko razmaknute.....	22
Slika 12. Ovisnost mase rebara i oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, jedna proveza na sredini dvoboka	22
Slika 13. Ovisnost ukupne mase o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, primjer konstrukcije	23
Slika 14. Ovisnost ukupne mase o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, dvije proveze jednako razmaknute.....	23
Slika 15. Ovisnost ukupne mase o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, jedna proveza na sredini dvoboka	24
Slika 17. Izgled modela prototipa	26
Slika 18. Rubni uvjeti modela	27
Slika 19. Prvi slučaj opterećenja prototipa	28
Slika 20. Drugi slučaj opterećenja prototipa	29
Slika 21. Normalna naprezanja prototipa za prvi slučaj opterećenja	30
Slika 22. Ekvivalentna naprezanja prototipa za prvi slučaj opterećenja	31
Slika 23. Normalna naprezanja prototipa za drugi slučaj opterećenja	32
Slika 24. Ekvivalentna naprezanja prototipa za drugi slučaj opterećenja	33

Slika 25. Izgled redimenzioniranog modela.....	34
Slika 26. Prvi slučaj opterećenja redimenzioniranog modela	35
Slika 27. Drugi slučaj opterećenja redimenzioniranog modela.....	36
Slika 28. Normalna naprezanja redimenzioniranog modela za prvi slučaj opterećenja.....	37
Slika 29. Ekvivalentna naprezanja redimenzioniranog modela za prvi slučaj opterećenja.....	38
Slika 30. Normalna naprezanja redimenzioniranog modela za drugi slučaj opterećenja.....	39
Slika 31. Ekvivalentna naprezanja redimenzioniranog modela za drugi slučaj opterećenja....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Opis polarnih klasa.....	3
Tablica 2. Proračunski koeficijenti ovisni o klasi	5
Tablica 3. Vrijednosti koeficijenta PPFi	8
Tablica 4. Koeficijenti AF.....	9
Tablica 5. Opće karakteristike.....	12
Tablica 6. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, ST24, PC6.....	13
Tablica 7. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, AH32, PC6.....	13
Tablica 8. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, AH36, PC6.....	14
Tablica 9. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, AH36, PC7.....	14
Tablica 10. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, ST24, PC6.....	15
Tablica 11. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, AH32, PC6.....	15
Tablica 12. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, AH36, PC6.....	16
Tablica 13. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, AH36, PC7.....	16
Tablica 14. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, ST24, PC6.....	17
Tablica 15. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, AH32, PC6.....	17
Tablica 16. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, AH36, PC6.....	18
Tablica 17. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, AH36, PC7.....	18

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
AF	/	Koeficijent područja trupa
A_w	cm^2	Površina struka
A_{pn}	cm^2	Neto površina flanže
A_{fn}	cm^2	Površina flanže
B	m	Širina broda
b_{nonbow}	m	Visina površine opterećenja
b	mm	Sunosiva širina lima
b_w	mm	Udaljenost središta flanže od centralne linije nosača
CF_C	/	Koeficijent loma
CF_D	/	Koeficijent površine opterećenja
CF_{DIS}	/	Koeficijent istisnine klase
CF_F	/	Koeficijent kolapsa savijanja
CF_L	/	Koeficijent uzdužne čvrstoće
C_B	/	Koeficijent punoće
DF	/	Faktor istisnine broda
D	kt	Istisnina broda
F_{nonbow}	MN	Sila
h	mm	Visina profila
h_w	mm	Visina struka
h_{fc}	mm	Visina nosača mjerena od središta flanže
L_{OA}	m	Duljina preko svega
L_{PP}	m	Duljina između okomica
P_{avg}	MPa	Srednji tlak
PPF_P	/	Koeficijent najvećeg tlaka
Q_{nonbow}	MN/m	Kontinuirano opterećenje
s	m	Razmak rebara

t	mm	Debljina oplata
t_{net}	mm	Neto debljina oplata
t_s	mm	Debljina korozijskog dodatka
t_{pn}	mm	Neto debljina
T	m	Gaz broda
t_{wn}	mm	Stvarna debljina struka nosača
V	čv	Brzina broda
w_{nonbow}	m	Širina površine opterećenja
Z_p	cm ³	Modul plastičnog presjeka
σ_y	N/mm ²	Granica popuštanja
φ_w	°	Kut profila

SAŽETAK

U ovom radu dan je pregled relevantnih pravila za dimenzioniranje brodske konstrukcije izložene opterećenju od leda kao što su IACS *Polar Rules*. Prema primjeru konstrukcije boka broda za prijevoz generalnog tereta provedeno je dimenzioniranje konstrukcije za tri različita položaja bočnih proveza. Istražen je utjecaj različitih kategorija klase leda (PC6, PC7), razmaka rebara i tipa materijala na dimenzije konstrukcijskih elemenata kao što su debljina oplata, moment otpora rebara za primjer poprečno orebrenog boka. Proračun je proveden prema pravilima IACS *Polar Rules* pomoću programskog paketa MS Excel. Također je istražen utjecaj klase leda, razmaka rebara i tipa materijala na masu ukupne konstrukcije. Pokazano je kako najveći utjecaj na masu konstrukcije imaju kategorija klase leda i tip materijala koji se koristi za gradnju. Za odabranu topologiju provedena je kontrola podobnosti putem direktnog proračuna koristeći linearnu metodu konačnih elemenata pomoću programskog paketa Maestro. Nakon provedenog redimenzioniranja osnovnih konstrukcijskih elemenata korištenjem linearnog MKE proračuna uočeno je da je potrebno značajno povećanje dimenzija kako bi se zadovoljili uvjeti podobnosti. Zaključeno je da je potrebno kao sljedeći korak u istraživanju provesti nelinearni proračun metodom konačnih elemenata.

Ključne riječi: kategorija klase leda, razmak rebara, kontrola podobnosti, linearni proračun, dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata broskog trupa

SUMMARY

This paper provides an overview of relevant dimensioning rules for ship construction exposed to ice loads, such as IACS Polar Rules. Following the example of the construction of the side of a ship, the dimensioning of the construction was carried out for three different positions of the stringer. The influence of different categories of ice class (PC6, PC7), frame spacing and material type on the dimensions of structural elements such as shell thickness and frame resistance are investigated. The calculation was implemented according to the rules using MS Excel package. The influence of ice class, frame spacing and material type on the mass of the overall construction is also investigated. It has been shown that the greatest influence on the construction mass is the category of ice class and the type of material used for construction. For the selected topology, feasibility check was performed by direct calculation through the linear finite element method using the Maestro software package. After redesigning the basic structural elements using a linear FEM calculation, it has been observed that a significant increase in dimensions is required to satisfy the eligibility conditions. It was concluded that as a next step in the study, it was necessary to carry out a nonlinear calculation using the finite element method.

Key words: categories of ice class, frame spacing, eligibility control, scantling determination of structural elements

1. UVOD

U posljednje vrijeme raste broj različitih tipova brodova (jahte, istraživački brodovi, trgovački brodovi, itd.) koji povremeno svoju funkciju obavljaju u zaleđenim vodama kao na slici 1.. Projektiranje konstrukcije takvih tipova brodova uz primjenu standardnih pravila klasifikacijskih društava zahtjeva primjenu posebnih pravila kojima su specificirana opterećenja izazvana ledom i način dimenzioniranja elemenata brodske konstrukcije.

Brod koji je u službi u polarnim uvjetima izvrnut je teškim uvjetima kao što su niske temperature te masa leda i snijega koja pluta pri površini, te samim tim dodatno opterećuje konstrukciju.



Slika 1. Polarni kruzer HONDIUS izgrađen u brodogradilištu BRODOSPLIT 2019. godine

Bucci [1] u svojem radu govori o konstruiranju broda koji zadovoljava zahtjeve za plovidbu polarnim područjima. U radu je provedena analiza senzitivnosti na brodu „Brave Goose“ za različita opterećenja nastala od leda i za različite polarne klase koje se mogu susresti. Kako bi se istražio utjecaj različitih parametara na dimenzije same strukture, provedena je analiza senzitivnosti. Iz takve analize dobiveni su rezultati u obliku dijagrama koji su vrlo korisni pri izboru dimenzija nosivih elemenata. Primjer konstrukcije ekspedicijske jahte duljine 35m je ispitan i uspoređen sa konstrukcijom koja nije pojačana te se provela procjena dodatne mase.

„Finnish-Swedish Ice Class Rules“ [2] su usvojena od strane većine članova IACS-a, koji ih je uvrstio u svoja pravila. Razvoj pravila Polarne klase počeo je 1990-ih s međunarodnim naporima da se usklade zahtjevi za morskim operacijama u polarnim vodama radi zaštite života, imovine i okoliša. Smjernice koje je razvila Međunarodna pomorska organizacija (IMO), a koje su kasnije uključene u Polarni kodeks, upućivale su na usklađenost s Jedinstvenim zahtjevima za polarne brodove, koje je razvila Međunarodna udruga klasifikacijskih društava (IACS). U svibnju 1996. osnovana je „Ad-Hoc“ grupa za uspostavljanje jedinstvenih zahtjeva za polarne brodove (AHG / PSR)“ s jednom radnom skupinom koja se koncentrirala na strukturne zahtjeve, a druga koja radi na pitanjima vezanim za strojeve. Prva pravila IACS [3] Polarne klase objavljena su 2007. godine. Prije razvoja jedinstvenih zahtjeva, svako klasifikacijsko društvo imalo je svoj skup pravila klase leda, u rasponu od baltičkih klasa leda namijenjenih radu u ledu prve godine, do viših kategorija plovila, uključujući i klasu ledolomac, namijenjenih operacijama u polarnim vodama. Prilikom razvoja gornjih i donjih granica za Polarne klase, dogovoreno je da bi plovila najviše klase Polarne klase (PC 1) trebala biti u stanju sigurno djelovati bilo gdje u arktičkim ili antarktičkim vodama u bilo koje doba godine, dok je donja granica bila postavljen na postojeću tonažu koja djeluje tijekom ljetne sezone, a većina je pratila baltičke klase leda s nekim nadogradnjama i dodacima. Najniža polarna klasa (PC 7) postavljena je na sličnu razinu s finsko-švedskom ledenom klasom (1A). Definicija radnih uvjeta za svaku polarnu klasu namjerno je ostavljena nejasna zbog velike raznolikosti brodskih operacija koje se obavljaju u polarnim vodama.

Cilj ovog rada je, za zadani predložak boka broda za prijevoz općeg tereta, provesti lokalno dimenzioniranje konstrukcije s obzirom na zahtjeve IACS *Polar Rules* te istražiti utjecaj različitih parametara kao što su klasa za led, tip materijala i razmak rebara na dimenzije konstrukcijskih elemenata.

2. Pregled zahtjeva pravila za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata

2.1. Polarne klase

Objedinjena pravila za „Polar Class“ brodove primjenjuju se na brodove izgrađene od čelika koji su namijenjeni za slobodnu plovidbu polarnim morima uz prisustvo leda, razvrstani u različite klase. U tablici 1. dana je podjela i opis različitih polarnih klasa.

Tablica 1. Opis polarnih klasa

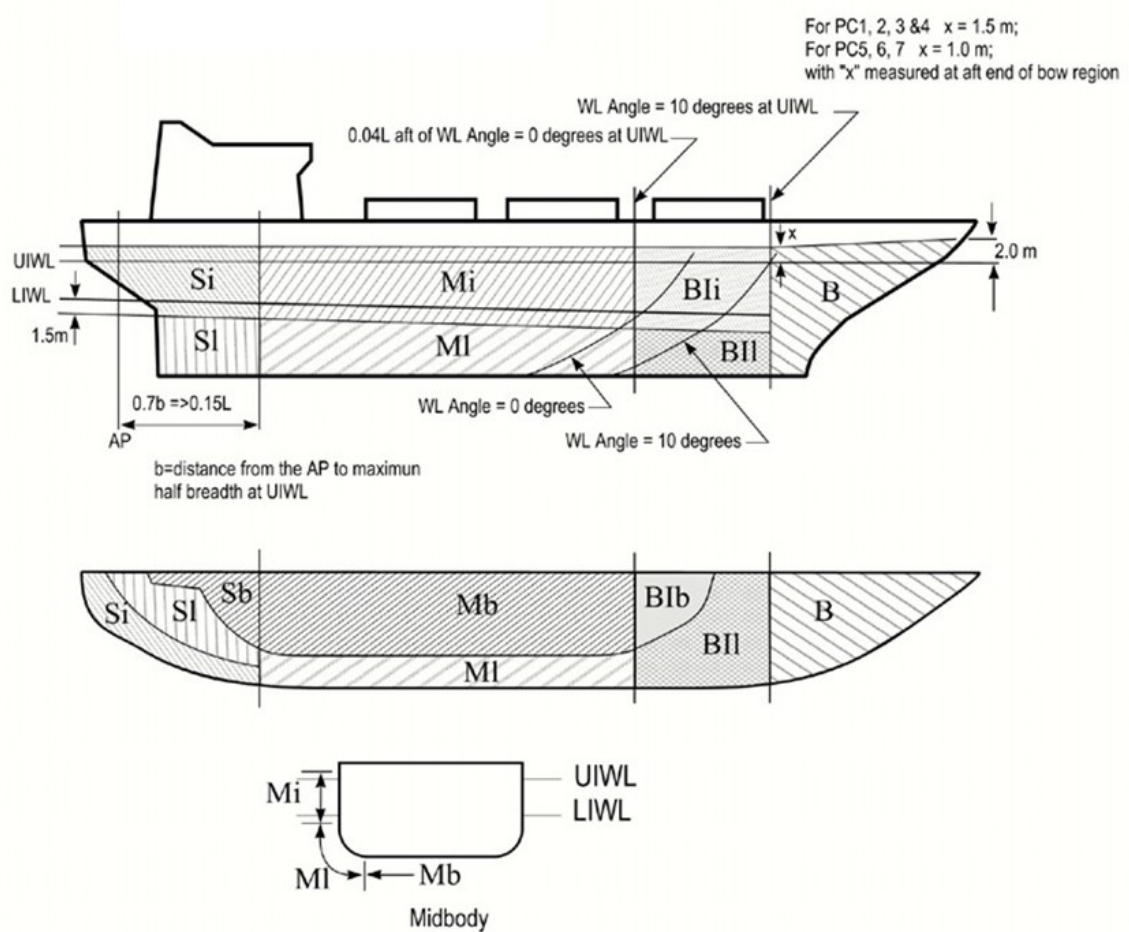
Polarna klasa	Opis uvjeta
PC1	Cjelogodišnja plovidba u svim polarnim morima
PC2	Cjelogodišnja plovidba u uvjetima višegodišnjeg leda
PC3	Cjelogodišnja plovidba u uvjetima dvogodišnjeg leda
PC4	Cjelogodišnja plovidba u uvjetima debelog jednogodišnjeg leda
PC5	Cjelogodišnja plovidba u uvjetima umjereno debelog jednogodišnjeg leda
PC6	Ljeto/jesen plovidba u uvjetima umjereno debelog jednogodišnjeg leda
PC7	Ljeto/jesen plovidba u uvjetima tankog jednogodišnjeg leda

2.2. Gornja i donja ledena vodna linija

Gornja i donja vodna linija su dva vrlo važna faktora o kojima ovisi dimenzioniranje konstrukcije i moraju biti naznačene u Certifikatu klasifikacije. Gornja vodna linija je definirana kao maksimum gazova krme, glavnog rebra i pramca. Donja vodna linija je definirana kao minimum gazova krme, glavnog rebra i pramca. Kod određivanja donje vodne linije mora se obratiti pažnja na plovidbu broda u balastno stanju i propeler mora biti potpuno uronjen na donjoj vodnoj liniji.

2.3. Područja trupa

Trup broda koji zadovoljava zahtjevima polarne klase podijeljen je u različita područja sa željom isticanja različitih intenziteta opterećenja koja se očekuju na elemente konstrukcije koji se nalaze u tom području. U uzdužnom smjeru postoje četiri područja: Pramac, središnji pramac, paralelni srednjak i krma. Ta područja su nadalje podijeljena po visini na dno, ledeni pojas i niže područje.



Slika 2. Raspored zona [3]

2.4. Projektno opterećenje

Projektno opterećenje je definirano kao srednji tlak koji je jednoliko raspoređen uzduž pravokutne površine „design patch“, određene visine i širine. Tlak je rezultat zajedničkog utjecaja vode i leda koji djeluju na konstrukciju.

Tablica 2. Proračunski koeficijenti ovisni o klasi

Polarna klasa	CF_C	CF_F	CF_D	CF_{DIS}	CF_L
PC1	17,69	68,60	2,01	250	7,46
PC2	9,89	46,80	1,75	210	5,46
PC3	6,06	21,17	1,53	180	4,17
PC4	4,50	13,48	1,42	130	3,15
PC5	3,10	9,00	1,31	70	2,50
PC6	2,40	5,49	1,17	40	2,37
PC7	1,80	4,06	1,11	22	1,81

2.4.1. Područje trupa izvan pramca

U području trupa koje se nalazi izvan područja pramca sila opterećenja se određuje prema formuli (1):

$$F_{nonbow} = 0.36 \cdot CF_C \cdot DF \quad [\text{MN}] \quad (1)$$

Gdje je:

DF – koeficijent istisnine broda

D – istisnina broda, [kt]

$$DF = D^{0,64} \quad \text{ako je } D \leq CF_{DIS}$$

$$DF = CF_{DIS}^{0,64} + 0,1 \cdot (D - CF_{DIS}) \quad \text{ako je } D > CF_{DIS}$$

U tablici 2. dane su vrijednosti koeficijenta CF_C u odnosu na različite polarne klase.

Kontinuirano opterećenje za područje koje se nalazi izvan područja pramca određeno je prema formuli (2):

$$Q_{nonbow} = 0,639 \cdot F_{nonbow}^{0,61} \cdot CF_D \text{ [MN/m]} \quad (2)$$

U tablici 2. dane su vrijednosti koeficijenta CF_D u odnosu na različite polarne klase.

2.5. Projektna površina opterećenja

U području trupa koje se nalazi izvan područja pramca projektna površina opterećenja ima dimenzije širine (w_{nonbow}) i visine (b_{nonbow}) koje se računaju prema izrazima:

$$w_{nonbow} = \frac{F_{nonbow}}{Q_{nonbow}} \text{ [m]} \quad (3)$$

$$b_{nonbow} = \frac{w_{nonbow}}{3,6} \text{ [m]} \quad (4)$$

2.6. Projektni tlak unutar površine opterećenja

Srednji tlak koji vlada unutar površine opterećenja određen je prema formuli (5):

$$P_{avg} = \frac{F_{nonbow}}{b_{nonbow} \cdot w_{nonbow}} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

2.7. Debljina oplata

Zahtijevana minimalna debljina oplata određena je prema izrazu (6):

$$t = t_{net} + t_s \text{ [mm]} \quad (6)$$

Gdje je:

t_{net} – potrebna debljina oplata, [mm]

t_s – korozijski dodatak, [mm]

U slučaju poprečno orebrenne oplata ($\Omega \geq 70^\circ$), uključujući i oplatu dna te oplatu u zonama B_{lb} , M_b i S_b , debljina oplata je određena prema izrazu (7):

$$t_{net} = 500 \cdot s \frac{\left(\frac{AF \cdot PPF_p \cdot P_{avg}}{\sigma_y} \right)^{0.5}}{1 + \frac{s}{2b}} \text{ [mm]} \quad (7)$$

Gdje je:

Ω – kut između vodne linije i orebrenja

s – razmak rebara

AF – koeficijent iz tablice 3.

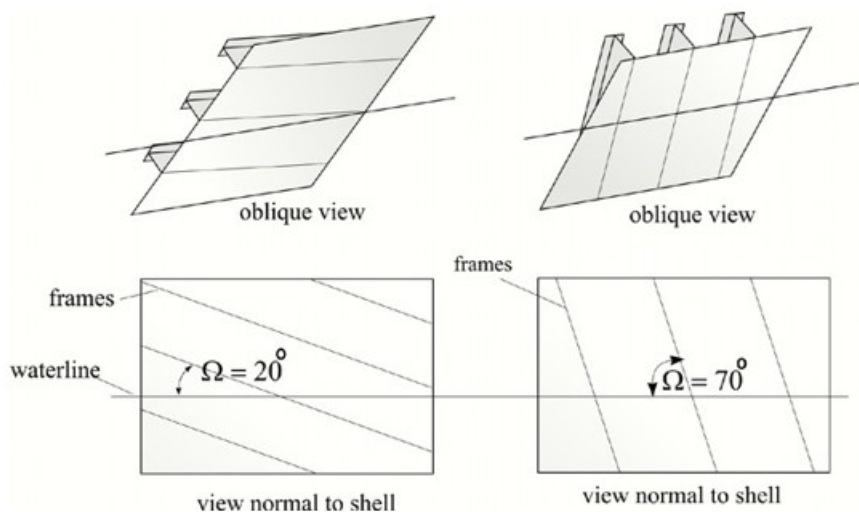
PPF_p – koeficijent iz tablice 4.

P_{avg} – srednji tlak, [MPa]

σ_y – granica popuštanja, [N/mm²]

b – visina površine opterećenja

l – udaljenost između oslonaca rebara



Slika 3. Kut između rebara i vodne linije [3]

U tablici 3. su prikazane vrijednosti koeficijenta PPF_i za različite elemente konstrukcije te različite načina orebrenja konstrukcije.

Tablica 3. Vrijednosti koeficijenta PPF_i

Dio konstrukcije		PPF_i
Oplata	Poprečno orebrena	$PPF_p = (1.8 - s) \div 1.2$
	Uzdužno orebrena	$PPF_p = (2.2 - 1.2 \cdot s) \div 1.5$
Rebra u poprečnom sustavu gradnje	Sa provezama	$PPF_t = (1.6 - s) \div 1.0$
	Bez proveza	$PPF_t = (1.8 - s) \div 1.2$
Rebra u strukturi dna		$PPF_s = 1.0$
Proveze		$PPF_s = 1.0$, if $S_w \div 0.5 \cdot w$
Uzdužnjaci		$PPF_s = 2.0 - 2.0 \cdot S_w / w$,
Okrvirna rebra		if $S_w < (0.5 \cdot w)$
s = razmak rebara [m] S _w = razmak okvira [m] w = širina površine opterećenja [m]		

Tablica 4. Koeficijenti AF

Područje trupa		Polarna klasa						
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
B	B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
BI	BI _i	0.90	0.85	0.85	0.80	0.80	1.00	1.00
	BI _l	0.70	0.65	0.65	0.60	0.55	0.55	0.50
	BI _b	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
M	M _i	0.70	0.65	0.55	0.55	0.50	0.45	0.45
	M _l	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.25
	M _b	0.30	0.30	0.25	/	/	/	/
S	S _i	0.75	0.70	0.65	0.60	0.50	0.40	0.35
	S _l	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.25	0.25
	S _b	0.35	0.30	0.30	0.25	0.15	/	/

2.8. Orebrenje

Potrebna površina poprečnog presjeka nosača rebra određena je izrazom (8):

$$A_w = \frac{h \cdot t_{wn} \cdot \sin \varphi_w}{100} \quad [\text{cm}^2] \quad (8)$$

Gdje je:

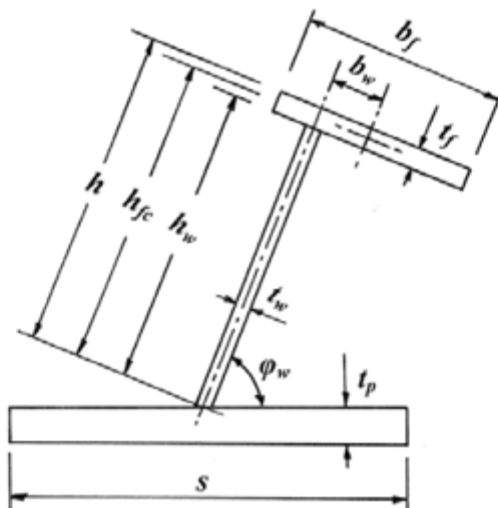
h – visina nosača, [mm]

$t_{wn} = t_w - t_c$, [mm]

t_w – stvarna debljina struka nosača, [mm]

t_c – korozijski dodatak, [mm]

φ_w – kut između oplata i struka nosača



Slika 4. Dimenzije nosača [3]

Moment otpora poprečnog presjeka nosača određen je prema izrazu (9):

$$Z_p = \frac{A_{pn} \cdot t_{pn}}{20} + \frac{h_w^2 \cdot t_{wn} \cdot \sin \varphi_w}{2000} + A_{fn} \cdot \frac{h_{fc} \cdot \sin \varphi_w - b_w \cdot \cos \varphi_w}{10} \quad [\text{cm}^3] \quad (9)$$

Gdje je:

h , t_{wn} , t_c i φ_w kao u točki 2.8.

A_{pn} – neto površina poprečnog presjeka nosača, $[\text{cm}^2]$

t_{pn} – neto debljina oplata, $[\text{mm}]$

h_w – visina nosača, $[\text{mm}]$

A_{fn} – neto površina poprečnog presjeka flanže, $[\text{cm}^2]$

h_{fc} – visina nosača mjerena od središta flanže, $[\text{mm}]$

b_w – udaljenost središta flanže od centralne linije nosača, $[\text{mm}]$

3. Lokalno dimenzioniranje i analiza senzitivnosti

Prototipna konstrukcija boka broda dimenzionirana na područje plovidbe izvan zone leda (na koju se ne odnose zahtjevi iz IACS *Polar Rules*) i preuzeta iz predloška za promatranu duljinu od 60m paralelnog srednjaka ima masu oko 85t.

Na osnovu projektnih izraza danih u poglavlju 2 provedeno je dimenzioniranje konstrukcijski elemenata za primjer poprečno orebrenog boka broda za prijevoz općeg tereta.

Analiza senzitivnosti mase konstrukcije provedena je na primjeru konstrukcije broda za opći teret za različite vrijednosti razmaka rebara:

- 600 mm
- 652 mm
- 706 mm
- 750 mm
- 800 mm

Cilj brodogradilišta je u brod ugraditi čim manje materijala kako bi sam proizvod bio čim jeftiniji, a samim time kako bi brodogradilište bilo konkurentnije na tržištu. Također za manju masu konstrukcije imamo povećanu nosivost uz istu formu broda što je brodovlasniku uvijek bitan faktor. Analiza senzitivnosti nam nudi uvid u ovisnost ukupne mase konstrukcije u ovisnosti o određenim konstrukcijskim značajkama kao što su:

- Razmak rebara
- Razmak okvira
- Razmak uzdužnjaka
- Materijal
- Namjena i područje plovidbe

Analiza senzitivnosti provedena je za dvije različite klase leda PC6 i PC7, te za klase materijala ST24, AH32 i AH36, te su dobiveni prikladni dijagrami i tablično prikazani rezultati.

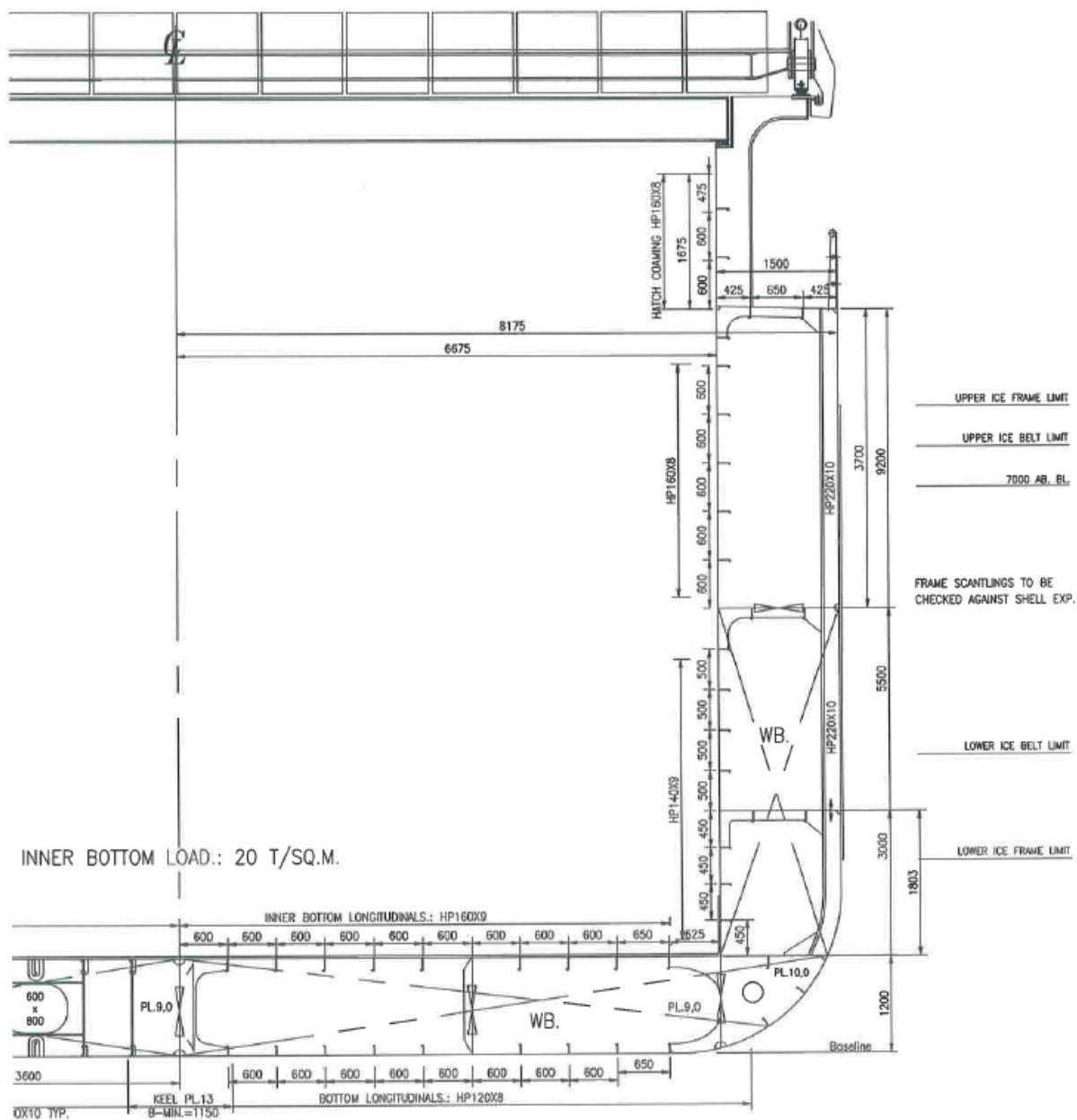
Po pravilima IACS-a provedeno je dimenzioniranje oplata i nosača rebara za različite razmake rebara, materijale i polarne klase. Proračun je proveden korištenjem programskog paketa MS Excel. Dimenzije okvira i proveza uzete su nepromjenjive što nije potpuno ispravno zato što promjenom razmaka rebara mijenjamo i konačan broj okvira pa pojedini okvir nosi nešto veće opterećenje pa će takav okvir morati biti većih dimenzija od prethodnih.

3.1. Primjer konstrukcije

Tablica 5. Opće karakteristike

L_{OA} , [m]	L_{PP} , [m]	B , [m]	D , [m]	T , [m]	C_B	V , [čv]	DW , [t]
99,9	97,5	16,35	9,2	7	0,8	12	6000

U tablici 5. nalaze se opće karakteristike brodske konstrukcije koja je uzeta za primjer, a radi se o brodu za opći teret.



Slika 5. Nacrt primjera prototipne konstrukcije

3.2. Tablični prikaz rezultata analize senzitivnosti

U tablicama od 6. do 17. prikazani su rezultati analize senzitivnosti koji je proveden prema pravilima IACS za različite varijante razmaka rebara, kategorije materijala i klase za led na osnovu alata koji je razvijen u programu MS Excel. Promatrana duljina dvoboka iznosi 60 m.

Tablica 6. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, ST24, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	15,94	16,85	17,74	18,43	19,18
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	11,88	12,56	13,22	13,73	14,29
Masa oplata, [t]	47,95	50,68	53,36	55,44	57,69
Moment otpora rebra zona 1, [cm ³]	525,22	596,48	650,80	670,96	726,48
Moment otpora rebra zona 2, [cm ³]	750,10	855,68	879,28	941,76	1059,67
Moment otpora rebra zona 3, [cm ³]	1173,00	1248,88	1391,33	1412,29	1560,14
Masa rebara, [t]	20,78	19,93	18,85	18,07	18,35
Masa oplata i rebra, [t]	68,73	70,61	72,21	73,51	76,04
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	106,86	106,88	106,62	106,99	107,66
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	106,86	108,00	108,67	109,92	111,20

Tablica 7. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, AH32, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	13,77	14,55	15,32	15,92	16,56
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	10,26	10,85	11,42	11,86	12,35
Masa oplata, [t]	41,41	43,76	46,09	47,88	49,82
Moment otpora rebra zona 1, [cm ³]	382,95	431,15	494,42	549,01	528,14
Moment otpora rebra zona 2, [cm ³]	550,32	597,09	645,89	701,63	756,45
Moment otpora rebra zona 3, [cm ³]	849,40	958,96	1024,92	1088,55	1107,69
Masa rebara, [t]	17,00	17,07	16,10	15,79	14,83
Masa oplata i rebra, [t]	58,41	60,83	62,19	63,67	64,65
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	96,54	97,11	96,60	97,15	96,27
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	96,54	98,22	98,64	100,08	99,81

Tablica 8. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, AH36, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	12,97	13,71	14,43	14,99	15,60
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	9,67	10,22	10,76	11,17	11,63
Masa oplata, [t]	39,01	41,23	43,42	45,10	46,94
Moment otpora rebra zona 1, [cm ³]	353,07	367,15	404,52	433,10	484,09
Moment otpora rebra zona 2, [cm ³]	491,13	556,07	572,12	616,84	664,44
Moment otpora rebra zona 3, [cm ³]	798,95	813,70	871,61	978,96	996,00
Masa rebara, [t]	16,18	14,90	14,78	14,34	13,75
Masa oplata i rebra, [t]	55,19	56,13	58,20	59,44	60,69
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	93,32	92,40	92,61	92,92	92,32
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	93,32	93,52	94,66	95,85	95,85

Tablica 9. Rezultati proračuna za primjer konstrukcije, AH36, PC7

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	11,69	12,34	12,98	13,47	14,00
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	8,71	9,20	9,67	10,04	10,44
Masa oplata, [t]	35,16	37,12	39,04	40,52	42,13
Moment otpora rebra zona 1, [cm ³]	277,70	306,68	319,55	376,20	389,53
Moment otpora rebra zona 2, [cm ³]	393,98	451,27	464,34	514,47	528,04
Moment otpora rebra zona 3, [cm ³]	589,49	641,90	690,94	738,27	836,37
Masa rebara, [t]	14,24	13,06	12,54	12,73	12,12
Masa oplata i rebra, [t]	49,40	50,18	51,58	53,25	54,25
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	87,53	86,45	85,99	86,73	85,88
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	87,53	87,57	88,03	89,66	89,41

Tablica 10. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, ST24, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	15,94	16,85	17,74	18,43	19,18
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	11,88	12,56	13,22	13,73	14,29
Masa oplata, [t]	47,95	50,68	53,36	55,44	57,69
Moment otpora rebra, [cm ³]	834,53	897,52	1014,51	1035,06	1107,85
Masa rebara, [t]	19,58	19,22	18,21	17,15	17,12
Masa oplata i rebara, [t]	67,53	69,90	71,57	72,59	74,81
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	105,66	106,17	105,99	106,07	106,43
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	105,66	107,29	108,03	109,00	109,97

Tablica 11. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, AH32, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	13,77	14,55	15,32	15,92	16,56
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	10,26	10,85	11,42	11,86	12,35
Masa oplata, [t]	41,41	43,76	46,09	47,88	49,82
Moment otpora rebra, [cm ³]	581,02	668,12	722,14	737,76	792,66
Masa rebara, [t]	16,06	15,26	15,12	14,23	14,25
Masa oplata i rebara, [t]	57,47	59,02	61,21	62,11	64,07
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	95,60	95,29	95,62	95,60	95,69
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	95,60	96,41	97,67	98,53	99,23

Tablica 12. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, AH36, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplate ledenog pojasa, [mm]	12,97	13,71	14,43	14,99	15,60
Debljina oplate izvan pojasa, [mm]	9,67	10,22	10,76	11,17	11,63
Masa oplate, [t]	39,01	41,23	43,42	45,10	46,94
Moment otpora rebra, [cm^3]	541,68	586,76	633,66	647,68	704,62
Masa rebara, [t]	14,95	14,78	14,60	13,74	12,44
Masa oplate i rebra, [t]	53,96	56,01	58,02	58,84	59,38
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	92,09	92,28	92,43	92,33	91,00
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	92,09	93,40	94,48	95,25	94,53

Tablica 13. Rezultati proračuna za dvije proveze jednoliko razmaknute, AH36, PC7

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplate ledenog pojasa, [mm]	11,69	12,34	12,98	13,47	14,00
Debljina oplate izvan pojasa, [mm]	8,71	9,20	9,67	10,04	10,44
Masa oplate, [t]	35,16	37,12	39,04	40,52	42,13
Moment otpora rebra, [cm^3]	439,51	451,27	503,11	514,47	578,59
Masa rebara, [t]	13,37	12,31	12,67	11,92	11,21
Masa oplate i rebra, [t]	48,53	49,43	51,71	52,44	53,34
Masa proveza, [t]	13,95	13,95	13,95	13,95	13,95
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	86,66	85,70	86,12	85,93	84,96
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	86,66	86,81	88,17	88,86	88,50

Tablica 14. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, ST24, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	15,94	16,85	17,74	18,43	19,18
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	11,88	12,56	13,22	13,73	14,29
Masa oplata, [t]	47,95	50,68	53,36	55,44	57,69
Moment otpora rebra, [cm ³]	1227,07	1367,03	1513,64	1774,91	1800,36
Masa rebara, [t]	26,32	24,76	25,55	25,46	23,87
Masa oplata i rebara, [t]	74,27	75,44	78,91	80,90	81,56
Masa proveza, [t]	6,98	6,98	6,98	6,98	6,98
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	105,43	104,73	106,35	107,41	106,21
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	105,43	105,85	108,39	110,34	109,74

Tablica 15. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, AH32, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplata ledenog pojasa, [mm]	13,77	14,55	15,32	15,92	16,56
Debljina oplata izvan pojasa, [mm]	10,26	10,85	11,42	11,86	12,35
Masa oplata, [t]	41,41	43,76	46,09	47,88	49,82
Moment otpora rebra, [cm ³]	942,43	1006,44	1072,52	1196,77	1215,95
Masa rebara, [t]	21,44	21,00	20,59	19,87	18,63
Masa oplata i rebara, [t]	62,85	64,76	66,68	67,75	68,45
Masa proveza, [t]	6,98	6,98	6,98	6,98	6,98
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	94,00	94,06	94,12	94,25	93,09
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	94,00	95,18	96,16	97,18	96,63

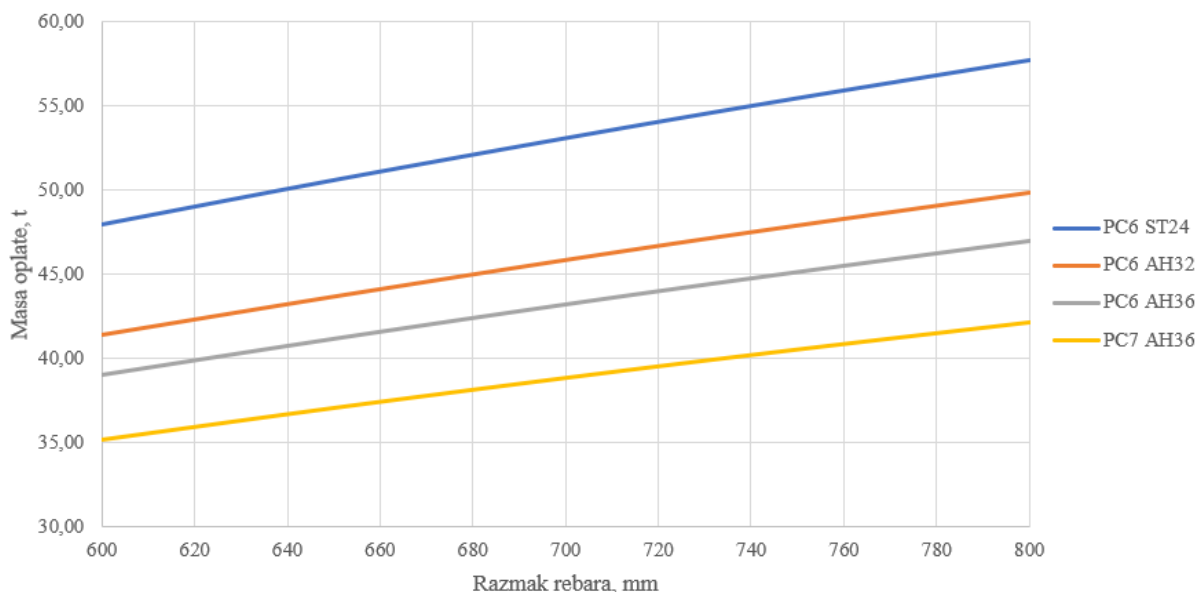
Tablica 16. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, AH36, PC6

Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplate ledenog pojasa, [mm]	12,97	13,71	14,43	14,99	15,60
Debljina oplate izvan pojasa, [mm]	9,67	10,22	10,76	11,17	11,63
Masa oplate, [t]	39,01	41,23	43,42	45,10	46,94
Moment otpora rebra, [cm ³]	798,95	948,13	1012,15	1026,51	1091,29
Masa rebara, [t]	19,59	19,73	19,41	18,27	18,17
Masa oplate i rebra, [t]	58,60	60,96	62,83	63,37	65,11
Masa proveza, [t]	6,98	6,98	6,98	6,98	6,98
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	89,75	90,25	90,26	89,87	89,76
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	89,75	91,37	92,31	92,80	93,29

Tablica 17. Rezultati proračuna za jednu provezu na polovici dvoboka, AH36, PC7

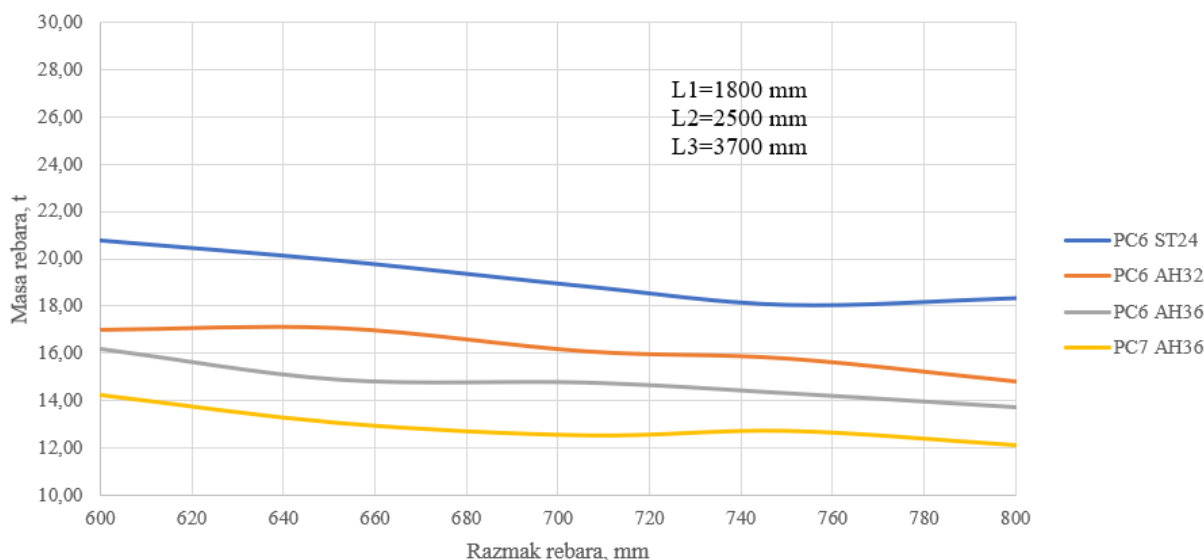
Razmak rebara, [mm]	600	652	706	750	800
Debljina oplate ledenog pojasa, [mm]	11,69	12,34	12,98	13,47	14,00
Debljina oplate izvan pojasa, [mm]	8,71	9,20	9,67	10,04	10,44
Masa oplate, [t]	35,16	37,12	39,04	40,52	42,13
Moment otpora rebra, [cm ³]	665,50	713,23	810,93	822,54	877,81
Masa rebara, [t]	17,80	17,49	16,65	15,67	15,67
Masa oplate i rebra, [t]	52,96	54,61	55,69	56,19	57,80
Masa proveza, [t]	6,98	6,98	6,98	6,98	6,98
Broj okvira	26,00	24,00	22,00	21,00	19,00
Masa okvira, [t]	24,18	22,32	20,46	19,53	17,67
Ukupna masa, [t]	84,11	83,91	83,12	82,69	82,44
Masa okvira sa povećanjem, [t]	24,18	23,44	22,51	22,46	21,20
Ukupna masa sa povećanjem okvira, [t]	84,11	85,02	85,17	85,62	85,98

3.3. Grafički prikaz rezultata analize senzitivnosti



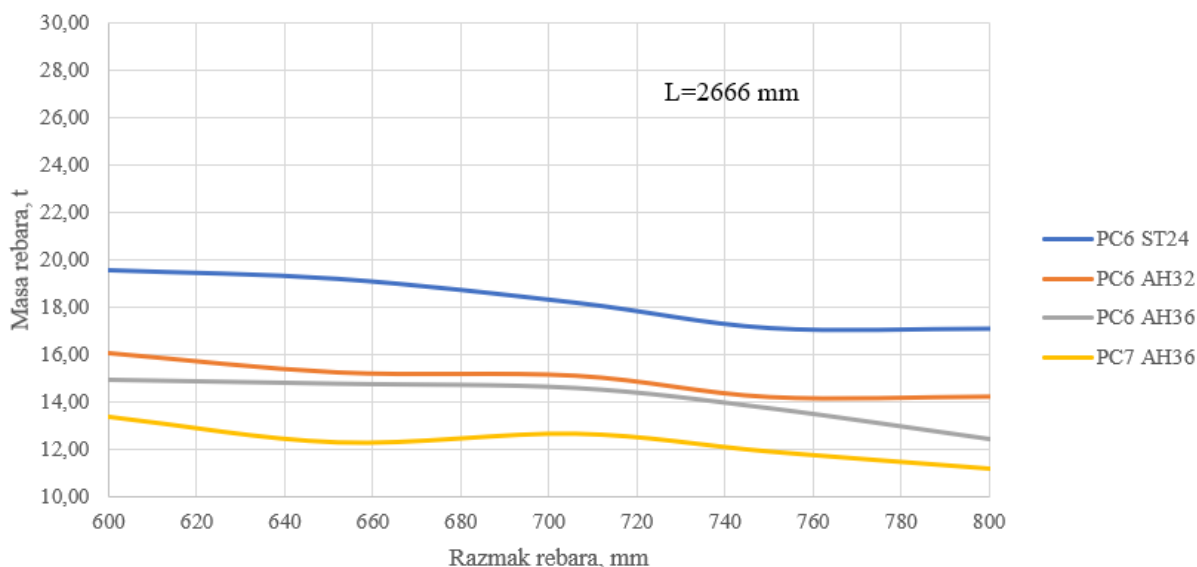
Slika 6. Ovisnost mase oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete

Prema slici 6. možemo zaključiti da se sa povećanjem razmaka rebara povećava i potrebna debljina oplata i da ima linearan trend povećanja. Logičan je zaključak ako biramo bolju klasu čelika da će nam biti potrebna manja debljina oplata, ali treba biti svjestan da na taj način raste cijena materijala, ali to nije tema razmatranja. Povećanje mase oplata za PC6 AH36 za razmak rebara 800mm u odnosu na 600mm iznosi 7,93 t, a povećanje mase oplata za PC6 ST24 iznosi 9,74 t.



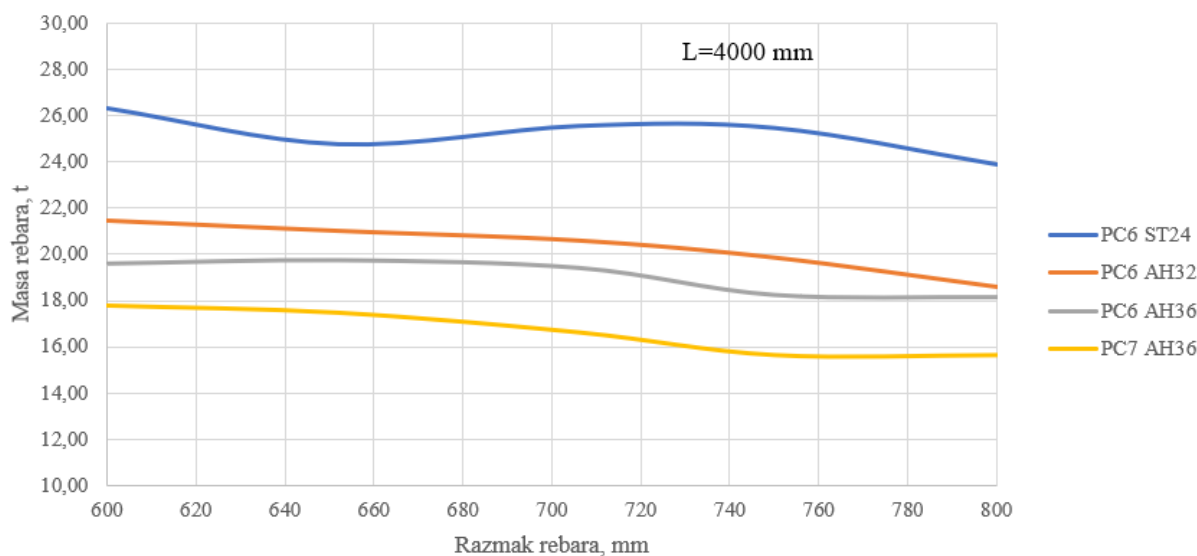
Slika 7. Ovisnost mase rebara o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, primjer konstrukcije

Prema slici 7. može se zaključiti da masa rebara opada sa povećanjem razmaka rebara uz neke određene skokove koji su rezultati skokovitog odabira HP profila iz kataloga valjanih profila. Smanjenje mase rebara za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 2,43 t. Smanjenje mase rebara za PC6 ST24 u odnosu na početni razmak rebara iznosi također 2,43 t.



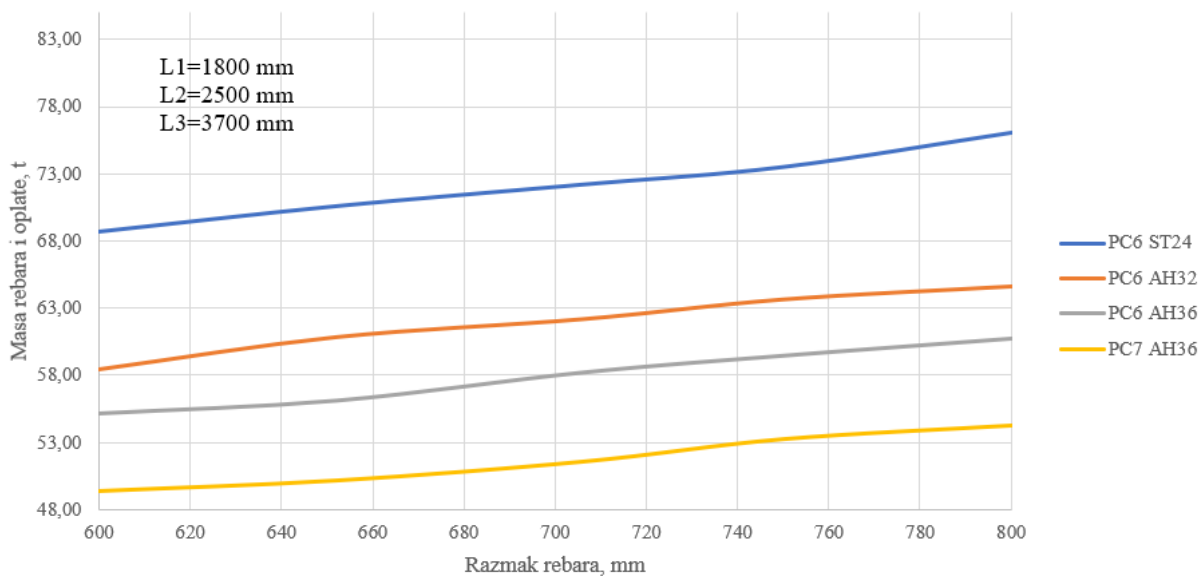
Slika 8. Ovisnost mase rebara o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, dvije proveze jednoliko razmaknute

Prema slici 8. smanjenje mase rebara za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 2,51 t, a za PC6 ST24 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 2,46 t.



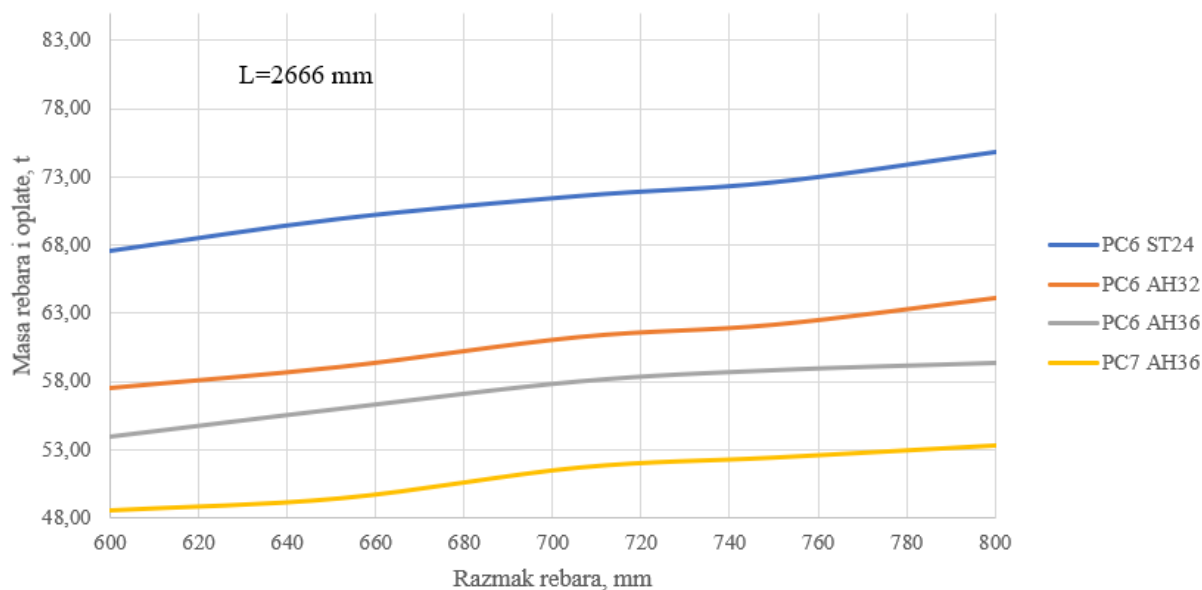
Slika 9. Ovisnost mase rebara o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, jedna proveza na sredini dvoboka

Na slikama 8. i 9. vidi se smanjenje mase rebara uz povećanja razmaka rebara, ali na nekim dijelovima dolazi do malog povećanja mase također zbog skokovitog odabira profila. Kako povećavamo razmak rebara tako smanjujemo ukupan broj rebara, ali povećavamo opterećenje na rebro pa rastu dimenzije pojedinog rebara. Smanjenje mase rebara za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 2,42 t, a za PC6 ST24 iznosi 2,45 t.



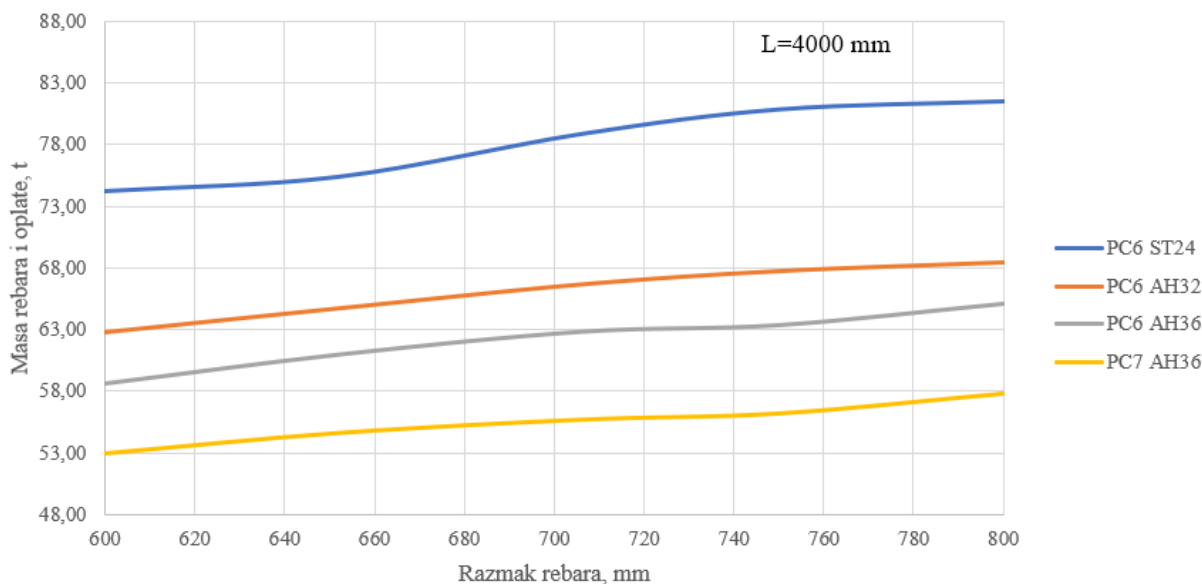
Slika 10. Ovisnost mase rebara i oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, primjer konstrukcije

Povećanje mase rebara i oplata za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 5,5 t, a za PC6 ST24 iznosi 7,31 t.



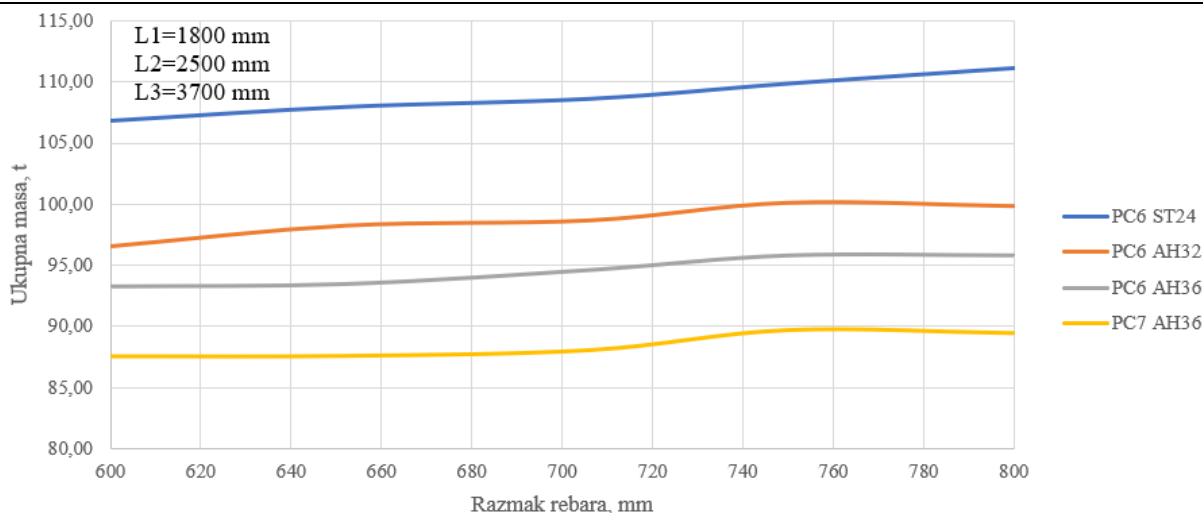
Slika 11. Ovisnost mase rebara i oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, dvije proveze jednoliko razmaknute

Na slikama 10. i 11. vidi se porast mase rebara i oplata sa povećanjem razmaka rebara. Ovaj prikaz se može promatrati kao superpozicija dijagrama mase rebara i mase oplata za određeni slučaj. Povećanje mase rebara i oplata za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 5,42 t, a za PC6 ST24 iznosi 7,28 t.



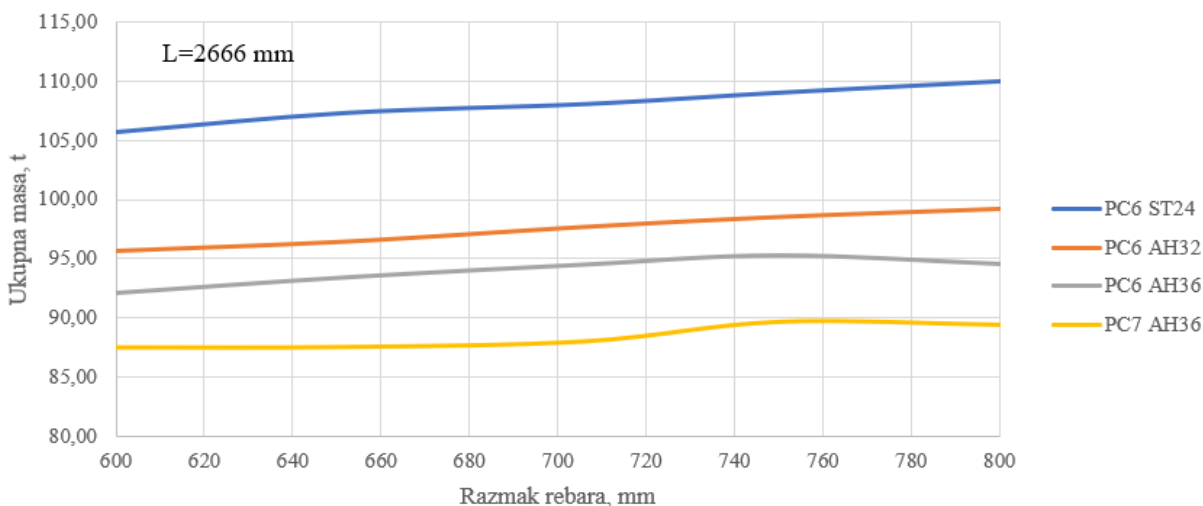
Slika 12. Ovisnost mase rebara i oplata o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, jedna proveza na sredini dvoboka

Povećanje mase rebara i oplata za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 6,51 t, a za PC6 ST24 iznosi 7,29 t.



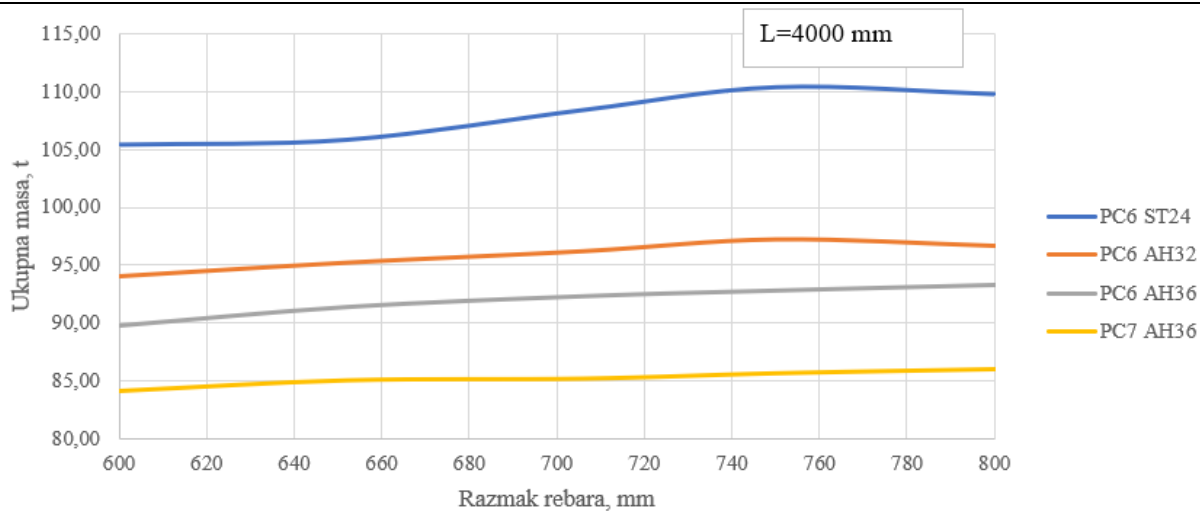
Slika 13. Ovisnost ukupne mase o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, primjer konstrukcije

Na slikama 12. i 13. vidi se povećanje ukupne mase sa povećanjem razmaka rebara, ali na nekom rasponu razmaka rebara vidi se pad ukupne mase. Kako povećavamo razmak rebara imamo sve manje okvirnih rebara koja utječu na ukupnu masu konstrukcije. Povećanje ukupne mase za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 2,53 t, a za PC6 ST24 iznosi 4,34 t.



Slika 14. Ovisnost ukupne mase o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, dvije proveze jednako razmknute

Povećanje ukupne mase za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 2,44 t, a za PC6 ST24 iznosi 4,31 t.



Slika 15. Ovisnost ukupne mase o razmaku rebara za čelik različite kvalitete, jedna proveza na sredini dvoboka

Na slikama 14. i 15. se vidi porast ukupne mase konstrukcije sa povećanjem razmaka rebara. Povećanje ukupne mase za PC6 AH36 u odnosu na početni razmak rebara iznosi 3,54 t, a za PC6 ST24 iznosi 4,31 t.

4. Direktni proračun korištenjem metode konačnih elemenata

Direktni proračun korištenjem metode konačnih elemenata (MKE) nije potrebno provesti kao alternativu za analitički proračun opisan za oplatu i rebra. Direktni proračun se provodi u svrhu proračuna i provjere podobnosti proveza i okvirnih rebara koja čine dio konstrukcije roštilja. Ako se za proračun čvrstoće konstrukcije koristi direktni proračun, primjenjuje se opterećenje na površini opterećenja dobivenu kako je pokazano u poglavlju 2. formula (5) proračunom bez kombiniranja s bilo kojim drugim opterećenjem. Posebnu pažnju treba posvetiti mjestima na kojima postoje otvori u konstrukciji.

Procjena čvrstoće okvirnih rebara i proveza može se provesti na temelju linearne ili nelinearne analize. Ako se struktura procjenjuje na temelju linearne metoda proračuna, uzima se u obzir sljedeće:

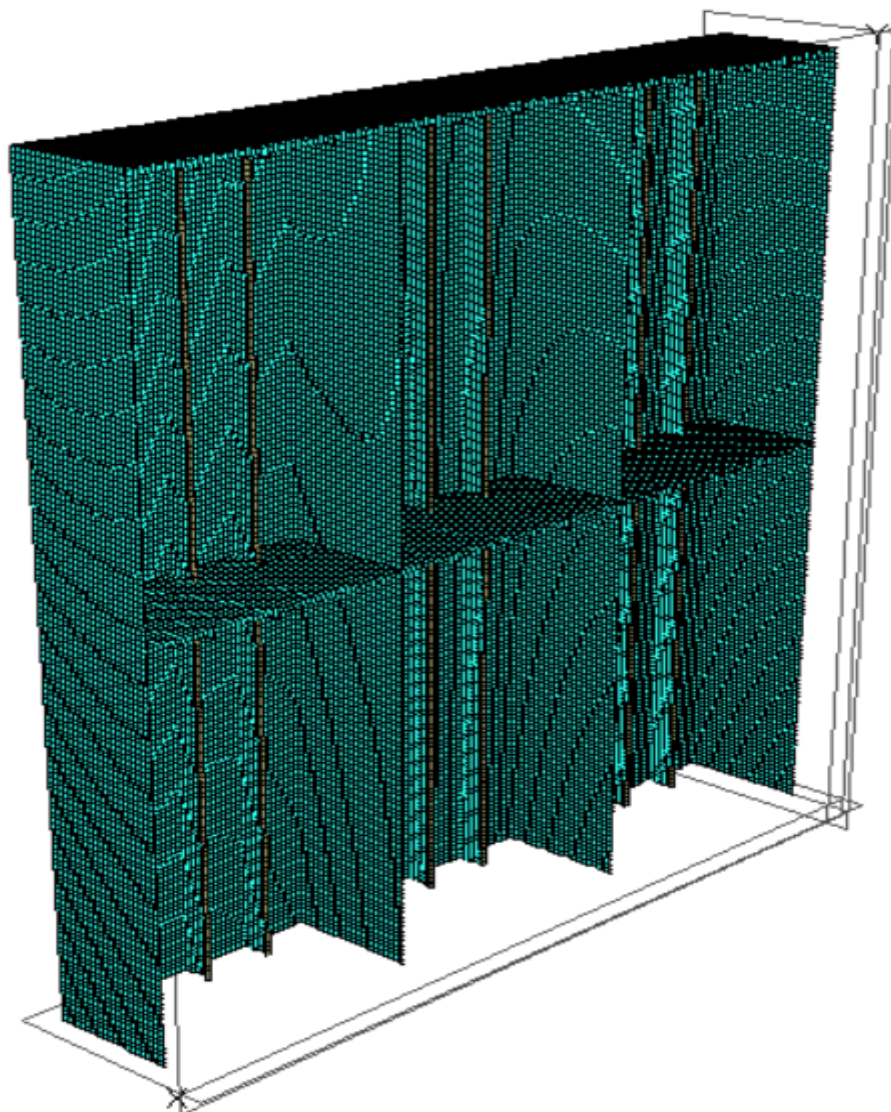
- Nominalna smična naprezanja moraju biti manja od $\sigma_y / \sqrt{3}$
- Nominalna von Misesova naprezanja moraju biti manja od $1,15 \sigma_y$

Ako se struktura procjenjuje na temelju nelinearne metode proračuna, uzima se u obzir sljedeće:

- Analiza uzima u obzir plastične deformacije konstrukcije
- Potrebno je osigurati prikladnu granicu loma od velikih oštećenja zato što izvijanje uzrokuje značajne gubitke krutosti
- Trajna deformacija razmatranog elementa mora biti malena u odnosu na odgovarajuće strukturne dimenzije

Nelinearna MKE analiza nije bila cilj ovog rada. Korištenjem linearne MKE analize željelo se istražiti kako rezultati dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata provedenih po pravilima proračuna iz poglavlja 2. korespondiraju s rezultatima MKE proračuna.

4.1. Opis prototipa

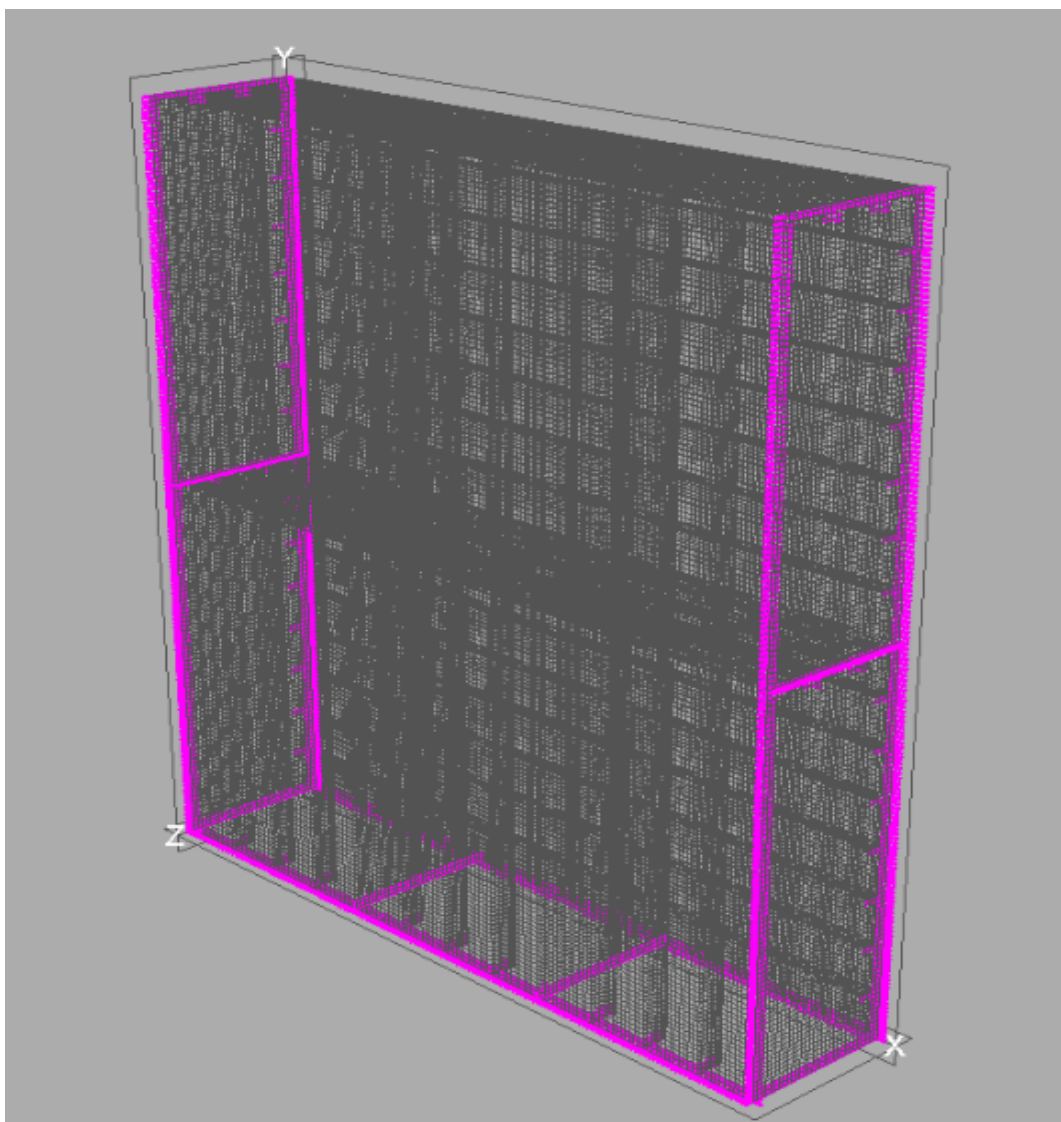


Slika 16. Izgled modela prototipa

Na slici 16. prikazan je prototip dvoboka u presjeku kako bi se vidjeli elementi strukture od koje je sastavljen. Odabrana je konstrukcija sa jednom provezom postavljenom na sredinu dvoboka zato što je ta varijanta dala konstrukciju najmanje mase u proračunu senzitivnosti.

Model je napravljen tako da je vanjska oplata dvoboka je debljine 15 mm, a unutarnja oplata dvoboka je 12,5 mm debljine. Debljina proveza i okvira je 10 mm. Unutarnji uzdužnjaci dvoboka su tipa HP 160x8, a profili rebara su tipa HP 280x12. Proveza je dodatno ukrepljena sa trakama FB 100x8. MKE model je u većoj mjeri modeliran finom mrežom standardnih pločastih MKE elemenata veličine 50x50 mm. Za HP profile su se koristili štapni konačni elementi ekvivalentne površine.

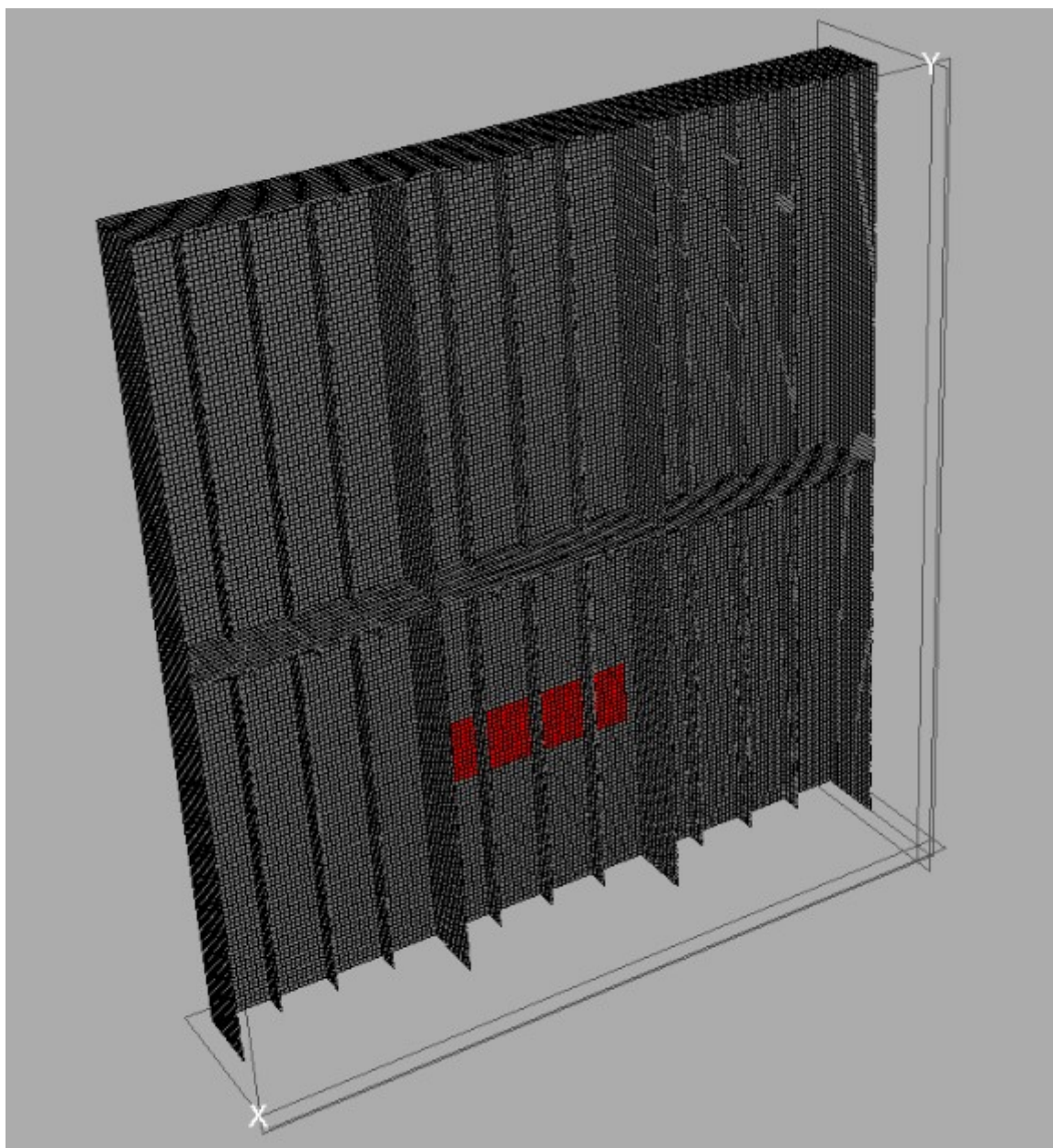
4.2. Rubni uvjeti



Slika 17. Rubni uvjeti modela

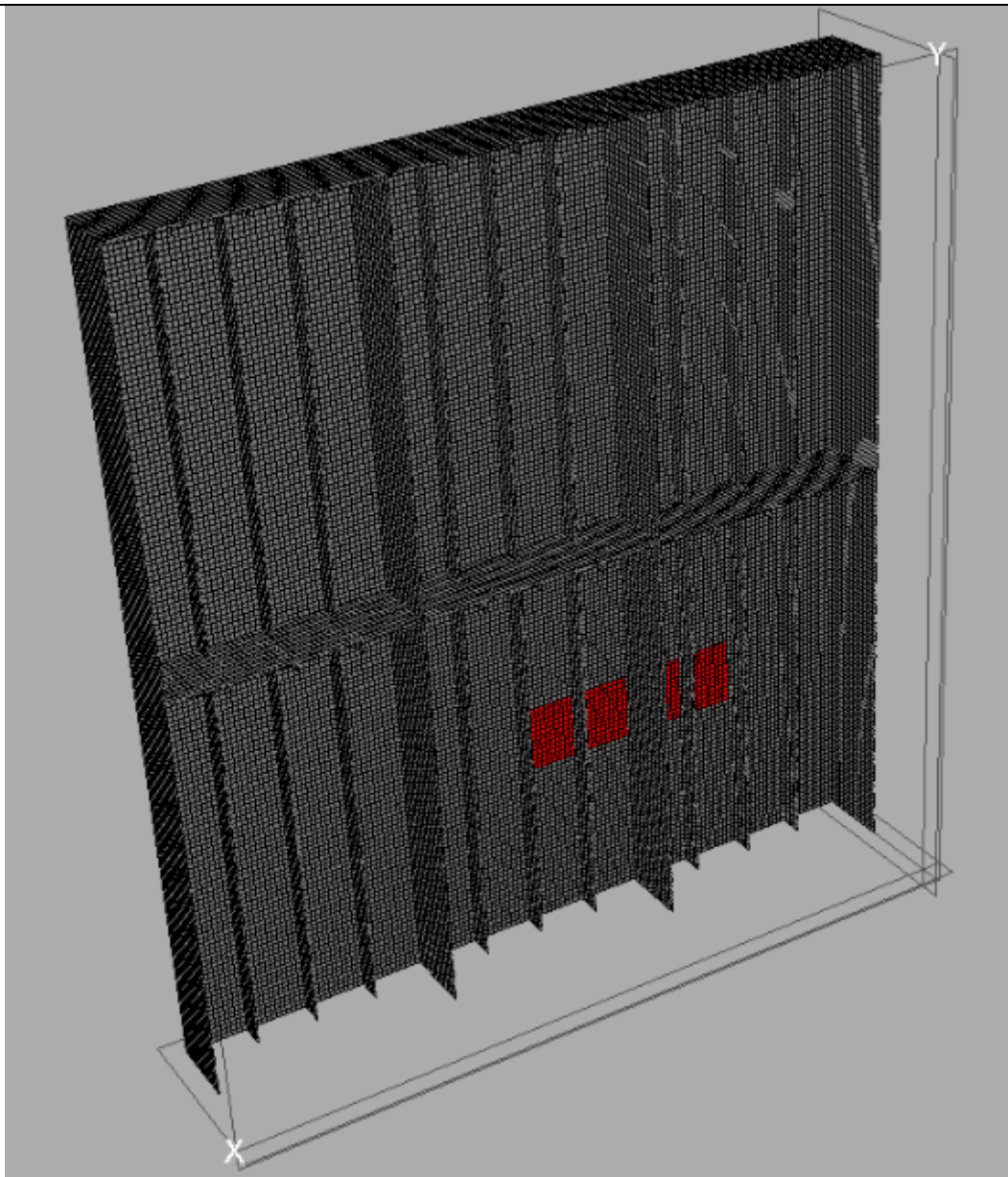
U ovom radu promatran je izdvojen dvobok iz ostatka brodske konstrukcije pa je potrebno na neki način odrediti interakciju izdvojenog dijela konstrukcije sa ostatkom konstrukcije. Na slici 17. prikazan je raspored čvorova na koje su primijenjeni rubni uvjeti. Za određivanje te interakcije nam služe rubni uvjeti koji su vrlo važni za točno ponašanje i odziv promatranog problema. Donji dio dvoboka vezan je sa uzvojem koji ima veliku krutost pa taj dio promatramo kao uklještenje. Gibanje krutog tijela spriječeno je na način da su spriječeni pomaci u smjeru X osi. Na čvorovima koji se nalaze na prvom i zadnjem okvirnom rebru promatranog modela spriječeni su pomaci po X i Z osi.

4.3. Površina opterećenja



Slika 18. Prvi slučaj opterećenja prototipa

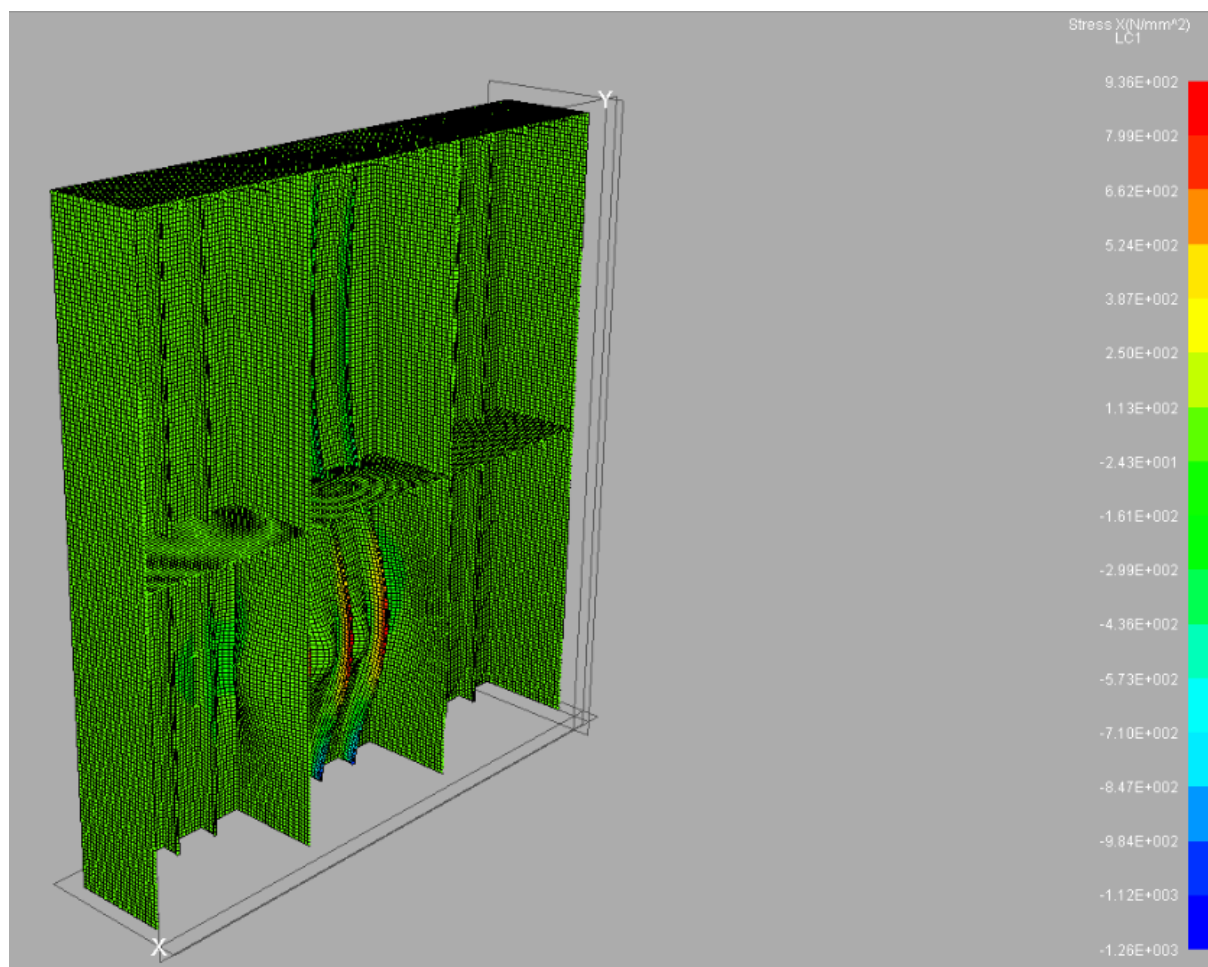
Na slici 18. prikazan je položaj površine opterećenja na koju je postavljen proračunski tlak od 2,69 Mpa. Odabrani položaj odgovara polovici raspona rebara između proveze i kraja dvoboka. Visina površine opterećenja je $b = 0,624$ m, a duljina je $w = 2,245$ m.



Slika 19. Drugi slučaj opterećenja prototipa

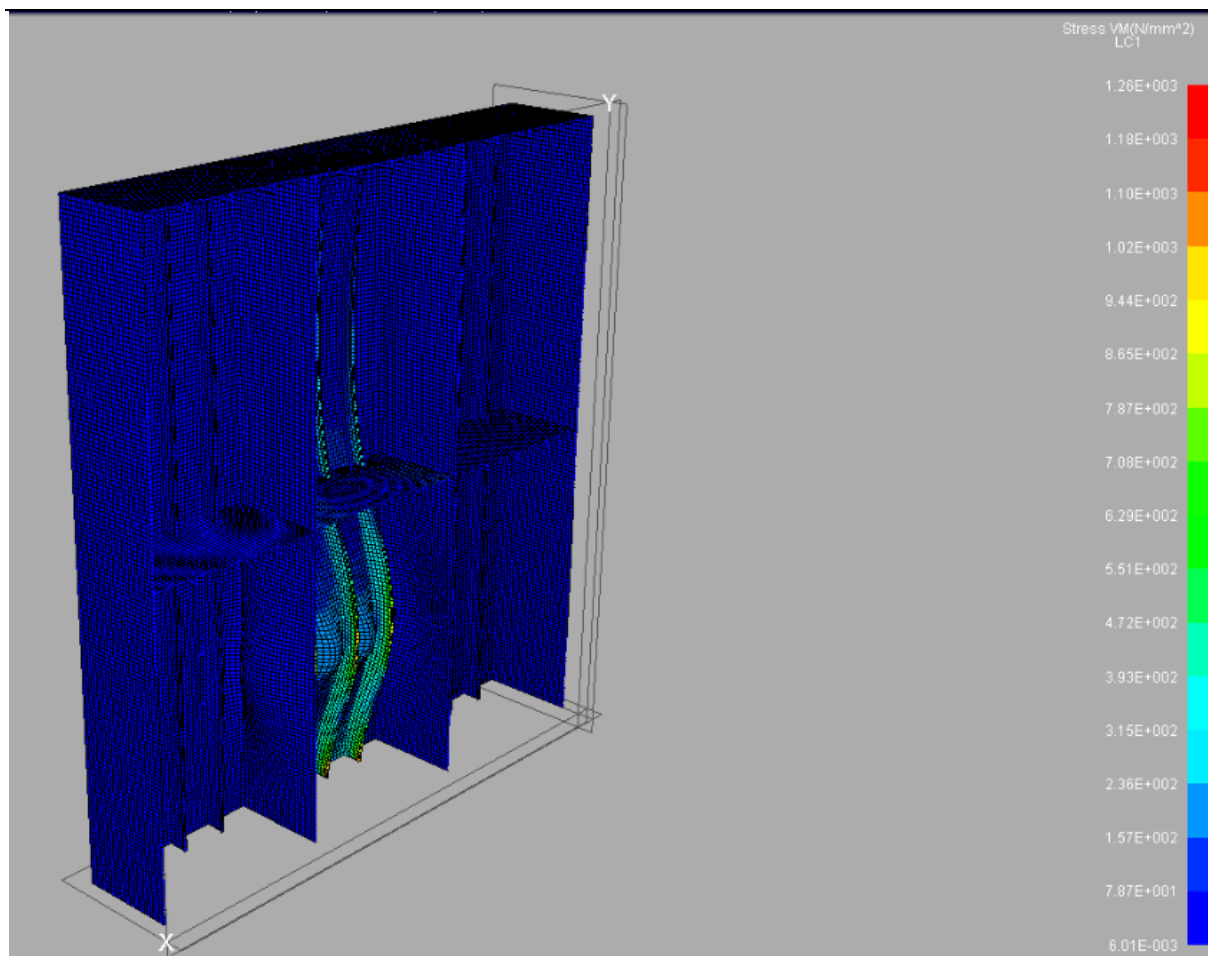
Na slici 19. prikazan je drugi položaj površine opterećenja na koju je postavljen proračunski tlak. Odabrani položaj odgovara polovici raspona okvira između proveze i kraja dvoboka. Proračunski tlak je isti kao u prethodnom slučaju.

4.4. Analiza naprezanja



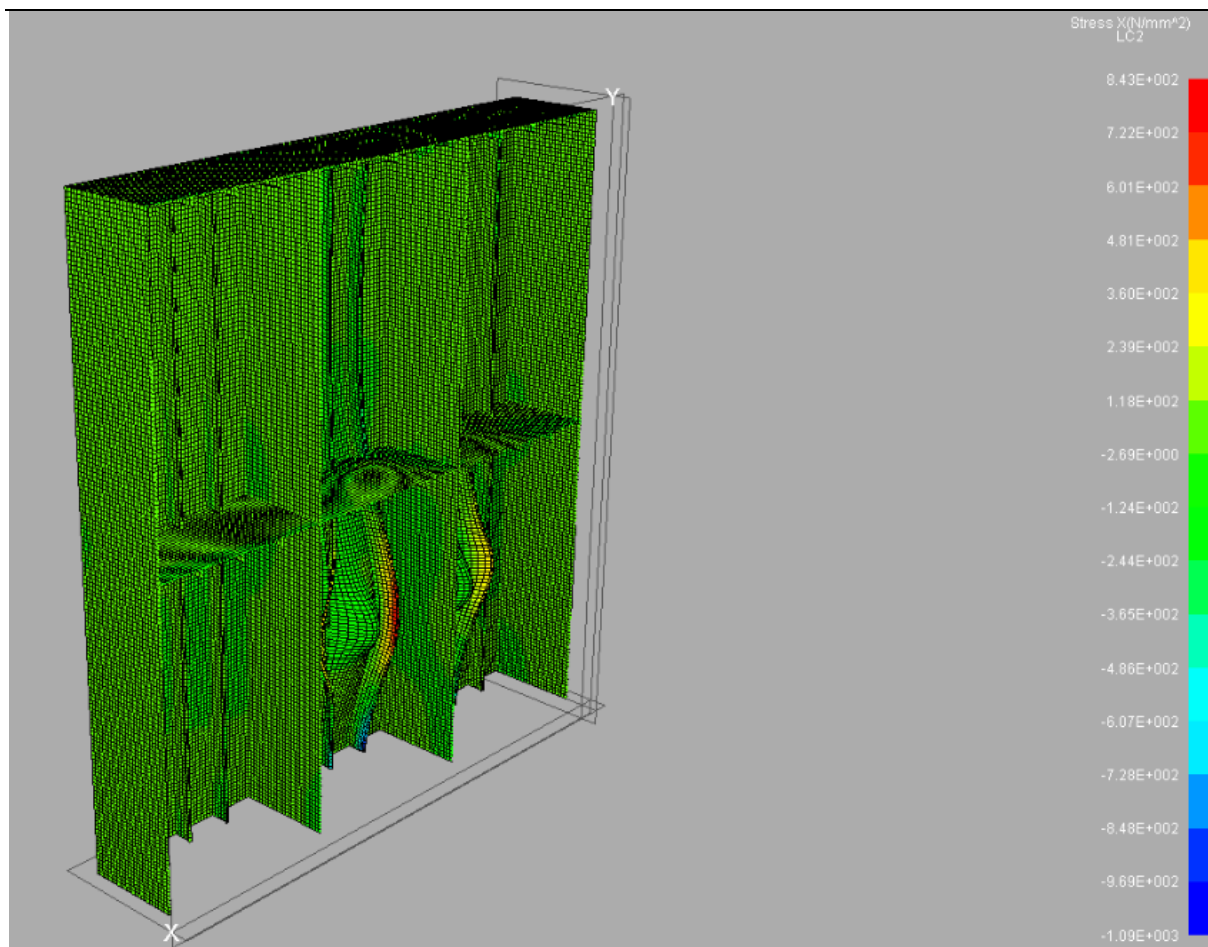
Slika 20. Normalna naprezanja prototipa za prvi slučaj opterećenja

Na slici 20. prikazan je opterećeni prototip i normalna naprezanja koja se pojavljuju na modelu. Raspon naprezanja koja se pojavljuju na modelu je od -1260 MPa do 936 MPa što je izvan granica linearnog proračuna zato što prema pravilima IACS-a naprezanje ne smiju preći granicu od $1.15 \sigma_y$ što iznosi 408 MPa.



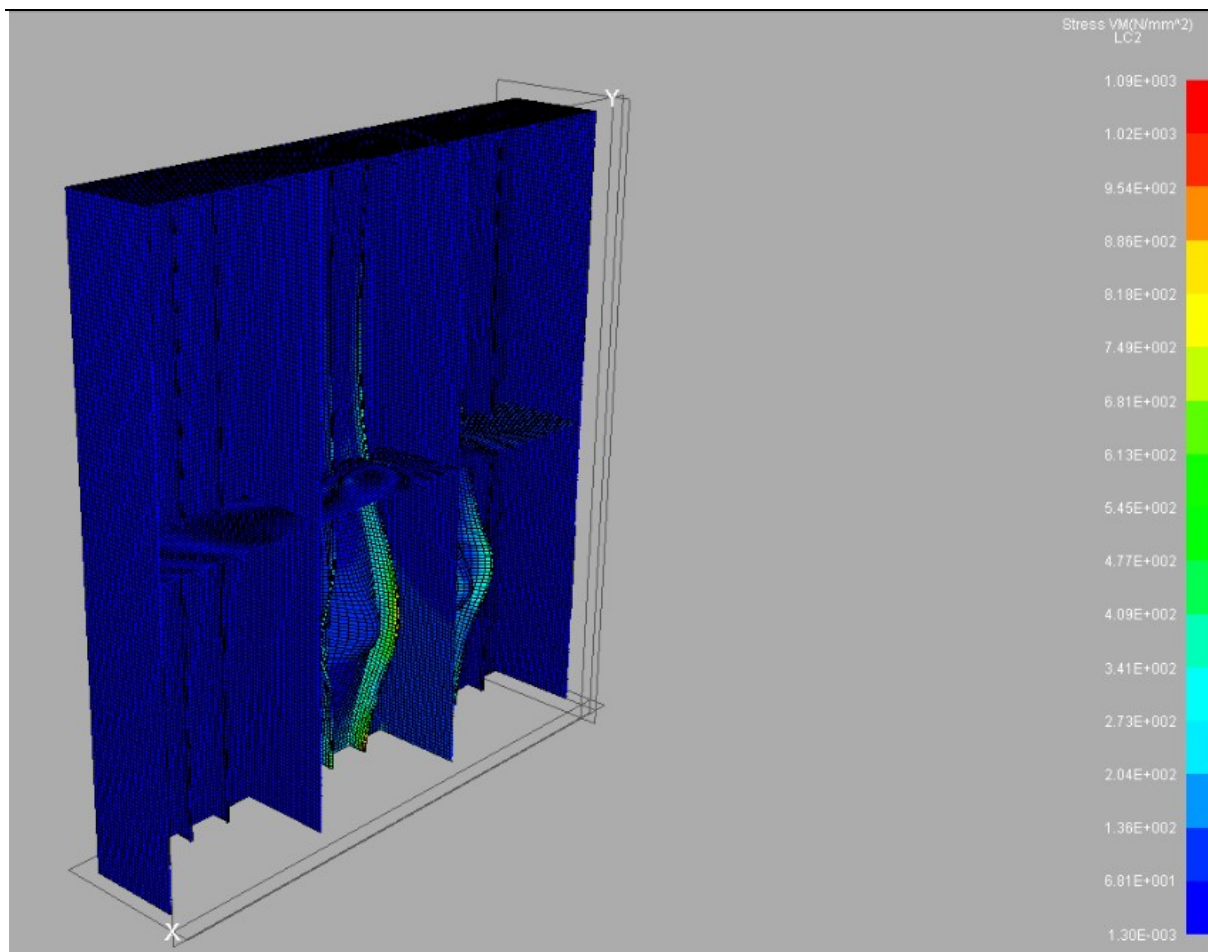
Slika 21. Ekvivalentna naprežanja prototipa za prvi slučaj opterećenja

Na slici 21. prikazan je opterećeni prototip i ekvivalentna naprežanja koja se pojavljuju na modelu. Raspon ekvivalentnih naprežanja modela raste do 1260 MPa što je također daleko iznad dopuštene granice.



Slika 22. Normalna naprezanja prototipa za drugi slučaj opterećenja

Na slici 22. prikazan je opterećeni model i normalna naprezanja koja se pojavljuju kod drugog slučaja opterećenja. Raspon normalnih naprezanja modela kreće se od -1090 MPa do 843 MPa. Žarišta naprezanja su spoj rebra krajem dvoboka i polovica raspona rebra između proveze i kraja dvoboka.

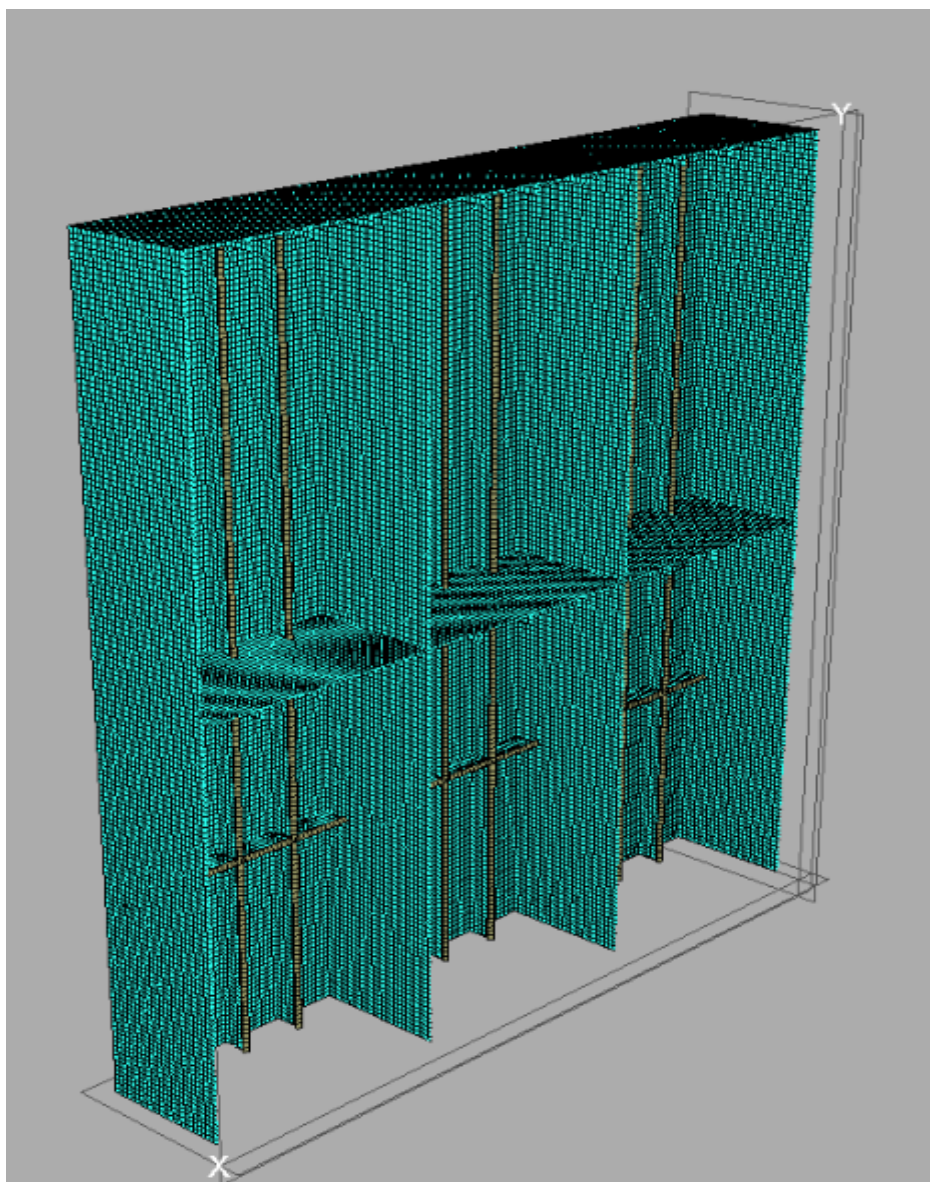


Slika 23. Ekvivalentna naprezanja prototipa za drugi slučaj opterećenja

Na slici 23. prikazan je opterećeni prototip i ekvivalentna naprezanja koja se pojavljuju kod drugog slučaja opterećenja. Raspon ekvivalentnih naprezanja u prirubnici običnog rebra kreće se od -1300 MPa do 1090 MPa.

Također možemo vidjeti da su naprezanja u roštilju dvoboka (okvirno rebro i bočna proveza) ispod 200 MPa te da za njih nije potrebno povećavati strukturne dimenzije.

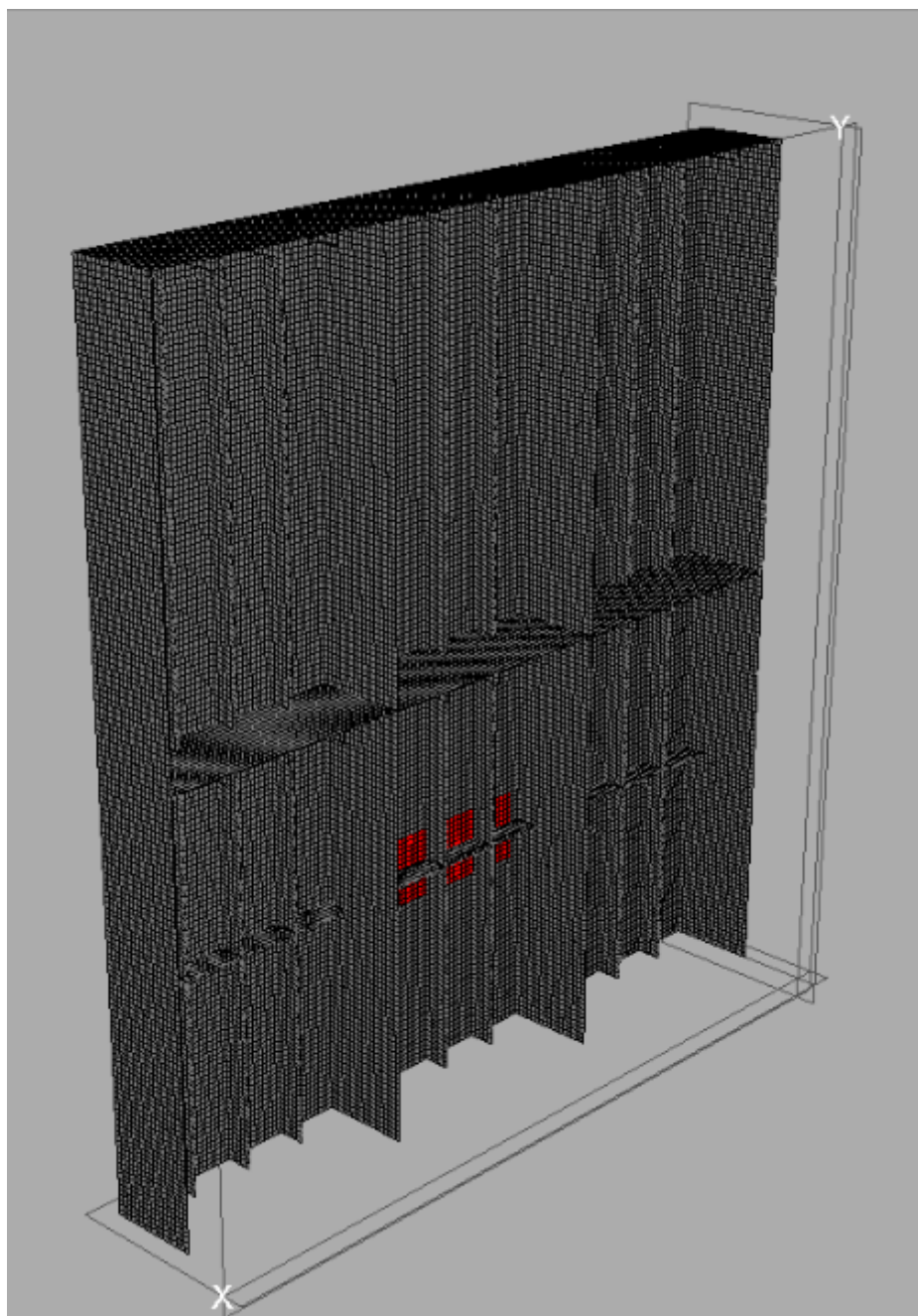
4.5. Opis redimenzioniranog modela



Slika 24. Izgled redimenzioniranog modela

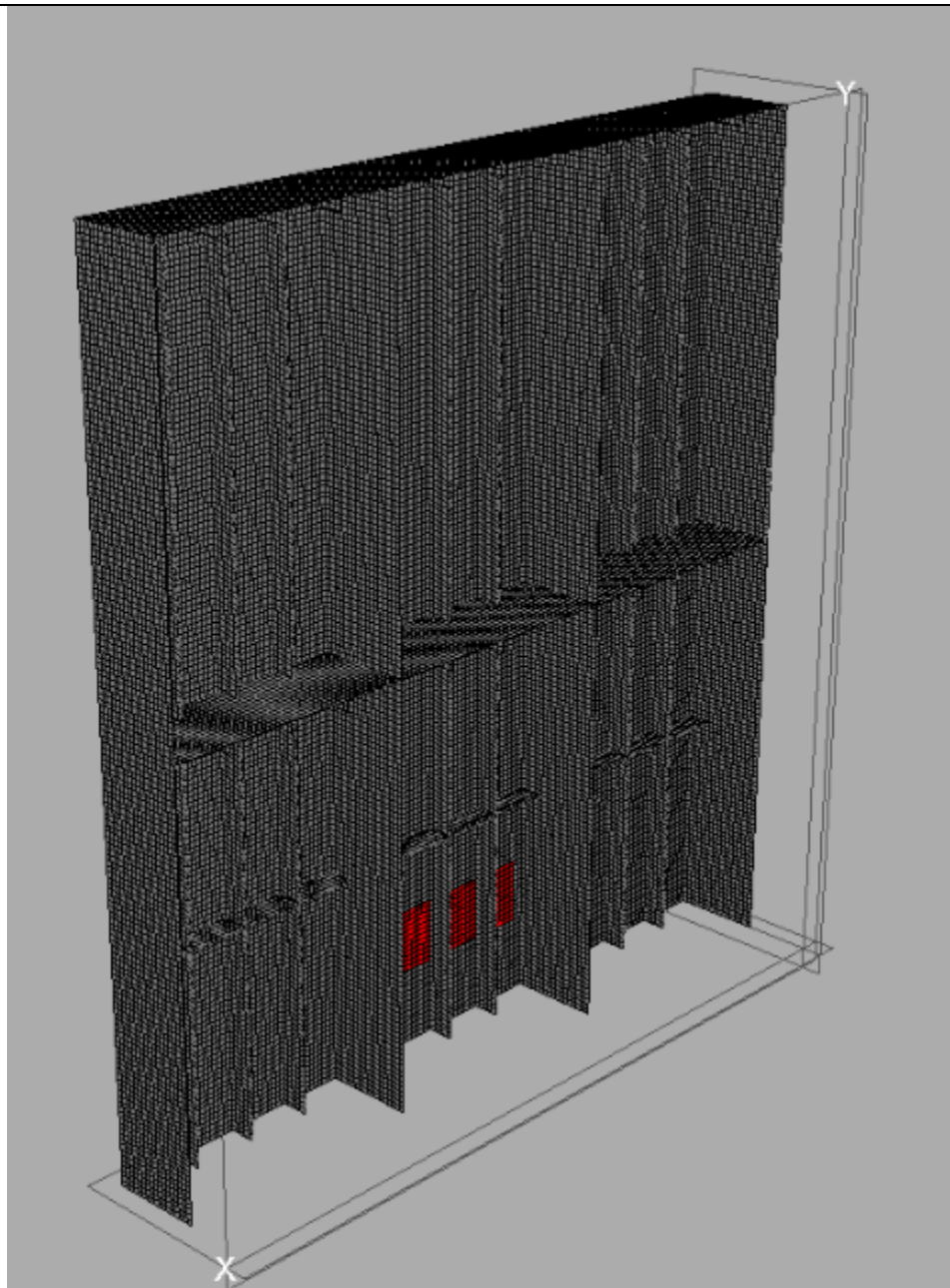
Iako je očito da linearni MKE proračun nije podoban za lokalno dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata ipak je u svrhu istraživanja provedeno redimenzioniranje. Zbog velikih naprezanja koja su prešla dopuštenu granicu provedeno je ponovno dimenzioniranje konstrukcije. Debljina vanjske oplata dvoboka povećana je na 25 mm. Uz provezu koja se nalazi na polovici dvoboka dodana je još jedna proveza u tipa T250x20/150x20 kako bi se dodatno pojačala konstrukcija na mjestu žarišta naprezanja. Rebro je tipa T250x15/150x20. Na slici 24. prikazan je izgled drugog modela dvoboka.

4.6. Površina opterećenja redimenzioniranog modela



Slika 25. Prvi slučaj opterećenja redimenzioniranog modela

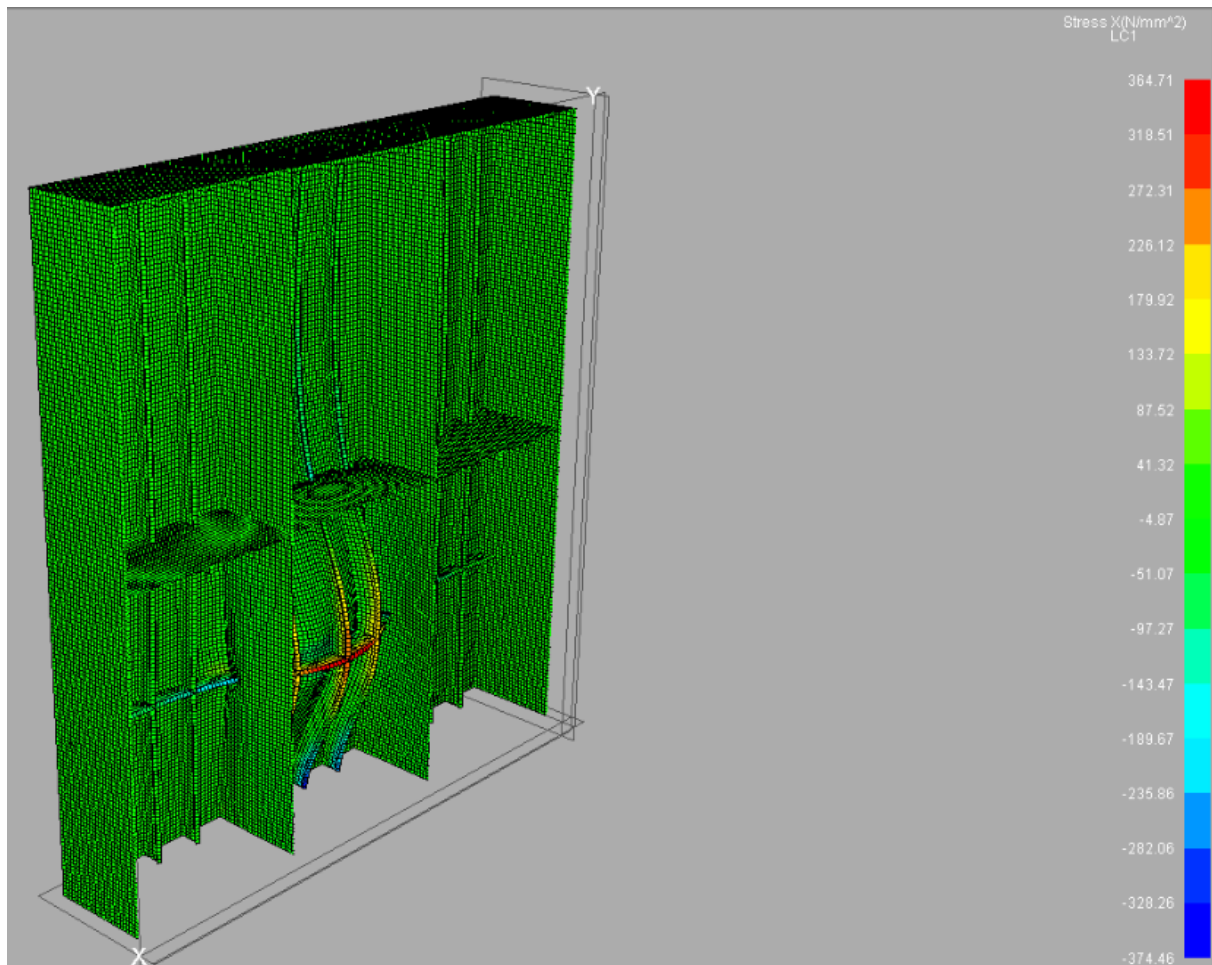
Na slici 25. prikazan je položaj površine opterećenja redimenzioniranog modela. Površina opterećenja je smještena točno na spoj dodatne proveze i rebra.



Slika 26. Drugi slučaj opterećenja redimencioniranog modela

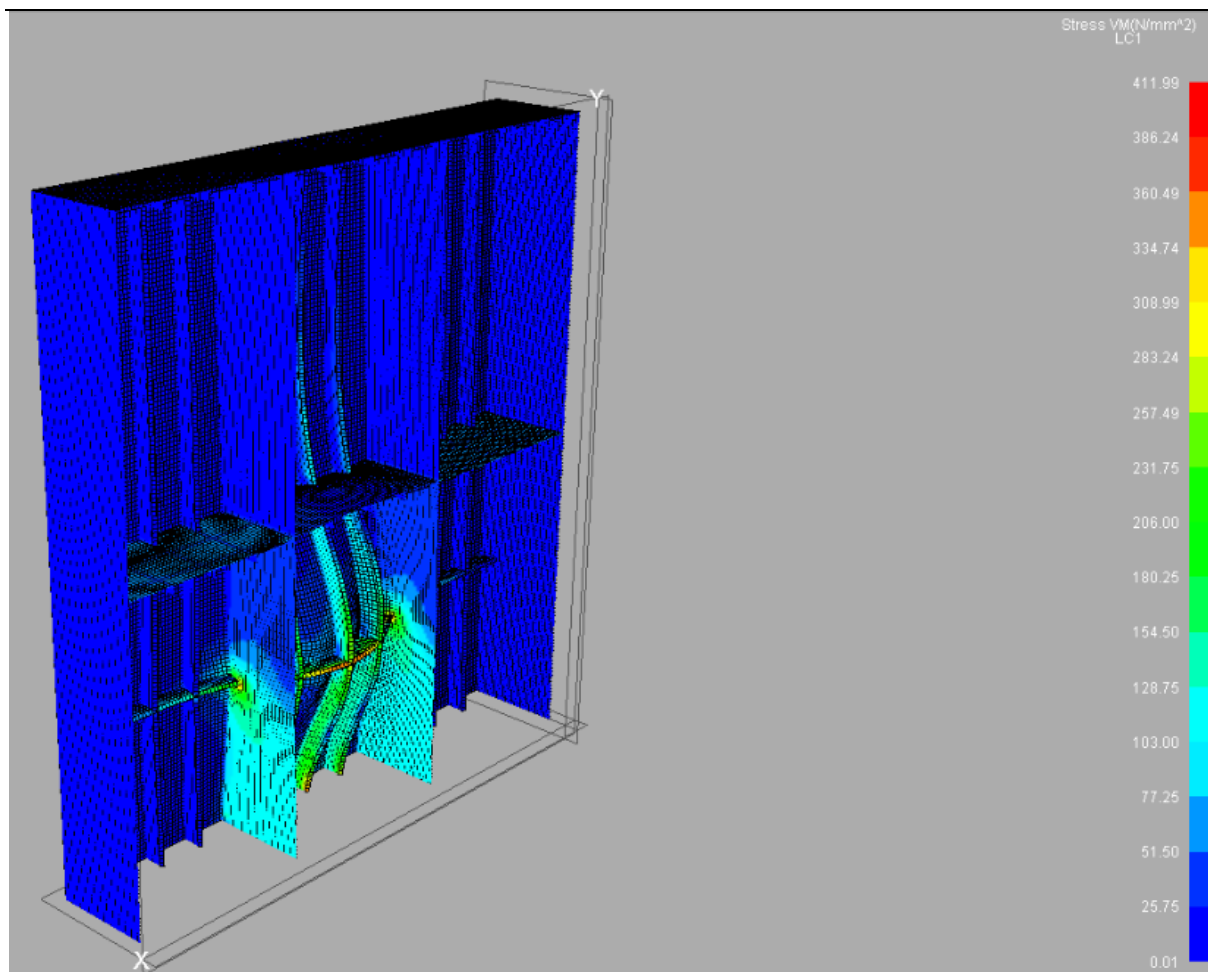
Na slici 26. prikazan je drugi položaj površine opterećenja drugog modela. Površina opterećenja je smještena na polovicu raspona između dodatne proveze i kraja dvoboka, na polovici raspona rebra.

4.7. Analiza naprezanja redimenzioniranog modela



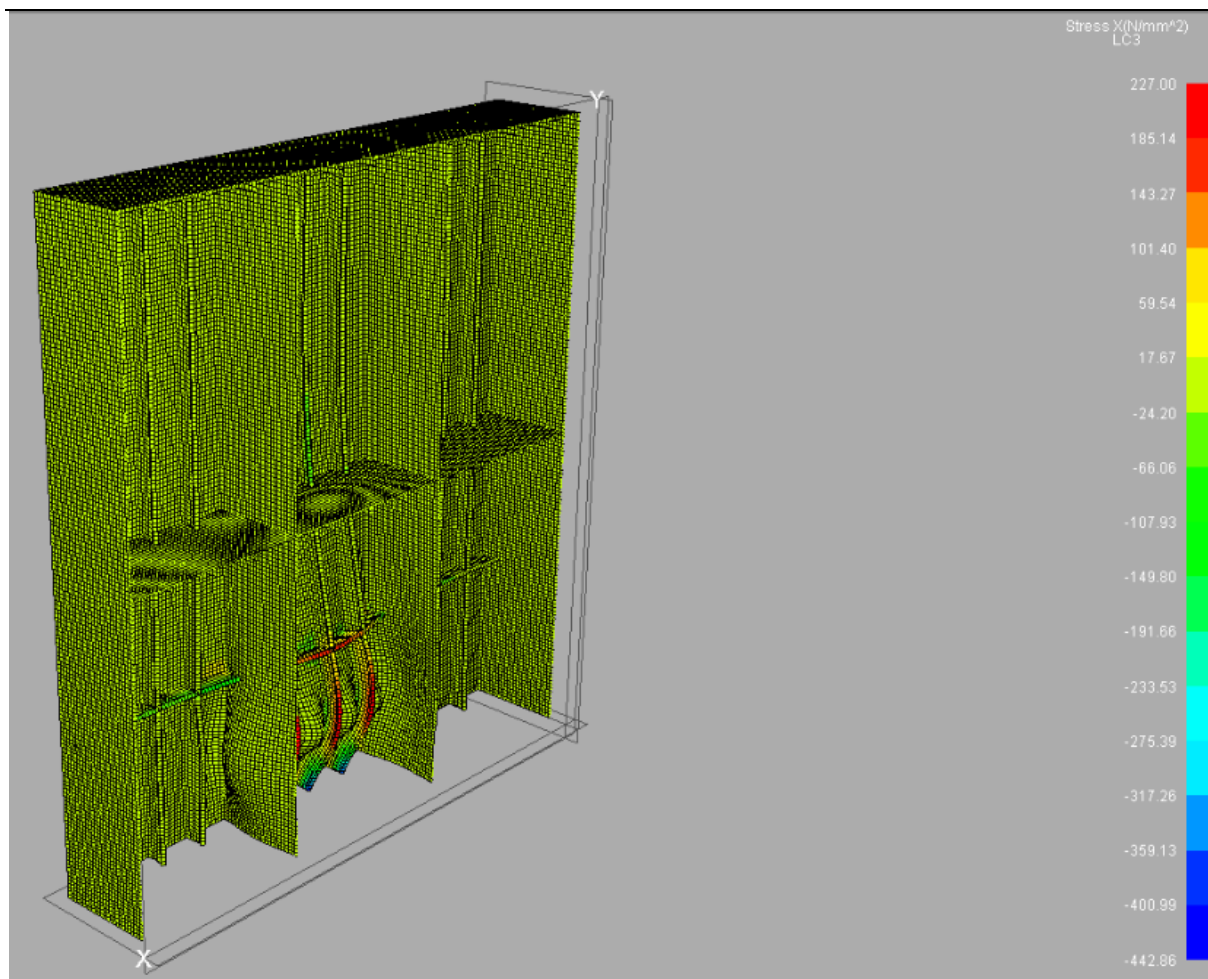
Slika 27. Normalna naprezanja redimenzioniranog modela za prvi slučaj opterećenja

Na slici 27. prikazan je opterećeni drugi model i normalna naprezanja koja se pojavljuju kod prvog slučaja opterećenja. Raspon normalnih naprezanja se kreće od -374,46 MPa do 364,71 MPa što je unutar granica dopuštenih naprezanja. Zbog povećanja dimenzija određenih elemenata konstrukcije naprezanja su pala unutar dopuštene granice.



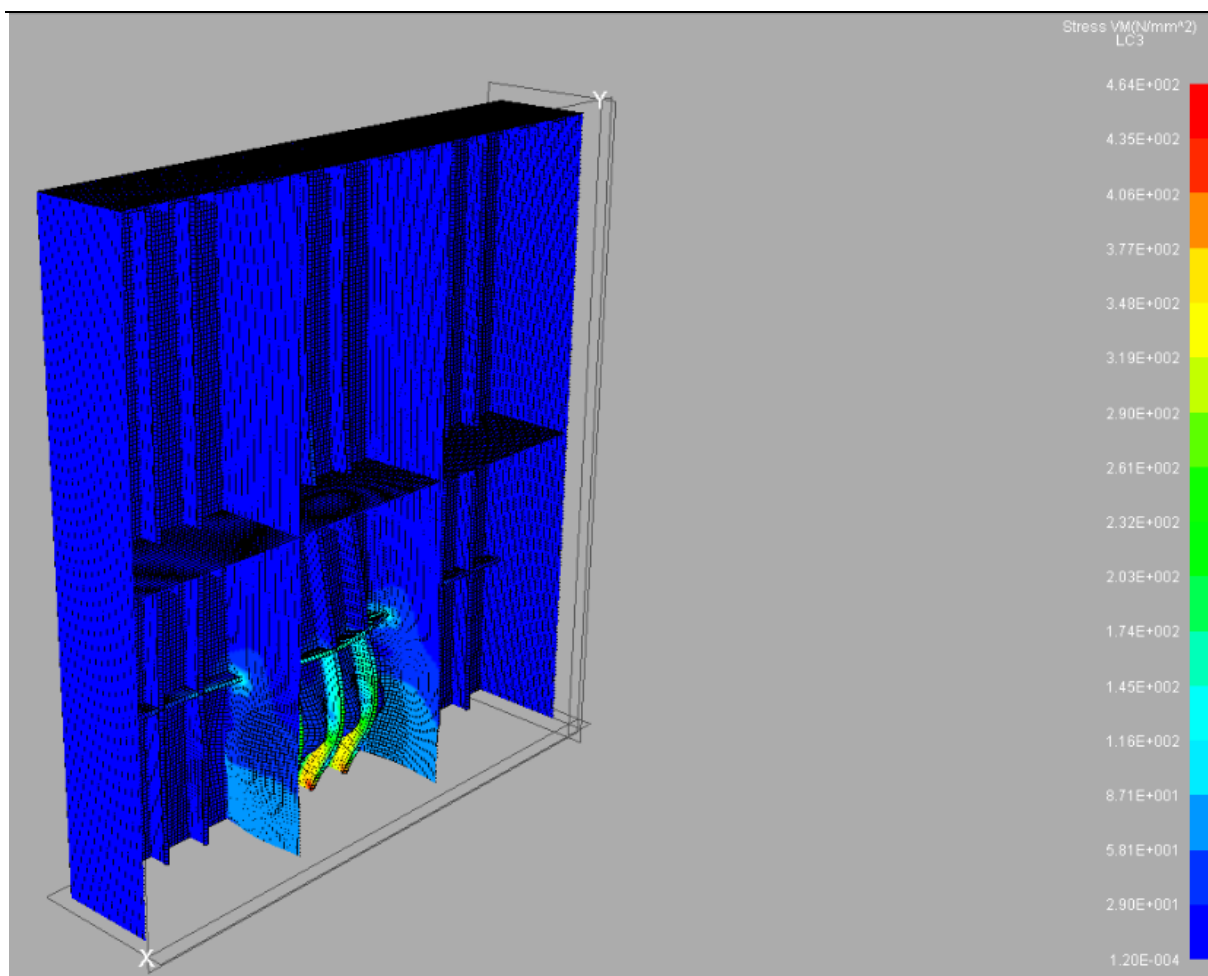
Slika 28. Ekvivalentna naprezanja redimencioniranog modela za prvi slučaj opterećenja

Na slici 28. prikazan je opterećeni redimencionirani model i ekvivalentna naprezanja koja se pojavljuju kod prvog slučaja opterećenja. Iznos ekvivalentnih naprezanja raste do vrijednosti od 411,99 MPa što je nešto malo iznad dopuštene granice.



Slika 29. Normalna naprezanja redimenzioniranog modela za drugi slučaj opterećenja

Na slici 29. prikazan je opterećeni redimenzionirani model i normalna naprezanja koja se pojavljuju kod drugog slučaja opterećenja. Raspon normalnih naprezanja kreće se od -442,86 MPa do 227 MPa, što je također nešto malo iznad dopuštenog naprezanja od 408 MPa.



Slika 30. Ekvivalentna naprezanja redimencioniranog modela za drugi slučaj opterećenja

Na slici 30. prikazan je opterećeni redimencionirani model i ekvivalentna naprezanja koja se pojavljuju kod drugog slučaja opterećenja. Iznos ekvivalentnih naprezanja raste do vrijednosti 464 MPa što premašuje dozvoljenu granicu.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je pregled relevantnih pravila za dimenzioniranje brodske konstrukcije izložene opterećenju od leda. Opterećenje od leda, za područje plovidbe PC6, uzrokuje povećanje mase konstrukcije vanjskog boka u iznosu od 15 do 20% u odnosu na istu konstrukciju koja nema zahtjev za plovidbu u području prisustva leda. Utjecaj različitih kategorija klase leda, razmaka rebara i tipa materijala na dimenzije konstrukcije istražen je kroz analizu senzitivnosti te su prema rezultatima proračuna (korištenjem formula iz pravila) generirani prikladni projektni dijagrami. Pokazano je kako klasa leda PC6 ima veće projektne zahtjeve u odnosu na klasu PC7, pa samim tim daje i veću konačnu masu konstrukcije za oko 6 do 7%. Za pravilno dimenzioniranje konstrukcije ključno je točno odrediti uvjete eksploatacije broda i namjenu. Pregledom pravila se može zaključiti da projektni tlak dominantno ovisi o području trupa u kojem tlak uslijed leda djeluje. Povećanjem razmaka rebara raste opterećenje na karakteristični panel oplata, pa samim time raste i debljina oplata. Sa povećanjem razmaka rebara povećava se i moment otpora pojedinog rebra zato što je veće opterećenje koje djeluje na pojedino rebro. Najmanja masa konstrukcije dobivena je za dvobok sa jednom provezom pa je ta topologija odabrana kao prototipna konstrukcija za izradu MKE modela i provođenje linearnog MKE proračuna korištenjem programskog paketa Maestro. Proveden linearni proračun metodom konačnih elemenata dao je poprilično visoka naprezanja pa je početna konstrukcija ponovno dimenzionirana tako da su povećane dimenzije nosivih elemenata i dodana je jedna proveza u obliku T profila uz postojeću. Nakon toga je ponovno proveden linearni proračun i naprezanja su se smanjila, ali je povećana masa konstrukcije za oko 45%. U pravilima za proračun momenta otpora rebra je definirano da je rezultat plastični moment otpora poprečnog presjeka, pa se može zaključiti kako linearni MKE proračun metodom konačnih elemenata nije prikladan za dimenzioniranje oplata i profila jer daje pretjerano konzervativne rezultate, što se i navodi u samim pravilima. U slijedećem koraku istraživanja bilo bi zanimljivo provesti nelinearni MKE proračun (koji nije bio u opsegu ovoga rada), dimenzionirati elemente po kriterijima plastičnosti i dopuštenih trajnih deformacija i vidjeti njegov utjecaj na masu konstrukcije. Također bi bilo zanimljivo istražiti utjecaj sustava gradnje vanjskog boka izloženom opterećenju od leda (uzdužni ili poprečni) na masu konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Bucci, V., Marino, A.: *On the design of ice-strengthened superyachts*, International Conference on Marine Research and Transportation ICMRT '07, Italy, 2007.
- [2] Finnish-Swedish ice class rules.: *The structural design and engine output required of ships for navigation in ice*, 2003.
- [3] IACS.: *Requirements concerning polar class*, 2016.

PRILOZI

I. CD-R disc