

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Mikulec

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Student:

Marko Mikulec

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se prof. Andriću na ukazanoj pomoći prilikom izrade ovog rada te na svom znanju koje mi je prenio svojim radom tokom studija. Također se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci Anamariji na pruženoj ljubavi, podršci i razumijevanju.

Marko Mikulec



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 24-02-2017 Prilog
Klasa: 602-04/17-6/4
Ur.broj: 15-1703-17-146

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Mikulec**

Mat. br.: 0035192527

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJE GLAVNOG REBRA TANKERA S DVOBOKOM PREMA HARMONIZIRANIM IACS CSR PRAVILIMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL DESIGN OF MIDSHIP SECTION OF DOUBLE HULL OIL TANKER ACCORDING TO HARMONIZED IACS CSR RULES**

Opis zadatka:

Projektirati konstrukcijske elemente glavnog rebra broda za prijevoz tekućeg tereta dimenzija ($L_{rule}=176,7$ m, $B=35,0$ m, $T=12,6$ m, $V=15,5$ čv, $C_B=0,76$ i nosivosti oko 50 000 t), prema usuglašenim IACS Pravilima (H-CSR BC&OT) i priloženom predlošku geometrije glavnog rebra.

U radu je potrebno :

- 1) Analizirati dostupnu literaturu i upoznati se s IACS Pravilima H-CSR BC&OT 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.
- 5) Izraditi nacrt predložene varijante glavnog rebra sa svim relevantnim značajkama (geometrija, konstrukcijske dimenzije, itd.)

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

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.....	2
2.2. Projekti parametri.....	4
2.3. Projektna ograničenja.....	4
2.3.1. Lokalna čvrstoća	5
2.3.2. Granična čvrstoća.....	6
2.3.3. Zamorna čvrstoća.....	9
3. DEFINIRANJE VARIJANTI KONSTRUKCIJE	11
3.1. Definiranje modela u MARS-u	11
3.1.1. Osnovni podaci o brodu	12
3.1.2. Zadavne opterećenja	12
3.1.3. Odabir materijala.....	13
3.1.4. Lokacije rebara.....	15
3.1.5. Zadavanje panela.....	15
3.1.6. Zadavanje čvorova	16
3.1.7. Zadavanje vojeva	17
3.1.8. Zadavanje uzdužnjaka.....	18
4. ANALIZA REZULTATA	20
4.1. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 725 \text{ mm}$	22
4.2. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 775 \text{ mm}$	24
4.3. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 830 \text{ mm}$	26
4.4. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 885 \text{ mm}$	28
4.5. Skupni rezultati	30
5. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	35
PRILOZI.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Lokalna čvrstoća panela u MARS-u	5
Slika 2.	Lokalna čvrstoća uzdužnjaka u MARS-u.....	6
Slika 3.	Granično stanje nosivosti razmatranog elementa konstrukcije [2]	7
Slika 4.	$M - \chi$ dijagram [3]	8
Slika 5.	Granični moment savijanja u MARS-u	9
Slika 6.	Dinamička izdržljivost u MARS-u.....	10
Slika 7.	Osnovni podaci o brodu u MARS-u.....	12
Slika 8.	Zadavanje opterećenja u MARS-u	12
Slika 9.	Odabir materijala u MARS-u	13
Slika 10.	Zone upotrebe čelika povišene čvrstoće.....	14
Slika 11.	Lokacije rebara u MARS-u	15
Slika 12.	Definiranje panela u MARS-u.....	16
Slika 13.	Definiranje čvorova u MARS-u	17
Slika 14.	Definiranje vojeva u MARS-u	18
Slika 15.	Definiranje uzdužnjaka u MARS-u.....	19
Slika 16.	Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=725$ mm	22
Slika 17.	Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=725$ mm	23
Slika 18.	Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=775$ mm	24
Slika 19.	Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=775$ mm	25
Slika 20.	Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=830$ mm	26
Slika 21.	Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=830$ mm	27
Slika 22.	Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=885$ mm	28
Slika 23.	Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=885$ mm	29
Slika 24.	Senzitivnost mase na promjenu razmaka okvira	31
Slika 25.	Senzitivnost mase na promjenu razmaka udzužnjaka	31
Slika 26.	Odzivna ploha mase	32
Slika 27.	Odzivna ploha faktora η_{MU}	32
Slika 28.	Odzivna ploha faktora η_W	33
Slika 29.	Optimizacija na temelju odzivne plohe mase	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije i masa poprečnih elemenata okvira.....	3
Tablica 2. Dimenzije i masa vertikalnih ukrepa.....	3
Tablica 3. Ukupna masa poprečne strukture karakterističnog okvira	3
Tablica 4. Varijante konstrukcije	11
Tablica 5. Varijacija mase karakterističnog okvira.....	20
Tablica 6. Ukupna masa referentnog modela	21
Tablica 7. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za referentni model	21
Tablica 8. Ukupna masa za $s=725$ mm.....	22
Tablica 9. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=725$ mm.....	22
Tablica 10. Ukupna masa za $s=775$ mm.....	24
Tablica 11. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=775$ mm.....	24
Tablica 12. Ukupna masa za $s=830$ mm.....	26
Tablica 13. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=830$ mm.....	26
Tablica 14. Ukupna masa za $s=885$ mm.....	28
Tablica 15. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=885$ mm.....	28
Tablica 16. Ukupna masa svih varijanti	30
Tablica 17. Varijante poredane po ukupnoj masi.....	30

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1 Optimalna geometrija glavnog rebra
- 2 Dimenzije konstrukcijskih elemenata optimalne varijante

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{rule}	[m]	računska duljina broda
B	[m]	širina broda
T	[m]	gaz broda
V	[čv]	brzina broda
s	[mm]	razmak uzdužnjaka
w	[mm]	razmak okvira
M_{sw-U}	[kNm]	moment savijanja na mirnoj vodi
M_{wv}	[kNm]	moment savijanja na valovima
M_U	[kNm]	granični moment savijanja
γ_S		parcijalni faktor sigurnosti savijanja na mirnoj vodi
γ_W		parcijalni faktor sigurnosti savijanja na valovima
γ_R		parcijalni faktor sigurnosti graničnog momenta savijanja
χ_i		zakrivljenost presjeka
χ_{max}		maksimalna zakrivljenost presjeka
E	[N/mm ²]	Youngov modul elastičnosti
$\rho_{\check{c}}$	[t/m ³]	gustoća čelika
η_W		faktor iskoristivosti momenta otpora
η_{M_U}		faktor iskoristivosti graničnog momenta
W_{rule}	[m ³]	minimalni moment otpora prema Pravilima
W_{actual}	[m ³]	postignuti moment otpora
M_b	[kNm]	vertikalni moment savijanja
L_C	[m]	duljina teretnog prostora
A_x	[m ²]	površina poprečnog presjeka

SAŽETAK

Kroz ovaj rad provedena je analiza utjecaja dvaju projektnih parametara (razmak uzdužnjaka i razmak okvira) na masu konstrukcije tankera s dvobokom s ciljem dobivanja optimalnog razmještaja uzdužno nosivih elemenata konstrukcije.

Na temelju referentnog modela, izrađeno je dodatnih 16 varijanti pri čemu su korištene različite kombinacije razmaka okvira i razmaka uzdužnih elemenata. Kako bi se osigurala relevantnost usporedbe različitih varijanti, nužno je bilo dimenzionirati konstrukcijske elemente tako da svi kriteriji čvrstoće budu zadovoljeni. Dimenzioniranje elemenata konstrukcije provedeno je pomoću programa MARS klasifikacijskog društva BV, prema usuglašenim IACS Pravilima (H-CSR BC&OT) koja su stupila na snagu 01. srpnja 2015. godine.

Dobiveni rezultati uspoređeni su s obzirom na postignutu masu konstrukcije, moment otpora i moment tromosti glavnog rebra te postignuti granični moment savijanja, na temelju čega su predloženi optimalni parametri konstrukcije.

Ključne riječi: konceptualna faza višekriterijskog projektiranja, brodska konstrukcija, projektni parametri, razmak uzdužnjaka, razmak okvira, granični moment savijanja, tanker s dvobokom, harmonizirana IACS CSR Pravila

SUMMARY

Through this paper study analysis of influence of two design parameters (longitudinals spacing and web frame spacing) on construction mass of double hull oil tanker has been performed.

Based on reference model, 16 additional variants have been made using different combinations of web frame spacing and spacing between longitudinals. To assure relevance of comparing the different variations, it was necessary to define the dimensions of construction elements so that all the strength criteria are met. Defining of the construction elements was conducted using software MARS, provided by classification society BV, in accordance to harmonized IACS Rules (H-CSR BC&OT) which came into force on first of July 2015.

Obtained results have been compared by construction mass, section modulus, moment of inertia and ultimate bending moment of midship cross section. Based on that comparison, the optimal construction parameters were proposed.

Key words: concept design procedure, ship construction, project parameters, spacing between longitudinals, web frame spacing, ultimate bending moment, double hull tanker, harmonized IACS CSR Rules

1. UVOD

Ekonomski i ekološki aspekti gradnje i eksploatacije brodova za prijevoz ljudi i dobara uvjetuju sve izraženije zahtjeve za smanjenjem potrošnje i materijala, odnosno za definiranjem racionalnijih i ekonomičnijih projektnih varijanti [1]. Upravo to doprinosi važnosti konceptualne faze projektiranja u kojoj se donosi najveći dio odluka koje utječu na ukupne troškove proizvoda. S obzirom na dinamičnost i konkurentnost tržišta, projektanti moraju u relativno kratkom vremenu generirati nekoliko varijanti brodske konstrukcije s osnovnim naznakama raspodjele glavnih podstruktura i nosivih elemenata buduće konstrukcije.

U uvodnom poglavlju dan je kratki osvrt na razmatrani problem i motivacija za završni rad te pregled rada po poglavljima.

U drugom poglavlju dana je definicija projektnog zadatka. Definirani su rasponi korištenih projektnih parametara, te projektna ograničenja u sklopu harmoniziranih IACS Pravila.

U trećem poglavlju prikazan je postupak definiranja i promjene dimenzija konstrukcijskih elemenata unutar programa MARS.

U četvrtom poglavlju predloženi su rezultati proračuna provedenih u programu MARS za 16 varijanti konstrukcije. Rezultati su uspoređeni s obzirom na postignutu masu konstrukcije, moment otpora i moment tromosti glavnog rebra te postignuti granični moment savijanja.

U petom poglavlju izveden je zaključak na temelju dobivenih rezultata i predloženi su optimalni projektni parametri konstrukcije.

2. PROJEKTNI ZADATAK

U sklopu projektnog zadatka potrebno je projektirati konstrukcijske elemente glavnog rebra broda za prijevoz tekućeg tereta sljedećih dimenzija:

- $L_{Rule} = 176,7$ m
- $B = 35,0$ m
- $T = 12,6$ m
- $V = 15,5$ čv
- Nosivosti oko 50 000 t

Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata provodi se prema harmoniziranim IACS Pravilima (H-CSR BC&OT) koja su rezultat dugogodišnjeg rada IACS-a na unaprijeđenju pouzdanosti i sigurnosti brodskih konstrukcija. Harmonizirana IACS pravila stupila su na snagu 01. srpnja 2015. godine i vrijede za sva klasifikacijska društva.

Svrha projektnog zadatka je stjecanje uvida u ovisnost ukupne mase konstrukcije s obzirom na promjenu razmaka uzdužnih elemenata i razmaka okvira. Rezultat analize optimalni su projektni parametri koji rezultiraju minimalnom masom konstrukcije uz zadovoljenje projektnih ograničenja. S obzirom da je u sklopu MARS-a moguće dimenzionirati samo uzdužne elemente, potrebno je izvršiti procjenu mase poprečne strukture. Masa pojedinog okvira izračunata je na temelju referentnog modela i korištena je pri usporedbi različitih varijanti kako bi se očuvala relevantnost usporedbe rezultata.

2.1. Referentni model

Polazna geometrija glavnog rebra definirana je u programu MARS klasifikacijskog društva BV, a vrijednosti projektnih varijabli su kako slijedi:

$s = 825$ mm - razmak uzdužnjaka

$w = 3240$ mm - razmak okvirnih rebara

Dimenzije svih poprečnih elemenata korištenih za aproksimaciju mase jednog okvira dane su u sljedećim tablicama:

Element	Površina [m ²]	Debljina [mm]	Masa [t]
Okvir tunelske kobilice	1.69	14.0	0.19
Okvir donje stule	1.95	14.5	0.22
Rebrenica	5.07	15.5	0.62
	20.30	14.0	2.23
Okvir uzvojnog tanka	13.92	13.0	1.42
Okvir boka	11.31	14.0	1.24
	11.31	12.5	1.11
	6.17	12.5	0.61
Ukupno:			7.63

Tablica 1. Dimenzije i masa poprečnih elemenata okvira

Ukrepa	Površina [m ²]	Duljina [m]	Količina	Masa [t]
FB 150x12, dvodno	0.0018	1.45	14	0.29
FB 150x12, uzvojni tank	0.0018	1.72	7	0.17
FB 150x12, dvobok	0.0018	1.42	12	0.24
FB 150x12, gornji balastni tank	0.0018	1.72	5	0.12
FB 150x12, paluba	0.0018	1.2	18	0.31
Sponja T 1500x13/300x30	0.0285	16	1	3.58
Ukupno:				4.70

Tablica 2. Dimenzije i masa vertikalnih ukrepa

Vrijednosti masa u tablicama 1. i 2. odnose se na poluširinu broda, a ukupna masa poprečne strukture za punu širinu broda prikazana je u sljedećoj tablici:

	Masa [t]	Udio [%]
Okvir	15.27	61.87
Ukrepe	9.41	38.13
Ukupno:	24.68	100

Tablica 3. Ukupna masa poprečne strukture karakterističnog okvira

2.2. Projekti parametri

Kao projekti parametri razmatrani su razmak uzdužnjaka i razmak okvira, s obzirom da promjena njihovih vrijednosti značajno utječe na dimenzije opločenja i uzdužnjaka čime dolazi do smanjenja, odnosno povećanja ukupne mase strukture. Po uzoru na referentnu geometriju, predložene su dodatne četiri varijante glavnog rebra s razmacima uzdužnjaka kako slijedi:

$$s_1 = 725 \text{ mm}$$

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

$$s_3 = 830 \text{ mm}$$

$$s_4 = 885 \text{ mm}$$

Pri definiranju gore navedenih varijanti glavnog rebra, velika pažnja bila je posvećena pronalaženju rješenja koje nema značajan utjecaj na geometriju balastnih tankova i tankova tereta, a razlike između koraka vrijednosti razmaka uzdužnjaka svedene su na minimalnu razinu kako bi usporedba rezultata bila relevantna.

Razmak okvira variran je s konstantim korakom, a pri izradi alternativnih modela korištene su sljedeće vrijednosti:

$$w_1 = 3000 \text{ mm}$$

$$w_2 = 3250 \text{ mm}$$

$$w_3 = 3500 \text{ mm}$$

$$w_4 = 3750 \text{ mm}$$

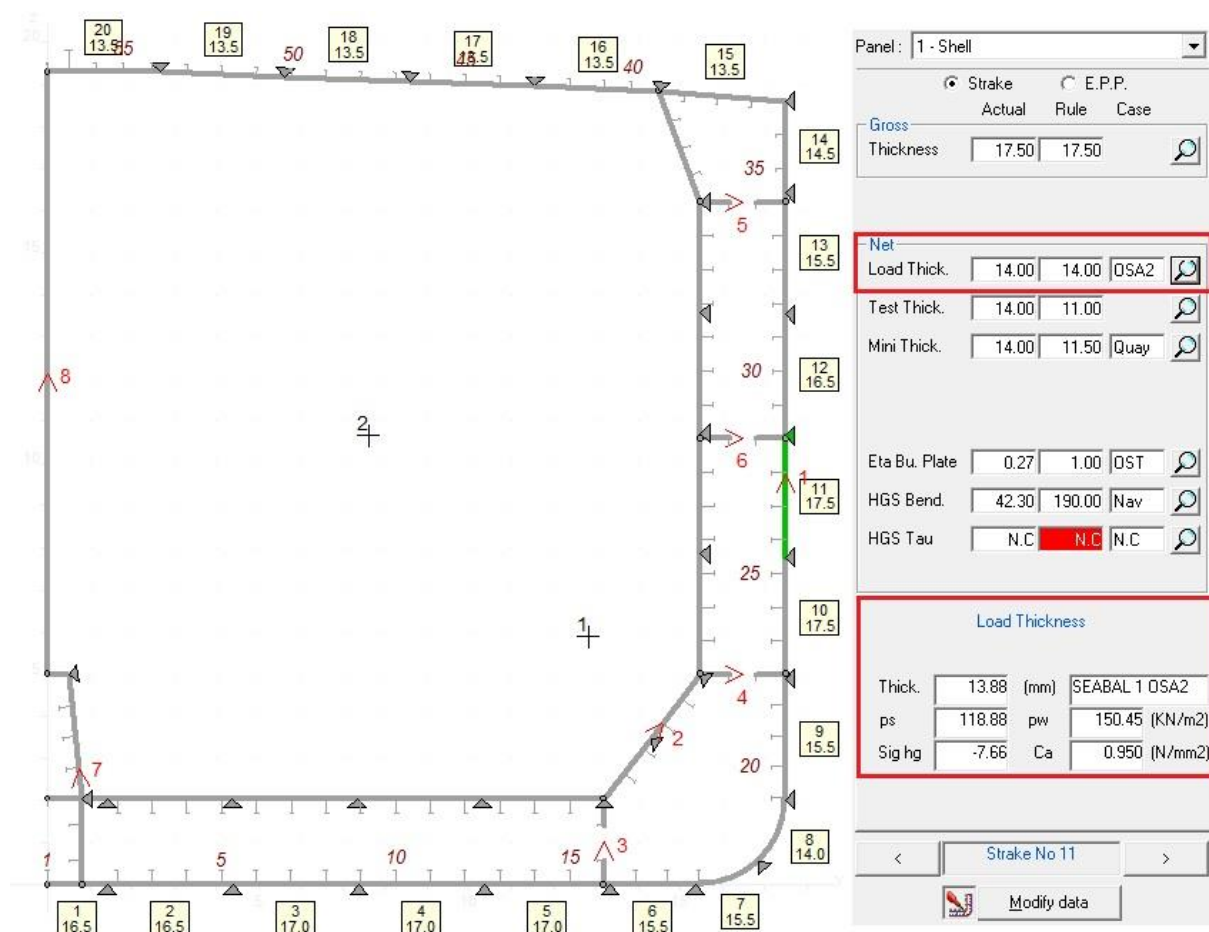
2.3. Projektna ograničenja

U postupku definiranja novih razmaka uzdužnjaka koji će se koristiti u daljnjoj analizi problema, bilo je nužno očuvati sličnosti karakterističnih dijelova konstrukcije u odnosu na referentni model. Pritom se primarno misli na raspored jakih uzdužnih nosača u dvodnu, te proveza u dvoboku s obzirom da njihov razmještaj direktno utječe na geometriju balastnih i teretnih tankova, a time i samu nosivost broda. Maksimalno odstupanje položaja jakog uzdužnog nosača u dvodnu, u odnosu na referentni model, iznosi 60 mm, dok je kod proveza najveće odstupanje 150 mm. Ove razlike predstavljaju zanemarivu vrijednost u odnosu na zadane dimenzije broda i možemo ih zanemariti prilikom usporedbe rezultata.

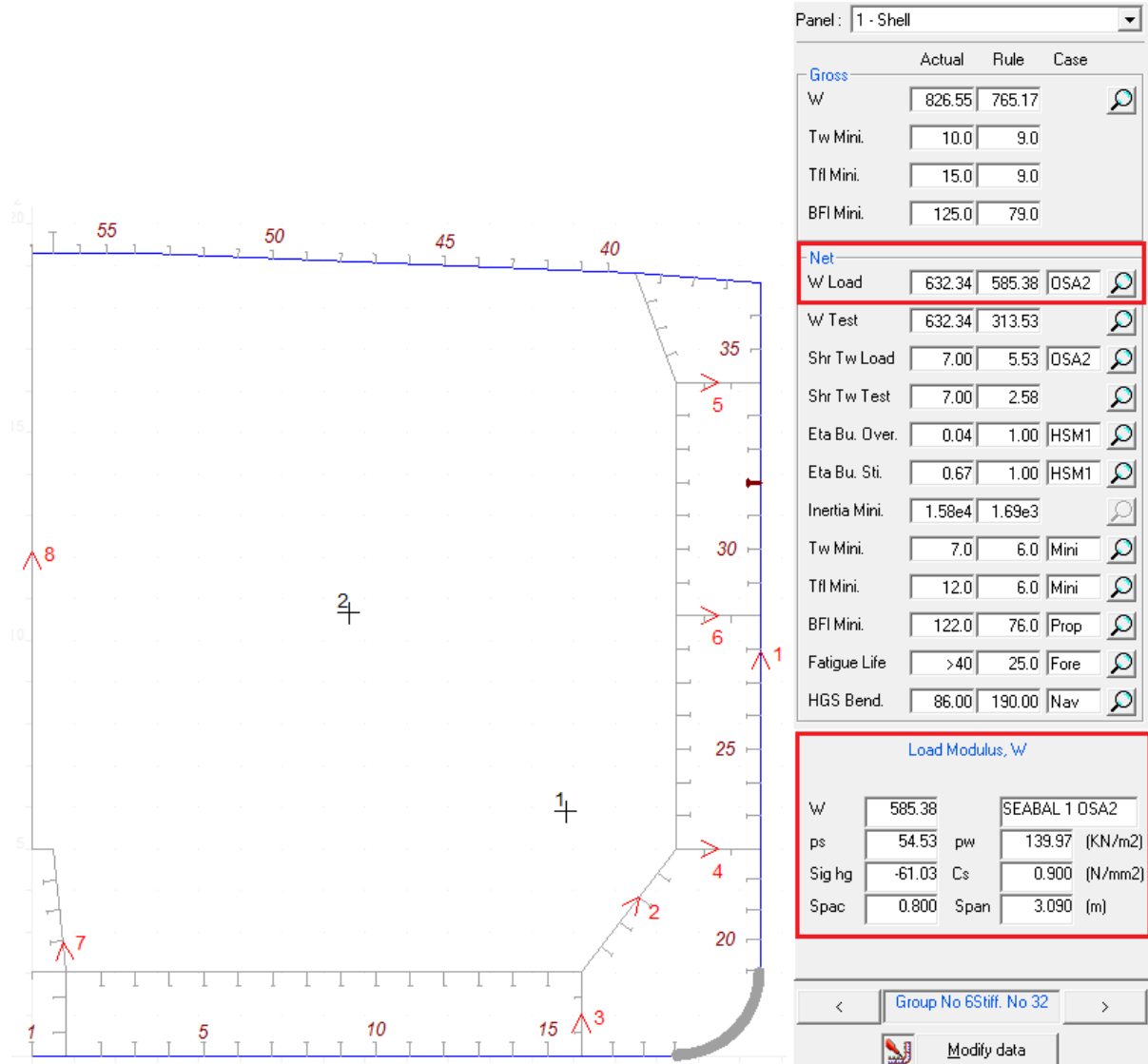
Osnova za međusobnu usporedbu različitih varijanti je zadovoljenje svih kriterija čvrstoće. Harmonizirana IACS Pravila prema kojima je proveden proračun iznimno su složene prirode, pa je za relativno brzo generiranje različitih projektnih varijanti nužno korištenje računalnog alata kao što je program MARS.

2.3.1. Lokalna čvrstoća

U sklopu proračuna lokalne čvrstoće provjerava se čvrstoća elemenata (opločenje, uzdužnjaci) s obzirom na lokalno uslijed djelovanja hidrostatskog tlaka, valova, težine tereta, težine opreme i sl. Proračun lokalne čvrstoće polazna je točka projektiranja konstrukcije s obzirom da daje početne dimenzije konstrukcijskih elemenata, na kojima se temelje sljedeće razine proračuna odziva brodske konstrukcije. Na slikama 1. i 2. prikazani su izbornici unutar MARS-a koji sadrže relevantne podatke (izračunate prema IACS Pravilima) za lokalnu čvrstoću panela i uzdužnjaka.



Slika 1. Lokalna čvrstoća panela u MARS-u

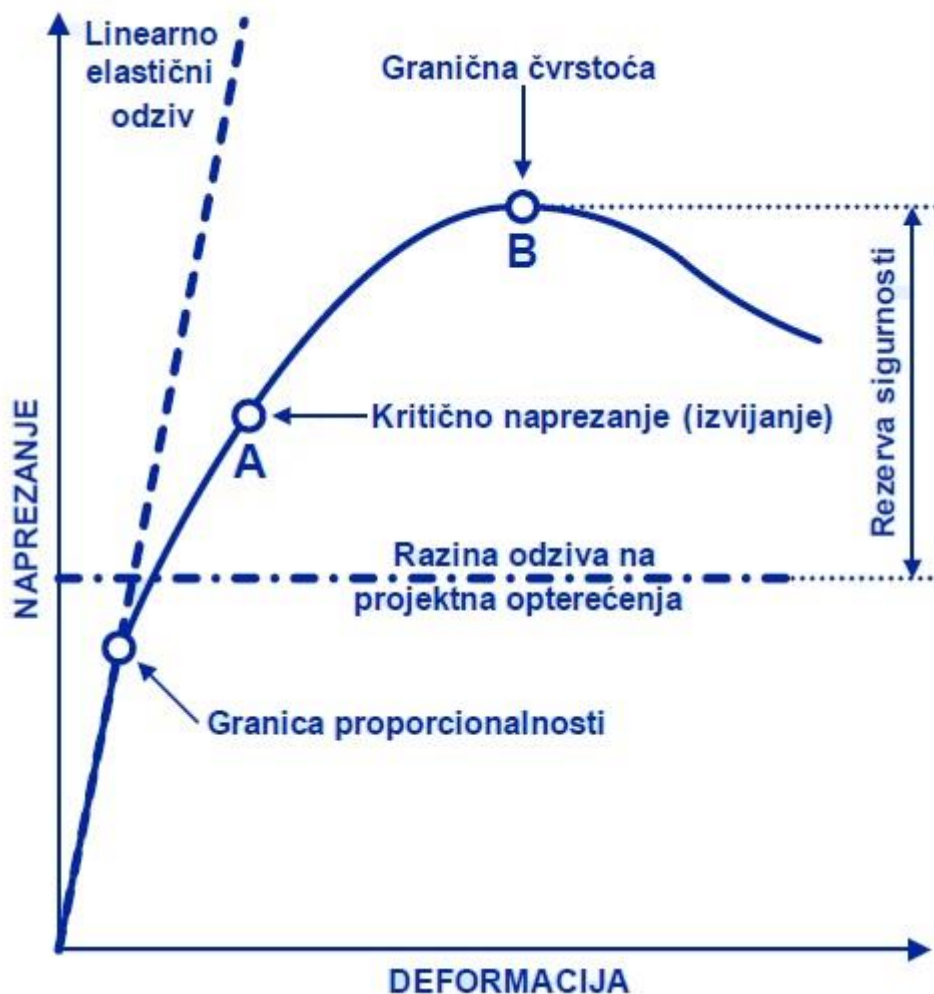


Slika 2. Lokalna čvrstoća uzdužnjaka u MARS-u

2.3.2. Granična čvrstoća

Granično stanje nosivosti razmatra se kao kolaps konstrukcije progresivnim gubitkom nosivosti njenih sastavnih elemenata zbog nadilaženja njihove granične čvrstoće uslijed djelovanja ekstremnih opterećenja [2].

Granična nosivost izražava se u obliku graničnog momenta savijanja i može se smatrati najprikladnijom globalnom mjerom sigurnosti u konceptualnom višekriterijskom projektiranju brodske konstrukcije, vidi sliku 3.



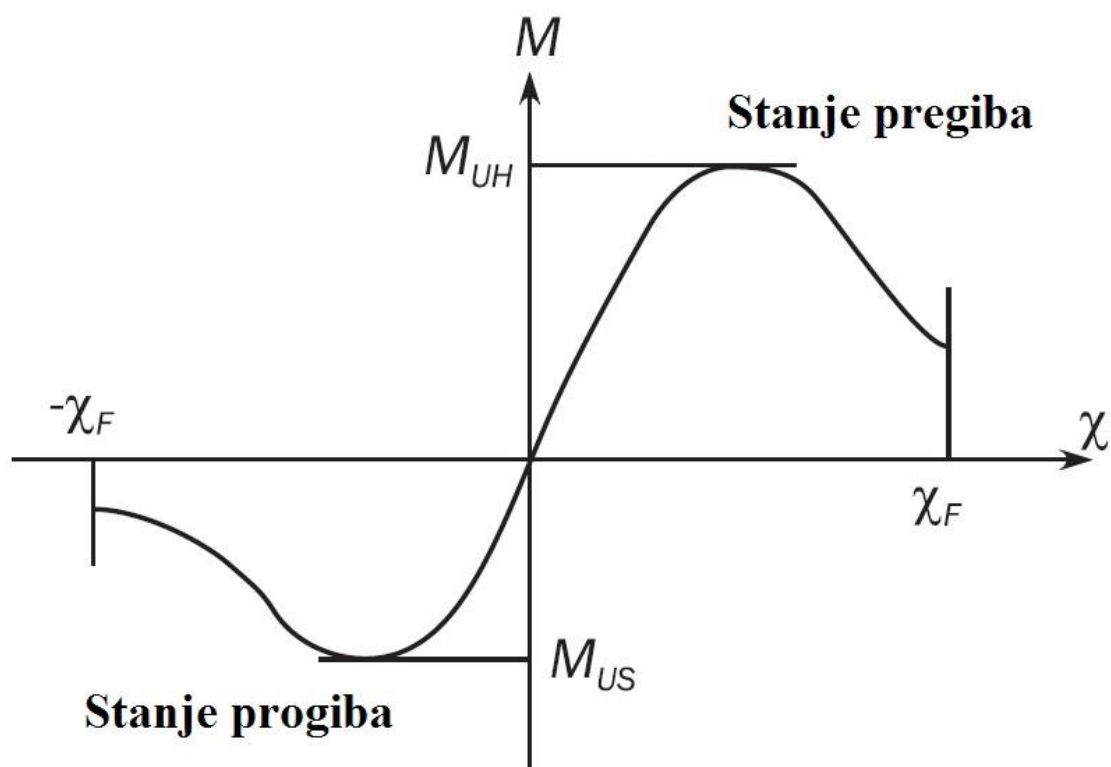
Slika 3. Granično stanje nosivosti razmatranog elementa konstrukcije [2]

Projektini kriterij vezan za graničnu čvrstoću konstrukcije prema Pravilima [3] glasi:

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

Vrijednost graničnog momenta određuje se pomoću inkrementalno-iterativne metode. U sklopu metode određuje se maksimalna očekivana zakrivljenost trupa χ_{max} koja se dijeli na konačni broj inkremenata. Za svaki inkrement računaju se deformacije uzrokovane narinutom zakrivljenošću χ_i , odgovarajuća naprezanja i uzdužne sile koje djeluju na presjek. Ukoliko suma uzdužnih sila nije jednaka nuli, odnosno nije zadovoljen uvjet ravnoteže, procedura iterativno pomiče neutralnu liniju sve dok se ne postigne ravnoteža presjeka. Nakon postizanja ravnoteže izračunava se ukupni moment savijanja koji odgovara narinutoj zakrivljenosti. Ovaj postupak ponavlja se sve dok zakrivljenost χ_i ne postigne maksimalnu vrijednost χ_{max} .

Rezultat inkrementalno iterativne metode je $M - \chi$ dijagram, odnosno skupa odzivnih točaka definiranim parovima vrijednosti momenata savijanja i zakrivljenosti presjeka. Nagib krivulje koja prolazi navedenim točkama predstavlja promjenu savojne krutosti presjeka. Točka u kojoj promjena savojne krutosti mijenja predznak interpretira se kao granična nosivost trupa, a odgovarajući moment naziva se graničnim momentom savijanja konstrukcije, slika 4. Granični moment proračunava se za pregibno i progibno stanje. Kod konstrukcije tankera obično je progibni moment znatno niži i predstavlja kritični slučaj s obzirom na zahtjev Pravila, vidi izraz (1). Slika 5. prikazuje rezultate proračuna graničnog momenta u MARS-u.



Slika 4. $M - \chi$ dijagram [3]

Hull girder strength criteria

Hull Girder Loads | Section Moduli | **Ultimate Strength** | Net/Gross Moduli | Residual Strength

Ultimate Bending Capacity (kN.m)
Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)

	Mu		Ultimate	Mb	%	
Hogging	6 186 654.	Navigation	5 112 937.	2 910 808.	56.93	Hogging
Sagging	- 4 437 065.		- 4 033 695.	- 2 792 428.	69.23	Sagging
		Harbour	5 112 937.	2 127 926.	41.62	Hogging
			- 4 033 695.	- 1 807 426.	44.81	Sagging
		Full Load Homogeneous				
			- 4 033 695.	- 2 145 138.	53.18	Sagging

The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin

Close

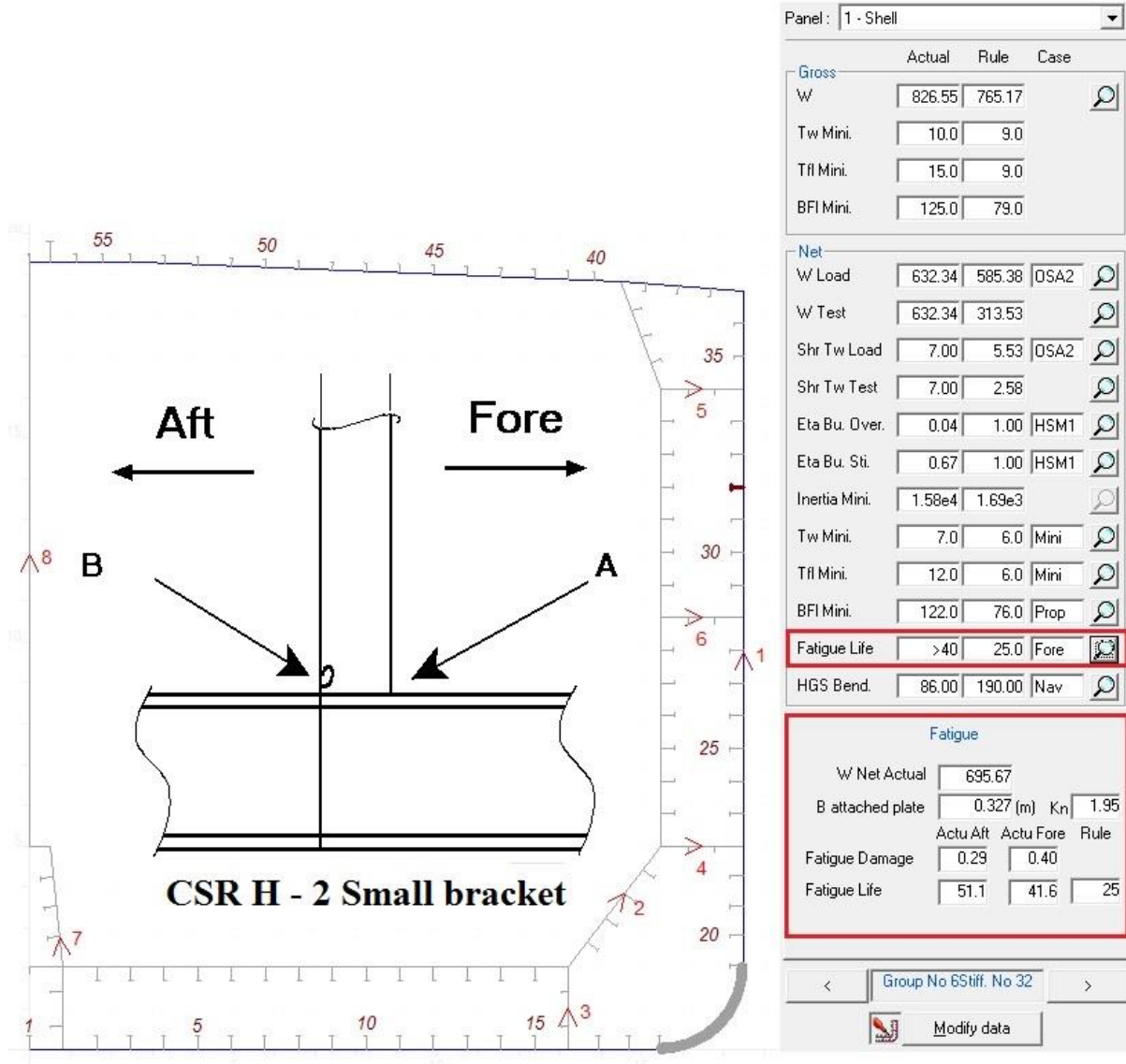
Slika 5. Granični moment savijanja u MARS-u

2.3.3. Zamorna čvrstoća

Zamor materijala je proces akumuliranja oštećenja, ciklus po ciklus, u materijalu koji uslijed izloženosti opterećenju doživljava promjenljiva naprezanja niža od granice razvlačenja. Do loma dolazi nakon određenog broja promjena opterećenja, kada akumulirano oštećenje dosegne kritičnu razinu, odnosno kada preostali dio poprečnog presjeka više ne može podnijeti opterećenje [4].

Otpornost konstrukcije prema takvom obliku oštećenja naziva se dinamička izdržljivost, a određuje se prema Palmgren-Minerovom pravilu [3]. Na slici 6. prikazan je izbornik u MARS-u koji prikazuje podatke vezane za dinamičku izdržljivost pojedinog elementa konstrukcije.

Kao glavna mjera povećanja zamorne čvrstoće preporučuje se bolje projektiranje osjetljivih konstrukcijskih detalja [4]. Lokalno povećanje naprezanja uslijed geometrijske konfiguracije detalja uzima se u obzir preko faktora geometrijske koncentracije naprezanja. Unutar MARS-a moguće je odabrati različite oblike detalja s već izračunatim faktorima koncentracije naprezanja. Dio izbornika u MARS-u koji se odnosi na zamor konstrukcije te korišteni detalj prikazani su na slici 6.



Slika 6. Dinamička izdržljivost u MARS-u

3. DEFINIRANJE VARIJANTI KONSTRUKCIJE

Kao što je navedeno u drugom poglavlju, 16 projektnih varijanti konstrukcije dobiveno je kombiniranjem različitih vrijednosti razmaka uzdužnjaka i razmaka okvira. U nastavku su, u tablici 4, dane kombinacije projektnih parametara koje su korištene u sklopu projektnog zadatka.

Model	Razmak uzdužnjaka [mm]	Razmak okvira [mm]
1	725	3000
2	725	3250
3	725	3500
4	725	3750
5	775	3000
6	775	3250
7	775	3500
8	775	3750
9	830	3000
10	830	3250
11	830	3500
12	830	3750
13	885	3000
14	885	3250
15	885	3500
16	885	3750

Tablica 4. Varijante konstrukcije

3.1. Definiranje modela u MARS-u

Iako su alternativni modeli bazirani na referentnom modelu i sukladno tome nije potrebno mijenjati neke od osnovnih (dimenzije broda, momenti savijanja na mirnoj vodi i sl.) kojima je konstrukcija definirana u MARS-u, u nastavku je prikazano sučelje unutar MARS-a gdje se ti parametri unose. Također su prikazani izbornici u kojima se provodi dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata. Nakon unosa početnih parametara modela, provodi se proračun i redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata koji ne zadovoljavaju projektna ograničenja. Postupak se ponavlja sve dok konstrukcija u potpunosti ne zadovolji IACS Pravila za sve kriterije čvrstoće (lokalne, globalne, zamor).

3.1.1. Osnovni podaci o brodu

Na sljedećoj slici prikazan je izbornik u kojemu je potrebno unijeti osnovne dimenzije broda, brzinu i nosivost te odabrati pravila prema kojima se vrši proračun.

Basic Ship Data 2000 - New Ship - MR TANKER CSR HARMONIZED SELECTED

File About Mars...

General

Notations & Main Data

Moments & Draughts

Materials

Frame Locations

Calculations & Print

Scantling of Oil Tanker CSR is checked according to CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers (Harmonized)

Notations:

Service: **Oil Tanker CSR**

Navigation: **Unrestricted navigation**

Apply CSR OT - Edition July 2012

Fore, central and aft parts (from AE):

After peak bulkhead: **9.100** m

Collision bulkhead: **169.180** m

Main dimensions:

Scantling length: **176.734** m

Breadth moulded: **35.000** m

Block coefficient: **0.760**

Maximum service speed: **15.5** Knots

Depths:

At strength deck: **18.600** m

At freeboard deck: **18.600** m

At top of continuous member: **19.800** m

CSR Harmonized:

Type B ship Type B Reduced freeboard or Type A ship

Freeboard Length L_{II} : **0.000** m

Distance from AE to EE_{II} : **0.000** m

Deadweight: **50000.0** t

Slika 7. Osnovni podaci o brodu u MARS-u

3.1.2. Zadavnje opterećenja

Opterećenja se zadaju za dva režima plovidbe: nakrcan brod i brod u balastu. Osim momenata savijanja na mirnoj vodu u pregibu i progibu, potrebno je unijeti projektni gaz i minimalni gaz kada brod plovu u balastu.

Basic Ship Data 2000 - New Ship - MR TANKER CSR HARMONIZED SELECTED

File About Mars...

General

Notations & Main Data

Moments & Draughts

Materials

Frame Locations

Calculations & Print

Scantling Ballast

Still Water Bending Moments:

Hogging condition: **1133650** kN.m

Sagging condition: **812300** kN.m

Ship:

Ship behavior: **Both Hogging / Sagging**

Min S.W.B.M. in Hogging condition: **0** kN.m

Draughts:

Scantling draught: **12.600** m

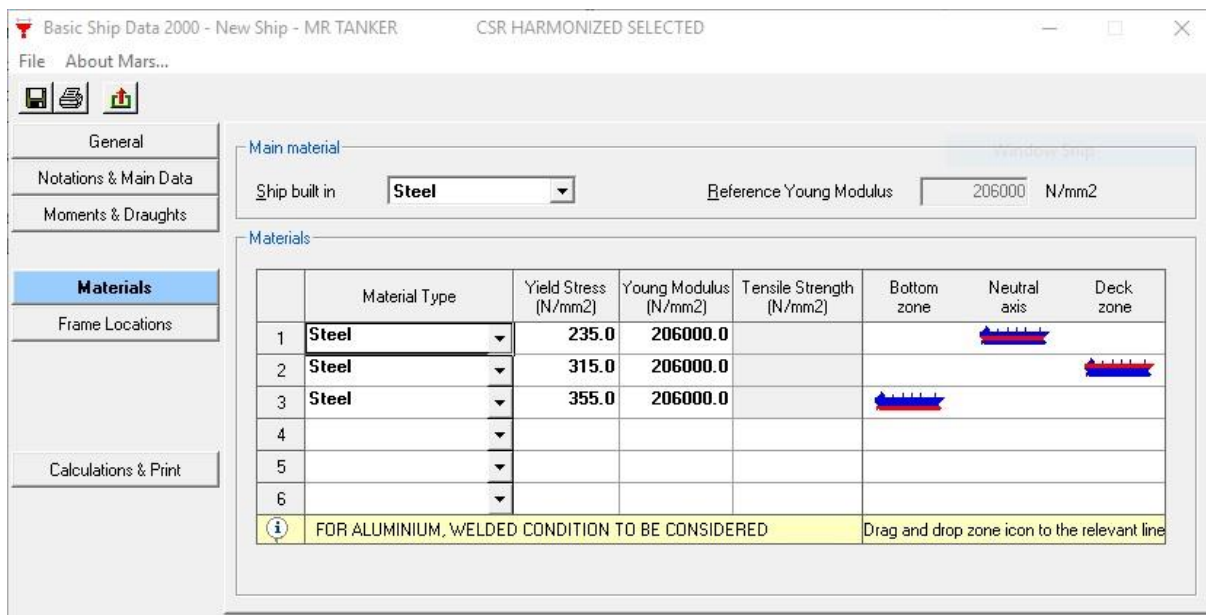
GM transverse metacentre: **0.000** m

Roll radius of giration (delta): **0.000** m

Slika 8. Zadavanje opterećenja u MARS-u

3.1.3. Odabir materijala

Potrebno je odabrati materijal koji će se koristiti u gradnji broda, pripadajuću granicu razvlačenja te područje primjene unutar konstrukcije. Youngov modul elastičnosti određen je prema [3] i iznosi $E=206000 \text{ N/mm}^2$. U području konstrukcije oko neutralne linije korišten je obični brodograđevni čelik dok su za dvodno i palubu, s obzirom na povećana naprezanja, korišteni čelici povišene čvrstoće.



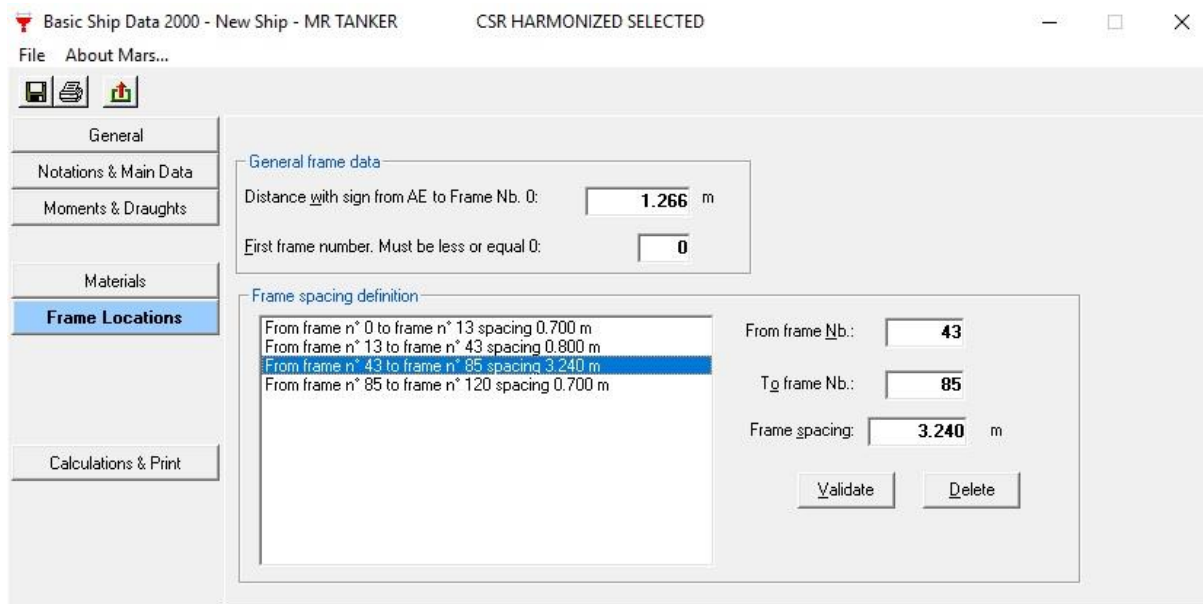
Slika 9. Odabir materijala u MARS-u



Slika 10. Zone upotrebe čelika povišene čvrstoće

Slika 10. prikazuje korištene vrste čelika i njihove zone primjene na referentnoj konstrukciji. Uvođenje materijala kao projektne varijable značajno bi utjecalo na složenost projektnog zadatka stoga je zadržana ista konfiguracija materijala za sve varijante konstrukcije.

3.1.4. Lokacije rebara

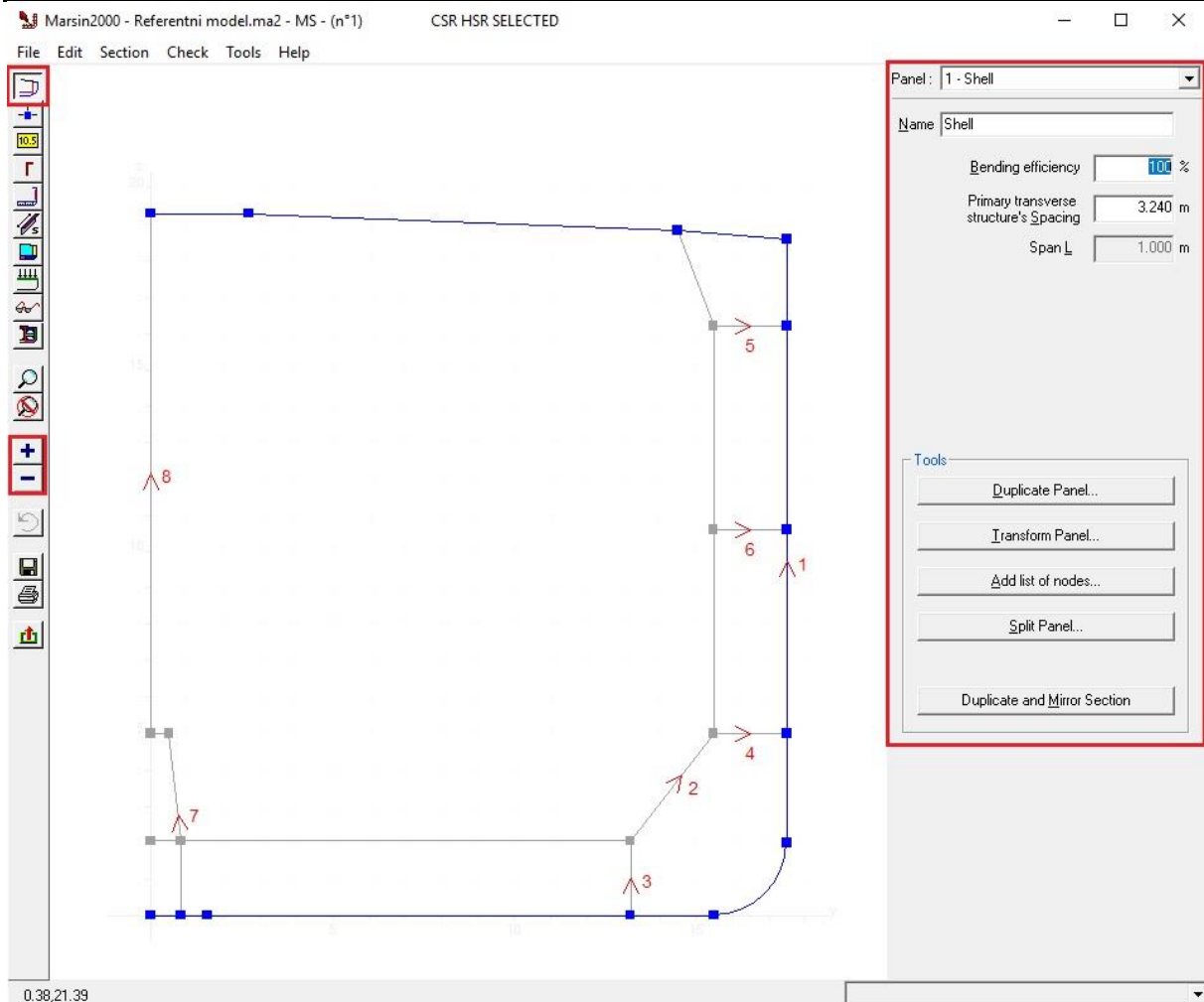


Slika 11. Lokacije rebara u MARS-u

Slika 11. prikazuje kako su definirani položaji rebara po zonama duž broda. Potrebno je naznačiti između kojih rebara se proteže pojedina zona i pripadajući razmak rebara odnosno okvira. Razmak okvira potrebno je definirati za svaki panel, bez obzira na vrijednost unesenu u gore prikazanom izborniku.

3.1.5. Zadavanje panela

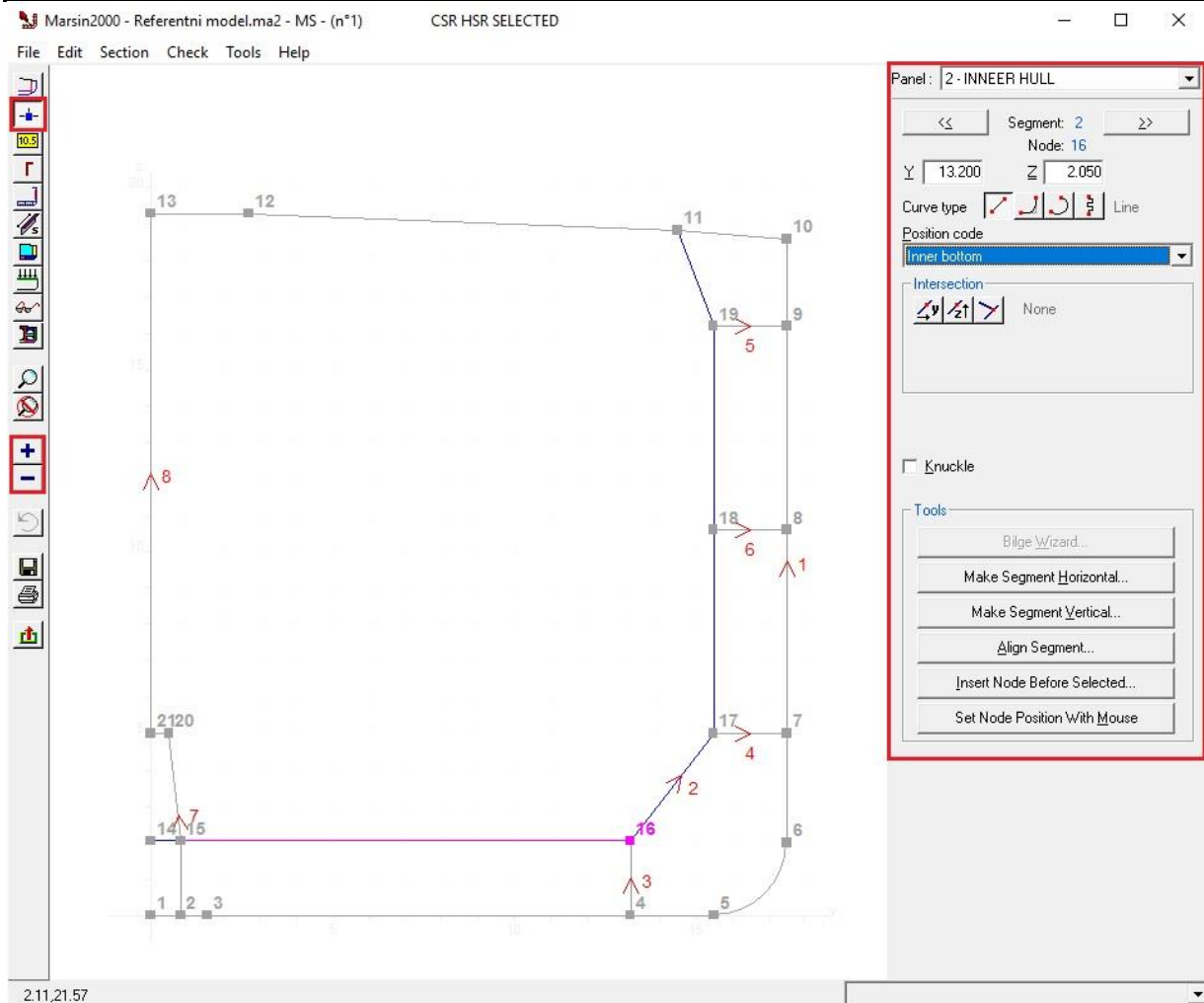
Nakon unosa osnovnih podataka o brodu, sljedeći korak u izradi modela je generiranje panela. Svaki panel određen je svojim poprečnim razmakom i efikasnošću kojom sudjeluje u savijanju. Panelima se na karakterističnim mjestima (npr. spojevi s provezama) pridružuju čvorovi, duljine vojeva i lokacije uzdužnjaka. Slika 12. prikazuje izbornik u MARS-u u kojem se definira pojedini panel.



Slika 12. Definiranje panela u MARS-u

3.1.6. Zadavanje čvorova

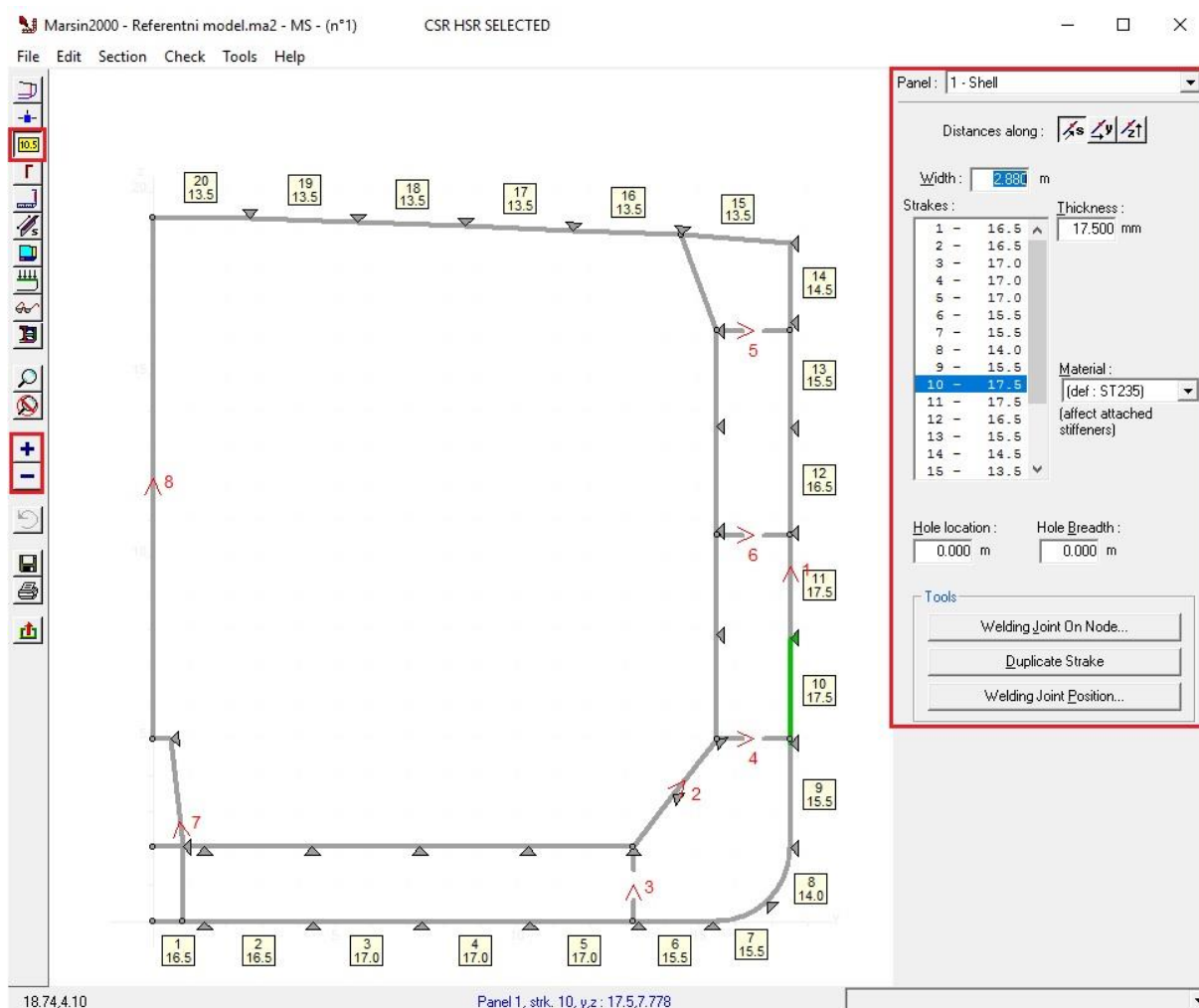
Čvorovi se su definirani pomoću Y i Z koordinata, i pripadaju pojedinim panelima, slika 13. Postavljaju se na karakterističnima mjestima u strukturi gdje se spajaju različiti elementi (npr. spoj proveze s vanjskom oplatom). Koriste se kao referentne točke za vojeve i uzdušnjake. Dijelovi panela između pojedinih čvorova nazivaju se segmenti i moraju imati pridruženu oznaku pozicije unutar strukture kako bi MARS- mogao primijeniti adekvatne izraze iz [3] pri izračunu minimalnih konstrukcijskih zahtjeva.



Slika 13. Definiranje čvorova u MARS-u

3.1.7. Zadavanje vojeva

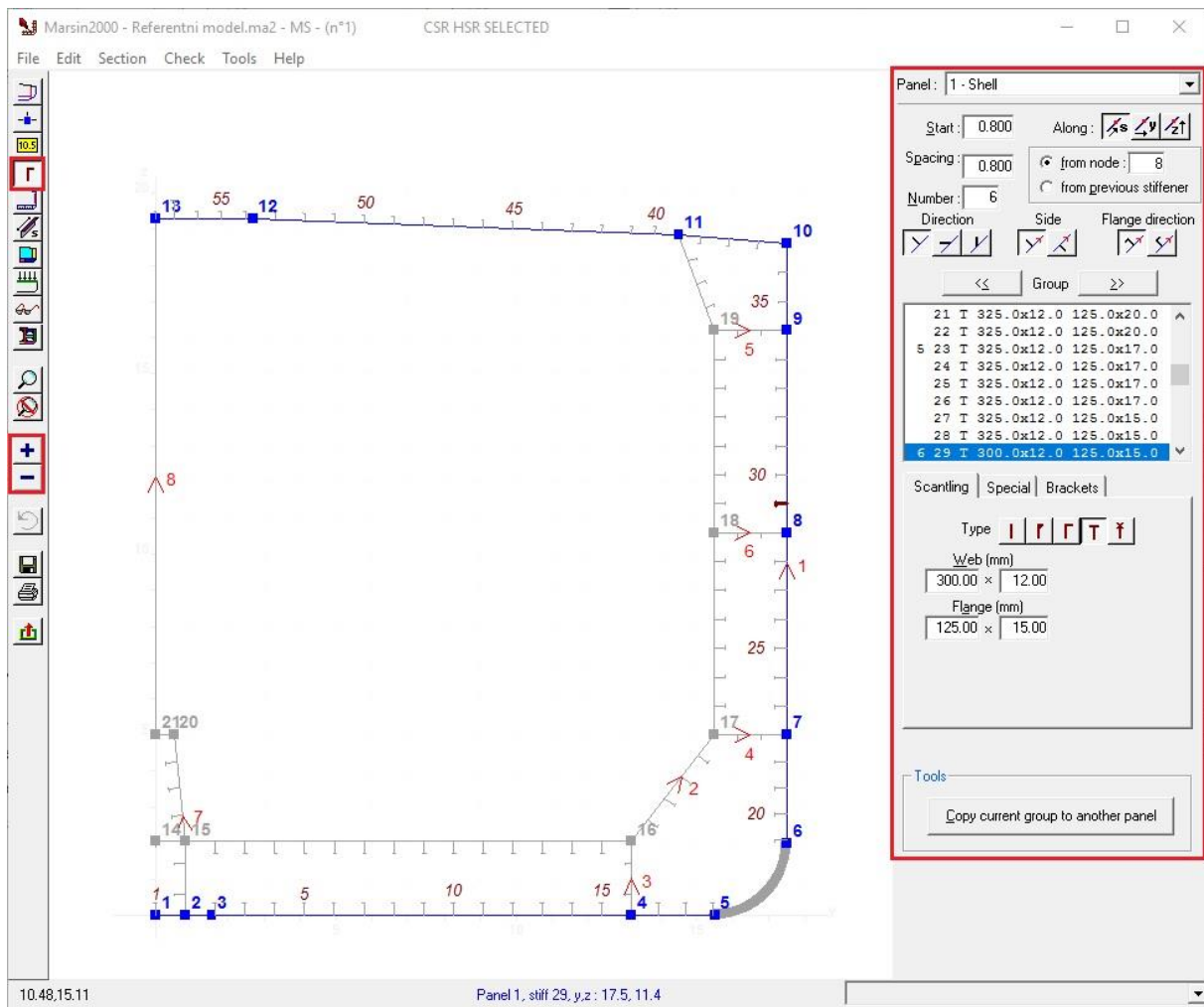
Vojevi unutar pojedinog panela određeni su svojom širinom, debljinom i materijalom, slika 14. Prilikom zadavanja širine vojeva treba imati na umu ograničenja u sklopu tehnologije gradnje broda. Materijal voja direktno određuje i materijal pridruženih uzdušnjaka. Promjena debljine izvodi se jednostavnim unošenjem nove vrijednosti debljine.



Slika 14. Definiranje vojeva u MARS-u

3.1.8. Zadavanje uzdužnjaka

Uzdužnjaci se zadaju za svaki panel posebno i razvrstavaju se u grupe uzdužnjaka s istim dimenzijama i međusobnim razmakom. Grupe se mogu nastavljati direktno na prethodnu ili mogu započinjati na odabranim čvorovima. Uzdužnjaci su definirani smjerom, orijentacijom i tipom. Prilikom projektiranja referentnog modela korišteni su T i L profili, a isti su zadržani i na alternativnim modelima.



Slika 15. Definiranje uzdužnjaka u MARS-u

4. ANALIZA REZULTATA

Rezultati su radi preglednosti podijeljeni na pet dijelova. U prva četiri prikazani su rezultati za varijante koje imaju jednaki razmak između uzdužnjaka, dok su u posljednjem dijelu uspoređeni rezultati svih 16 varijanti.

Za izračun ukupne mase konstrukcije korištena je duljina skladišnog prostora $L_c = 70 \text{ m}$ i gustoća čelika $\rho_c = 7,85 \text{ t/m}^3$. Broj okvira dobiven je dijeljenjem duljine skladišnog prostora s razmakom okvira, a dobivena vrijednost nije zaokruživana na cijeli broj. Varijante su uspoređivane na temelju postignute mase, momenta otpora na palubi i graničnog momenta savijanja (za najgori slučaj opterećenja), a prikazani su i udjeli površina poprečnog presjeka uzdužnjaka i opločenja u ukupnoj površini poprečnog presjeka. Moment otpora na palubi prikazan je kao faktor iskoristivosti η_W , a granični moment savijanja kao faktor iskoristivosti η_{M_U} , vidi tablicu 7. i 8. za varijante $s=725 \text{ mm}$. Vrijednost faktora iskoristivosti η_W i η_{M_U} određena je izrazima (2) i (3) i izražava se u postotcima.

$$\eta_W = \frac{W_{rule}}{W_{actual}} \quad (2)$$

$$\eta_{M_U} = \frac{M_b}{M_U} \quad (3)$$

Za izračun s jednakim razmakom između uzdužnjaka grafički je prikazana ovisnost mase o razmaku okvira uz varijaciju procjenjenje mase okvira $\pm 10\%$, vidi tablicu 5. i sliku 16. za varijante $s=725 \text{ mm}$.

Okvir	Masa [t]
Referentni	24.7
Smanjenje 10%	22.2
Povećanje 10%	27.1

Tablica 5. Varijacija mase karakterističnog okvira

Kao svojevrsan dokaz da su sve varijante podjednako zadovoljene, dan je usporedbi prikaz iskoristivosti uzdužnjaka u MARS-u, vidi sliku 17. za varijante $s=725 \text{ mm}$. Rezultati su prikazani na isti način za sve analizirane varijante.

U posljednjem dijelu tablično su uspoređeni svi dobiveni rezultati s obzirom na postignutu masu konstrukcije, vidi tablice 16. i 17. Ovdje se pomoću grafova nastojalo prikazati koji od dvaju odabranih projektnih parametara značajnije utječe na ukupnu masu konstrukcije. Na kraju s pomoću programa Design Expert dobivene odzivne plohe koje prikazuju rezultate u tri dimenzije.

Tablice 5. i 6. prikazuju rezultate referentnog modela.

Razmak okvira [mm]	A_x [m ²]	Uzdužni materijal [t]	Broj okvira	Poprečni materijal [t]	Ukupna masa [t]
3240	4,37	2402,9	22,6	557,8	2960,7

Tablica 6. Ukupna masa referentnog modela

Površina [m ²]		η_{M_U} [%]	η_W [%]
Opločenje	Uzdužnjaci		
3,24	1,14	69,23	62,72

Tablica 7. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za referentni model

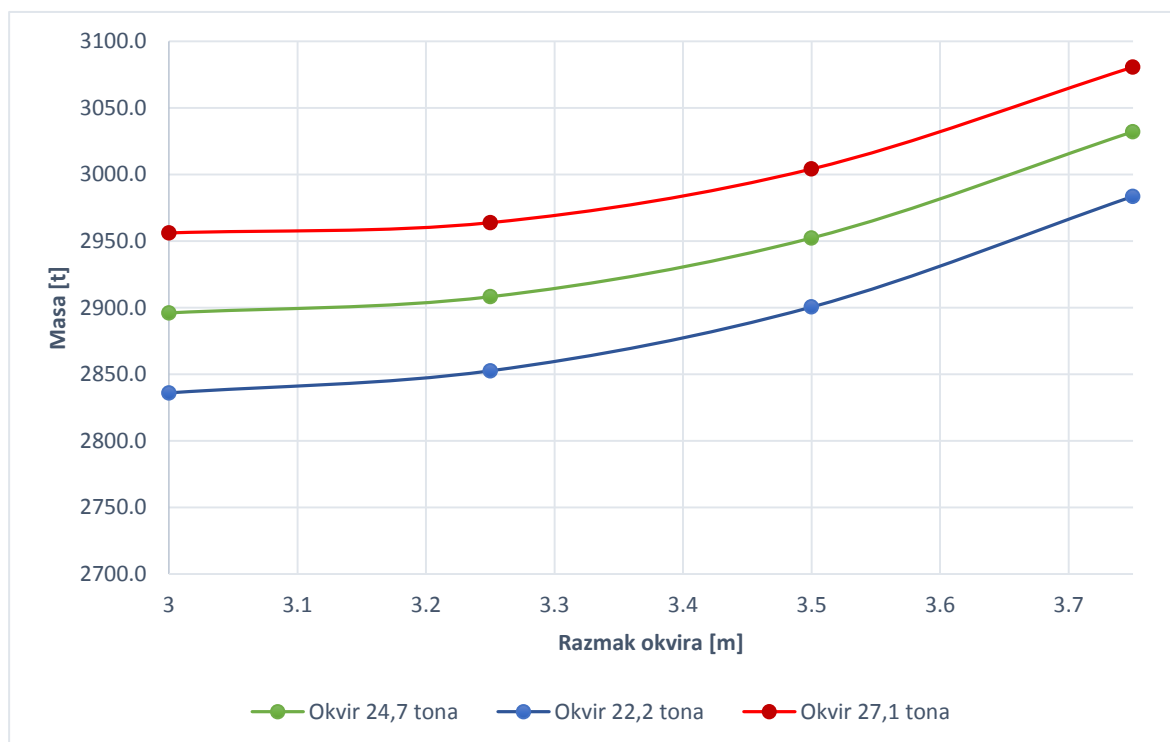
4.1. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 725 \text{ mm}$

Razmak okvira [mm]	$A_x \text{ [m}^2\text{]}$	Uzdužni materijal [t]	Broj okvira	Poprečni materijal [t]	Ukupna masa [t]
3000	4.18	2295.5	24.3	600.5	2896.0
3250	4.28	2352.0	22.5	556.2	2908.1
3500	4.43	2434.0	21.0	518.2	2952.2
3750	4.63	2546.7	19.7	485.3	3032.0

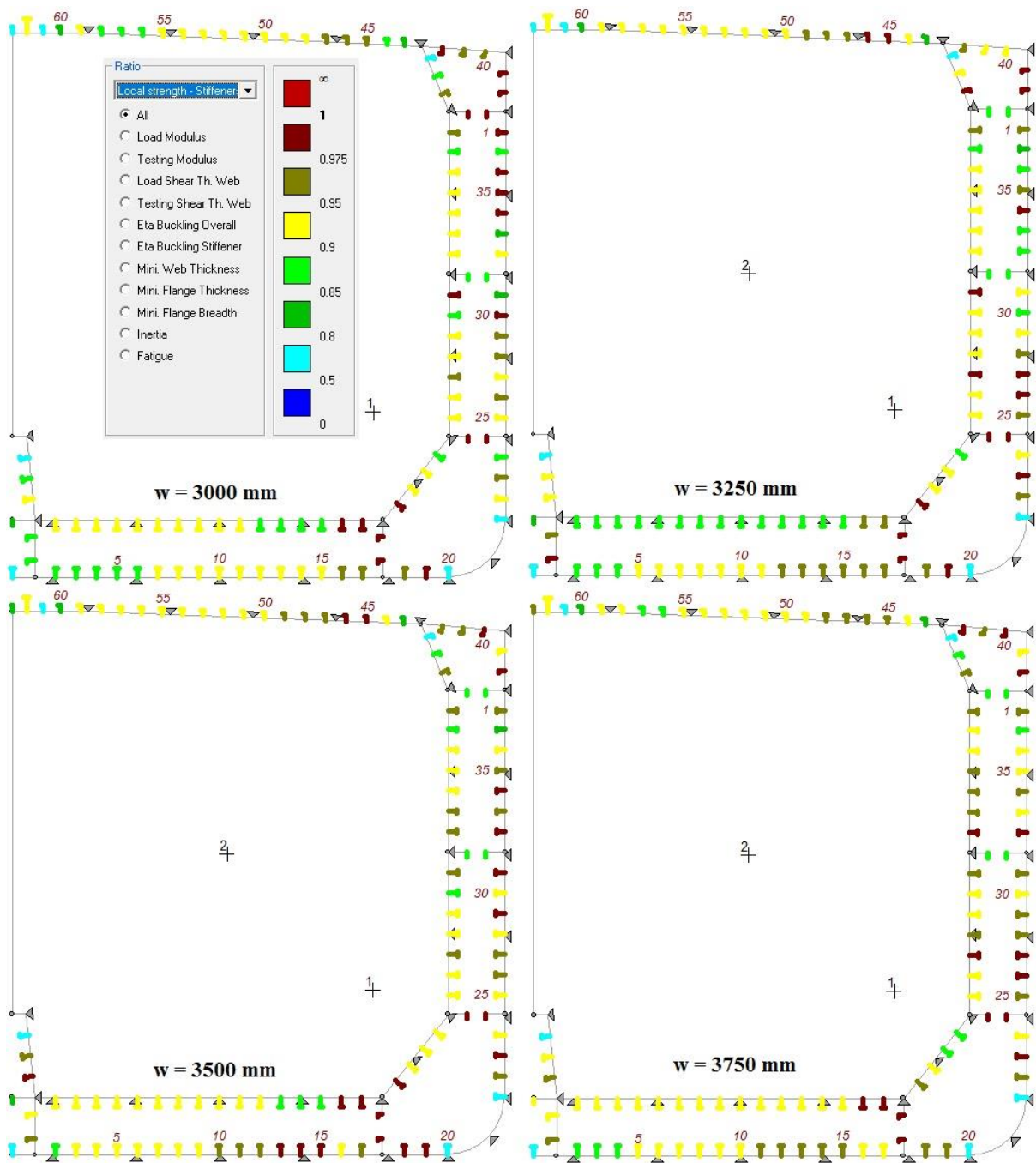
Tablica 8. Ukupna masa za $s=725 \text{ mm}$

Površina [m ²]		η_{M_U} [%]	η_W [%]
Oploćenje	Uzdužnjaci		
3.06	1.11	73.31	67.02
3.06	1.22	70.64	64.67
3.06	1.36	67.61	61.88
3.07	1.57	64.64	59.56

Tablica 9. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=725 \text{ mm}$



Slika 16. Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=725 \text{ mm}$



Slika 17. Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=725 \text{ mm}$

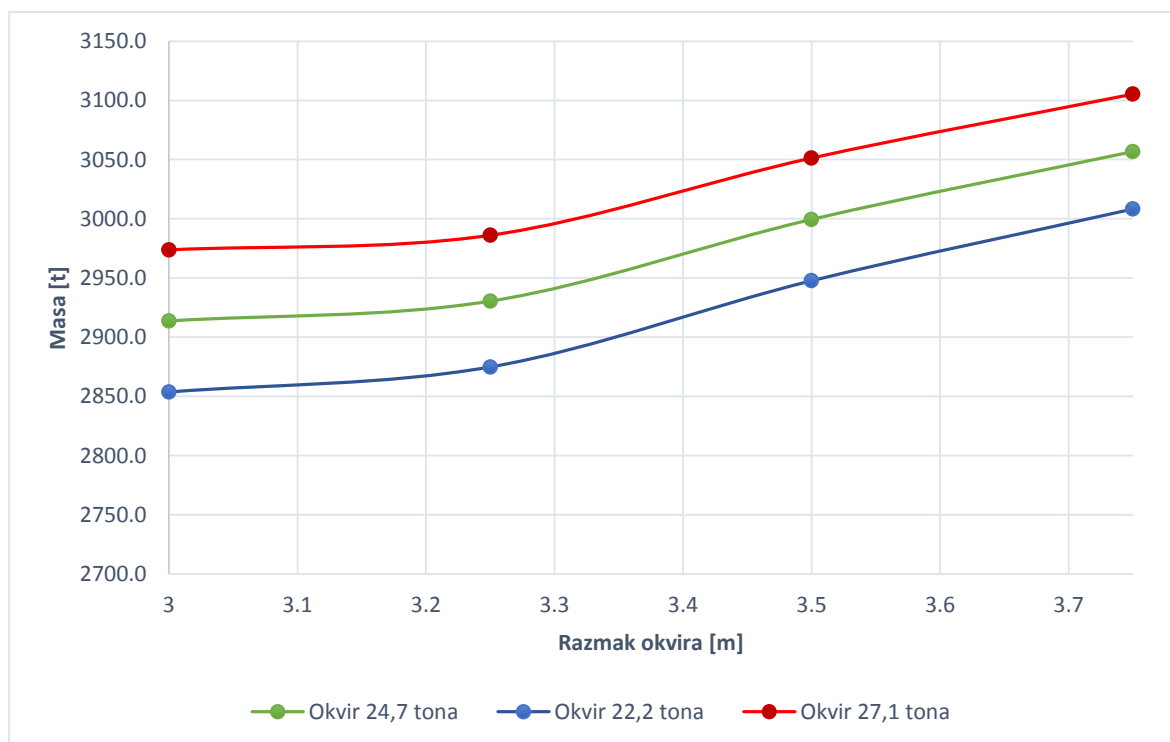
4.2. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 775 \text{ mm}$

Razmak okvira [mm]	$A_x \text{ [m}^2\text{]}$	Uzdužni materijal [t]	Broj okvira	Poprečni materijal [t]	Ukupna masa [t]
3000	4.21	2313.3	24.3	600.5	2913.7
3250	4.32	2374.3	22.5	556.2	2930.5
3500	4.52	2481.3	21.0	518.2	2999.5
3750	4.68	2571.5	19.7	485.3	3056.8

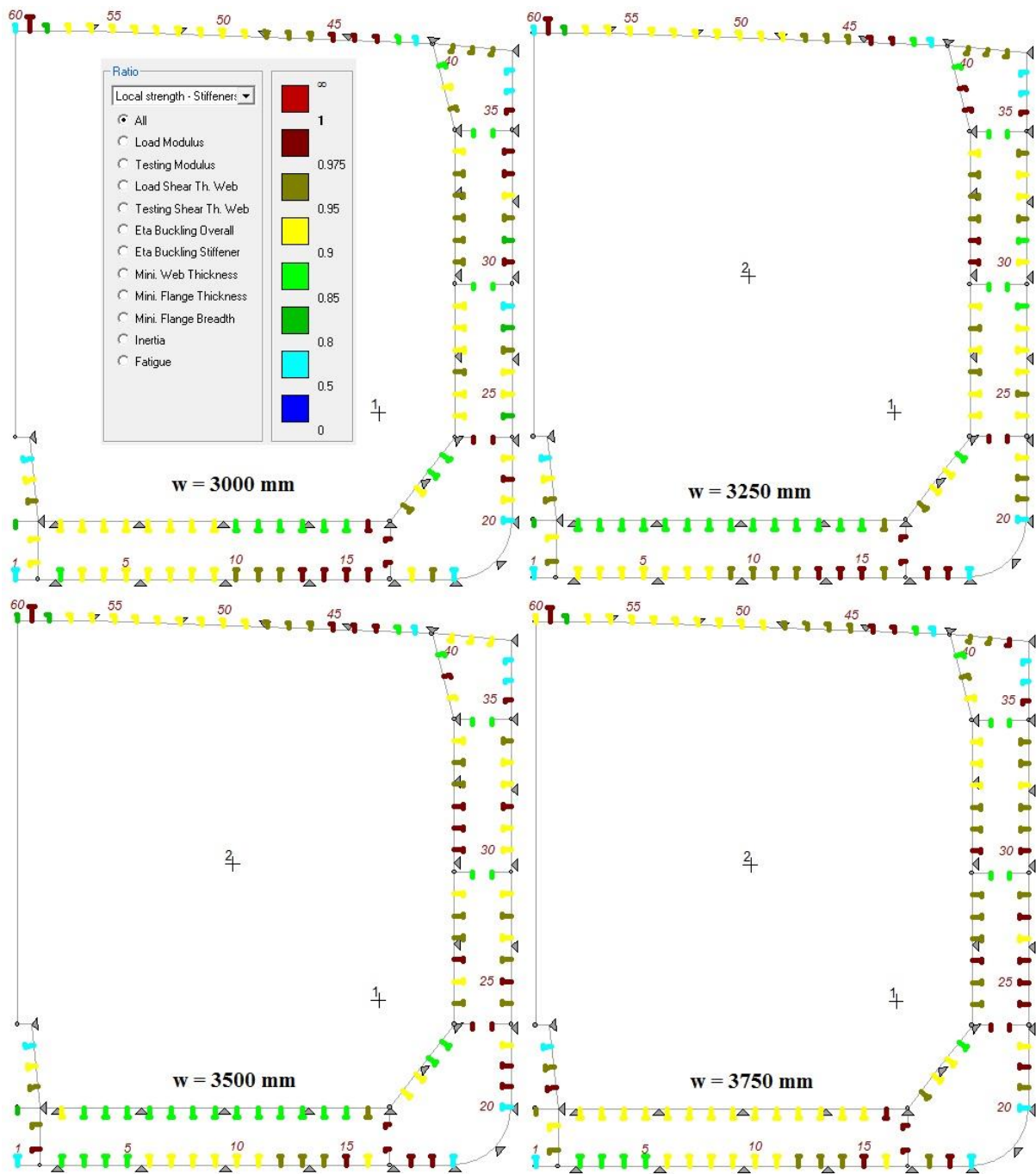
Tablica 10. Ukupna masa za $s=775 \text{ mm}$

Površina [m ²]		η_{M_U} [%]	η_W [%]
Opločenje	Uzdužnjaci		
3.15	1.06	72.64	66.55
3.15	1.17	70.07	64.20
3.15	1.36	66.93	61.48
3.16	1.52	64.24	59.10

Tablica 11. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=775 \text{ mm}$



Slika 18. Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=775 \text{ mm}$



Slika 19. Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=775$ mm

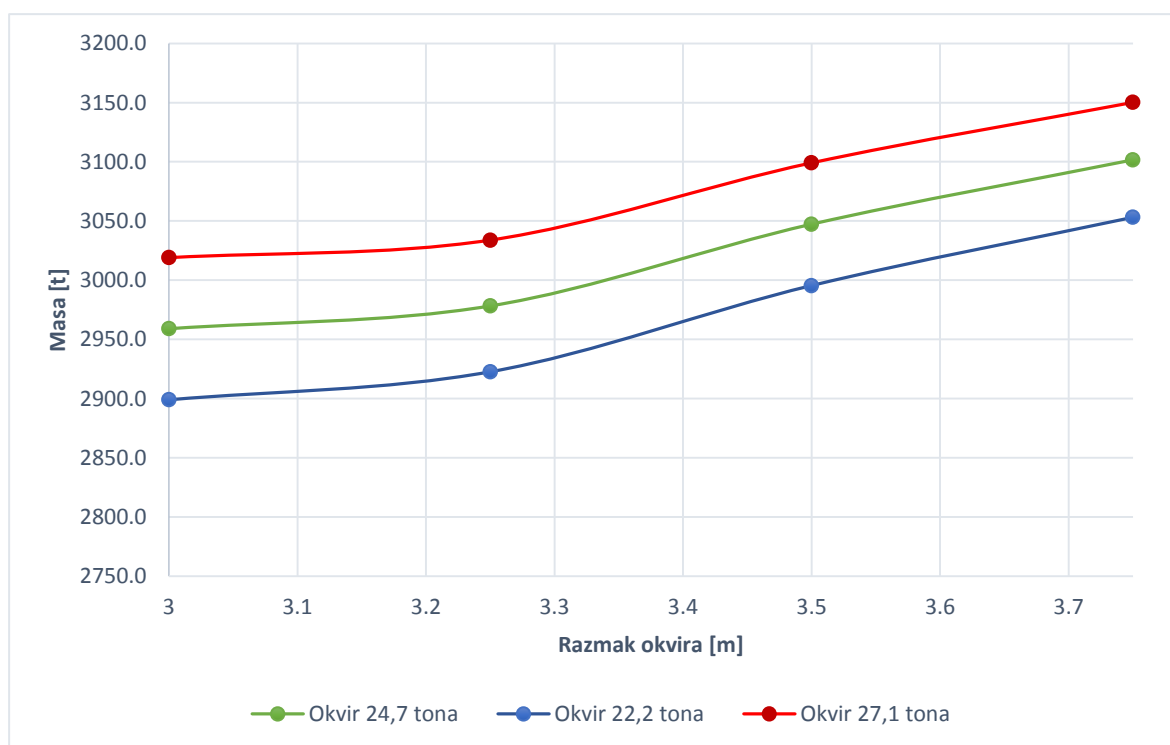
4.3. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 830 \text{ mm}$

Razmak okvira [mm]	$A_x \text{ [m}^2\text{]}$	Uzdužni materijal [t]	Broj okvira	Poprečni materijal [t]	Ukupna masa [t]
3000	4.29	2358.5	24.3	600.5	2959.0
3250	4.41	2422.1	22.5	556.2	2978.2
3500	4.60	2529.1	21.0	518.2	3047.3
3750	4.76	2616.3	19.7	485.3	3101.6

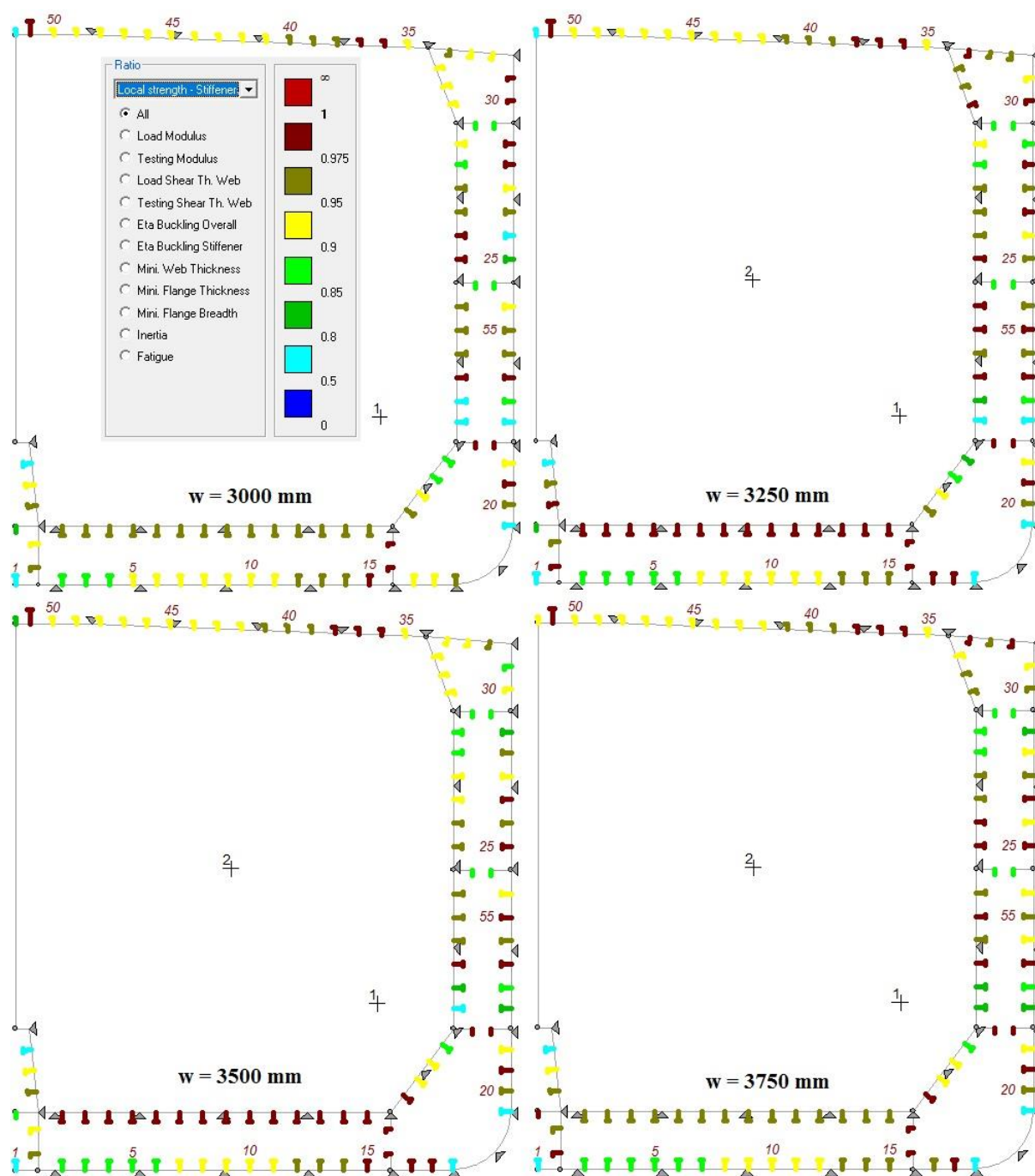
Tablica 12. Ukupna masa za $s=830 \text{ mm}$

Površina [m ²]		η_{M_U} [%]	η_W [%]
Opločenje	Uzdužnjaci		
3.26	1.04	71.85	65.14
3.26	1.15	69.72	63.32
3.26	1.34	66.38	60.65
3.26	1.50	63.92	58.53

Tablica 13. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=830 \text{ mm}$



Slika 20. Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=830 \text{ mm}$



Slika 21. Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=830$ mm

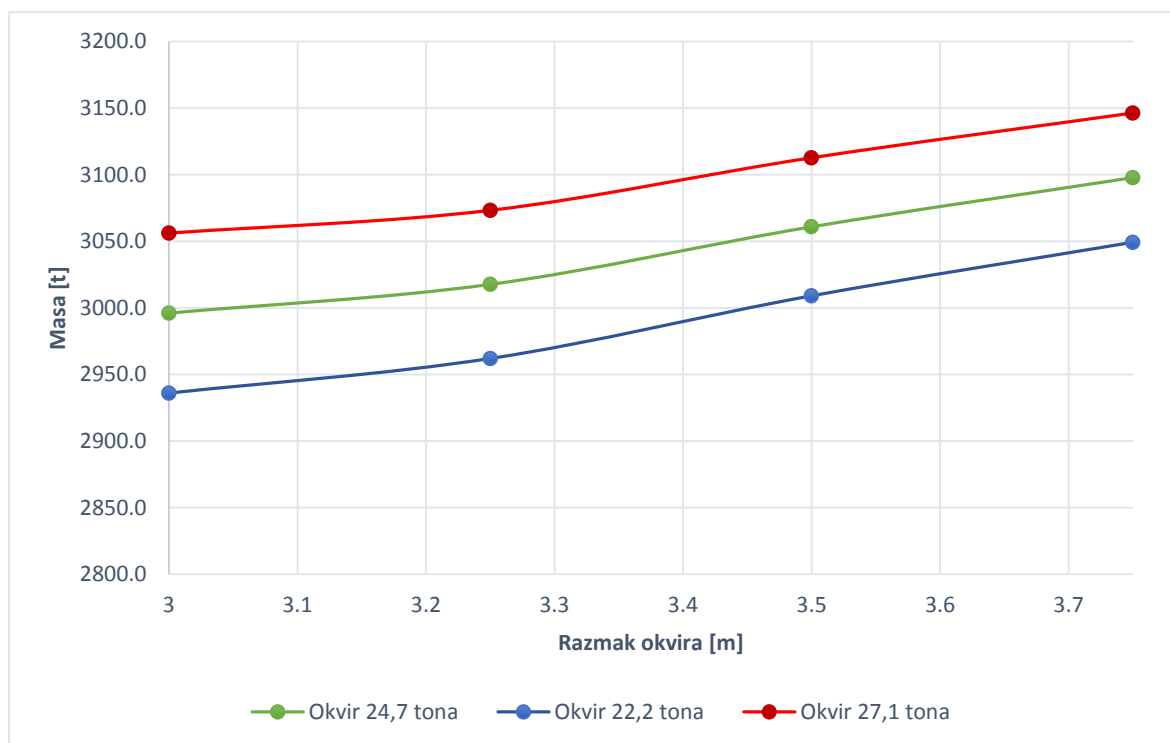
4.4. Varijante s razmakom uzdužnjaka $s = 885 \text{ mm}$

Razmak okvira [mm]	$A_x \text{ [m}^2\text{]}$	Uzdužni materijal [t]	Broj okvira	Poprečni materijal [t]	Ukupna masa [t]
3000	4.36	2395.5	24.3	600.5	2996.0
3250	4.48	2461.4	22.5	556.2	3017.6
3500	4.63	2542.6	21.0	518.2	3060.8
3750	4.75	2612.4	19.7	485.3	3097.7

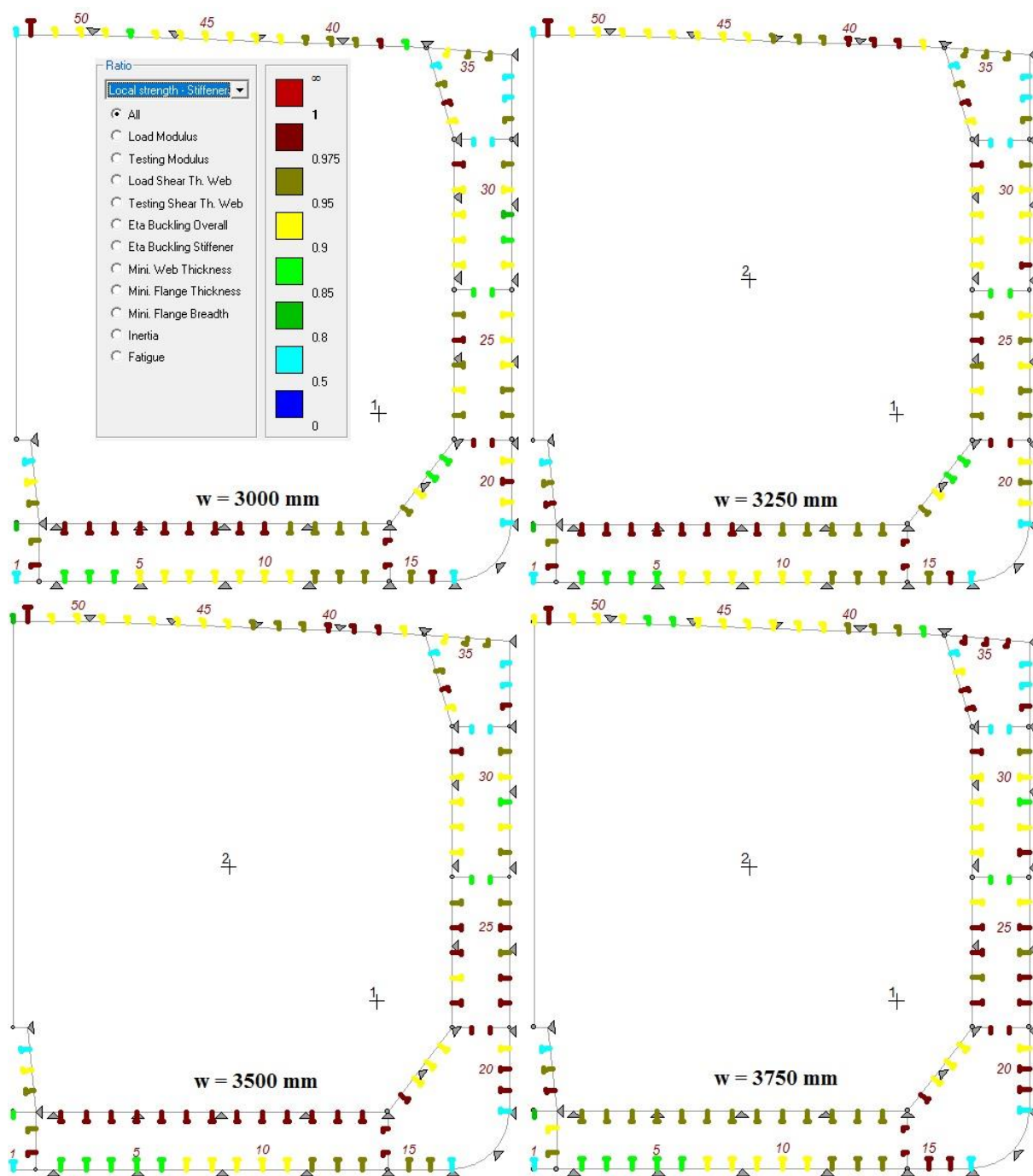
Tablica 14. Ukupna masa za $s=885 \text{ mm}$

Površina [m ²]		η_{M_U} [%]	η_W [%]
Opločenje	Uzdužnjaci		
3.33	1.03	71.00	64.10
3.33	1.15	68.76	62.21
3.34	1.29	66.27	60.11
3.34	1.41	64.09	58.50

Tablica 15. Odnos površina, granični moment i moment otpora na palubi za $s=885 \text{ mm}$



Slika 22. Ovisnost mase konstrukcije o razmaku okvira za $s=885 \text{ mm}$



Slika 23. Omjer iskoristivosti uzdužnjaka za $s=885 \text{ mm}$

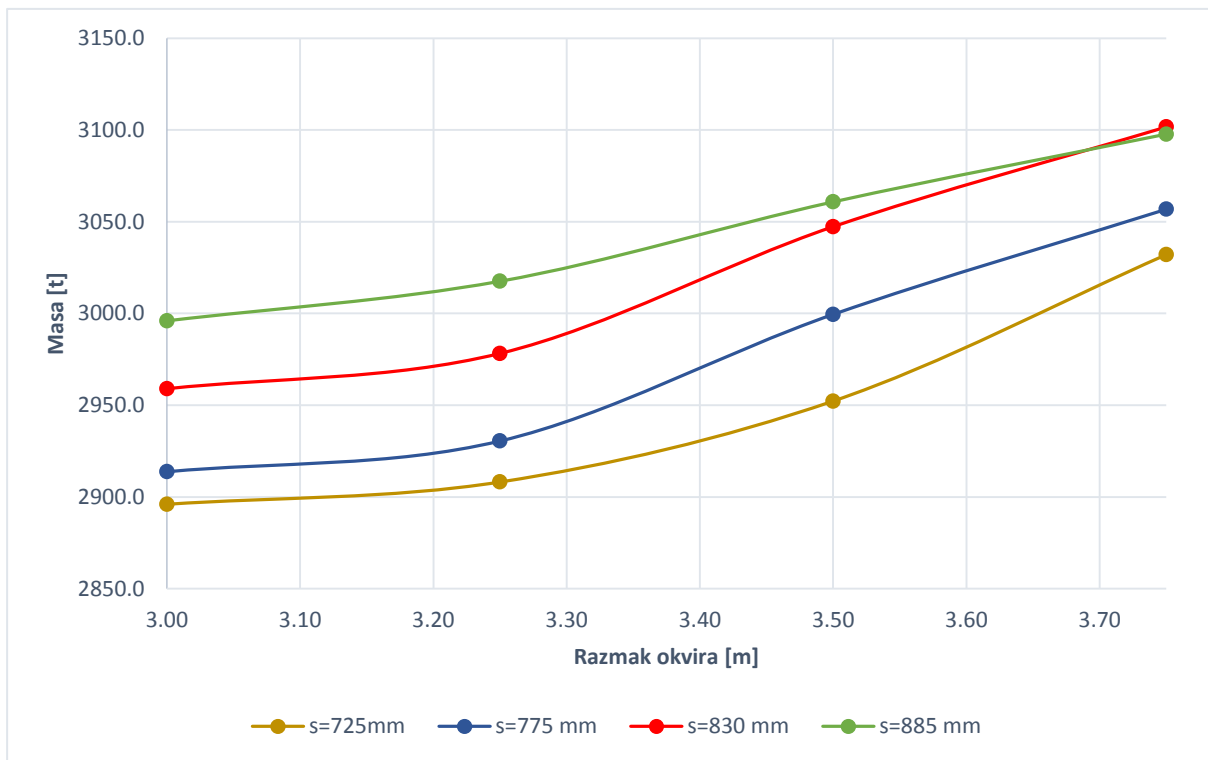
4.5. Skupni rezultati

w \ s	725	775	830	885
3000	2896.0	2913.7	2959.0	2996.0
3250	2908.1	2930.5	2978.2	3017.6
3500	2952.2	2999.5	3047.3	3060.8
3750	3032.0	3056.8	3101.6	3097.7

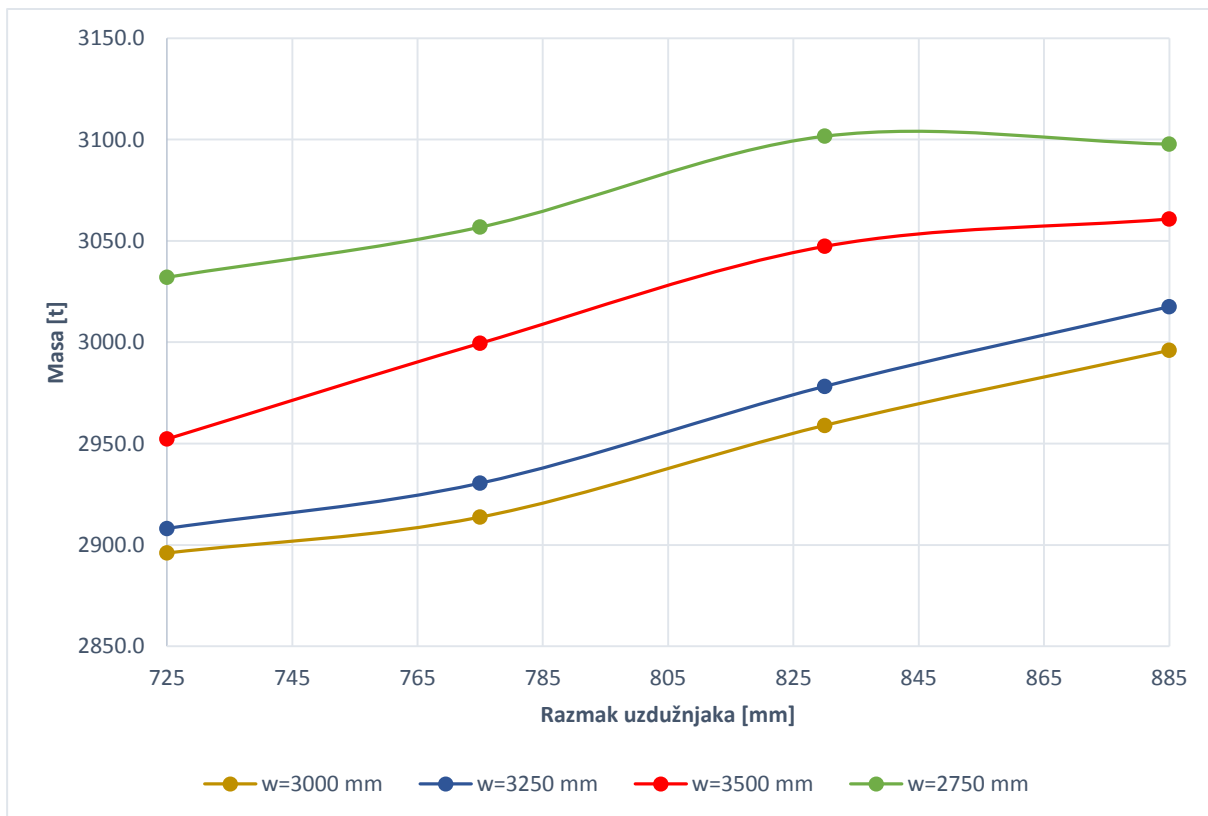
Tablica 16. Ukupna masa svih varijanti

s [mm]	w [mm]	Masa [t]
725	3000	2896.0
725	3250	2908.1
775	3000	2913.7
775	3250	2930.5
725	3500	2952.2
830	3000	2959.0
830	3250	2978.2
885	3000	2996.0
775	3500	2999.5
885	3250	3017.6
725	3750	3032.0
830	3500	3047.3
775	3750	3056.8
885	3500	3060.8
885	3750	3097.7
830	3750	3101.6

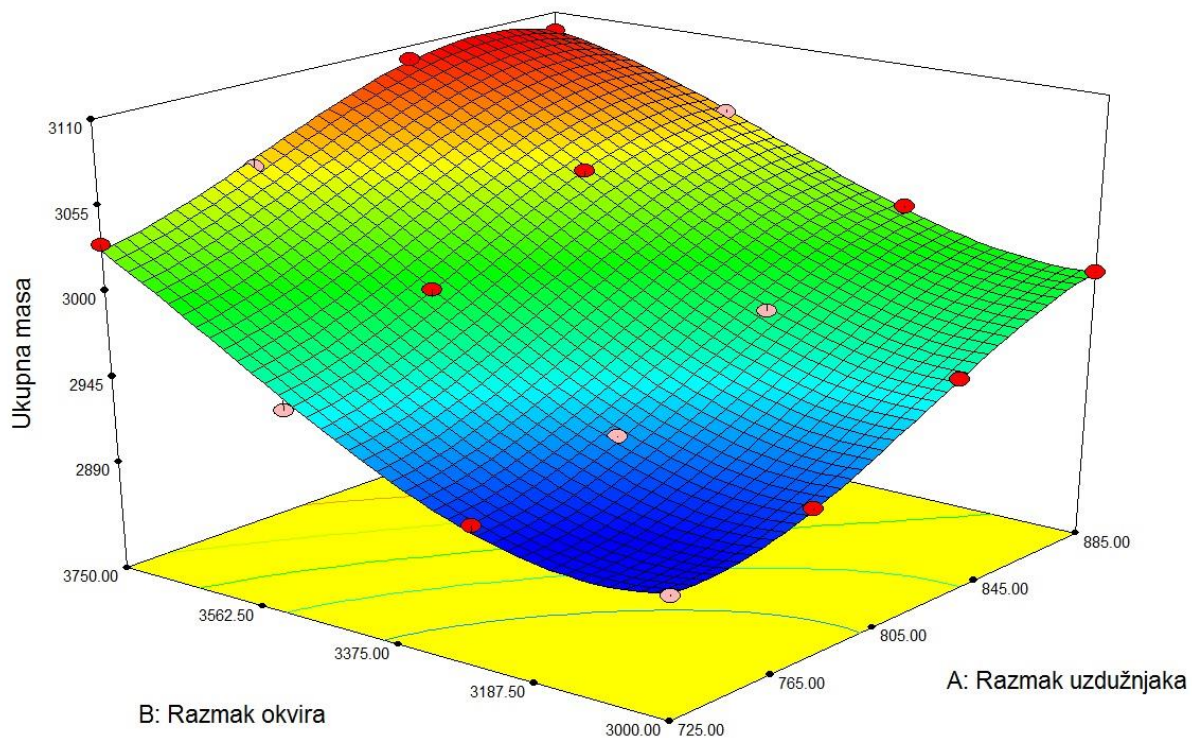
Tablica 17. Varijante poredane po ukupnoj masi



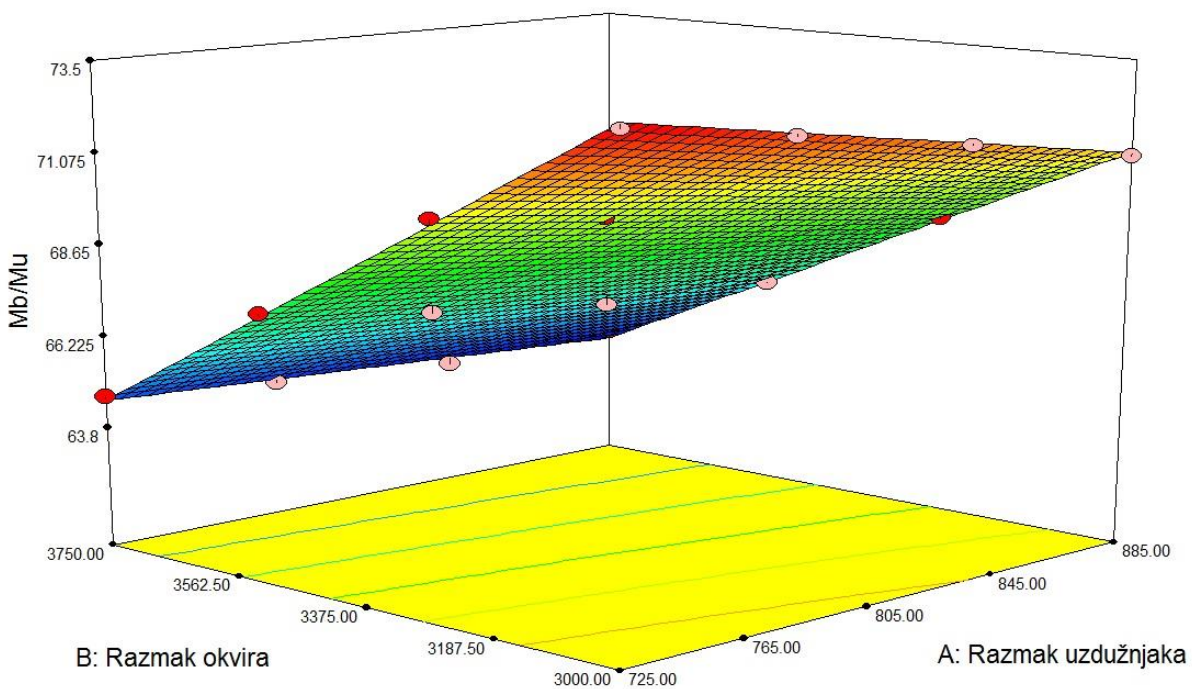
Slika 24. Senzitivnost mase na promjenu razmaka okvira



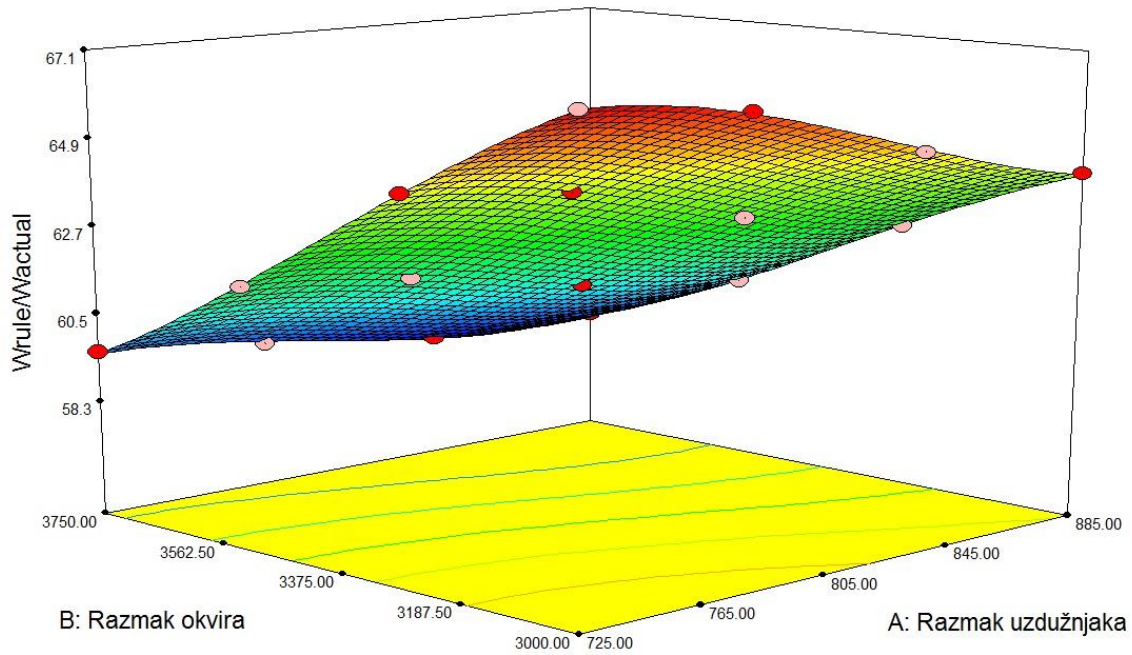
Slika 25. Senzitivnost mase na promjenu razmaka uzdužnjaka



Slika 26. Odzivna ploha mase

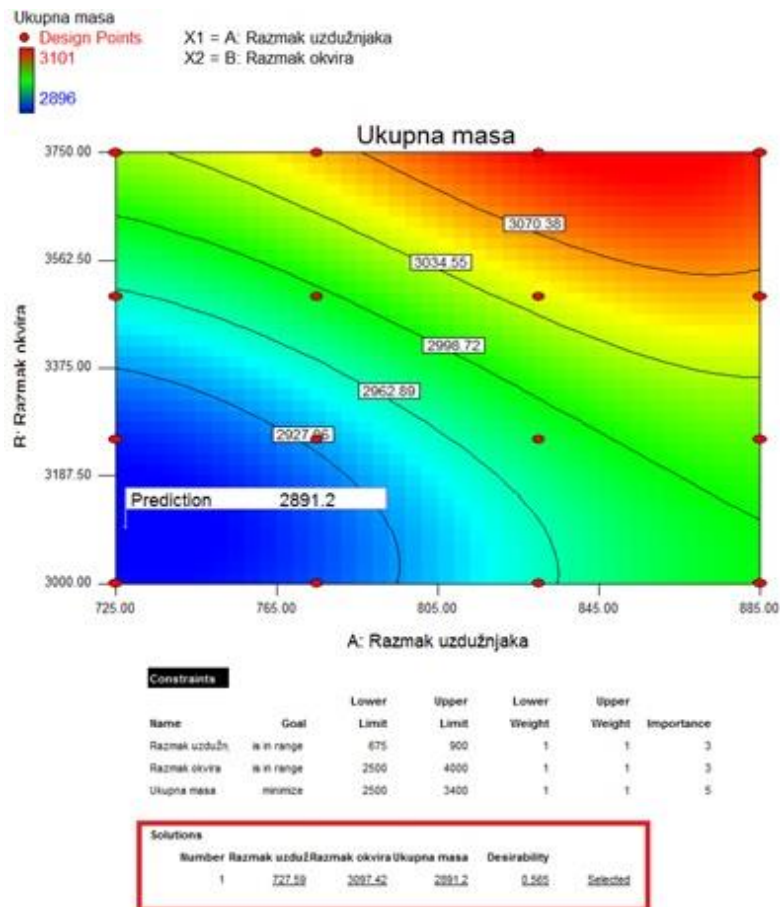


Slika 27. Odzivna ploha faktora η_{MU}



Slika 28. Odzivna ploha faktora η_w

Razmatrajući sve varijante na odzivnoj plohi, kao optimalna (minimum mase) dobiva se varijanta s vrijednostima parametara: $s=727$ mm i $w=3096$ mm i masom od 2891,2 tona.



Slika 29. Optimizacija na temelju odzivne plohe mase

5. ZAKLJUČAK

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da ukupna masa konstrukcije teži minimumu smanjenjem razmaka između uzdužnjaka i razmaka okvira. Najbolja od svih 16 razmatranih varijanti s obzirom na cilj minimalne mase je varijanta sa sljedećim vrijednostima projektnih parametara:

$$s = 725 \text{ mm}$$

$w = 3000 \text{ mm}$, koja rezultira masom od 2896,0 tona razmatranog dijela konstrukcije.

Razmatrajući sve moguće varijante na odzivnoj plohi, kao optimalna (minimum mase) dobiva se varijanta s vrijednostima parametara:

$$s = 727 \text{ mm}$$

$w = 3096 \text{ mm}$, koja rezultira masom od 2891,2 tona.

Među pet najlakših varijanti najčešći razmaci uzdužnjaka su $s=725 \text{ mm}$ i $s=775 \text{ mm}$ te razmaci okvira $w=3000 \text{ mm}$ i $w=3250 \text{ mm}$, kako je prikazano u tablici 17. U slučaju optimalne varijante s najnižom postignutom masom ostvarena je ušteda od 64,7 tona (2,2%) u odnosu na referentni model. Promatrajući sve razmatrane varijante razlika između varijante najmanje mase ($s=725 \text{ mm}$ i $w=3000 \text{ mm}$) i one s najvećom masom ($s=830 \text{ mm}$ i $w=3750 \text{ mm}$) je oko 205 tona. Promatrajući odzivnu plohu mase možemo zaključiti da značajniji utjecaj na masu konstrukcije ima razmak okvira. Ukoliko se ukaže potreba, koristeći dobivene odzivne plohe moguće je odrediti dodatne varijante za daljnju analizu.

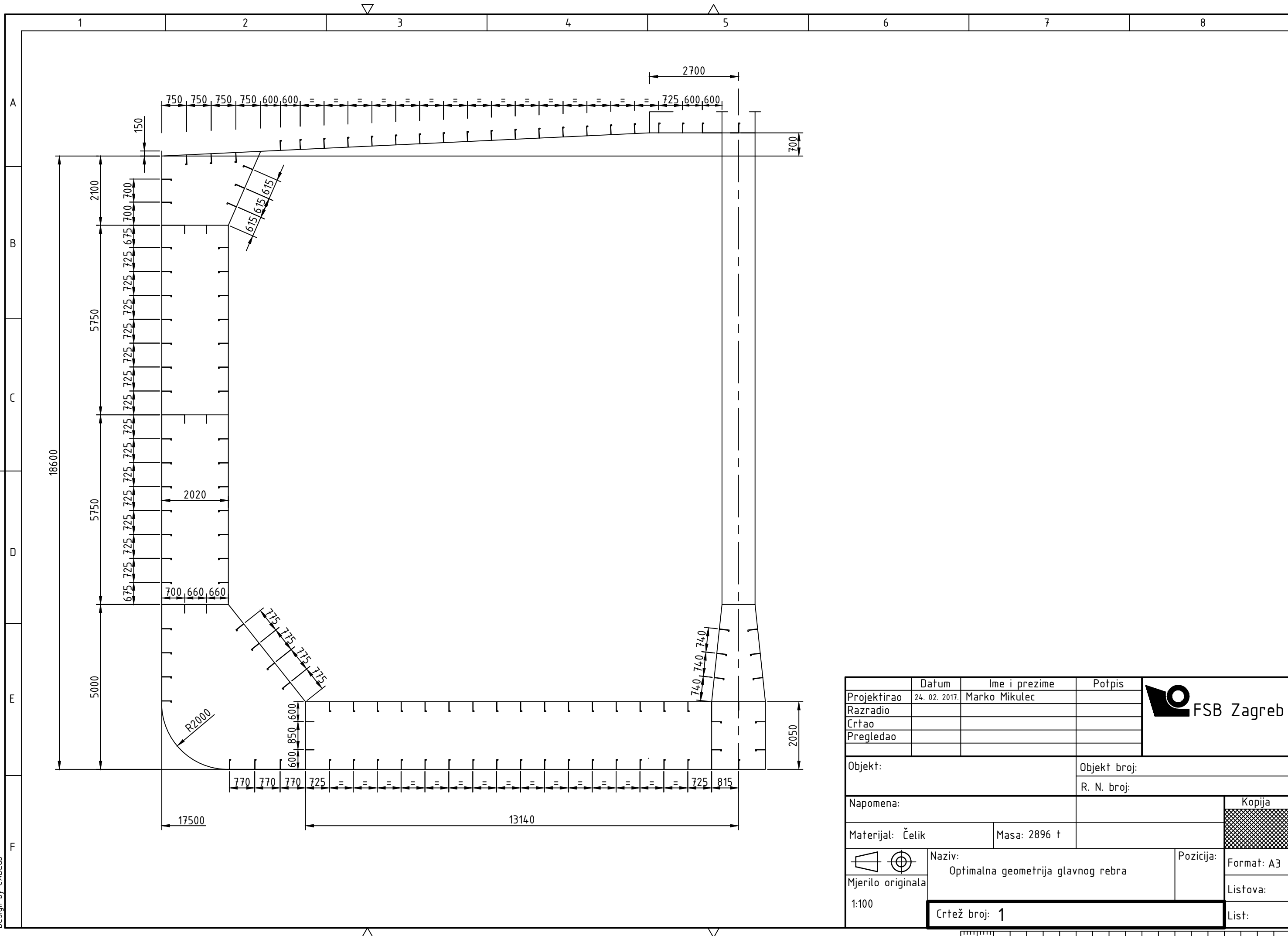
U svrhu još značajnije uštede mase, preporuča se, u daljnjem istraživanju, ispitati i utjecaj materijala kao projektnog parametra za slučaj optimalne varijante.

LITERATURA


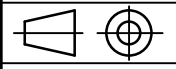
- [1] Prebeg, P. (2011), Višekriterijsko projektiranje složenih tankostijenih konstrukcija, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [2] Prebeg, P. (2015), Analiza uzdužne granične nosivosti brodskih konstrukcija, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [3] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. International association of classification societies, Longon, January (2015).
- [4] Parunov, J. (2008), Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

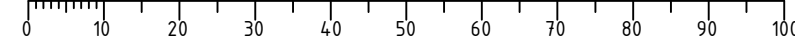
PRILOZI

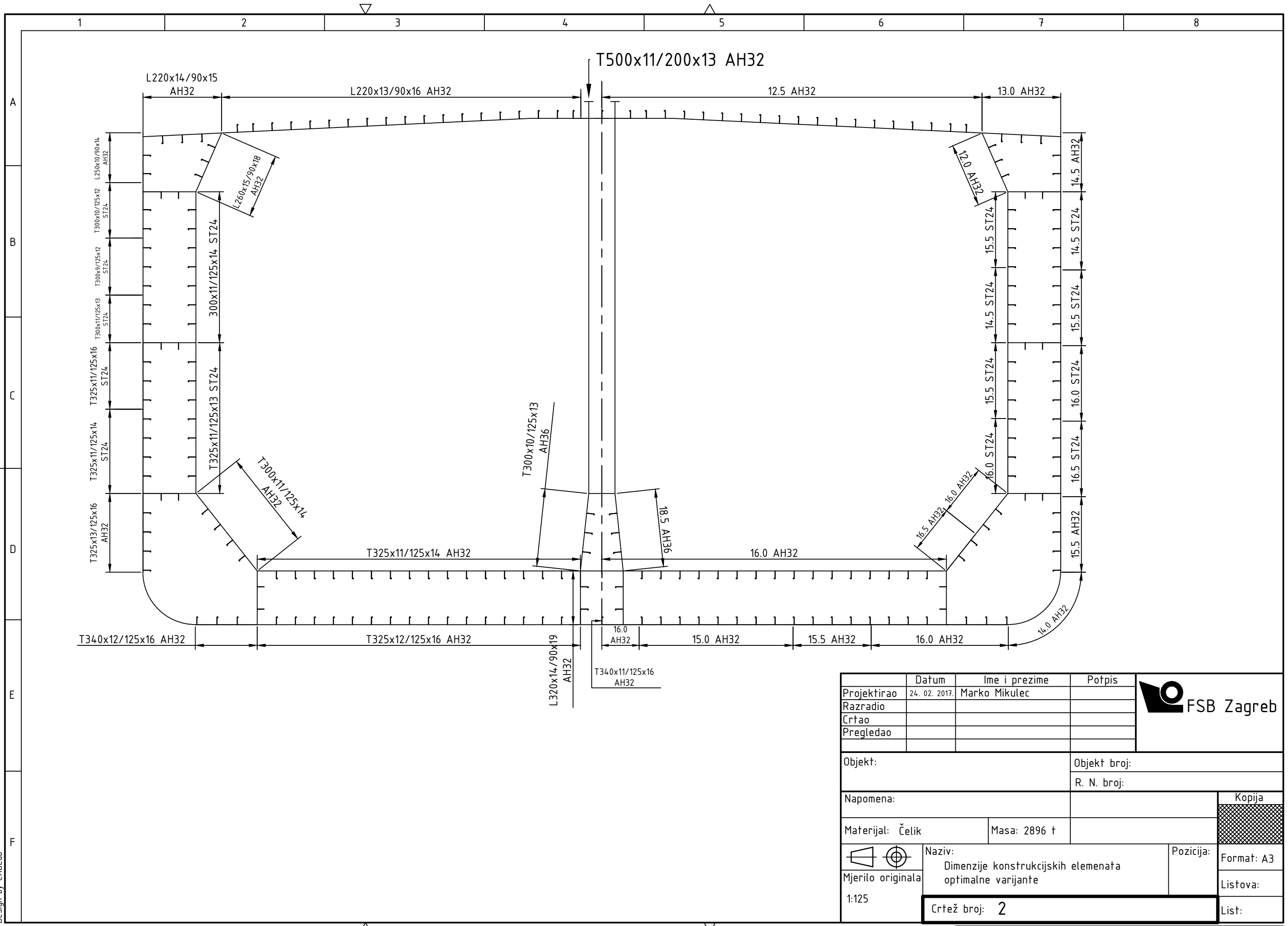
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija



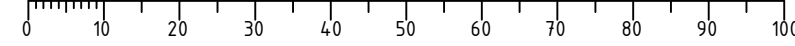
Design by CADLab

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	24. 02. 2017.	Marko Mikulec		
Razradio				
Crtao				
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:			Kopija	
Materijal: Čelik		Masa: 2896 t		
		Naziv: Optimalna geometrija glavnog rebra		Pozicija:
Mjerilo originala 1:100		Crtež broj: 1		Format: A3
				Listova:
				List:





Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio	24. 02. 2017.	Marko Mikulec		
Crtao				
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: Čelik		Masa: 2896 t		
		Naziv:		
Mjerilo originala		Dimenzije konstrukcijskih elemenata optimalne varijante		Format: A3
1:125		Crtež broj: 2		Listova:
				List:



Design by CADLab