

# Projektiranje konstrukcije glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija

---

Ilić, Ella

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*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:235:968755>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ella Ilić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Ella Ilić

Zagreb, 2022.

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

Želim posebno zahvaliti profesoru Jerolimu Andriću na pomoći prilikom izrade ovog rada, na trudu i strpljenju, te znanju koje mi je prenio tokom studija i kroz ovaj rad.

Velika hvala roditeljima, bratu i dečku Patriku koji su mi velika podrška u životu.

Ella Ilić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ella Ilić** JMBAG: 0035210846

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje konstrukcije glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of midship section of chemical tanker**

Opis zadatka:

Projektirati uzdužne konstrukcijske elemente glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija (dimenzija  $L_{oa}=173$  m,  $B=24,7$  m,  $T=9,9$  m,  $V=15,9$  čv,  $C_B=0,83$  i nosivosti oko 27 000 t) prema Pravilima Bureau Veritas-a (BV) i priloženom predlošku geometrije glavnog rebra.

U radu je potrebno :

- 1) Analizirati dostupnu literaturu i upoznati se s Pravilima BV-a za dimenzioniranje konstrukcijskih elementa broskog trupa u području teretnog prostora.
- 2) Dimenzionirati sve uzdužne konstrukcijske elemente s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom. Proračun provesti koristeći program MARS klasifikacijskog društva BV-a.
- 3) Predložiti nekoliko varijanti s različitim razmacima okvirnih rebara te različitim razmakom uzdužnjaka. Za sve predložene varijante dimenzionirati konstrukcijske elemente tako da svi kriteriji čvrstoće budu zadovoljeni. Težiti konstrukciji minimalne mase.
- 4) Usporediti rezultate s obzirom na postignutu masu konstrukcije, moment otpora glavnog rebra i postignuti granični moment savijanja za sve evaluirane varijante.

Izraditi nacrt predložene varijante glavnog rebra sa svim relevantnim značajkama (geometrija, konstrukcijske dimenzije, itd.).

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

Zadatak zadan:

9. 5. 2022.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Jerolim Andić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. PROJEKTNI ZADATAK.....	2
2.1. Referentni model.....	3
2.2. Projektni parametri.....	4
2.3. Teorijska osnova .....	4
2.3.1. Granična čvrstoća.....	5
2.3.2. Lokalna čvrstoća .....	6
2.3.3. Faktor iskoristivosti .....	8
3. DEFINIRANJE VARIJANTI KONSTRUKCIJE .....	9
3.1. Definiranje modela u MARS-u.....	9
3.1.1. Osnovni podaci o brodu .....	10
3.1.2. Zadavanje momenata savijanja i gaza.....	10
3.1.3. Odabir materijala.....	11
3.1.4. Pozicije okvirnih rebara .....	12
3.1.5. Generiranje panela .....	13
3.1.6. Generiranje čvorova.....	14
3.1.7. Generiranje vojeva .....	15
3.1.8. Generiranje uzdužnjaka.....	16
3.2. Provođenje proračuna korištenjem modela u MARS-u .....	17
3.2.1. Rezultati proračuna i reprojekiranje iterativnim postupkom .....	18
4. ANALIZA REZULTATA .....	20
4.1. Utjecaj razmaka okvira i uzdužnjaka na masu uzdužnih elemenata .....	20
4.2. Utjecaj razmaka okvira i uzdužnjaka na masu poprečnih elemenata konstrukcije....	22
4.2.1. Masa okvirnih rebara izračunata prema površini poprečnog presjeka referentnog modela – MODEL A.....	22
4.2.2. Procjena mase ovisno o razmaku okvira – MODEL B.....	23
4.2.3. Procjena mase ovisno o razmaku okvira – MODEL C.....	23
4.3. Analiza ukupne mase promatranog dijela konstrukcije .....	24
5. ZAKLJUČAK.....	29
LITERATURA.....	30

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Krivulja momenata savijanja i zakrivljenosti broskog trupa za pregib i progib [2].	6
Slika 2.	Lokalna čvrstoća uzdužnjaka u MARS-u.....	7
Slika 3.	Lokalna čvrstoća oplata u MARS-u .....	7
Slika 4.	Primjer faktora iskoristivosti u MARS-u .....	8
Slika 5.	Osnovni podaci o brodu .....	10
Slika 6.	Momenti i gazovi.....	10
Slika 7.	Korišteni materijali i njihove granice razvlačenja.....	11
Slika 8.	Materijali po poprečnom presjeku.....	11
Slika 9.	Pozicije okvirnih rebara.....	12
Slika 10.	Panel vanjske oplata .....	13
Slika 11.	Naborana pregrada .....	13
Slika 12.	Čvorovi.....	14
Slika 13.	Vojevi .....	15
Slika 14.	Uzdužnjaci.....	16
Slika 15.	Modul definiranje tipa proračuna .....	17
Slika 16.	Iteracija lokalne čvrstoće za vojeve.....	18
Slika 17.	Zadovoljenje lokalne čvrstoće vojeva .....	18
Slika 18.	Iteracija lokalne čvrstoće za uzdužnjake .....	19
Slika 19.	Zadovoljenje lokalne čvrstoće uzdužnjaka.....	19
Slika 20.	Ovisnost površine uzdužnih elemenata o razmaku uzdužnjaka .....	21
Slika 21.	Ukupna masa – MODEL A .....	24
Slika 22.	Ukupna masa – MODEL B .....	25
Slika 23.	Ukupna masa – MODEL C .....	26

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Dimenzije i mase poprečnih limova okvira.....	3
Tablica 2. Dimenzije i mase poprečnih ukrepa okvira.....	3
Tablica 3. Ukupna masa poprečne strukture okvira.....	3
Tablica 4. Varijante modela .....	9
Tablica 5. Dimenzije i mase uzdužnih elemenata konstrukcije .....	21
Tablica 6. Masa poprečnih elemenata konstrukcije okvira za razmak uzdužnjaka $s=700$ mm .....	22
Tablica 7. Masa poprečnih elemenata konstrukcije okvira za razmak uzdužnjaka $s=775$ mm .....	22
Tablica 8. Masa poprečnih elemenata konstrukcije okvira za razmak uzdužnjaka $s=850$ mm .....	22
Tablica 9. Masa okvira prema površini okvirnog rebra MODEL – A .....	23
Tablica 10. Masa okvira ovisno o razmaku rebara – MODEL B.....	23
Tablica 11. Masa ovisno o razmaku rebara – MODEL C .....	23
Tablica 12. Ukupna masa – MODEL A .....	24
Tablica 13. Ukupna masa – MODEL B .....	25
Tablica 14. Ukupna masa – MODEL C .....	26
Tablica 15. Granični moment savijanja konstrukcije.....	27
Tablica 16. Ukupni poredak masa konstrukcija .....	28



---

**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$L_{rule}$	[m]	Računska duljina broda
$B$	[m]	Širina broda
$T$	[m]	Gaz broda
$V$	[čv]	Brzina broda
$D$	[m]	Visina brodskog trupa
$s$	[mm]	Razmak uzdužnjaka
$w$	[mm]	Razmak okvirnih rebara
$M_{sw}$	[kNm]	Maksimalni moment savijanja na mirnoj vodi
$M_{wv}$	[kNm]	Maksimalni moment savijanja na valovima
$M_U$	[kNm]	Granični moment savijanja
$\gamma_S$		Parcijalni faktor sigurnosti momenata savijanja na mirnoj vodi
$\gamma_w$		Parcijalni faktor sigurnosti momenata savijanja na valovima
$\gamma_R$		Parcijalni faktor sigurnosti graničnog momenta savijanja
$\chi$	[rad]	Zakrivljenost trupa
$d$		faktor povećanja opterećenja
$c$		faktor smanjenja izdržljivosti
$D$	[N/mm <sup>2</sup> ]	najveće opterećenje za neko stanje plovidbe
$C$	[N/mm <sup>2</sup> ]	strukturna izdržljivost
$\rho_{\check{c}}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gustoća čelika
$m$	[kg]	Masa

**SAŽETAK**

U ovom radu proveden je postupak projektiranja glavnog rebra tankera za prijevoz kemikalija, te su analizirani utjecaji razmaka okvirnih rebara i razmaka uzdužnjaka na masu konstrukcije trupa.

Na temelju referentnog modela predloženo je i izrađeno devet varijanti različitog razmaka okvirnih rebara i uzdužnjaka. Prema uzdužnjacima pozicionirani su također uzdužni nosači dvodna i dvoboka. Kod svih varijanti zadovoljeni su svi uvjeti lokalne i globalne čvrstoće s obzirom na propisane kriterije klasifikacijskog društva. Dimenzioniranje uzdužnih konstrukcijskih elemenata konstrukcije provedeno je programom MARS, klasifikacijskog društva Bureau Veritas prema pravilima "Rules for the Classification of Steel Ships". Dimenzije poprečne konstrukcije preuzete su iz predloška te je provedena studija senzitivnosti masa poprečnih elemenata ovisno o razmaku okvira.

Na kraju su uspoređene postignute mase konstrukcije svih varijanti te su dane preporuke vezano za razmak okvira i razmak uzdužnjaka u cilju ostvarenja projekta minimalne mase.

Ključne riječi: projektiranje brodske konstrukcije, tanker za prijevoz kemikalija, minimalna masa, razmak okvirnih rebara, razmak uzdužnjaka, Bureau Veritas

---

**SUMMARY**

Through this paper study structural design of midship section of chemical tanker has been made, and the influence of longitudinals and web frame spacing on construction mass of chemical tanker was analyzed.

Based on reference model, nine models have been made using different combinations of longitudinals and web frame spacing. Double hull girders and double side girders were positioned according to longitudinal spacing. In every variant all local and global strength criteria were met regarding classification society criteria. Longitudinal construction elements have been designed using software MARS, provided by classification society Bureau Veritas, in accordance with Rules for the Classification of Steel Ships.

Dimensions of transverse structure elements were taken from the template, and mass sensitivity study was made depending on the web frame spacing. At the end, all variants were compared to structural mass, and recommendations regarding the longitudinals and web frame spacing to achieve minimum structural mass project were given.

Key words: ship structure design, chemical tanker, minimum mass, web frame spacing, longitudinal spacing, Bureau Veritas

## 1. UVOD

Kao svjetski vodeći način prijevoza ljudi i dobara brodovi zahtijevaju najveću moguću optimizaciju kod gradnje i eksploatacije.

Tankeri za prijevoz kemikalija, osim kemikalija mogu prevoziti i razne druge vrste osjetljivih organskih ili anorganskih tereta koji zahtijevaju visoki standard čišćenja tankova. Ekološki i ekonomski uvjeti diktiraju potrošnju materijala i energenata.

Bit konceptualne faze konstrukcije broda jest smanjiti ukupne troškove proizvoda, te maksimalno iskoristiti volumen trupa kao teretni prostor. Balast se krca u brodske balastne tankove, njihov volumen pokušava se minimalizirati. Svrha ove faze jest predložiti nekoliko varijanti s različitim razmacima okvirnih rebara te različitim razmakom uzdužnjaka. Za sve predložene varijante dimenzionirani su konstrukcijski elementi tako da svi kriteriji čvrstoće budu zadovoljeni. Teži se konstrukciji minimalne mase. Uzdužni konstrukcijski elementi glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija projektirani su prema pravilima Bureau Veritas-a i priloženom predlošku geometrije glavnog rebra.

U drugom poglavlju opisan je projektni zadatak, definirani su projektni parametri, te je dana kratka teorijska osnova.

U trećem poglavlju opisan je postupak definiranja modela dimenzioniranjem svih uzdužnih konstrukcijskih elemenata s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom. Postupak je proveden u programu MARS.

U četvrtom poglavlju prikazani su rezultati proračuna u programu MARS, te je provedena studija senzitivnosti mase poprečne konstrukcije. Rezultati poprečne i uzdužne strukture za svaku varijantu zbrojeni su i uspoređivani na temelju postignute mase konstrukcije.

U petom poglavlju izveden je zaključak i predložen daljnji nastavak istraživanja.

---

## 2. PROJEKTNI ZADATAK

U sklopu projektnog zadatka potrebno je projektirati konstrukcijske elemente na poziciji glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija sljedećih dimenzija:

$$L_{rule} = 163 \text{ m}$$

$$B = 24.7 \text{ m}$$

$$T = 9.9 \text{ m}$$

$$D = 14.3 \text{ m}$$

$$V = 15.9 \text{ čv}$$

*nosivosti oko 27000 DWT*

Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata provedeno je prema Bureau Veritas pravilima za klasifikaciju čeličnih brodova kojima je datum ugovora o izgradnji 1. srpnja 2021 ili kasnije. Naravno, klasifikacijsko društvo može se pozvati na pravila prije tog datuma ukoliko je potrebno.

Projektни zadatak rađen je prema referentnom modelu iz programskog zadatka kolegija Konstrukcija broda I. Cilj projektnog zadatka jest analizirati utjecaj na ukupnu masu konstrukcije variranjem razmaka okvirnih rebara i uzdužnih elemenata. Rezultat je optimalan razmak uz minimalnu masu konstrukcije, a pri tome su zadovoljena sva projektna ograničenja. U sklopu programskog paketa MARS moguće je izvršiti proračun isključivo uzdužnih elemenata, dok je proračun poprečne mase proveden ručno koristeći inicijalne dimenzije dane u predlošku. Na kraju je provedena analiza senzitivnosti ukupne mase poprečnih elemenata ovisno o razmaku okvira, te je analiziran njihov utjecaj na konačno rješenje.

## 2.1. Referentni model

Geometrija glavnog rebra referentnog modela definirana je u programu MARS, a vrijednosti projektnih varijabli su:

$w = 3200 \text{ mm}$  – razmak okvirnih rebara

$s = 850 \text{ mm}$  – razmak uzdužnjaka

Masa jednog okvira izračunata je korištenjem konstrukcijskih elemenata navedenih u sljedećim tablicama (prema danom predlošku):

**Tablica 1. Dimenzije i mase poprečnih limova okvira**

Element	Površina [m <sup>2</sup> ]	Debljina [mm]	Masa [t]
rebrenica	19.28	13	1.97
Okvir uzvojnog tanka	5.34	13	0.54
Okvir boka	20.90	11	1.80
Okvir tunelske kobilice	0.62	13	0.06

Ukupna masa: 4,38 t

**Tablica 2. Dimenzije i mase poprečnih ukrepa okvira**

Element	Površina [m <sup>2</sup> ]	Duljina [m]	Količina	Masa[t]
FB 150x10 dvodno	0.0015	1.65	10	0.19
FB 150x10 dvodno otvor	0.0015	0.85	6	0.06
FB 150x10 uzvojni tank	0.0015	3.43	1	0.04
FB 150x10 uzvojni tank	0.0015	2.19	1	0.03
FB 150x10 uzvojni tank	0.0015	1.86	1	0.02
FB 150x10 uzvojni tank	0.0015	1.59	1	0.02
LB 400x15-100x15	0.0075	1.77	1	0.10
FB 150x10 dvobok otvor	0.0015	1.70	4	0.08
FB 150x10 dvobok otvor	0.0015	0.70	4	0.03
FB 150x10 dvobok	0.0015	1.78	9	0.19
palubna sponja	0.0137	10.36	1	1.11

Ukupna masa: 1,88 t

Ukupne vrijednosti masa ispisane podno tablica 1. i 2. odnose se na poluširinu broda, dok je ukupna masa poprečnog presjeka prikazana u sljedećoj tablici:

**Tablica 3. Ukupna masa poprečne strukture okvira**

	Masa [t]	Udio [%]
limovi	8.76	69.97
ukrepe	3.76	30.03
ukupno	12.52	100

## 2.2. Projektni parametri

Razmak okvira i razmak uzdužnjaka glavni su parametri, jer njihovim se variranjem značajno utječe na dimenzije ostalih konstrukcijskih elemenata i opločenja, a posredno i ukupnu masu konstrukcije. U okviru zadatka predložene su tri varijante razmaka okvira, te tri varijante razmaka uzdužnjaka. Pri svakoj varijanti geometrija balastnih tankova i tereta držana je konstantnom kako bi usporedba rezultata bila relevantna.

Razmaci su kako slijedi:

$$s_1 = 700 \text{ mm}$$

$$s_2 = 775 \text{ mm}$$

$$s_3 = 850 \text{ mm}$$

za razmake uzdužnjaka, te:

$$w_1 = 2743 \text{ mm}$$

$$w_2 = 3200 \text{ mm}$$

$$w_3 = 3850 \text{ mm}$$

za razmake okvira.

## 2.3. Teorijska osnova

Kod dimenzioniranja različitih varijanti okvira nužno je zadržati osnovne dimenzije i sličnost karakteristika konstrukcijskih elemenata. Pozicija jakih uzdužnih nosača dvodna prilagođena je zadanom razmaku uzdužnjaka dna i pokrova dvodna. Odstupanje od referentnog modela nije veće od 400 mm. Proveze boka prilagođavane su uzdužnjacima boka, pa ni one ne odudaraju više od 570 mm od pozicija proveza referentnog modela. Time nije puno utjecalo na nosivost i izgled tankova. Nepoduprti raspon između nosača dna i boka nije puno utjecao na debljinu oplata, niti na poprečni presjek uzdužnjaka. Obzirom na kompleksnost zadovoljavanja pravila BV i zadovoljavanje svih kriterija čvrstoće proces je ubrzan korištenjem programskog sustava MARS za generiranje projektnih varijanti.



### 2.3.1. Granična čvrstoća

Granično stanje nosivosti razmatra se kao kolaps konstrukcije kada konstrukcija, neki njen dio ili spoj, više ne može vršiti pridruženu funkciju, odnosno kada ekstremno opterećenje konstrukcijskih sastavnih dijelova nadilazi njihovu graničnu čvrstoću. Računa treba voditi o odgovarajućem modeliranju broskog trupa (početne deformacije, zaostala naprezanja zbog zavarivanja itd.). Najveći utjecaj na graničnu čvrstoću imaju dimenzije ukrepa i debljina opločenja kao i čvrstoća popuštanja materijala, a faktor sigurnosti pregiba veći je nego kod progiba. Razne su metode proračuna uzdužne granične nosivosti složenih tankostijenih konstrukcija. Jedna od njih je Smithova inkrementalno-iterativna metoda. Smithova metoda koristi se za brodske konstrukcije s jasno izraženom najvišom neprekinutom palubom čvrstoće.. Pod slomom broskog trupa pojednostavljeno se smatra gubitak krutosti grede na savijanje, smik ili torziju. Moment savijanja glavno je opterećenje kod globalnog uzdužnog sloma broskog trupa kao grede. Glavni odziv je savijanje grede. sve se lako prikazuje pomoću zakrivljenosti grede  $\chi$ .

Inkrementalno-iterativna metoda analize progresivnog sloma broskog trupa s izračunatim krivuljama naprezanje-deformacija pojednostavljena je metoda koja omogućuje veliku točnost u oponašanju progresivnog sloma pri uzdužnom savijanju. Inkrementalni dio očituje se u postupnom povećanju zamišljene zakrivljenosti broskog trupa kao idealne grede. Dok se iterativnim putem u svakom koraku dobije novi položaj neutralne linije presjeka trupa zbog gubitka čvrstoće pojedinih uzdužnih elemenata. Ova metoda rezultira krivuljom momenta savijanja  $M$  u ovisnosti o zakrivljenosti  $\chi$ . Projektni kriterij vezano uz granični vertikalni moment savijanja trupa broda [2] dan je prema izrazu (1):

$$\gamma_S M_{sw-U} + \gamma_w M_{wv} \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (1)$$

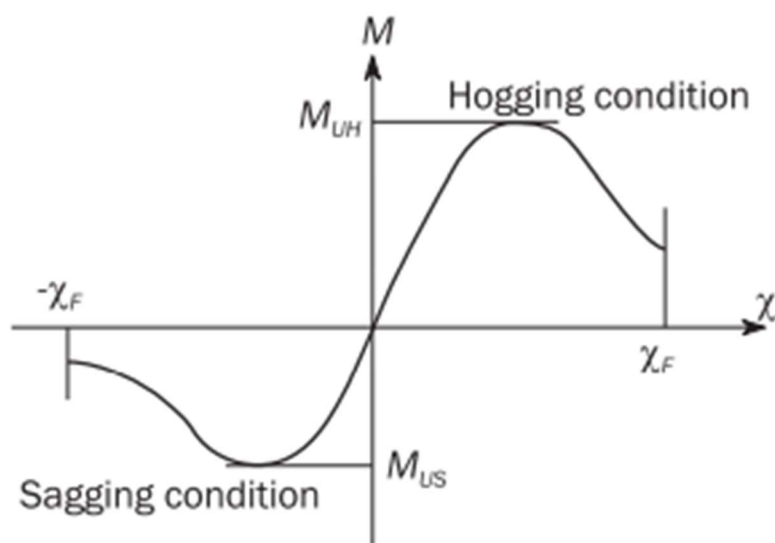
$M_{sw}$  – maksimalni moment savijanja na mirnoj vodi

$M_{wv}$  – maksimalni moment savijanja na valovima

$M_U$  – granični moment savijanja

$\gamma_S, \gamma_w, \gamma_R$  – parcijalni faktori sigurnosti za pojedine komponente

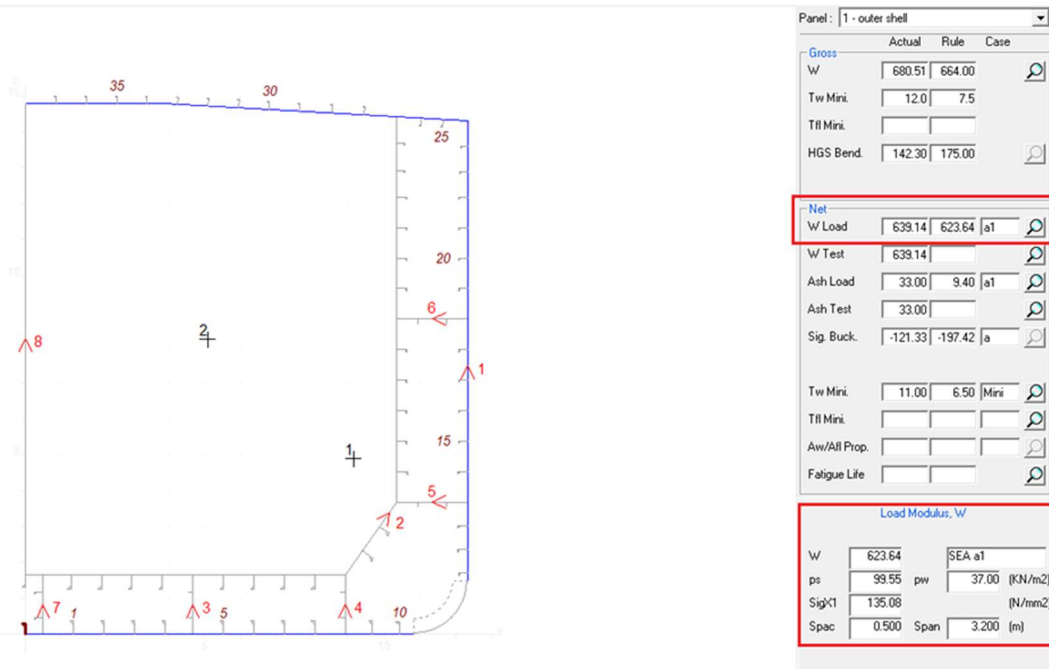
Granični moment u grafu jest vršna vrijednost krivulje ovisno o predznaku za pregib i progib, slika 1.



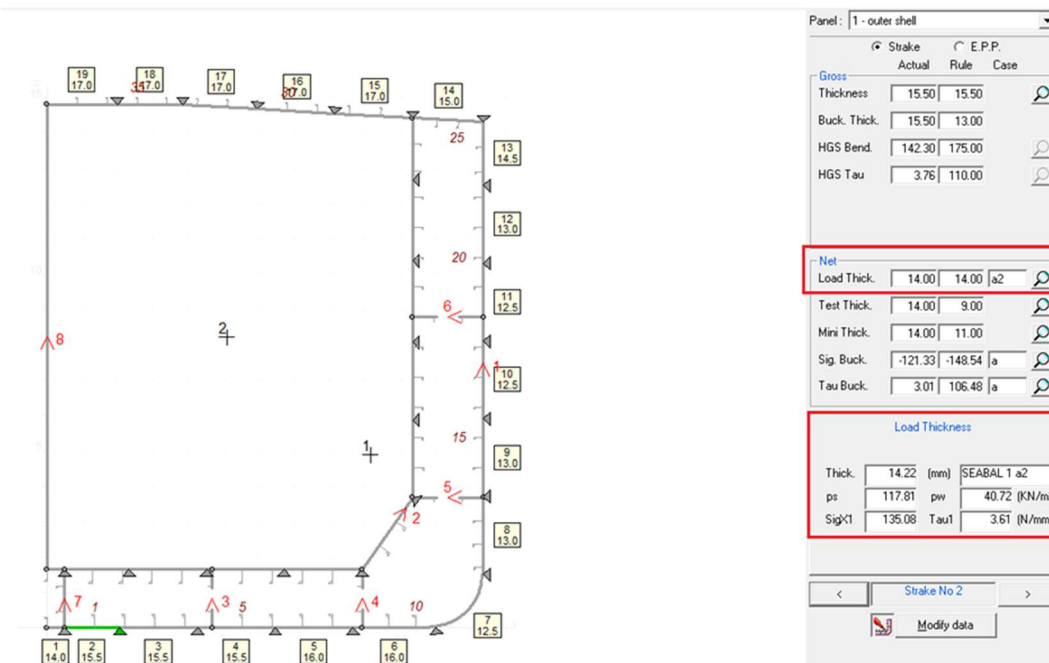
Slika 1. Krivulja momenata savijanja i zakrivljenosti broskog trupa za pregib i progib [2].

### 2.3.2. Lokalna čvrstoća

Savijanje oplata između ukrepa i savijanje ukrepa između okvira proračun je lokalne čvrstoće. Lokalno statičko opterećenje nastaje uslijed djelovanja hidrostatskog tlaka na uronjeni dio trupa, kao i unutarnjim silama i tlakovima uslijed težine tereta, balasta i sl. Lokalna dinamička opterećenja su ona koja nastaju uslijed gibanja broda na valovima. Očituju se djelovanjem tlakova izazvanih valovima na uronjeni dio broda kao i na izložene nadvodne dijelove trupa, te svakako palube zbog prelijevanja valova. Bitno je napomenuti lokalno dinamičko opterećenje na izložene dijelove trupa i nadgrađa uslijed djelovanja vjetra. Uzdužnjaci se smatraju jednoliko opterećenom upetom gredom između dvaju poprečnjaka (okvirna rebra). Ovdje je praktično dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata napravljeno prema BV pravilima u sklopu programa MARS. Na slikama 2. i 3. vidljivi su izbornici s podacima o lokalnoj čvrstoći oplata i uzdužnjaka unutar programa MARS.



Slika 2. Lokalna čvrstoća uzdužnjaka u MARS-u



Slika 3. Lokalna čvrstoća oplata u MARS-u

### 2.3.3. Faktor iskoristivosti

Mjere sigurnosti trebaju biti jednostavno, prepoznatljivo i samorazumljivo kvantitativno izražene veličinama tako da se strukturna izdržljivost za pojedini strukturni dio može jednostavno i brzo usporediti s najvećim opterećenjem za neko stanje plovidbe broda.

Faktor iskoristivosti je recipročna vrijednost faktora sigurnosti [3], a definira se kao (2):

$$i = \frac{d \cdot D}{c \cdot C} \leq 1 \quad (2)$$

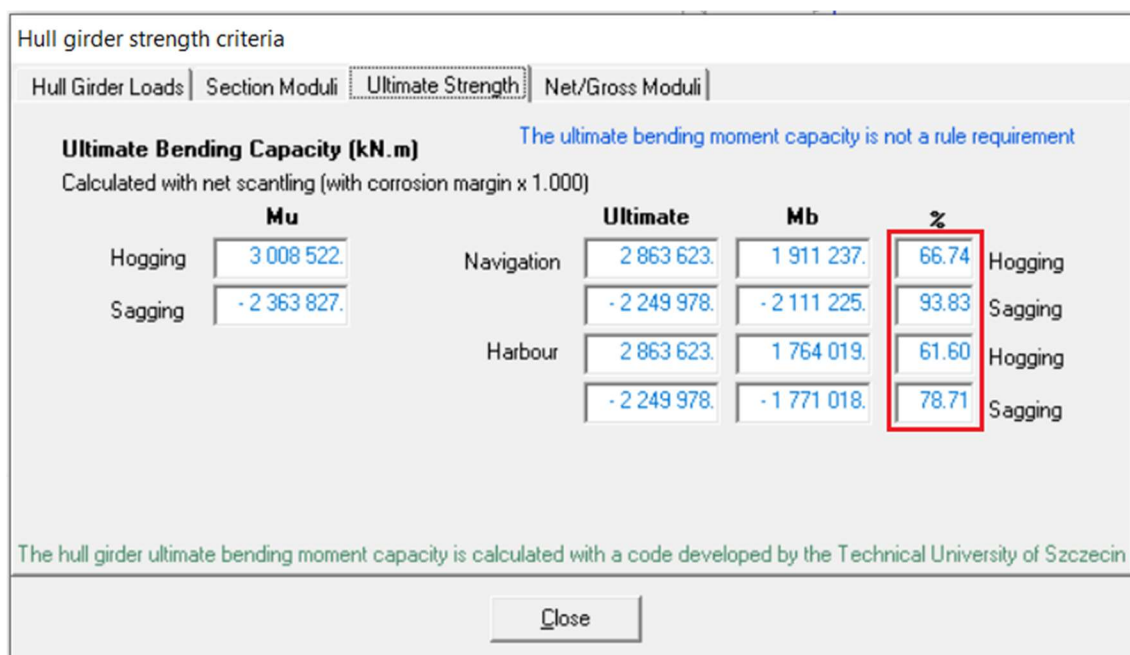
$d$  – faktor povećanja opterećenja

$c$  – faktor smanjenja izdržljivosti

$D$  – najveće opterećenje za neko stanje plovidbe

$C$  – strukturna izdržljivost

Na slici 4 dan je primjer faktora iskoristivosti s obzirom na graničnu čvrstoću trupa broda.



Slika 4. Primjer faktora iskoristivosti u MARS-u

### 3. DEFINIRANJE VARIJANTI KONSTRUKCIJE

U tablici 4. nalazi se devet kombinacija različitih razmaka uzdužnjaka i razmaka okvira.

**Tablica 4. Varijante modela**

Varijanta	Razmak okvira [mm]	Razmak uzdužnjaka [mm]
1	2743	700
2	2743	775
3	2743	850
4	3200	700
5	3200	775
6	3200	850
7	3840	700
8	3840	775
9	3840	850

#### 3.1. Definiranje modela u MARS-u

Unutar sučelja programskog paketa MARS ponuđena su sljedeća tri izbornika: *Basic Ship Data*, *Mars Edit* i *Mars Rule*. Svaki model provučen je kroz sva tri proračuna. Modeli izvedeni prema referentnom modelu ne zahtijevaju promjenu osnovnih karakteristika. U nastavku su prikazani koraci za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata kako bi se zadovoljila projektna ograničenja. Program se zasniva na iterativnoj metodi, stoga se određeni postupci ponavljaju dokle god nisu zadovoljena pravila klasifikacijskog društva.

### 3.1.1. Osnovni podaci o brodu

Odabirom *Basic Ship Data* ikone, otvara se izbornik s osnovnim dimenzijama broda, brzinom i nosivosti. U ovom se koraku odabiru pravila prikazana slikom 5. prema kojima se provodi proračun.

Slika 5. Osnovni podaci o brodu

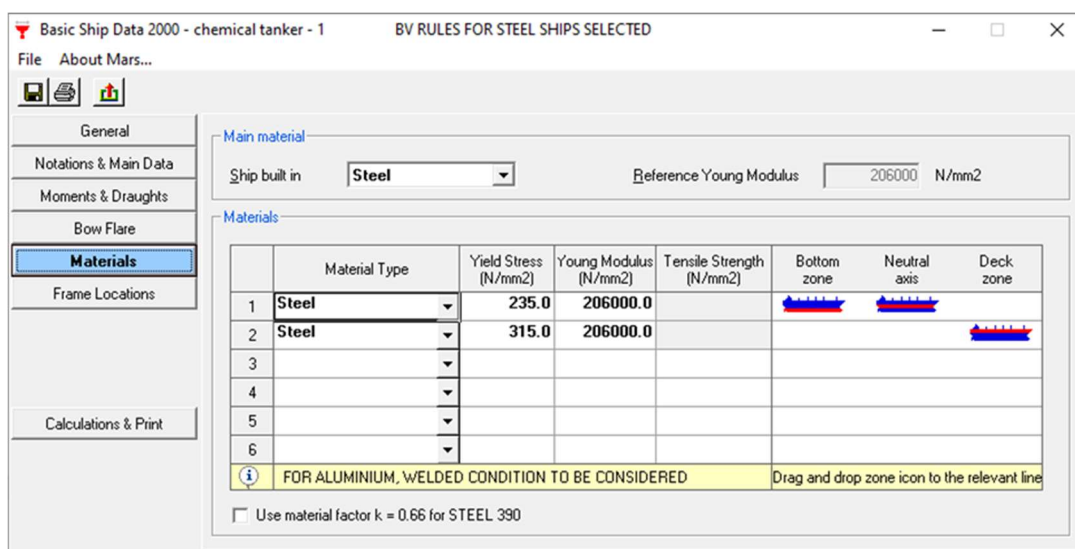
### 3.1.2. Zadavanje momenata savijanja i gaza

U ovom koraku bitno je zadati opterećenje za dva režima plovidbe, a to su nakrcano stanje i brod u balastu. Samim time je potrebno unijeti, osim momenata savijanja na mirnoj vodi u progibu i pregibu, projektni gaz i gaz broda kada plovi u balastu. Vidi sliku 6.

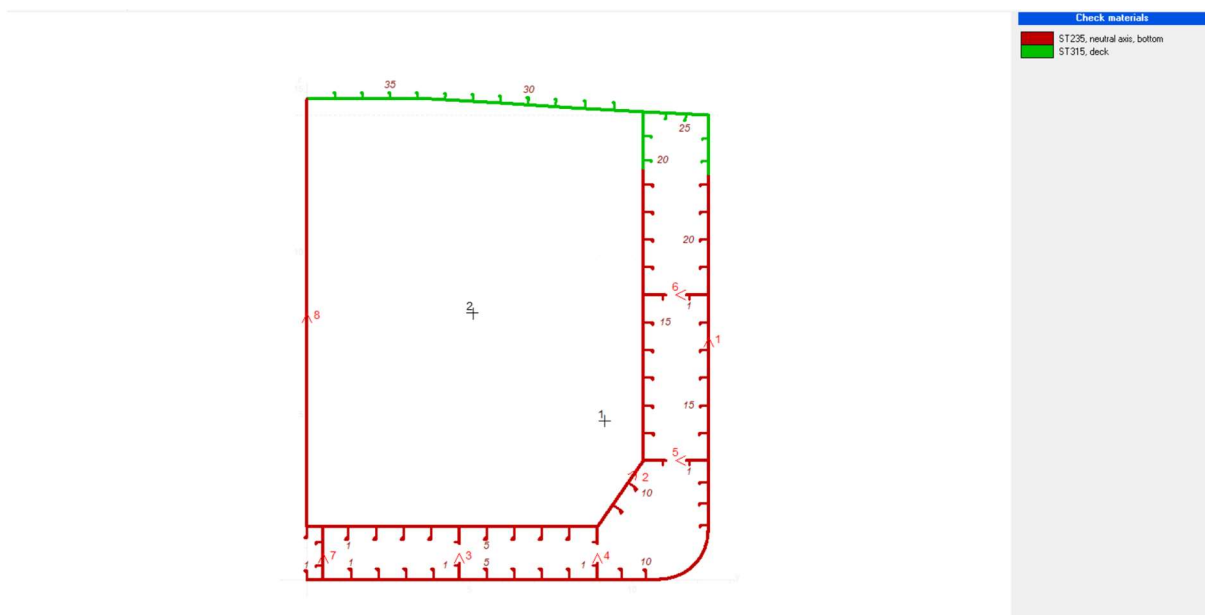
Slika 6. Momenti i gazovi

### 3.1.3. Odabir materijala

Materijal je odabran prema pripadajućoj granici razvlačenja potrebnoj u pojedinom dijelu konstrukcije. U ovim modelima korišten je obični brodograđevni čelik u svim područjima osim za palubu, gdje je korišten čelik povišene čvrstoće s minimalnom granicom razvlačenja od 315 N/mm<sup>2</sup>. Na slici 7. vidljiva je razlika u granici razvlačenja između dva korištena čelika poprečnog presjeka u *Basic Ship Data*, dok je na 8. slici prikazana u *MARS Rule-u*. Svaki je materijal obojan drugom bojom. S obzirom da se materijalom direktno utječe na minimalno zahtijevani moment otpora zone za koju je korišten, u ovom zadatku raspored korištenja materijala držali smo konstantnim, za sve razmatrane varijante.



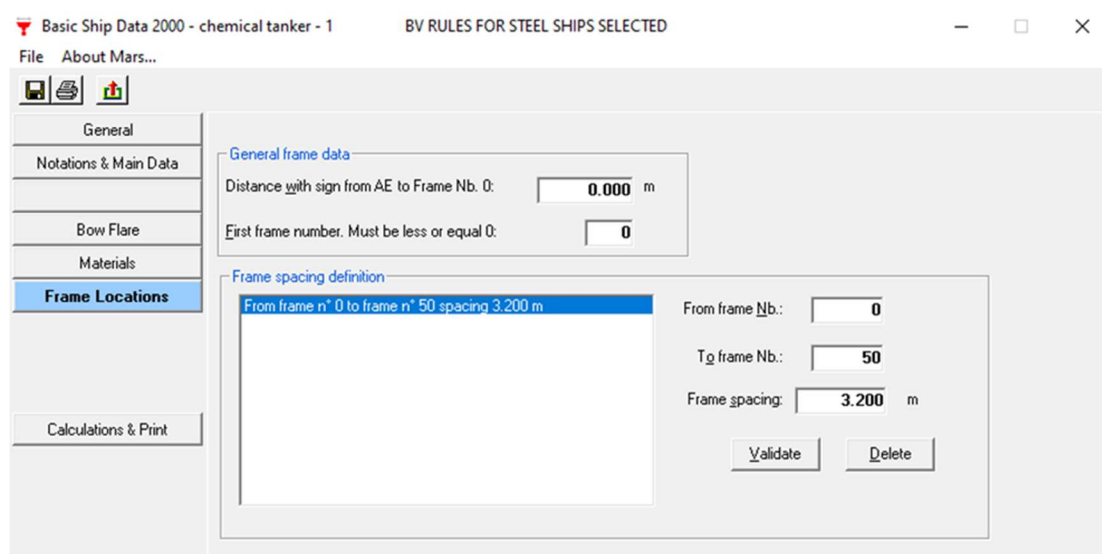
Slika 7. Korišteni materijali i njihove granice razvlačenja



Slika 8. Materijali po poprečnom presjeku

### 3.1.4. Pozicije okvirnih rebara

U ovom zadatku proučavan je poprečni presjek glavnog rebara brodskog trupa. Unošenje pozicija okvirnih rebara nije zahtijevalo preveliku preciznost. Na slici 9. vidljivo je da je uneseni razmak okvira referentnog modela za sredinu brodskog trupa odgovara konstrukciji brodskog trupa u cijelosti. To nije relevantno stvarnosti, jer sužavanjem brodske forme od glavnog rebara prema pramčanoj i krmenoj okomici raspored i razmak rebara i uzdužnjaka se mijenja. Npr. pramac često puta biva poprečno orebren kako bi se dobila dodatna sigurnost savladavanju tlakova od sraza (e: slamming).

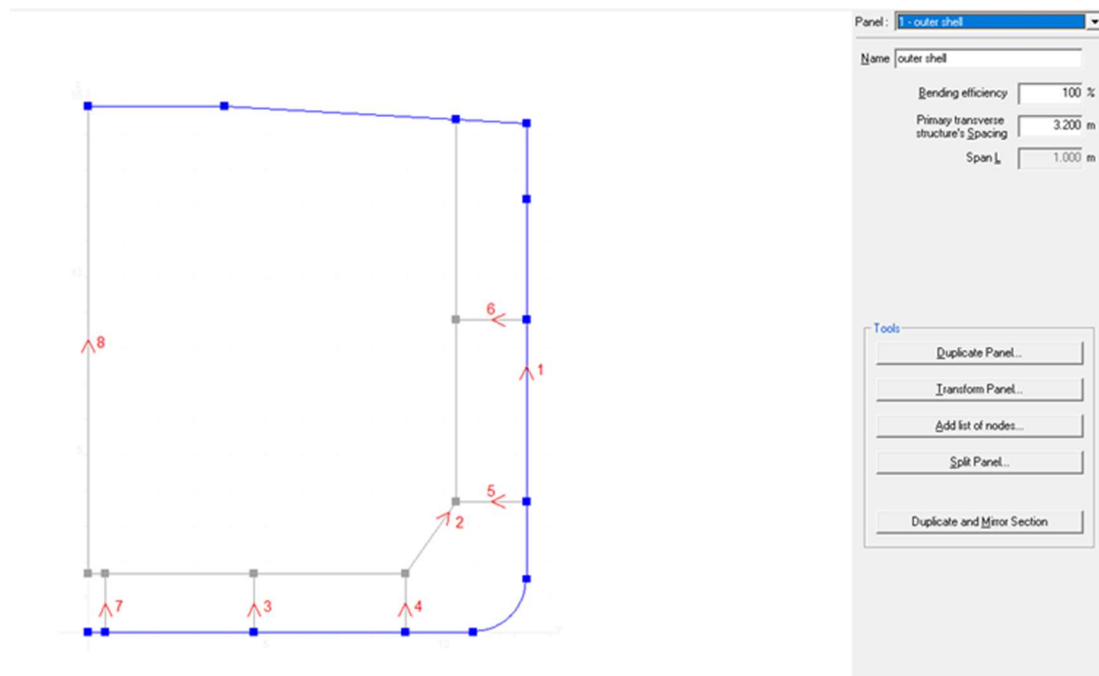


Slika 9. Pozicije okvirnih rebara



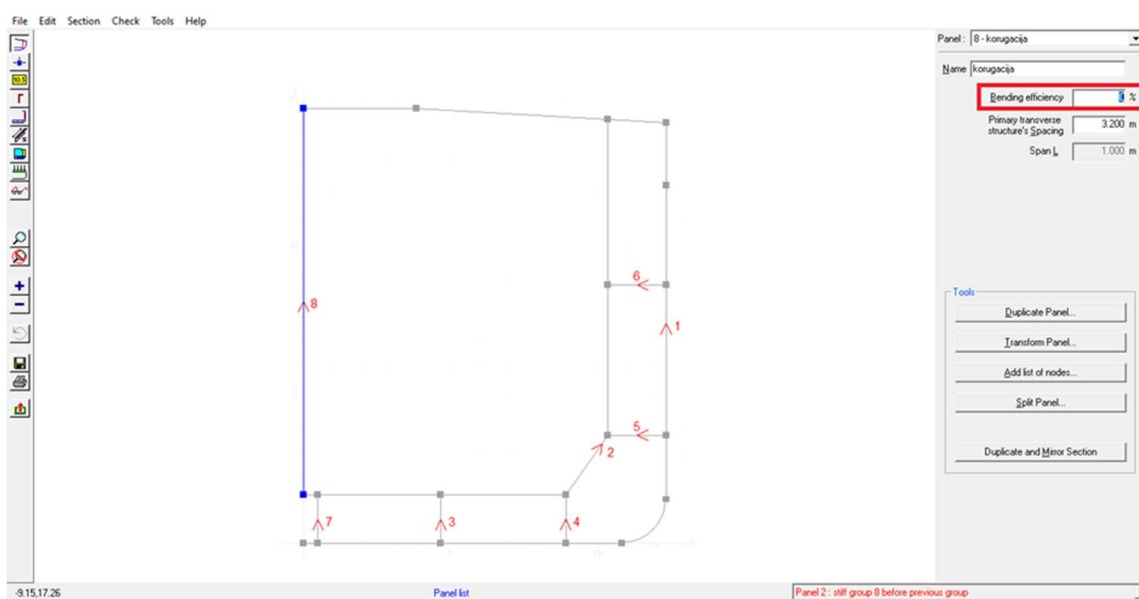
### 3.1.5. Generiranje panela

Za zadavanje panela potreban je odabir klikom na tipku *MARS Edit*. U tom prozoru odabiremo tipku *Panels* kojom pridružujemo karakteristike pripadajućim panelima.



Slika 10. Panel vanjske oplata

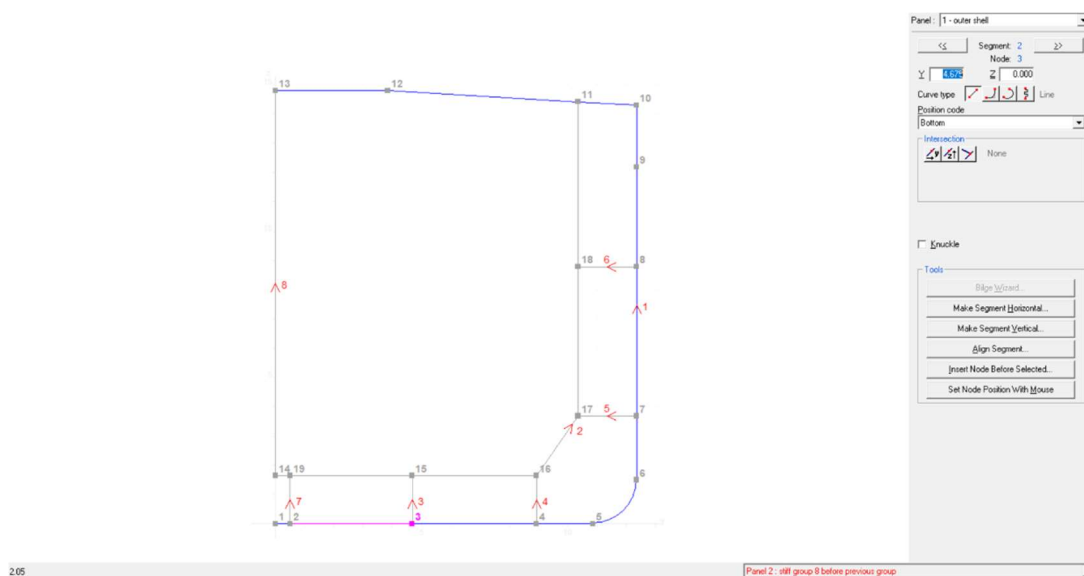
Na desnoj strani prozora sa slike 10. vidljiv je naziv odabranog panela, te postotak njegovog sudjelovanja u uzdužnoj čvrstoći i raspon između oslonaca, što na referentnom modelu iznosi 3.200 m. Svi paneli konstruiranih varijanti modela sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći, osim uzdužne naborane pregrade prikazane kao panel 8 na slici 11.



Slika 11. Naborana pregrada

### 3.1.6. Generiranje čvorova

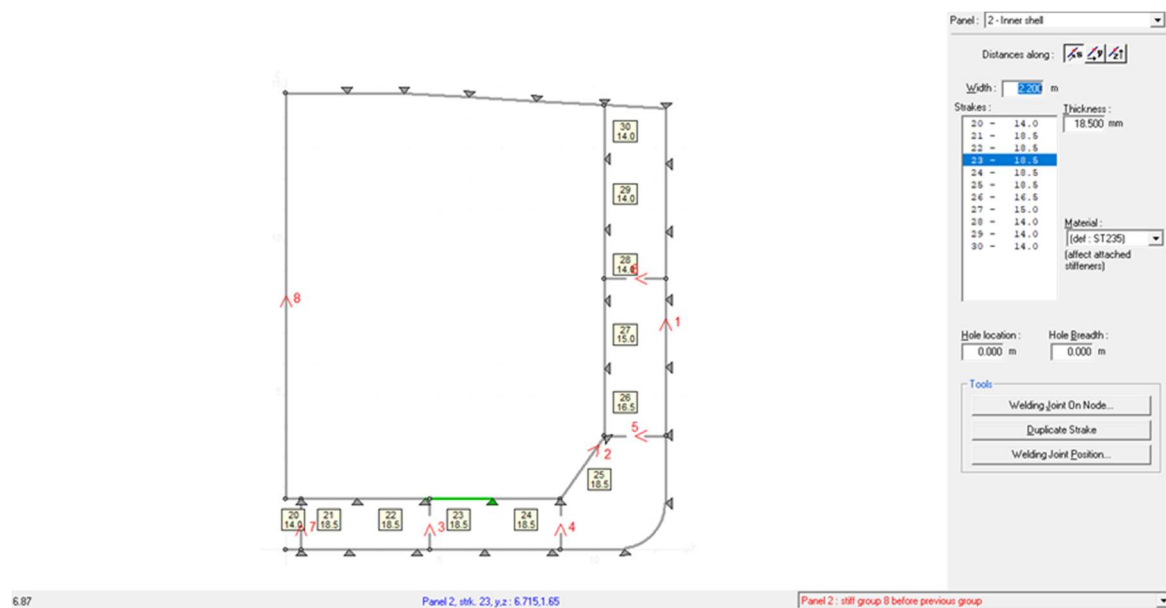
Drugi korak konstruiranja modela jest zadavanje čvorova. Svaki je čvor definiran Y i Z koordinatom i tipom krivulje, te mora biti pridružen odgovarajućem panelu. Tj. svaki segment, dio panela između čvorova, mora imati pridruženu oznaku pozicije na konstrukciji. Prema tome se dobiva relevantan proračun koji zadovoljava minimalne zahtjeve konstrukcije prema pravilima. Čvorovi se nalaze na spojevima pojedinih elemenata konstrukcije kao na slici 12. Svrha im je biti referentna točka za vojeve i uzdužnjake.



Slika 12. Čvorovi

### 3.1.7. Generiranje vojeva

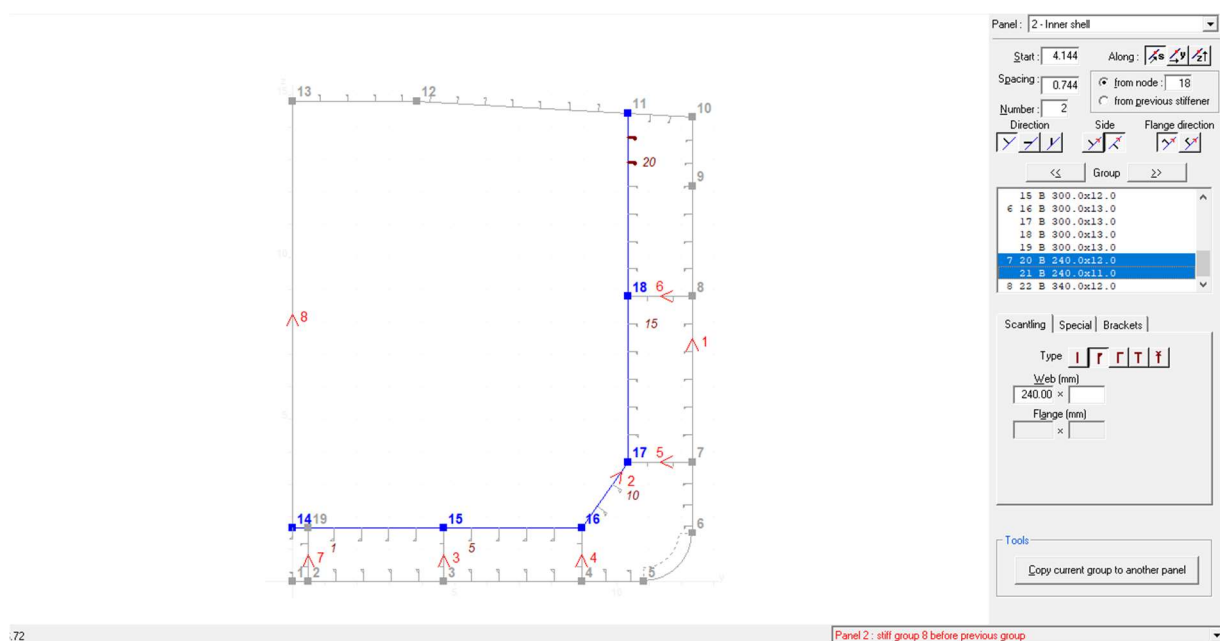
Svaki voj generira se na način da mu se pridružuje širina, debljina i materijal. Materijal voja ne mora nužno određivati materijal pripadajućih uzdužnjaka. Ograničenje širine voja diktira tehnologija gradnje broda, posebna pažnja pridaje se izbjegavanju gomilanja zavora. Klikom na pojedini voj moguća je promjena svih zadanih parametara prikazanih na slici 13.



Slika 13. Vojevi

### 3.1.8. Generiranje uzdužnjaka

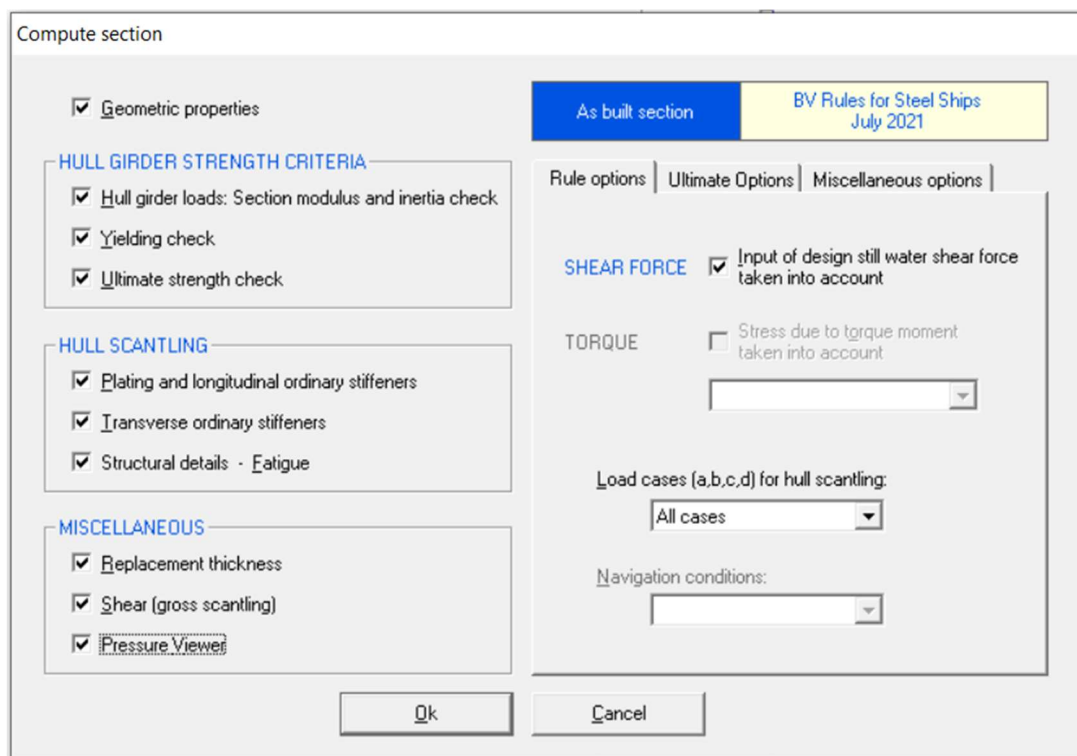
Obzirom na teorijsku prirodu zadatka ovdje su uzdužnjaci dimenzionirani da svaki posebno debljinom zadovolji minimalne konstrukcijske zahtjeve. Vidljivo na slici 14. Iako se u praksi zadaju po grupama istih dimenzija i razmaka. Uzdužnjaci se zadaju za svaki panel, postavljaju se razmakom od zadnjeg uzdužnjaka prethodne grupe ili čvora panela. Parametri kojima definiramo uzdužnjake jesu: tip, smjer i orijentacija. U svim generiranim varijantama modela ova tri parametra su konstantna.



Slika 14. Uzdužnjaci

### 3.2. Provođenje proračuna korištenjem modela u MARS-u

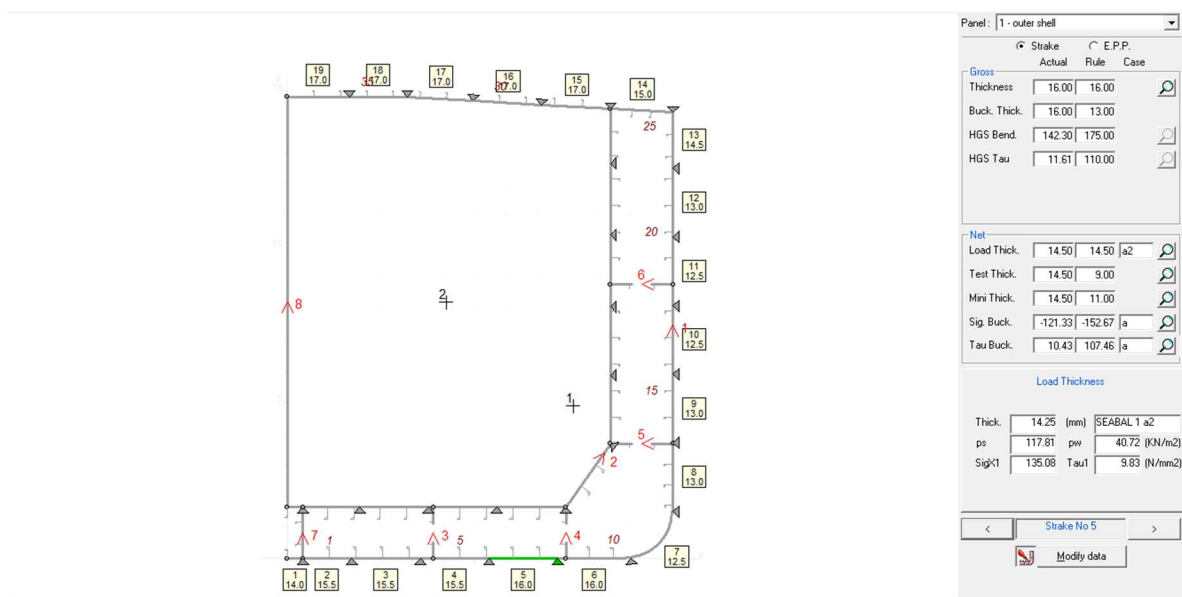
U daljnjim je koracima korišten MARS *Rule* kojim su kontrolirani zahtjevi na konstrukcijske elemente, koji se daju iščitati iz slike 15.



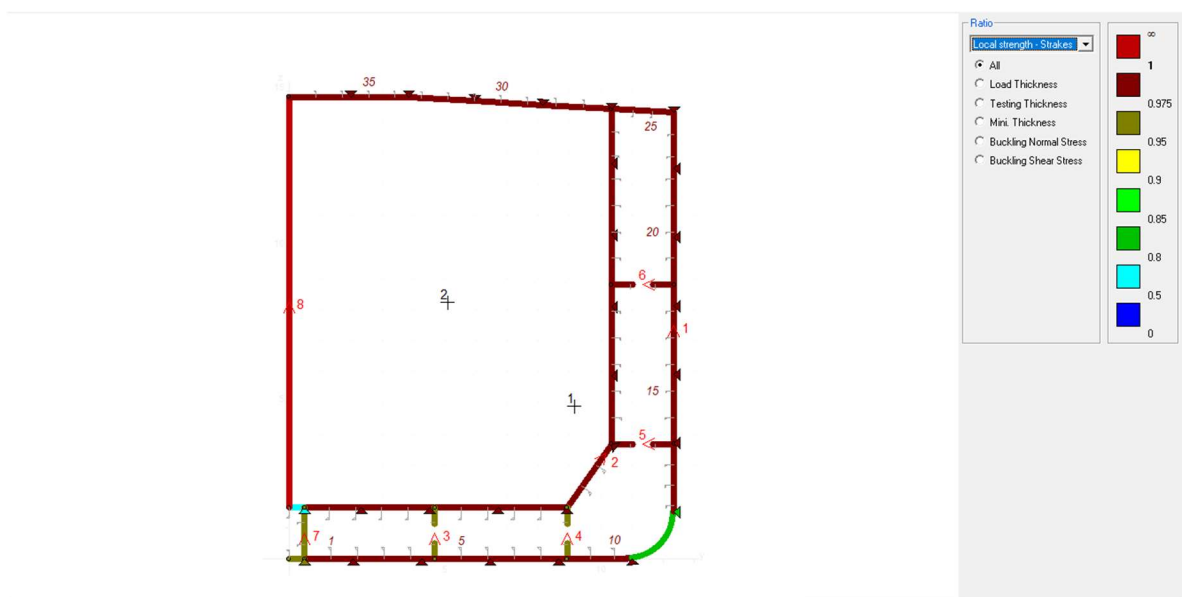
Slika 15. Modul definiranje tipa proračuna

### 3.2.1. Rezultati proračuna i reprojekiranje iterativnim postupkom

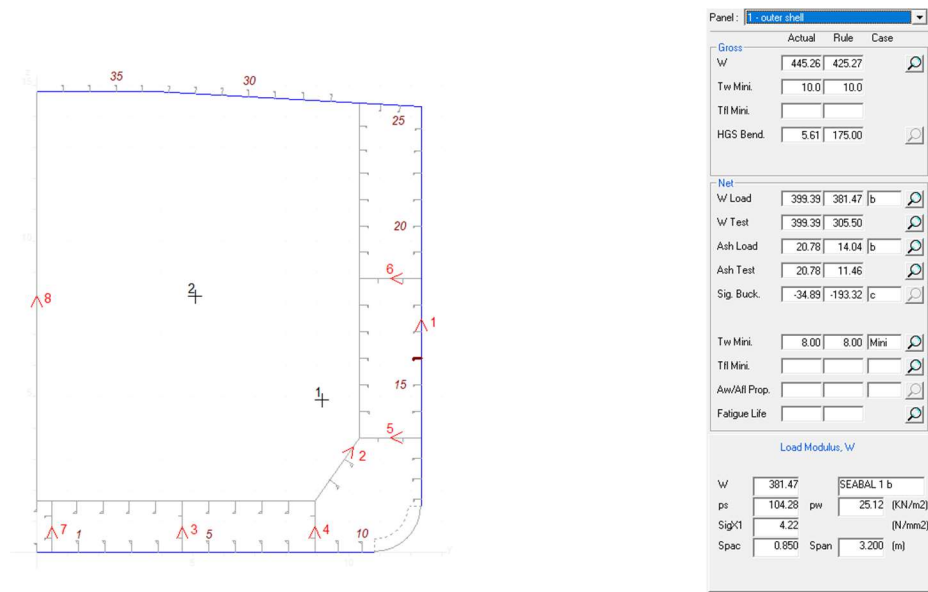
Ako konstrukcijski elementi nisu zadovoljili neki od kriterija označenih na slici prethodnog paragrafa, povećana im je debljina u MARS *Edit-u*. Iterativnim postupkom zadovoljena je prvo lokalna čvrstoća, zatim granična, te izvijanje, posebno uzdužnjaka, posebno oplate. Slike 16. i 18. predstavljaju opis postupka iteracije. Cilj postupka je zadovoljiti uvjete čvrstoće na način da faktor iskoristivosti bude čim bliži vrijednosti 1. Vidljivo na desnoj strani slika 17. i 19.



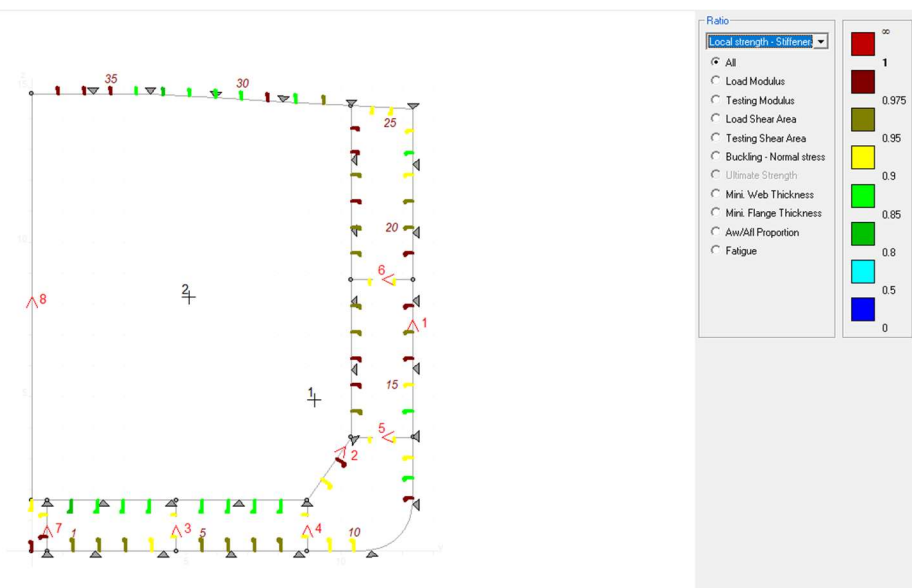
Slika 16. Iteracija lokalne čvrstoće za vojeve



Slika 17. Zadovoljenje lokalne čvrstoće vojeva



Slika 18. Iteracija lokalne čvrstoće za uzdužnjake



Slika 19. Zadovoljenje lokalne čvrstoće uzdužnjaka

## 4. ANALIZA REZULTATA

Rezultati analize ukupne mase konstrukcije obzirom na variranje razmaka okvira i uzdužnjaka temeljeni su na podacima za površinu poprečnog presjeka uzdužnih elemenata konstrukcije u programu MARS. Masa uzdužnih elemenata na razmaku okvira dobivena je množenjem volumena uzdužnog elementa s gustoćom čelika koja iznosi  $\rho_{\xi}=7.85 \text{ t/m}^3$ . Ukupna masa dobivena je množenjem rezultata brojem razmaka okvira unutar četiriju skladišta ukupne duljine 76.8 m. Broj okvira zaokružen je na cijeli broj, a razmak je zaokruživan na tri decimale. Masa poprečnih elemenata aproksimirana je na tri načina.

### 4.1. Utjecaj razmaka okvira i uzdužnjaka na masu uzdužnih elemenata

Povećanjem razmaka okvira i uzdužnjaka:

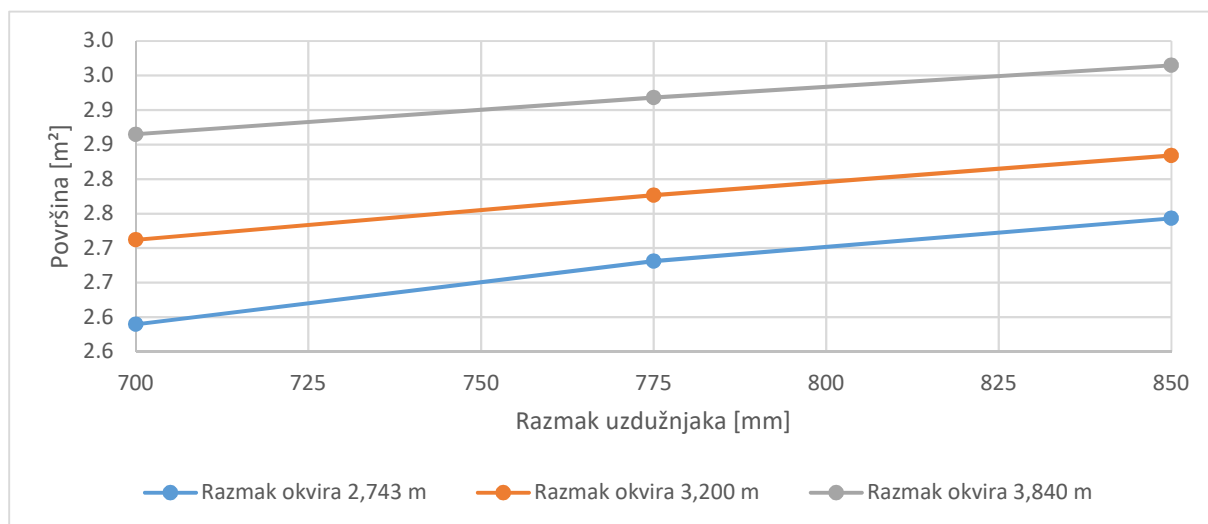
- Povećava se nepoduprti raspon između okvira i uzdužnjaka
- Smanjuje se broj okvira i uzdužnjaka
- Povećava se debljina oplate
- Povećava se površina poprečnog presjeka okvira i uzdužnjaka

U sljedećoj tablici navedeni su utjecaji razmaka okvira i razmaka uzdužnjaka na masu uzdužnih elemenata, a na slici 20. nalazi se dijagram iz kojeg je vidljiva ovisnost površine uzdužnih elemenata o razmaku uzdužnjaka.



Tablica 5. Dimenzije i mase uzdužnih elemenata konstrukcije

Razmak [m]		Površina [m <sup>2</sup> ]			Masa duljine četiri skladišta
Okvirna rebra	Uzdužnjaci	Limovi	Uzdužnjaci	Suma	
2743	700	1.98	0.61	2.59	387.83
	775	2.09	0.59	2.68	402.10
	850	2.20	0.55	2.74	411.39
3200	700	1.95	0.76	2.71	406.16
	775	2.08	0.70	2.78	416.41
	850	2.19	0.65	2.83	425.02
3840	700	1.94	0.92	2.86	429.06
	775	2.07	0.85	2.92	437.65
	850	1.78	1.19	2.96	444.59



Slika 20. Ovisnost površine uzdužnih elemenata o razmaku uzdužnjaka

#### 4.2. Utjecaj razmaka okvira i uzdužnjaka na masu poprečnih elemenata konstrukcije

U ovom poglavlju obrađena je studija senzitivnosti mase na temelju površine poprečnog presjeka okvirnog rebra referentnog modela.

##### 4.2.1. Masa okvirnih rebara izračunata prema površini poprečnog presjeka referentnog modela – MODEL A

Masa je izračunata kao površina poprečnog presjeka glavnog rebra broda koja je pomnožena s debljinom poprečnih elemenata referentnog modela i na kraju množena gustoćom čelika. U ovom proračunu razlika je u površini rebra, rebrenice i rebra na području uzvojnog tanka s obzirom na razmak uzdužnjaka. Mase poprečnih elemenata konstrukcije vidljive su na sljedećim tablicama. Masa ukrepa poprečnih elemenata iz tablice 2. držana je konstantnom u svim varijantama.

**Tablica 6. Masa poprečnih elemenata konstrukcije okvira za razmak uzdužnjaka  $s=700$  mm**

Element	Površina [m <sup>2</sup> ]	Debljina [mm]	Masa[t]
Rebrenica	19.28	13	1.95
Okvir uzvojnog tanka	3.77	13	0.38
Okvir boka	22.32	11	1.92
Okvir tunelske kobilice	0.62	13	0.06

**Tablica 7. Masa poprečnih elemenata konstrukcije okvira za razmak uzdužnjaka  $s=775$  mm**

Element	Površina [m <sup>2</sup> ]	Debljina [mm]	Masa[t]
Rebrenica	19.28	13	1.97
Okvir uzvojnog tanka	3.79	13	0.39
Okvir boka	21.90	11	1.89
Okvir tunelske kobilice	0.62	13	0.06

**Tablica 8. Masa poprečnih elemenata konstrukcije okvira za razmak uzdužnjaka  $s=850$  mm**

Element	Površina [m <sup>2</sup> ]	Debljina [mm]	Masa [t]
Rebrenica	19.28	13	1.97
Okvir uzvojnog tanka	5.34	13	0.54
Okvir boka	20.90	11	1.80
Okvir tunelske kobilice	0.62	13	0.06

Procjena mase prema površini poprečnih konstrukcijskih elemenata okvirnog rebra vidi se u tablici 9.

**Tablica 9. Masa okvira prema površini okvirnog rebra MODEL – A**

Razmak uzdužnjaka [mm]	Masa okvira [t]
700	11.35
775	12.34
850	12.52

#### 4.2.2. Procjena mase ovisno o razmaku okvira – MODEL B

Procjena mase provedena je prema referentnom modelu kojem je varirana masa ovisno o razmaku okvira prema formuli (3):

$$\frac{w_0}{w_{ref}} \cdot m_{ref} \quad (3)$$

Gdje je zapravo omjer razmaka promatranog i referentnog okvira korišten kao koeficijent kojim je množena masa referentnog modela iz tablice 3, izračunata masa okvira MODELA – B naznačena je u tablici 10.

**Tablica 10. Masa okvira ovisno o razmaku rebara – MODEL B**

Razmak okvira [m]	Masa okvira [t]
2.743	10.73
3.2	12.52
3.84	15.03

#### 4.2.3. Procjena mase ovisno o razmaku okvira – MODEL C

Masa okvira u ovoj varijanti, također je procijenjena koeficijentom razmaka okvirnih rebara. Ovoga puta kao jedna polovina koeficijenta MODELA B. Masa okvira referentnog modela množena je koeficijentom 0.925 da bi se dobila masa okvira s razmakom 2.743 m, dok je s 1.1 množena za dobivanje mase s razmakom okvira 3.840 m. Dobivene mase nalaze se u tablici 11.

**Tablica 11. Masa ovisno o razmaku rebara – MODEL C**

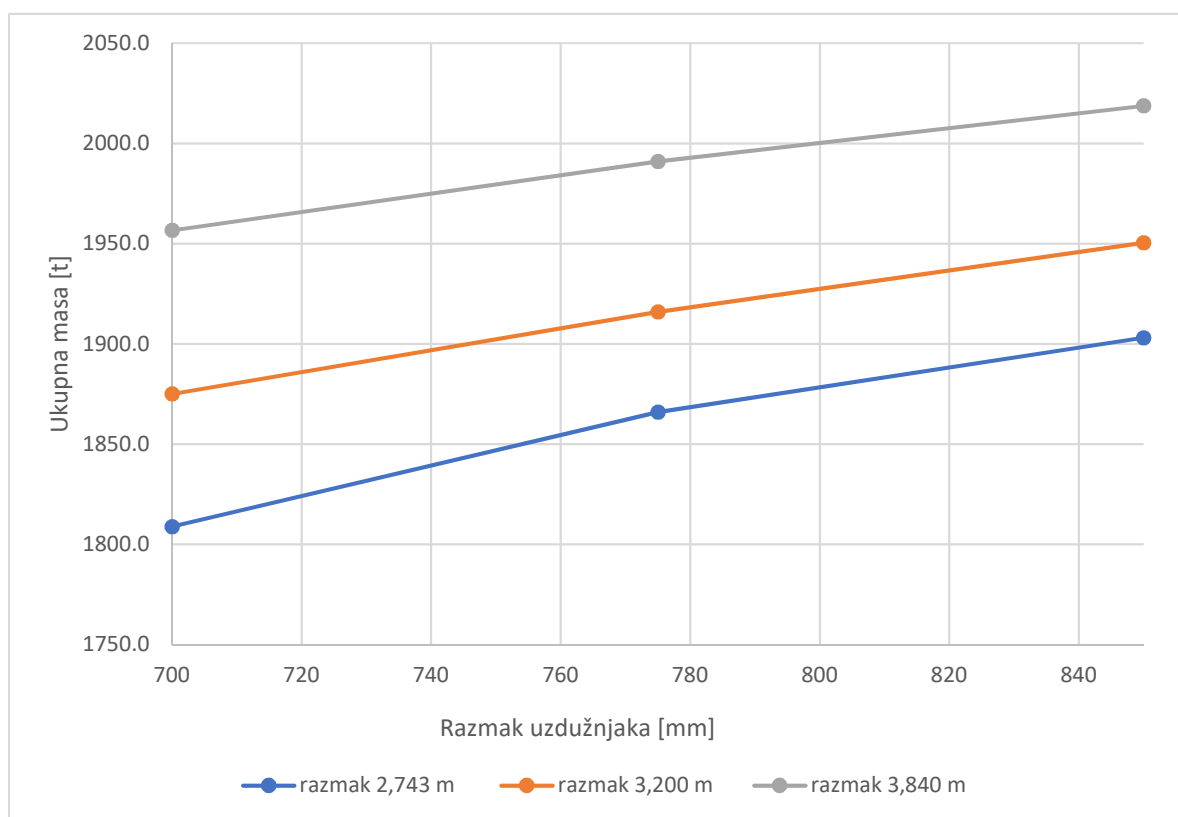
Razmak okvira [m]	Masa okvira [t]
2.743	11.58
3.200	12.52
3.840	13.77

### 4.3. Analiza ukupne mase promatranog dijela konstrukcije

Ranije je spomenuto kako je promatrana konstrukcija četiriju skladišta duljine 19.2 m, odnosno ukupne duljine 76.8 m. U ovom poglavlju razmatrat ćemo prethodno dobivene rezultate u globalu promatrane konstrukcije.

**Tablica 12. Ukupna masa – MODEL A**

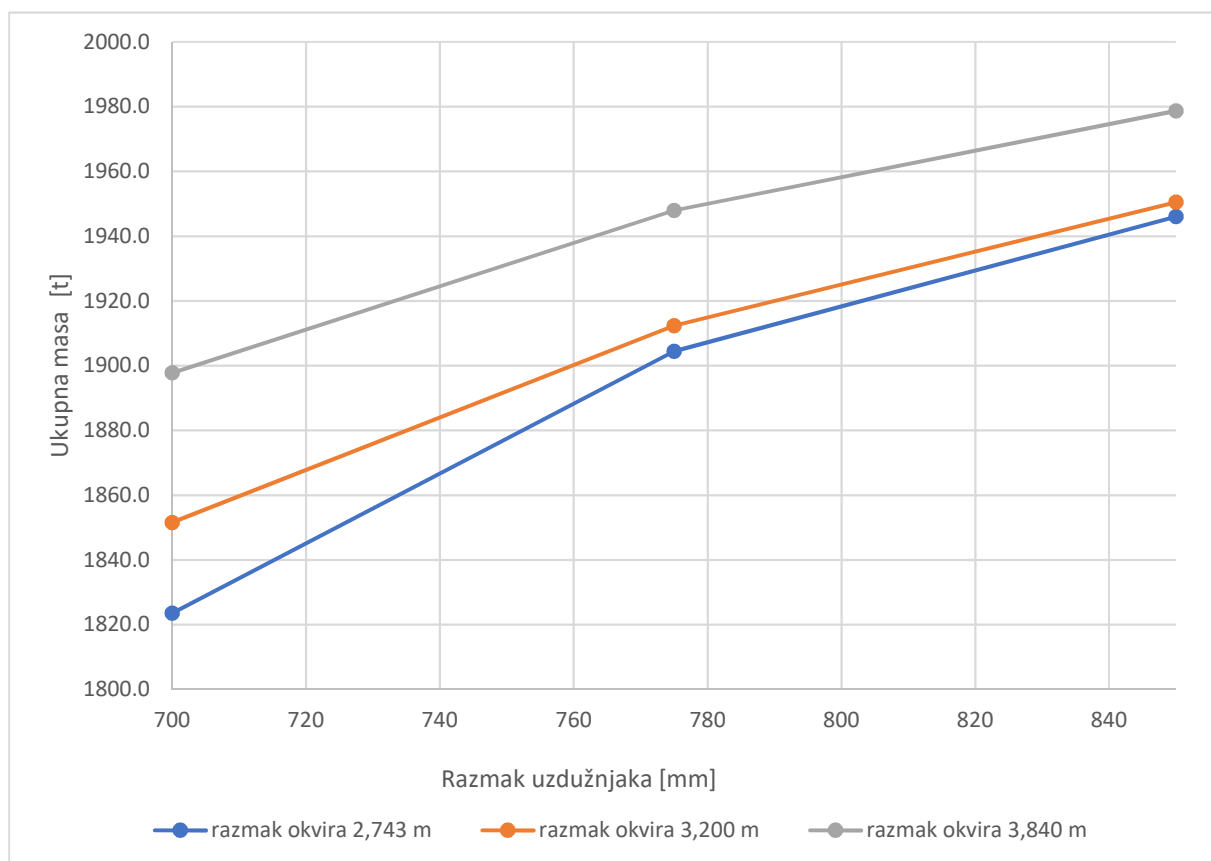
Razmak okvira [m]	Razmak uzdužnjaka [mm]	Broj okvira u 4 skladišta	Masa okvira 4 skladišta	Uzdužna masa 4 skladišta [t]	Ukupna masa-4 skladišta [t]
2.743	700	24	257.6	1551.3	1808.9
2.743	775	24	257.6	1608.4	1866.0
2.743	850	24	257.6	1645.6	1903.1
3.2	700	20	250.4	1624.7	1875.1
3.2	775	20	250.4	1665.6	1916.0
3.2	850	20	250.4	1700.1	1950.5
3.84	700	16	240.4	1716.2	1956.6
3.84	775	16	240.4	1750.6	1991.0
3.84	850	16	240.4	1778.4	2018.8



**Slika 21. Ukupna masa – MODEL A**

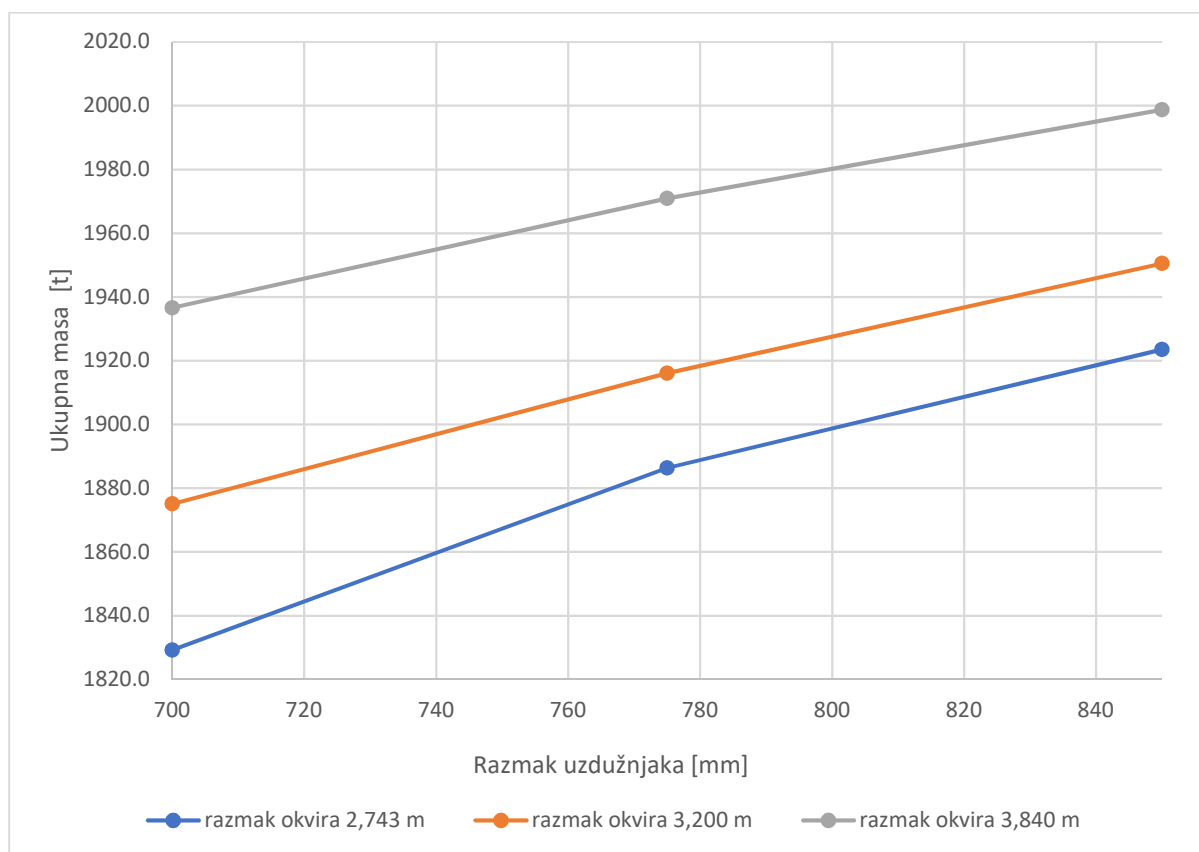
**Tablica 13. Ukupna masa – MODEL B**

Razmak okvira [m]	Razmak uzdužnjaka [m]	Broj okvira u 4 skladišta	Masa okvira-4 skladišta	Uzdužna masa-4 skladišta	Ukupna masa-4 skladišta [t]
2.743	700	24	272.3	1551.3	1823.6
2.743	775	24	296.1	1608.4	1904.5
2.743	850	24	300.5	1645.6	1946.1
3.2	700	20	226.9	1624.7	1851.6
3.2	775	20	246.7	1665.6	1912.4
3.2	850	20	250.4	1700.1	1950.5
3.84	700	16	181.6	1716.2	1897.8
3.84	775	16	197.4	1750.6	1948.0
3.84	850	16	200.3	1778.4	1978.7

**Slika 22. Ukupna masa – MODEL B**

Tablica 14. Ukupna masa – MODEL C

Razmak okvira [m]	Razmak uzdužnjaka [m]	Broj okvira u 4 skladišta	Masa okvira-4 skladišta	Uzdužni-4 skladišta	Ukupna masa-4 skladišta [t]
2.743	700	24	278.0	1551.3	1829.3
2.743	775	24	278.0	1608.4	1886.4
2.743	850	24	278.0	1645.6	1923.5
3.2	700	20	250.4	1624.7	1875.1
3.2	775	20	250.4	1665.6	1916.0
3.2	850	20	250.4	1700.1	1950.5
3.84	700	16	220.4	1716.2	1936.6
3.84	775	16	220.4	1750.6	1971.0
3.84	850	16	220.4	1778.4	1998.7



Slika 23. Ukupna masa – MODEL C

U tablici 15. nalaze se podaci za ukupnu masu varijanti konstrukcije, te granični momenti savijanja pojedine varijante konstrukcije. U prvom stupcu tablice nalaze se redni brojevi varijanti  $i, j$

$i$  - redni broj formule prema kojoj je izračunata masa poprečnih elemenata konstrukcije

$j$  – redni broj varijante razmaka okvirnih rebara i uzdužnjaka

**Tablica 15. Granični moment savijanja konstrukcije**

	Redni broj varijante ( $ij$ )	Razmak okvirnih rebara [m]	Razmak uzdužnjaka [mm]	Ukupna masa [t]	Granični moment savijanja [kNm]
MODEL A	11	2.743	700	1823.6	2 587 934
	12	2.743	775	1904.5	2 711 138
	13	2.743	850	1946.1	2 771 376
	14	3.2	700	1851.6	2 692 295
	15	3.2	775	1912.4	2 796 228
	16	3.2	850	1950.5	2 863 623
	17	3.84	700	1897.8	2 809 838
	18	3.84	775	1948.0	2 920 261
	19	3.84	850	1978.7	2 965 594
MODEL B	21	2.743	700	1808.9	2 587 934
	22	2.743	775	1866.0	2 711 138
	23	2.743	850	1903.1	2 771 376
	24	3.2	700	1875.1	2 692 295
	25	3.2	775	1916.0	2 796 228
	26	3.2	850	1950.5	2 863 623
	27	3.84	700	1956.6	2 809 838
	28	3.84	775	1991.0	2 920 261
	29	3.84	850	2018.8	2 965 594
MODEL C	16	3.2	850	1950.5	2 587 934
	31	2.743	700	1829.3	2 711 138
	32	2.743	775	1886.4	2 771 376
	33	2.743	850	1923.5	2 692 295
	34	3.2	700	1875.1	2 796 228
	35	3.2	775	1916.0	2 863 623
	36	3.2	850	1950.5	2 809 838
	37	3.84	700	1936.6	2 920 261
	38	3.84	775	1971.0	2 965 594

U tablici 16. prikazan je ukupni poredak varijanti konstrukcije počevši od najmanje mase konstrukcije prema većoj.

**Tablica 16. Ukupni poredak masa konstrukcija**

Redni broj varijante (ij)	Razmak okvirnih rebara [m]	Razmak uzdužnjaka [mm]	Ukupna masa [t]
21	2.743	700	1808.9
11	2.743	700	1823.6
31	2.743	700	1829.3
14	3.2	700	1851.6
22	2.743	775	1866.0
24	3.2	700	1875.1
34	3.2	700	1875.1
32	2.743	775	1886.4
17	3.84	700	1897.8
23	2.743	850	1903.1
12	2.743	775	1904.5
15	3.2	775	1912.4
25	3.2	775	1916.0
35	3.2	775	1916.0
33	2.743	850	1923.5
37	3.84	700	1936.6
13	2.743	850	1946.1
18	3.84	775	1948.0
16	3.2	850	1950.5
26	3.2	850	1950.5
16	3.2	850	1950.5
36	3.2	850	1950.5
27	3.84	700	1956.6
38	3.84	775	1971.0
19	3.84	850	1978.7
28	3.84	775	1991.0
39	3.84	850	1998.7
29	3.84	850	2018.8



---

## 5. ZAKLJUČAK

Bit konceptualne faze konstrukcije broda jest smanjiti ukupne troškove proizvoda, te maksimalno iskoristiti volumen trupa kao teretni prostor.

Svrha ove faze jest predložiti nekoliko varijanti s različitim razmacima okvirnih rebara te različitim razmakom uzdužnjaka. Uzdužni konstrukcijski elementi glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija projektirani su prema pravilima Bureau Veritas-a i priloženom predlošku geometrije glavnog rebra. Za sve predložene varijante dimenzionirani su konstrukcijski elementi tako da svi kriteriji čvrstoće budu zadovoljeni. Teži se konstrukciji minimalne mase. U ovom je radu pokazano da ukupna masa konstrukcije teži minimumu što je manji nepoduprti raspon konstrukcijskih elemenata.

Drugačijim pristupom poprečnoj masi dobivene su drugačije konačne mase konstrukcije, no svi rezultati upućuju da je najbolja varijanta razmaka uzdužnjaka  $s=700$  mm, dok je razmak okvira  $w=2.743$  m. Najveća ušteda mase postignuta je ocjenjivanjem mase prema MODELU – B i u postotku iznosi 7.26%. Linearnom interpolacijom prva tri rezultata dobivena je srednja vrijednost najmanje dobivene mase.

Znači da je srednja ušteda mase varijante najmanjih razmaka okvira i uzdužnjaka prema referentnom modelu u postotku 6.66%.

Preporuča se daljnje istraživanje koje bi ispitalo dodatne varijante još manjih razmaka okvirnih rebara i uzdužnjaka za postizanje minimalne mase konstrukcije.

---

**LITERATURA**

- [1] Kalman, Ž., Parunov, J., Tušek, B.: Granična čvrstoća broskoga Trupa, BRODOGRADNJA, Vol. 58, No. 1, 2007.
- [2] Common Structural Rules for Bulk carriers and Oil Tankers. International association of classification societies, January 2015.
- [3] Andrić J., Načini oštećenja i kriteriji čvrstoće brodskih konstrukcija, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [4] Mikulec M. (2017.), Projektiranje konstrukcije glavnog rebra tankera s dvobokom prema harmoniziranim IACS CSR Pravilima, Završni rad, Zagreb