Utjecaj upotrebe čelika povišene čvrstoće na strukturne dimenzije glavnog rebra tankera

Deković, Matko

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:540002

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matko Deković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Matko Deković

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom i uz stručnu pomoć izv. prof. dr.sc Jerolima Andrića.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof.dr.sc. Jerolimu Andriću na pruženoj pomoći i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj djevojci i roditeljima na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Matko Deković

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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATKO DEKOVIĆ** Mat. br.: 0035185898

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ UPOTREBE ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE NA STRUKTURNE DIMENZIJE GLAVNOG REBRA TANKERA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF USING HIGH TENSILE STEELS IN STRUCTURAL DESIGN OF MIDSHIP SECTION OF TANKER FOR OIL**

Opis zadatka:

Projektirati konstrukciju glavnog rebra tankera za prijevoz naftnih prerađevina slijedećih dimenzija (Loa=195.2, B=32.20m, T=12.50m, v=15.2 čv, nosivosti oko 52 000 t), prema harmoniziranim usuglašenim IACS Pravilima (H-CSR BC&OT) i priloženom predlošku glavnog rebra broda.

U radu je potrebno :

1) Analizirati dostupnu literaturu i upoznati se s relevantnim Pravilima H-CSR BC&OT za dimenzioniranje trupa.
2) Dimenzionirati sve relevantne strukturne dimenzije s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom uz uporabu običnog brodograđevnog čelika. Proračun provesti koristeći program BV-a MARS.
3) Predložiti nekoliko varijanti s različitim zonama uporabe čelika povišene čvrstoće (AH32 i AH36). Za sve predložene varijante dimenzionirati relevantne strukturne dimenzija s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom.
4) Usporediti rezultate s obzirom na postignutu masu konstrukcije i postignuti granični moment savijanja za sve evaluirane varijante.
5) Izraditi nacrt projektiranog glavnog rebra sa svim relevantnim značajkama (geometrija, strukturne dimenzije, itd.).

Zadatak zadan:
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:
1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:
Izv.prof.dr.sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

POPIS OZNAKA VI

SAŽETAK VIII

SUMMARY IX

1. UVOD 1

1.1 Specifičnosti broda za prijevoz nafte-tanker 2

2. PRAVILA IACS (H-CSR BC&OT) 6

2.1 Proračun uzdužne granične čvrstoće za neoštećeni trup 6

2.2 Proračun uzdužne granične čvrstoće oštećenog trupa 7

2.3 Primjena pravila IACS 9

3. PROJEKTIRANJE GLAVNOG REBRA TANKERA 12

3.1 MARS model 12

3.1.1 Generiranje modela 13

3.2 Izvođenje proračuna 18

3.2.1 Kriterij debljine voja 19

3.2.2 Kriteriji vezani za uzdužnjake 21

3.2.3 Način provođenja proračuna 22

4. ANALIZA REZULTATA 24

4.1 Varijante glavnog rebra sa različitim materijalima 25

4.1.1 Analiza varijanti konstrukcije glavnog rebra 29

4.2 Usporedba površine presjeka glavnog rebra sa odabirom materijala 33

4.2.1 Analiza cijena u odnosu na varijante glavnog rebra 35

4.2.2 Zaključak na dobivene rezultate cijena i površina.....38

5. Zaključak.....39

Literatura 41

POPIS SLIKA

Slika 1 Tanker za prijevoz naftnih prerađevina 2
Slika 2 Pregled veličine tanker 3
Slika 3 Opći plan tankera za prijevoz naftnih prerađevina 4
Slika 4 Tanker s dvostrukim trupom [3] 5
Slika 5 Granični moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti [1] 7
Slika 6 Opseg oštećenja kod sudara [1] 8
Slika 7 Pregled procesa projektiranja brodske konstrukcije [1] 9
Slika 8 Značajke čelika [1] 10
Slika 9 Osnovni podaci o brodu u programu MARS 13
Slika 10 Zadavanje opterećenja na projektnom gazu 14
Slika 11 Zadavanje opterećenja u stanju balasta 14
Slika 12 Zadavanje materijala 15
Slika 13 Lokacija rebara 16
Slika 14 Zadavanje panela 17
Slika 15 Vojevi oplate dna 18
Slika 16 Kriteriji za zadovoljenje promjene debljine voja 19
Slika 17 Kriteriji vezani za ukrepe, odnosno uzdužnjake 21
Slika 18 Pokretanje proračuna 22
Slika 19 Odabir postavki proračuna 23
Slika 20 Kriteriji za a) globalnu i b) lokalnu čvrstoću glavnog rebra od običnog brodograđevnog čelika ST24 25
Slika 21 Kriteriji za a) globalnu čvrstoću i b) lokalnu čvrstoću glavnog rebra od čelika povišene čvrstoće (AH36) 26
Slika 22 Kriteriji za a) globalnu čvrstoću i b) lokalnu čvrstoću glavnog rebra od čelika povišene čvrstoće (AH32) 27
Slika 23 Kriteriji za a) globalnu čvrstoću i b) lokalnu čvrstoću kod glavnog rebra kombiniranih materijala (AH32-ST24) 28
Slika 24 Prikaz materijala a) kod varijante glavnog rebra ST24 (desno) i b) kod varijante glavnog rebra kombinacije AH32 i ST24 (lijevo) 29

Slika 25 Dijagram graničnog momenta savijanja trupa za različite varijante u stanju progiba.....31
Slika 26 Površina presjeka glavnog rebra po različitim varijantama 33
Slika 27 Položaj neutralne linije po različitima varijantama 34
Slika 28 Dijagram različitih varijanti o početnom modelu ST24 34
Slika 29 Usporedba jedinične cijene za različite varijante glavnog rebra.....37

POPIS TABLICA

Tablica 1 Prikaz parcijalnih faktora sigurnosti u uvjetima pregiba i progiba [1] 7
Tablica 2 Opseg oštećenja kod sudara [1] 7
Tablica 3 Opseg oštećenja kod nasukavanja [1] 8
Tablica 4 Dimenzije zadanog tankera.....12
Tablica 5 Iznos graničnog momenta savijanja za različite materijale.....31
Tablica 6 Površine presjeka glavnog rebra i neutralne linije za sve varijante.....33
Tablica 7 Jedinična cijena za pojedini čelik.....35
Tablica 8 Ukupna cijena presjeka od istog čelika 35
Tablica 9 Kombinirani presjek varijante glavnog rebra 36
Tablica 10 Odnos površine limova i profila na ukupnu površinu.....37
Tablica 11 Odnos cijena pojedine varijante na početnu 37

POPIS OZNAKA

M [kNm]	Vertikalni moment savijanja
M_U [kNm]	Vertikalni granični moment savijanja trupa
γ	Faktor sigurnosti
$M_{SW\text{-}U}$ [kNm]	Moment savijanja na mirnoj vodi
M_w [kNm]	Moment savijanja na valovima
A [m^2]	Površina
E [N/mm^2]	Youngov modul elastičnosti
I [m^4]	Moment inercije
L_{OA} [m]	Duljina preko svega
B [m]	Širina broda
T [m]	Gaz broda
D [t]	Istisnina
v [čv]	Brzina broda
W [cm^3]	Moment otpora presjeka
z [m]	Udaljenost od neutralne linije
σ [N/mm^2]	Naprezanje
s [m]	Razmak ukrepa
l [m]	Nepoduprti raspon
R_{eh} [N/mm^2]	Minimalna granica popuštanja
R_m [N/mm^2]	Granica razvlačenja
ν	Poissonov koeficijent
RATIO	Faktor iskoristivosti
c	Izdržljivost
D	Opterećenje
t [m]	debljina
χ	Kut zakreta poprečnog presjeka grede s obzirom na os z;
i [€/t]	Jedinična cijena
m [t]	Masa presjeka glavnog rebra
V [m^3]	Volumen tanka

ρ [t/m^3]	Gustoća čelika
C [€]	Cijena
M_{UH} [kNm]	Granični moment čvrstode kod pregiba
M_{US} [kNm]	Granični moment čvrstode kod progiba;
d [m]	Dubina oštećenja
h [m]	Visina oštećenja
b [m]	Širina oštećenja
$M_{SW\text{-}D}$ [kNm]	Granični moment čvrstode na mirnoj vodi kod oštećenog trupa
M_D [kNm]	Moment čvrstode kod oštedenog trupa
M_{wv} [kNm]	Vertikalni valni moment savijanja

SAŽETAK

Ovaj završni rad obuhvaća upoznavanje s novim Harmoniziranim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz nafte, s naglaskom na lokalno dimenzioniranje uzdužnih strukturnih elemenata, te na uzdužnu graničnu čvrstoću trupa broda. Bilo je potrebno dimenzionirati nekoliko varijanti glavnog rebra tankera uz uporabu običnog brodograđevnog čelika ST24, čelika povišene čvrstoće AH32 i AH36, te njihovu kombinaciju.

Izrađeni su modeli uz primjenu programa MARS klasifikacijskog društva Bureau Veritas s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom. Svaki model je trebao zadovoljiti određene kriterije kao što su: minimalna debljina, izvijanje, dopuštena naprezanja, granična čvrstoća, zamor materijala itd.

Na temelju odrađenog proračuna provedena je analiza rezultata. Sve evaluirane varijante su uspoređene na temelju njihove postignute mase konstrukcije, graničnog momenta savijanja trupa i cijene jediničnog metra konstrukcije. Dan je prikaz utjecaja čelika povišene čvrstoće na strukturne dimenzije, masu i cijenu uzdužnih elemenata glavnog rebra tankera.

Ključne riječi: konstrukcija tankera za prijevoz nafte, lokalno dimenzioniranje, uzdužna čvrstoća, čelici povišene čvrstoće, granični moment savijanja

SUMMARY

This thesis covers familiarization with the new Common Structural Rules, widely used in construction projecting of Oil Tankers, with emphasis on local scantling of longitudinal structural elements and longitudinal ultimate strenght of the hull. It was necessery to scantle a few variants of the main rib of the tanker, using ordinary-strenght shipbuilding steel ST24, higher tensile steel AH32 and AH36, and their combination as well.

Models were built by using the MARS programme of the classification society Bureau Veritas, regarding requirments for global and local strenght. Every model should please certain criteria, for example: minimum thickness, buckling, design stress, ultimate strenght, fatigue.

Result analisis was conducted, based on completed calculations. Every evaluated variant was compared, based on reached construction weight, ultimate bending moment and the construction cost per meter. The review of the effect of higher tensile steel on structural dimension, weight and price of the main rib longitudinal elements was given.

Key words: construction of Oil Tanker, local scantling, longitudinal strenght, higher tensile steel, ultimate bending moment

1. UVOD

Ideja rada je razmotriti utjecaj upotrebe čelika povišene čvrstoće na strukturne dimenzije uzdužnih elemenata glavnog rebra tankera. Potrebno je bilo projektirati konstrukciju glavnog rebra tankera za prijevoz naftnih prerađevina prema harmoniziranim usuglašenim IACS pravilima (H-CSR BC&OT) koja su stupila na snagu 1.7.2015. godine [1]. Svrha tih pravila je da se izbjegne mogućnost ugrožavanja sigurnosti broda, posade, tereta i putnika iz komercijalnih razloga, ili barem svede na najmanju moguću mjeru. Uporabljeni čelici su: običan brodograđevni čelik i čelici povišene čvrstoće; AH32 i AH36. Proračun se proveo uz korištenje programa Bureau Veritas, MARS. Trebalo je pokazati kako uporaba običnog čelika i čelika povišene čvrstoće utječe na globalnu i lokalnu čvrstoću. Čelici povišene čvrstoće utječu i na težinu trupa broda, tj. uštedu materijala. Dva su osnovna principa primjene čelika povišene čvrstoće. Prvi princip je ugradnja čelika povišene čvrstoće na zonama koji su najudaljeniji od neutralne osi, tj. palubi i dnu broda. Protezanje zone od dna prema gore i od palube prema dolje se određuje omjerom dopuštenih naprezanja čelika povišene čvrstoće i normalnog brodograđevnog čelika. Na ovakav način se ugrađuje oko 30% čelika povišene čvrstoće i takav se pristup pokazao kao najekonomičniji način. Drugi princip je lokalna primjena čelika povišene čvrstoće na mjestima povećanih naprezanja [2].

Ukupna teoretska ušteda čelika primjenom AH32 čelika iznosi od 10 do 14%, dok kod AH36 čelika iznosi od 15 do 16% [2]. Čelik povišene čvrstoće ima i jednu manu - zbog manje debljine elemenata podložniji je zamoru materijala [2].

Materijal za gradnju broda predstavlja 60-70% vrijednosti broda. Njegova težina ovisi o mehaničkim osobinama materijala, glavnim izmjerama broda i njihovim međusobnim odnosima, te konstrukcijskim značajkama trupa. Važna svojstva materijala su žilavost i dobra obradljivost [3]

Brodovi u službi uvijek će biti izloženi sudarima i nasukavanju. Takve se pojave ne mogu eliminirati proračunom. U takvim nesrećama najčešće dolazi do zagađivanja okoliša ili smrtnih slučajeva. Nova Harmonizirana pravila provjeravaju graničnu čvrstoću

proračunima za neoštećeni trup broda, ali i za brodski trup sa oštećenjem dna, odnosno oštećenjem boka. Do kolapsa brodskog trupa dolazi zbog manjka uzdužne čvrstoće trupa, uslijed čega konstrukcija više ne može izdržati narinuta opterećenja. Proračun uzdužne čvrstoće za oštećen brod od velike je važnosti u slučaju sudara ili nasukavanja, jer rezultati takvih proračuna u tom trenutku mogu biti ključni za sprječavanje daljnjeg napredovanja oštećenja i potpunog kolapsa broda.

1.1 Specifičnosti broda za prijevoz nafte-tanker

S razvojem tržišta rastu i zahtjevi brodovlasnika. Njihovi zahtjevi se najčešće odnose na tip broda, nosivost, brzinu i područje operacija. Također, u novije vrijeme nastaju sve složeniji brodovi koji traže primjenu novih tehnologija u gradnji, opremanju i u procesu projektiranja. Gotovo je nemoguće plovne objekte uspješno projektirati bez primjene računalnih tehnologija i suvremenih projektnih metoda.

Tanker, brod za prijevoz tekućeg tereta kojemu je teretni prostor u trupu podijeljen na više nepropusnih tankova, najčešće je namijenjen za prijevoz sirove nafte i naftnih prerađevina, ali i kemikalija, ukapljenoga plina i drugo.



Slika 1 Tanker za prijevoz naftnih prerađevina

Pogonjen je Dieselovim motorima i jednim brodskim vijkom (iznimni su uvjeti kada se koriste dva brodska vijka), a opremljen je crpkama golemih kapaciteta, što omogućuje iskrcaj tereta u roku od 12 do 18 sati. Crpke su smještene u crpnim stanicama ili su uronjene u teretnim tankovima. Osim cjevovodom velikoga promjera za iskrcaj tereta, tankovi su opremljeni cjevovodima za isušivanje, odušnim i protupožarnim sustavima.

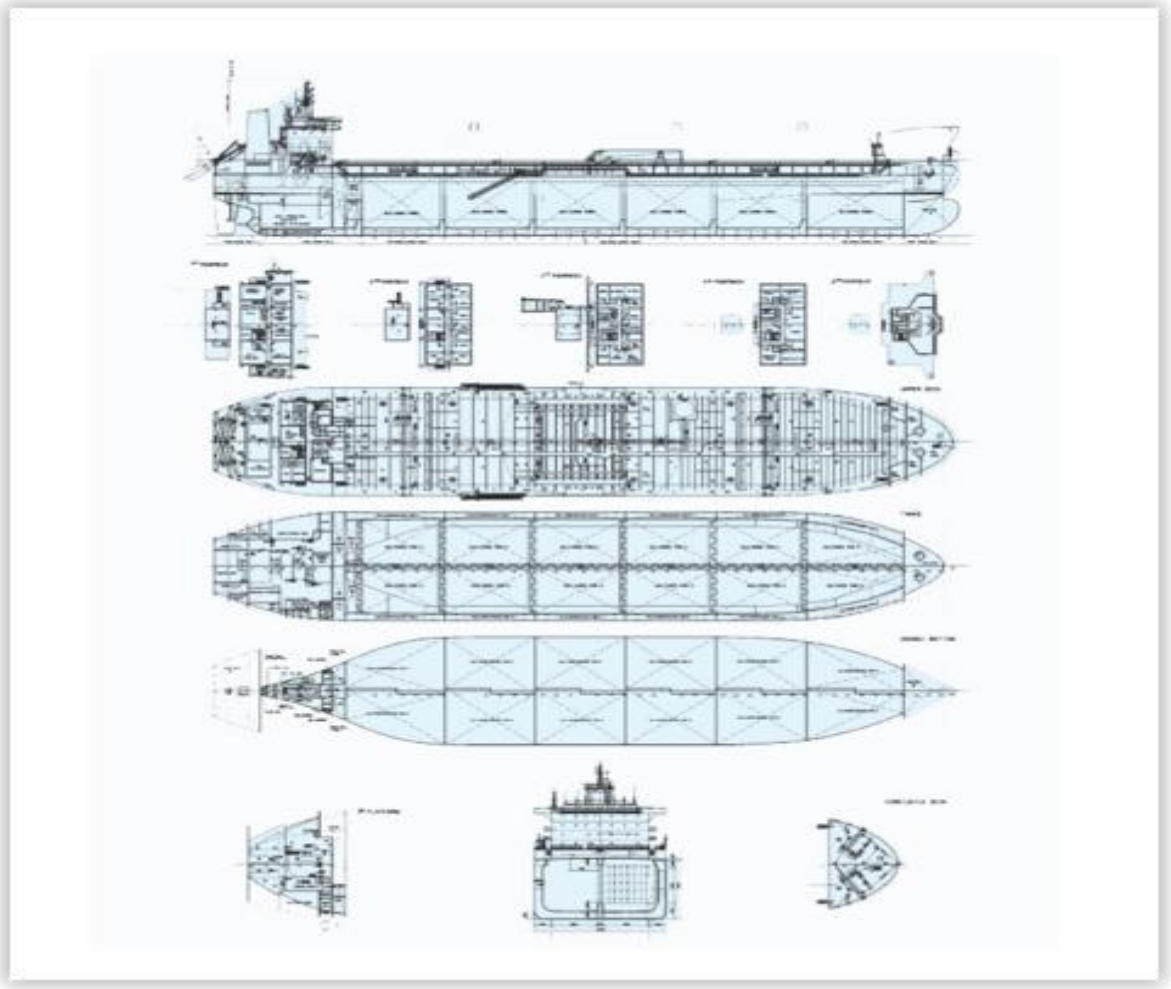
S obzirom na veličinu, danas prevladava nekoliko vrsta tankera :

- Medium Range Tankers : -nosivost od 38 000 do 50 000 t, težine 9 500 t
- Aframax : - nosivost od 80 000 do 120 000 t, težine 17 000 t
- Panamax : - nosivost od 50 000 do 80 000 t, širine 32.26 m i gaza 12.2
  - veličina im je određena mogućnošću prolaska kroz Panamski kanal,
  - težine 13 000 t
- Suezmax : - nosivosti od 120 000 do 200 000 t, prevoze razne vrste nafte
  - prolaze kroz Sueski kanal , njihova težina je 20 000 t
- Supertankeri - VLCC (vrlo veliki brodovi za prijevoz sirove nafte)
  - nosivosti od 200 000 do 310 000 , prijevoz nafte na velike udaljenosti, težine 40 000 t



Slika 2 Pregled veličine tanker

Kako se razvoj tankera poboljšavao, počelo se razmišljati i o konstrukciji tankera.



Slika 3 Opći plan tankera za prijevoz naftnih prerađevina

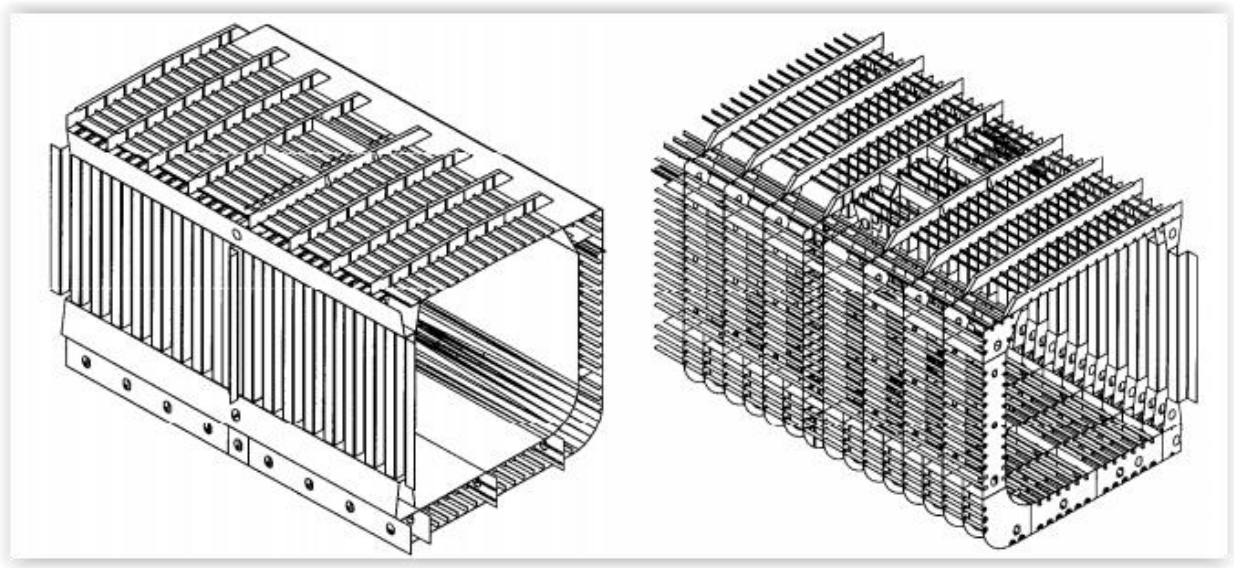
Prvi uvjet, a ujedno i najbitniji na koji se trebalo paziti je uzdužna čvrstoća. Uslijed nepovoljno raspoređenih tereta odnosno balasta, te male visine trupa, u pojedinim strukturnim elementima može doći do znatnih naprezanja, uslijed čega mogu nastati napuknuća ili lom brodskog trupa.

Kroz povijest se sustav gradnje nadopunjavao. 1906. godine se usvaja uzdužni sustav gradnje tankera. Ugrađena su uzdužna rebra na dnu, boku i palubi, te jaka poprečna okvirna rebra i koljena. Kako su se naprezanja uzdužnih elemenata prenosila i na poprečne elemente, 1925. godine je uvedena konstrukcija bez koljena.

U narednim godinama pojavljuju se i drugi sustavi gradnje sa poprečnim rebrima. Konstrukcija trupa se i dalje mijenjala. Uvode se dvije uzdužne pregrade umjesto ljetnih

tankova, te se pronalaze nove forme spajanja pojedinih elemenata, osobito poslije primjene varenja i početka gradnje supertankera.

U novije vrijeme prevladava uzdužni sustav gradnje s uzdužnim rebrima , iako je dosta čest i kombinirani sustav. Naročito se pazi na odabir materijala za zavarivanje, uklanjanje oštrih prekida te položaj i sustav gradnje uzdužnih pregrada. Cijeli je prostor ispod palube tankera, od pramčanog prostora do strojarnice, predviđen za smještaj tereta i podijeljen s jednom ili dvije uzdužne i nekoliko poprečnih pregrada u više tankova, tako da u poprečnom smjeru postoje lijevi i desni bočni i po jedan središnji tank. Tankovi nose brojeve od pramčanog prostora prema krmi.



Slika 4 Tanker s dvostrukim trupom [3]

2. PRAVILA IACS (H-CSR BC&OT)

Pravila IACS [1] su zajednička pravila svih klasifikacijskih društava koja pokrivaju dvije vrste brodskih konstrukcija: tankera za prijevoz nafte i brodove za rasuti teret. Jako su složena i detaljna. Njihov cilj je produženje vijeka sigurnosti broda u tijeku plovidbe i mogućnost plovidbe u svim morima. Područje djelovanja Pravila pokriva cijelu strukturu trupa, uključujući pramčani i krmeni pik, vanjsku oplatu trupa broda, poprečne i uzdužne pregrade, te elemente primarne čvrstoće, poprečne i lokalne čvrstoće. U ovom poglavlju će se obratiti pozornost na pravila koja su vezana za graničnu uzdužnu čvrstoću. Uzdužna se čvrstoća, zbog značaja za sigurnost samog broda, promatra kao primarna čvrstoća broda. Zadovoljenje proračuna uzdužne granične čvrstoće je vrlo bitan kriterij vezan za podobnost.

2.1 Proračun uzdužne granične čvrstoće za neoštećeni trup

Prema pravilima IACS-a, vertikalni granični moment savijanja trupa treba zadovoljiti sljedeće kriterije [1] :

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \qquad (2.1)$$

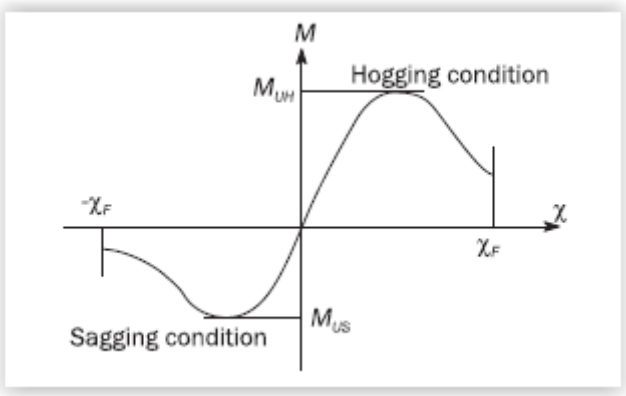
M je vertikalni moment savijanja, a M_U je vertikalni granični moment savijanja trupa kao grede. γ_R je parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja trupa.

$$\gamma_R = \gamma_M \gamma_{DB} \qquad (2.2)$$

γ_M je parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja trupa koji uzima u obzir svojstvo materijala i nezvjesnosti predviđanja geometrijskih svojstava i čvrstoće, te se u pravilu uzima vrijednost 1.1, a γ_{DB} je parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja trupa koji uzima u obzir savijanje dvodna, te je njegova vrijednost 1.10 u pregibu,a 1.0 u progibu. U oba slučaja, kada dođe do naplavljivanja, uzima se vrijednost 1.0.

M je vertikalni moment savijanja, u uvjetima pregiba i progiba, koji se dobije zbrajanjem momenta savijanja na mirnoj vodi M_{SW-U} i momenta savijanja na valovima M_W :

$$M = \gamma_S M_{SW-U} + \gamma_W M_W \qquad (2.3)$$



Slika 5 Granični moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti [1]

γ_S je parcijalni faktor sigurnosti za momente savijanja na mirnoj vodi, a γ_W je parcijalni faktor sigurnosti za momente savijanja na valovima.

Varijante projektnog opterećenja	γ_S	γ_W
A	1.0	1.2
B	1.0	1.3

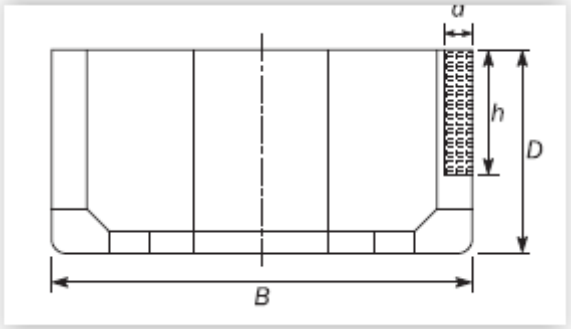
Tablica 1 Prikaz parcijalnih faktora sigurnosti u uvjetima pregiba i progiba [1]

2.2 Proračun uzdužne granične čvrstoće oštećenog trupa

Kod proračuna čvrstoće poprečnog presjeka uslijed oštećenja boka, pretpostavlja se da je oštećenje konstrukcije smješteno na jednom boku i neposredno uz palubu.

Damage penetration, in m	*Side shell arrangements*	
	Single side	*Double side*
Height, h	*0.75D*	*0.60D*
Depth, d	*B/16*	*B/16*

Tablica 2 Opseg oštećenja kod sudara [1]



Slika 6 Opseg oštećenja kod sudara [1]

Uslijed oštećenja dna broda, pretpostavlja se da je oštećenje konstrukcije smješteno na najnepovoljnijoj poprečnoj poziciji na dnu.

Damage penetration, in m	*Oil tankers*
Height, h	*Min (B/15.2)*
Breadth, b	*0.60 B*

Tablica 3 Opseg oštećenja kod nasukavanja [1]

Kod proračuna trupa treba pripaziti na vertikalni moment savijanja M_D u pregibu i progibu kao glavni uvjet provjere maksimalne čvrstoće trupa broda u oštećenom stanju

$$M_D = \gamma_{SD} M_{SW-D} + \gamma_{WD} M_{WV} \qquad (2.4)$$

gdje je:

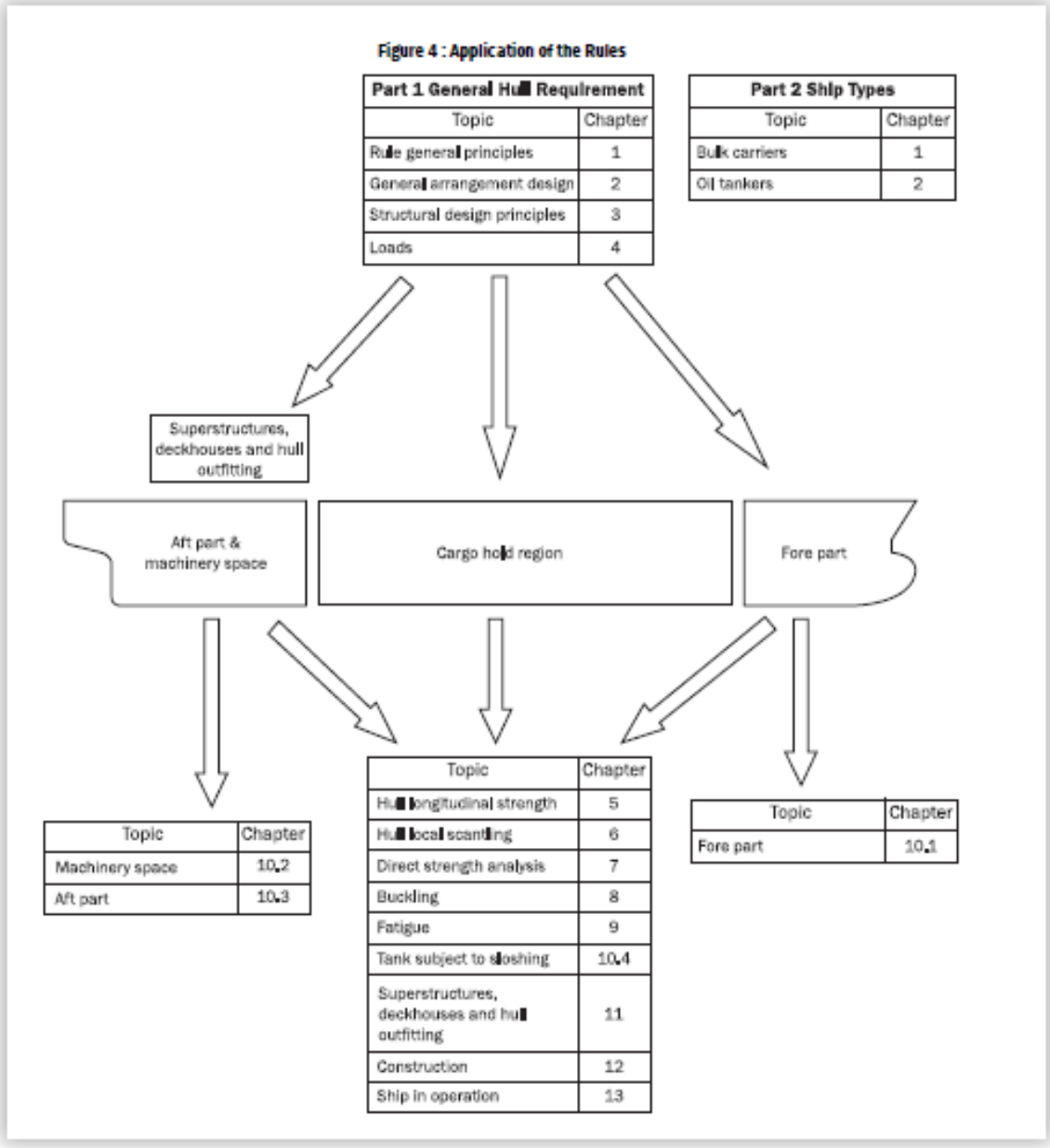
M_{SW-D} - dozvoljeni moment savijanja na mirnoj vodi, u kNm, u uvjetima pregiba i progiba na poprečnu sekciju trupa

M_{wv} - vertikalni valni moment savijanja, u kNm, u uvjetima pregiba i progiba na poprečnu sekciju trupa

γ_{SD} - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi u oštećenom stanju, uzima se $\gamma_{SD} = 1.1$

γ_{WD} – parcijalni faktor sigurnosti za valni moment savijanja u oštećenom stanju, uzima se $\gamma_{WD} = 0.67$

2.3 Primjena pravila IACS



Slika 7 Pregled procesa projektiranja brodske konstrukcije [1]

U svrhu primjene postojećih pravila, brod je podijeljen na:

- Pramčani dio
- Prostor za teret

- Prostor strojarnice
- Krmeni dio
- Nadgrađe i palubna kućica

Brodovi se grade na način da bi mogli izdržati uvjete okoline očekivanih tijekom njihovog životnog vijeka (25 godina), na temelju prikladnih uvjeta opterećenja. Opterećenja koja su najkritičnija na brodskoj konstrukciji su izvijanje i popuštanje. Elementi konstrukcije su konstruirani tako da pojava tih opterećenja bude što kasnija. Kod proračuna maksimalne čvrstoće treba se uzeti u obzir maksimalni kapacitet trupa kao grede i maksimalna čvrstoća oplate i uzdužnjaka, dok se proračun preostale čvrstoće provodi kod brodova koji imaju duljinu *L* 150 m i više. Konstruiraju se na način da imaju dovoljno rezervne čvrstoće da bi izdržali naprezanja u uvjetima oštećenja [1] :

- Osnovni model i procesi zavarivanja moraju biti unutar limita propisanih za određenu vrstu materijala za one dijelove konstrukcije za koje su namijenjeni
- Potrebno će biti predzagrijavanje prije upotrebe zavarivanja
- Zavarivanje i drugi proizvodni procesi moraju pratiti pravila za adekvatne obrade

Modul elastičnosti i Poissonov koeficijent za određeni čelik iznose:

- E= 206 000 N/mm^2
- v= 0.3

Table 1 : Mechanical properties of hull steels

Steel grades for plates with $t_{as_built} \leq 100$ mm	R_{eH}, specified minimum yield stress, in N/mm²	R_m, specified tensile strength, in N/mm²
A-B-D-E	235	400 – 520
AH32-DH32-EH32-FH32	315	440 – 570
AH36-DH36-EH36-FH36	355	490 – 630
AH40-DH40-EH40-FH40	390	510 – 660

Slika 8 Značajke čelika [1]

gdje je :

- R_{eh} – minimalna granica popuštanja

- R_m- granica razvlačenja

Podjela materijala prema razredima vidi se na slici 8. :

- A, B, D, E su razredi čelika sa normalnom čvrstoćom
- AH, DH, FH su razredi čelika sa povišenom čvrstoćom

Opterećenja koja djeluju na brod su statička i dinamička. Pravila nam opisuju način procjene opterećenja za čvrstoću i zamor konstrukcije. Razdvajaju ih na dva dijela [1].

- Procjena čvrstoće bez utjecaja zamora, za opterećenja koja korespondiraju sa vjerojatnošću od 10^{-8}
- Procjena zamora za opterećenja koja korespondiraju sa vjerojatnošću od 10^{-2}

Statička i dinamička opterećenja se javljaju uslijed opterećenja trupa na mirnoj vodi, te vanjskih i unutarnjih opterećenja [1].

Vrijednosti i distribucija momenta savijanja na mirnoj vodi i poprečnih sila koje će se koristiti za procjenu zamora moraju biti uzete kao tipične vrijednosti stanja opterećenja u kojem će brod operirati cijeli svoj životni vijek. Ta stanja će biti za vrijeme plovidbe u balastu i u vrijeme punog opterećenja[1].

3. PROJEKTIRANJE GLAVNOG REBRA TANKERA

Projektiranje uzdužnih dimenzija glavnog rebra po H_CRS [1] provedeno je korištenjem računalnog programa MARS klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Prilikom projektiranja razmatrani su svi relevantni kriteriji :

- Primarna čvrstoća i granična čvrstoća
- Lokalna čvrstoća limova i profila s obzirom na različite zahtjeve (minimalne dimenzije, dopuštena naprezanja, izvijanje, zamor materijala itd.)

3.1 MARS model

Program MARS za analizirane modele daje podatke o njihovoj uzdužnoj graničnoj čvrstoći, odnosno o graničnom momentu savijanja konstrukcije. Također računa i zahtijevani moment savijanja, a u proračun uzima i korekcijske faktore sigurnosti. Osim što globalno ispituje čvrstoću konstrukcije, ispituje ju i lokalno. Na temelju globalnih i lokalnih kriterija, program nam izbacuje rješenja za *gross* i *net* debljine strukturnih elemenata. Njihova razlika je korozijski dodatak koji je definiran Harmoniziranim pravilima. Program MARS provodi i proračun za oštećene dijelove trupa, odnosno tijekom sudara i nasukavanja broda.

Dimenzije broda dane su u sljedećoj tablici:

Duljina preko svega, L_{oa}	195,2 [m]
Širina broda, B	32,20 [m]
Gaz broda, T	12,50 [m]
Brzina broda, v	15,2 [čv]
Istisnina, D	52 000 [t]

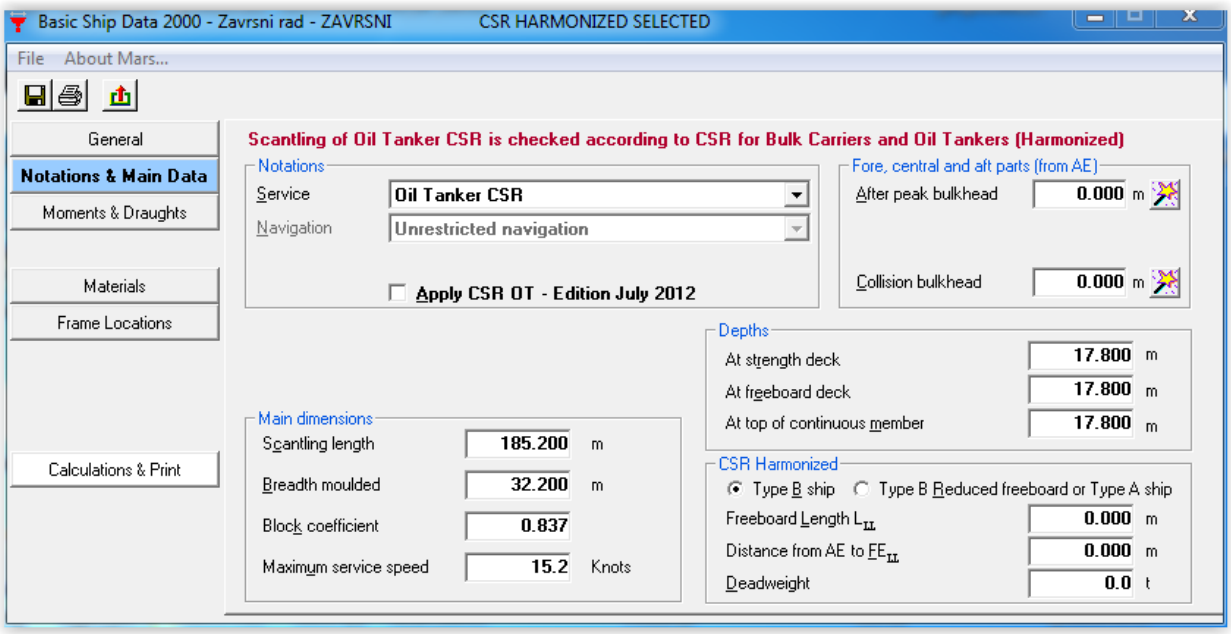
Tablica 4 Dimenzije zadanog tankera

3.1.1 Generiranje modela

Model glavnog rebra dan je na korištenje kako bi se pomoću njega mogli provoditi proračuni, no ipak će biti opisan način generiranja modela radi boljeg shvaćanja kako su se mijenjali parametri početnog modela. U nastavku će biti objašnjeno kako je generiran model, zadana opterećenja, te način na koji su se projektirale različite strukturne varijante, te kako se kontroliralo jesu li konstrukcije sa različitim materijalima zadovoljile pojedinačne kriterije zadane programom MARS.

3.1.1.1 Osnovni podaci broda

Početni model je napravljen zadavanjem osnovnih podataka broda, zadavanjem opterećenja i generiranjem modela. Osnovni podaci se mogu vidjeti na sljedećoj slici.

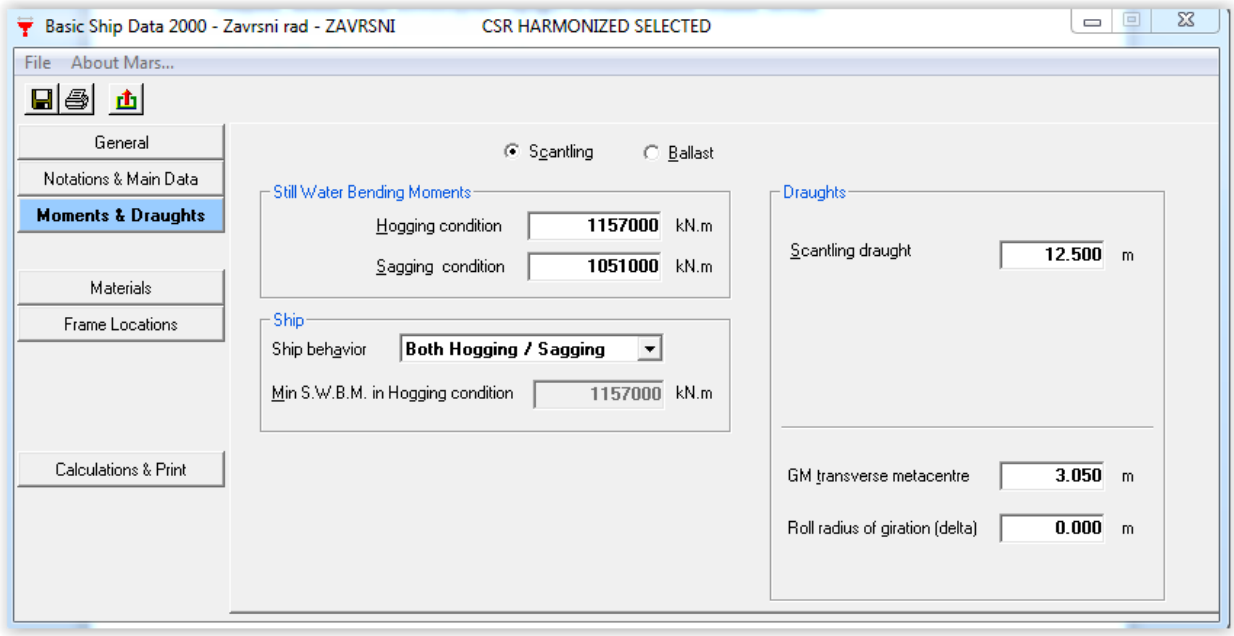


Slika 9 Osnovni podaci o brodu u programu MARS

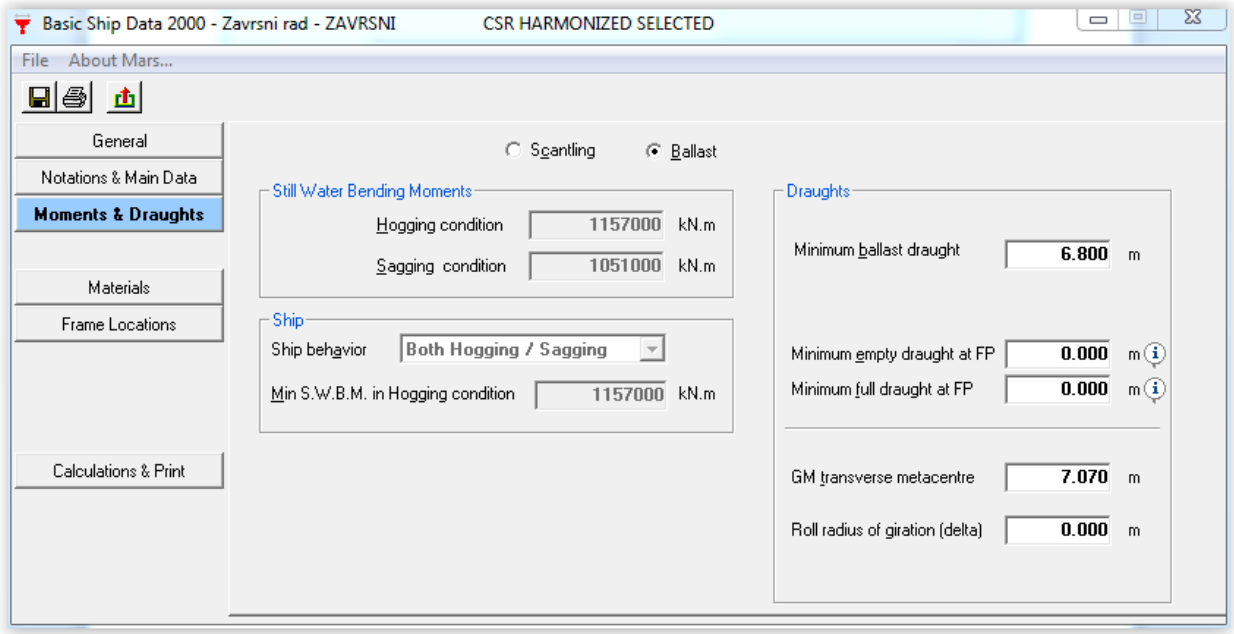
Kao što se može vidjeti, postoji više stavki kako se može generirati početni model broda. Prvo se zadaje tip broda, odnosno funkcija broda. Ovaj brod je namijenjen za prijevoz naftnih prerađevina pa se pod *Service* stavlja *Oil Tanker CSR*. Oznaka *CSR* predstavlja akronim *Common Structural Rules* [1] pod kojim će ovaj brod biti projektiran i izgrađen. Brod ima definirano neograničeno područje plovidbe. Nakon toga se zadaju njegove glavne dimenzije, kao što su duljina, širina, blok koeficijent i njegova maksimalna brzina.

3.1.1.2 Zadavanje opterećenja

Opterećenje se zadaje na dva načina plovidbe. Prvi način je projektno, odnosno kada je brod nakrcan, a drugi način je kada brod plovi u stanju balasta. Na sljedećim slikama se može vidjeti zadavanje opterećenja.



Slika 10 Zadavanje opterećenja na projektnom gazu



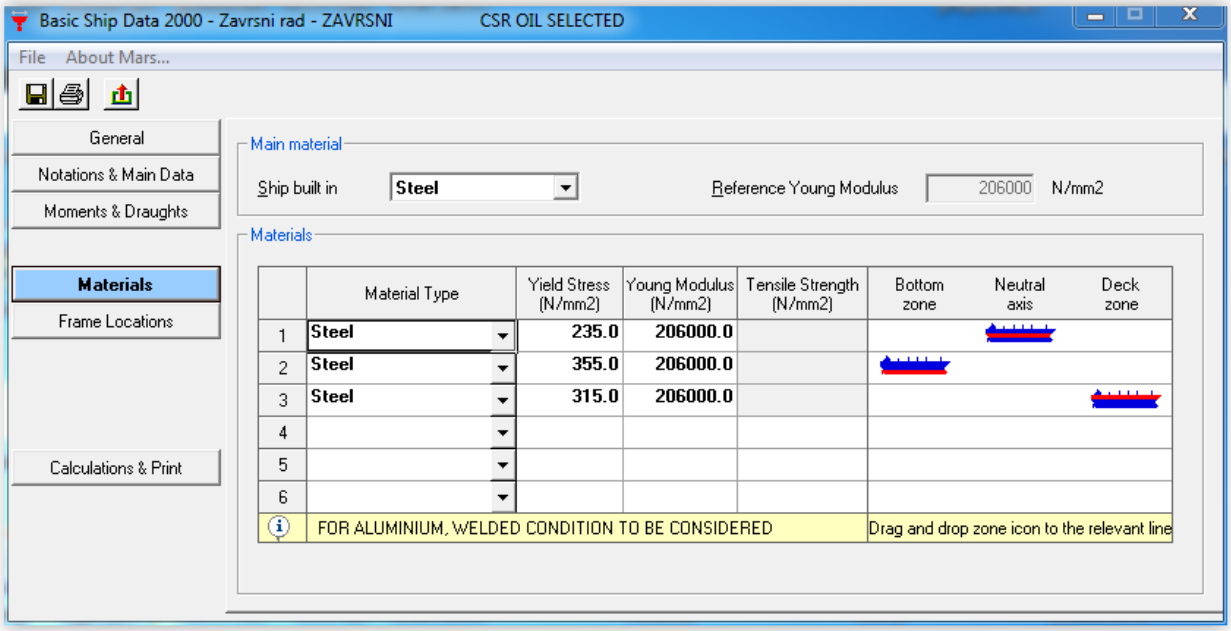
Slika 11 Zadavanje opterećenja u stanju balasta

Na slici 10 se može vidjeti zadano opterećenje na projektnom gazu. Zadaje se statički moment savijanja za vrijeme pregiba i progiba tako da se može opisati ponašanje broda u tim zadanima uvjetima. Također se zadaje i projektni gaz T.

Slika 11 nam prikazuje opterećenja u stanju balasta. Zadaje se minimalni balastni gaz, te poprečni metacentar.

3.1.1.3 Zadavanje materijala

Prvo se odabere materijal od čega će se graditi brod, a onda se za određene zone izabere materijal koji će se koristiti.

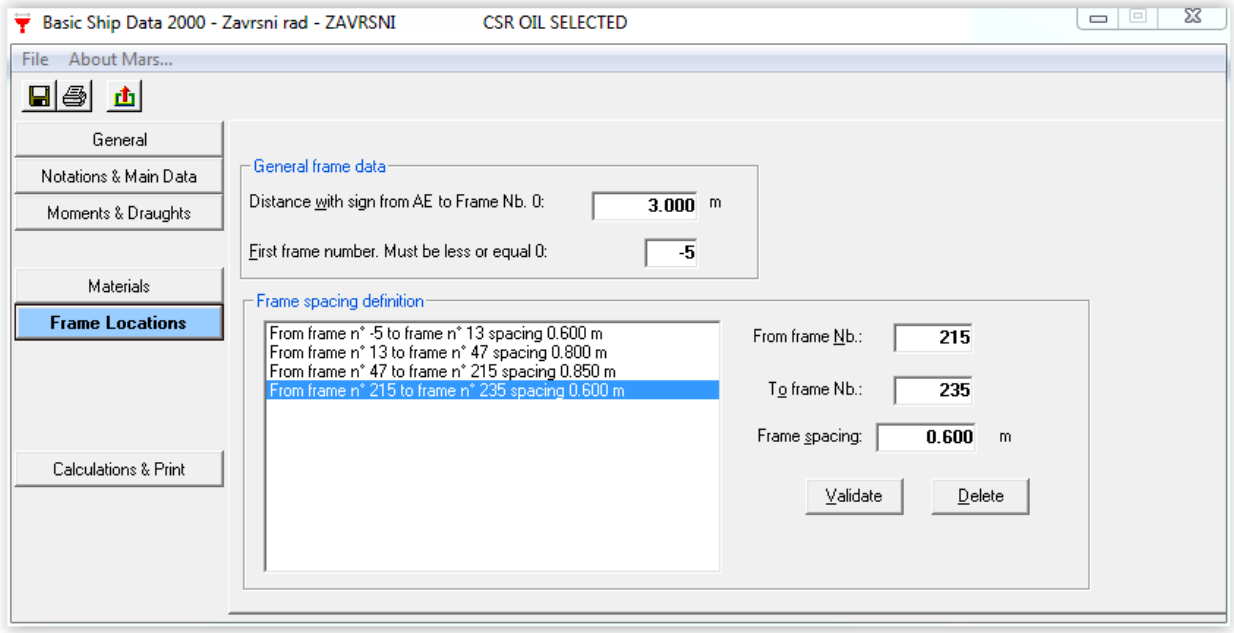


Slika 12 Zadavanje materijala

Na slici 12 se vidi da se koristi običan brodograđevni čelik sa granicom razvlačenja 235 N/mm^2 i čelici povišene čvrstoće AH32 sa granicom razvlačenja 315 N/mm^2 i AH36 sa granicom razvlačenja 355 N/mm^2 te Youngovim modulom elastičnosti E=206 000 N/mm^2 [3].

3.1.1.4 Lokacija rebara

U današnje se vrijeme sve više teži uzdužnom sistemu orebrenja, što je postala uobičajena praksa. Takav sustav orebrenja se ostvaruje uzdužnjacima dna, bokova i paluba. Razmak rebara u pramčanoj i krmenoj zoni je 600 mm.



Slika 13 Lokacija rebara

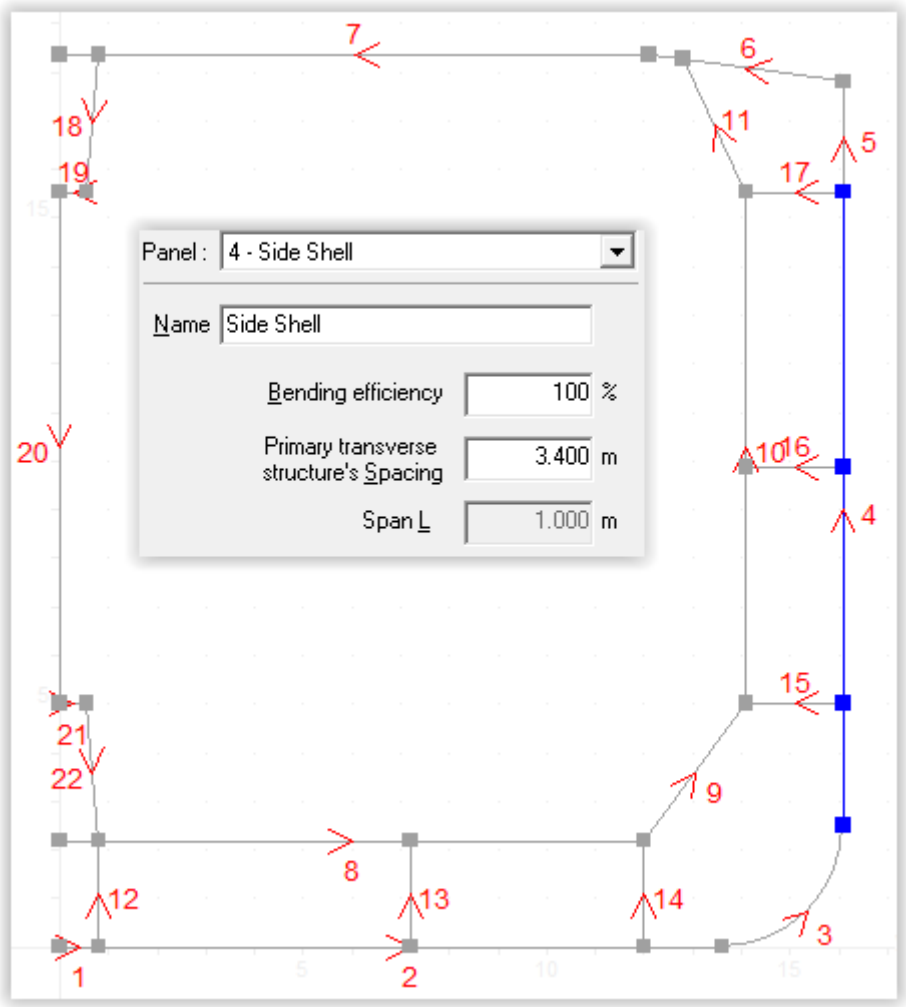
3.1.1.5 Zadavanje čvorova

Čvorovi se unose prije panela. Oni se zadaju za određivanje geometrije glavnog rebra, odnosno njegovog izgleda. Svaki čvor je zadan preko koordinata x i z (x koordinata nam predstavlja položaj glavnog rebra). Čvorovi se povezuju sa određenim krivuljama pa tako dobivamo segmente. Ovdje korišteni izgledi krivulja su linija i luk (za uzvoj). Svakom segmentu se treba zadati položaj,a to uključuje: segmente kobilice, dna, uzvoja, boka, skoka palube, palube, stule i vertikalne korugirane pregrade. Postoje još segmenti donjeg uzvojnog tanka, pokrova dvodna, proveze boka, proveze dvodna. Zadavanje čvorova je bitno jer tako program MARS "shvaća" gdje se određeni segment nalazi.

3.1.1.6 Zadavanje panela

Model je generiran pomoću zadavanja panela, čvorova, vojeva i ukrepa. Model je napravljen pomoću dvadeset i jednog panela, odnosno dijelova glavnog rebra, a to su:

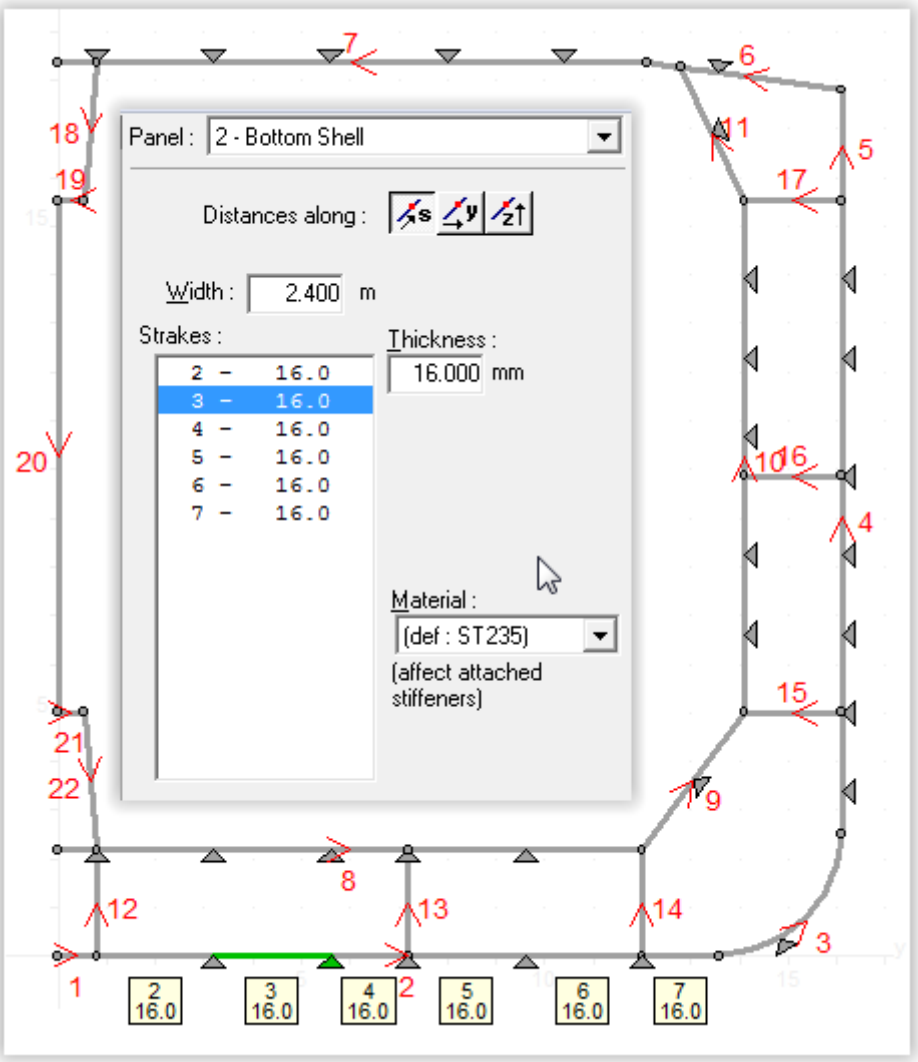
vanjska oplata, dvodno i donji uzvojni tank, uzvoj, bok, skok palube, palube, stula, pokrov dvodna, proveza boka i dvodna i vertikalna korugirana pregrada. Za svaki od tih panela potrebno je unijeti sudjelovanje u uzdužnoj čvrstoći u postotcima i razmake između poprečnih presjeka osim za vertikalnu korugiranu pregradu koja ne sudjeluje u uzdužnoj čvrstoći. Razmak između panela se razlikuje.



Slika 14 Zadavanje panela

3.1.1.7 Zadavanje vojeva

Vojevi su četverokutni elementi kojima se definira širina i duljina. Svaki panel je definiran sa nekoliko vojeva. Na taj je način omogućena promjena debljine oplate pojedinih dijelova glavnog rebra tankera. Promjena debljine se vrši jednostavnim unošenjem dimenzija za pojedini voj. Na isti način se vrši i promjena širina, što se nije razmatralo u ovom radu.



Slika 15 Vojevi oplate dna

3.1.1.8 Zadavanje ukrepe

Zadavanje ukrepe se vrši zasebno za svaki panel. Potrebno ih je sortirati u grupe, tako da svaki panel ima svoju određenu grupu. Svaka grupa ukrepe definirana je brojem ukrepa unutar grupe, polazišnog čvora pojedine ukrepe, udaljenosti prve ukrepe od polazišnog čvora i razmakom između ukrepa. Potrebno je definirati i oblike profila ukrepa i njihovu veličinu. U ovom radu korišteni su Holland profili i plosni profili.

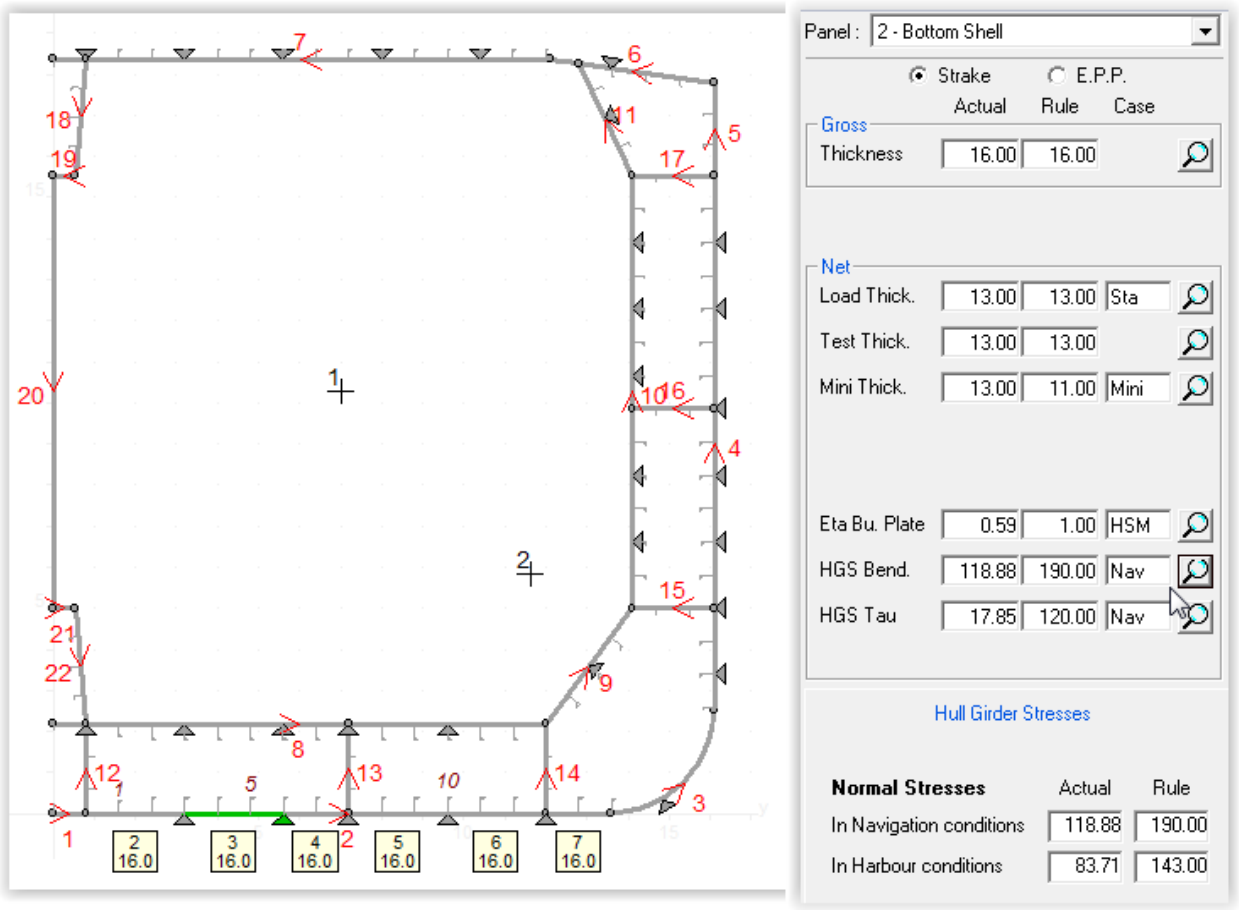
3.2 Izvođenje proračuna

U poglavlju 3.1. opisano je generiranje modela u MARS-u. U ovom poglavlju biti će opisani kriteriji koji su trebali biti zadovoljeni mijenjanjem tih varijabli. Varijable su:

debljina oplate, mijenjanje tipa/veličine uzdužnjaka i materijala po zonama i po glavnom rebru. Slike koje će biti prikazane uzete su sa modela koji je već zadovoljio odabrane kriterije radi boljeg objašnjenja.

3.2.1 Kriterij debljine voja

Kod mijenjanja debljine voja treba pripaziti na više kriterija. Kriteriji su navedeni na sljedećoj slici. Slika se odnosi na startni model.



Slika 16 Kriteriji za zadovoljenje promjene debljine voja

Prvi stupac nam prikazuje vrijednosti za pojedini kriterij aktualnog modela / projekta. Te su veličine karakteristike predložene konstrukcije. Sljedeći stupac nam prikazuje zahtijevane vrijednosti pojedinog kriterija. Jedan od najvažnijih kriterija koji se mora zadovoljiti je debljina opločenja koja mora biti veća od zahtijevane. Osim toga, bitno je da stvarna naprezanja budu manja od zahtijevanih (dopuštenih) naprezanja. Promjenom debljine voja utječemo na M_{ULT}, koji se mijenja s promjenom geometrijskih značajki.

Primjerice, ako neki voj na palubi ne zadovoljava *HGS Bending*, to znači da je naprezanje u određenom voju veće od dopuštenog i potrebno ga je smanjiti. Promjena se vrši na način da se poveća debljina voja ili da se pojača ukrepa uzdužnjaka, koja će posljedično utjecati na povećanje momenta otpora. Moment otpora je bitan kriterij vezan za uzdužnjake koji je opisan u poglavlju 3.2.2. Taj se kriterij može zadovoljiti bez povećanja debljine dotičnog voja i njemu pridruženih uzdužnjaka, što se postiže pomicanjem neutralne linije, budući da nam je poznata relacija iz nauke o čvrstoći [4]:

$$W = \frac{I}{z} \qquad (3.1)$$

gdje je W moment otpora presjeka, I je aksijalni moment tromosti, a z je udaljenost pojedinog voja od neutralne linije.

Naprezanje je izraženo pomoću momenta savijanja i momenta otpora i dobiva se [2]:

$$\sigma = \frac{M}{W} \qquad (3.2)$$

Odnosno preko aksijalnog momenta tromosti [2] :

$$\sigma = \frac{M}{I} z \qquad (3.3)$$

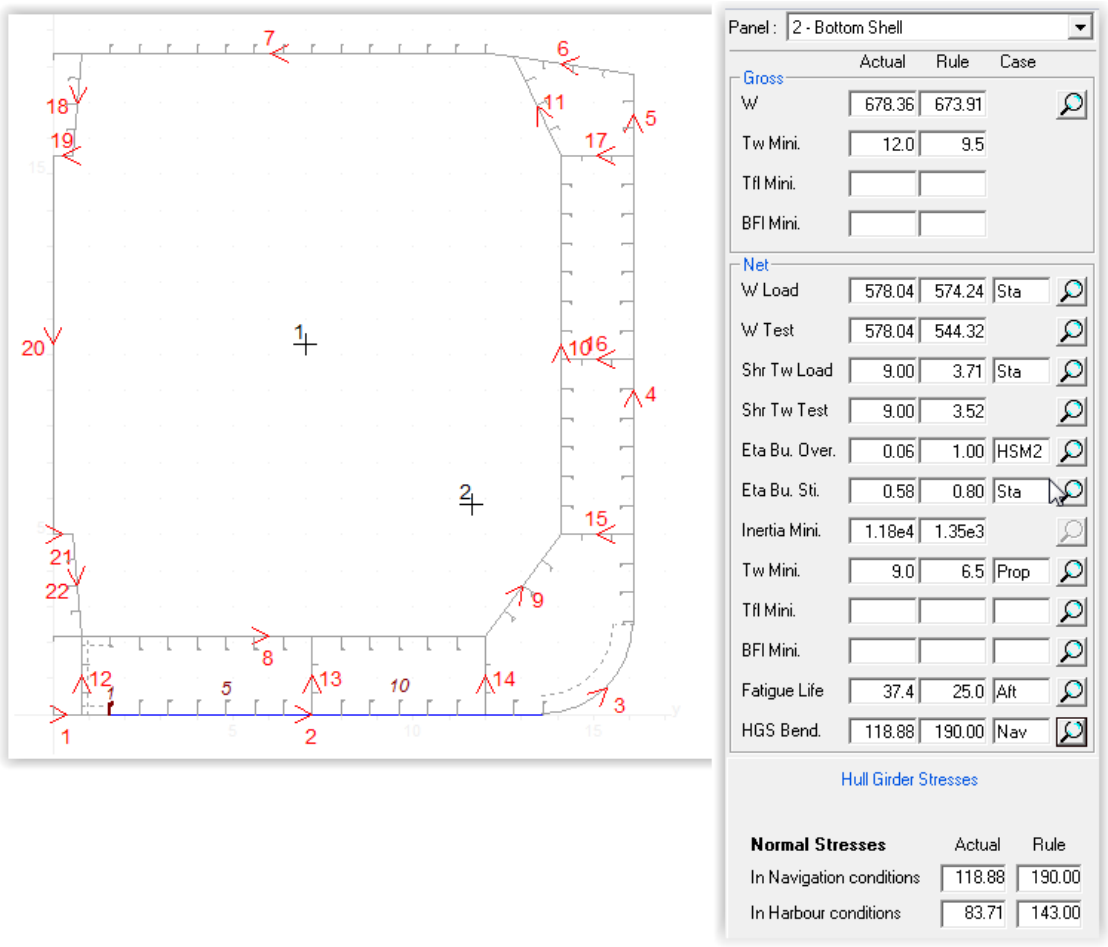
Iz jednadžbe 3.3 vidljivo je da približavanje voja neutralnoj osi uzrokuje smanjenje naprezanja uslijed savijanja, budući da su naprezanja linearna po visini presjeka prema *Euler-Bernoullijevoj* teoriji grede. Približavanje voja neutralnoj osi izvodi se promjenom položaja neutralne linije presjeka, budući da nije moguće pomaknuti pojedini voj. Položaj neutralne linije dobije se prema :

$$z_{NL} = \frac{\sum z_e A_e}{\sum A_e} \qquad (3.4)$$

gdje z_e predstavlja udaljenost pojedinog elementa od osnovice, a A_e predstavlja površinu pojedinog elementa. Dakle, povećanjem površina (što se izvodi povećavanjem debljina ili širina elementa ili veličina ukrepa) više postavljenih elemenata, položaj neutralne linije se povećava, z_{NL} raste, što znači da z pada (opisanog voja palube) kao i σ [4].

3.2.2 Kriteriji vezani za uzdužnjake

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

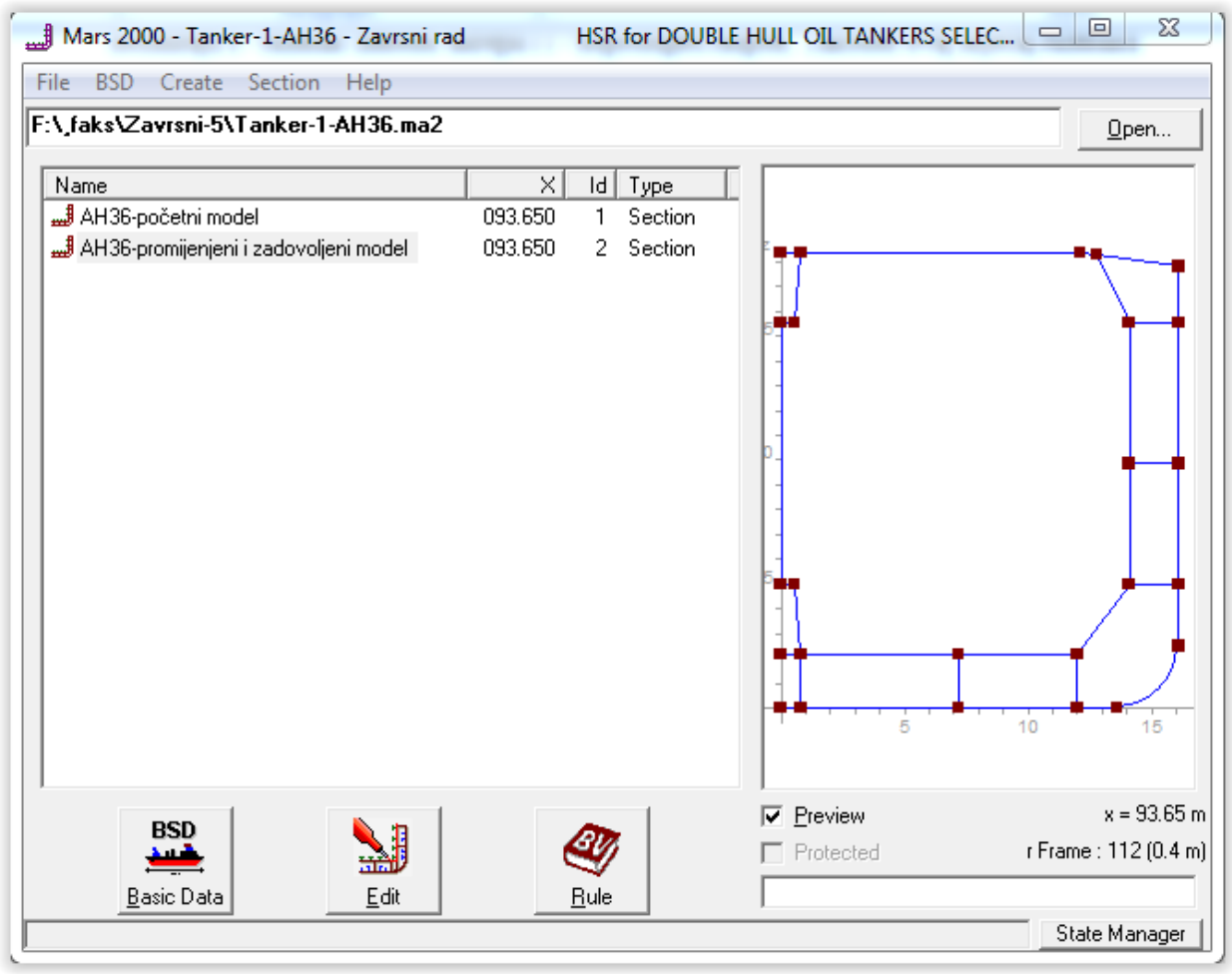


Slika 17 Kriteriji vezani za ukrepe, odnosno uzdužnjake

Najbitniji kriteriji vezani za ukrepe, odnosno uzdužnjake je da stvarni moment otpora *W* bude veći od zahtijevanog i da stvarna minimalna debljina struka bude veća od zahtijevane. Pri zadovoljavanju kriterija zahtijevanog momenta otpora uočen je izrazit utjecaj razmaka među ukrepama, kao i razmaka između poprečnih struktura koje definiraju *s* - razmak između ukrepa i *l* - nepoduprti raspon. Ovaj utjecaj razmaka *s* poprečnih struktura utječe na zadovoljavanje kriterija izvijanja ukrepa. Na ove kriterije za uzdužnjake utjecat će i odabir materijala. O njima će biti govora u sljedećem poglavlju 4., gdje će biti pokrijepljeni sa varijantama koje su napravljene u ovom radu.

3.2.3 Način provođenja proračuna

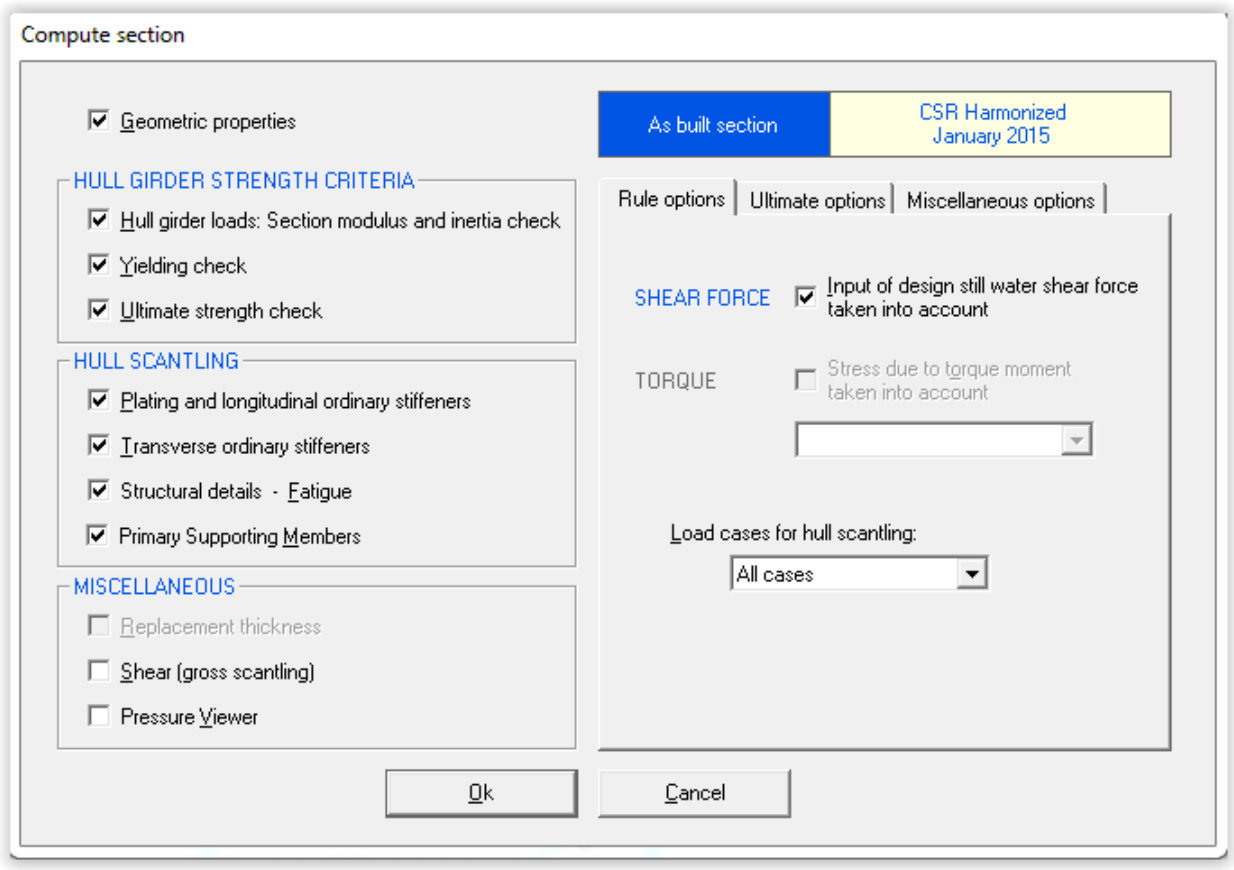
U poglavljima 3.2.1. i 3.2.2. opisani su kriteriji radi boljeg izvođenja proračuna u programu MARS. To nam omogućuje najbolji mogući odabir prihvatljivih materijala i debljina za pojedine zone glavnog rebra, osobito za one elemente koje ne zadovoljavaju neki od kriterija. Bit proračuna je da završna konstrukcija bude podobna. Nakon svih opisanih koraka kreće se u izvođenje proračuna. To se izvodi tako da se na svaki generirani model pritisne tipka *Rule*, prikazana na slici 18 Slika nam prikazuje početni model i model koji zadovoljava sve nabrojane kriterije. Model na slici 18 je napravljen od čelika povišene čvrstoće AH36.



Slika 18 Pokretanje proračuna

Pritiskom na tipku *Rule* otvara nam se prozor koji nam služi za postavljanje pojedinih postavki vezanih za proračun. Pomoću ovog prozora odabiremo postavke koje želimo, s

ciljem da nam program izračuna i prikaže rezultate nakon provedenog proračuna. To je prikazano sljedećom slikom.



Slika 19 Odabir postavki proračuna

Prva kućica nam predstavlja geometrijske karakteristike koje želimo dobiti. Ispod toga su prikazani kriteriji vezani za uzdužnu čvrstoću. Ti se kriteriji odnose na momente otpora i momente inercije, kriterije za provjeru popuštanja, te kriterije vezane za provjeru granične čvrstoće. Sljedeće četiri kućice opisuju dimenzije glavnog rebra tankera. Prva se kućica odnosi na debljine oplate i uzdužnjake, druga kućica na poprečne uzdužnjake, treća na konstrukcijske detalje (odnosno kako konstrukcija reagira na zamor materijala), dok se četvrta kućica odnosi na primarne poduprte elemente. Na desnoj se strani slike 19 odabiru opcije proračuna. U ovom zadatku su odabrane kućice: *Rule options* i *Ultimate options*. *Ultimate options* se odnose na provjeru uzdužne čvrstoće neoštećenog trupa i oštećenog trupa uslijed sudara i nasukavanja, dok se kod *Rule options* u obzir uzimaju

smične sile na mirnoj vodi. Preko odabira postavki, program nam prikazuje poprečne sile i tlakove koje djeluju na konstrukciju.

4. ANALIZA REZULTATA

Nakon objašnjenih kriterija i načina izvođenja proračuna, u ovom poglavlju će biti objašnjeno koje su se varijante sa materijalima koristile kod projektiranja glavnog rebra.

Varijante koje su korištene:

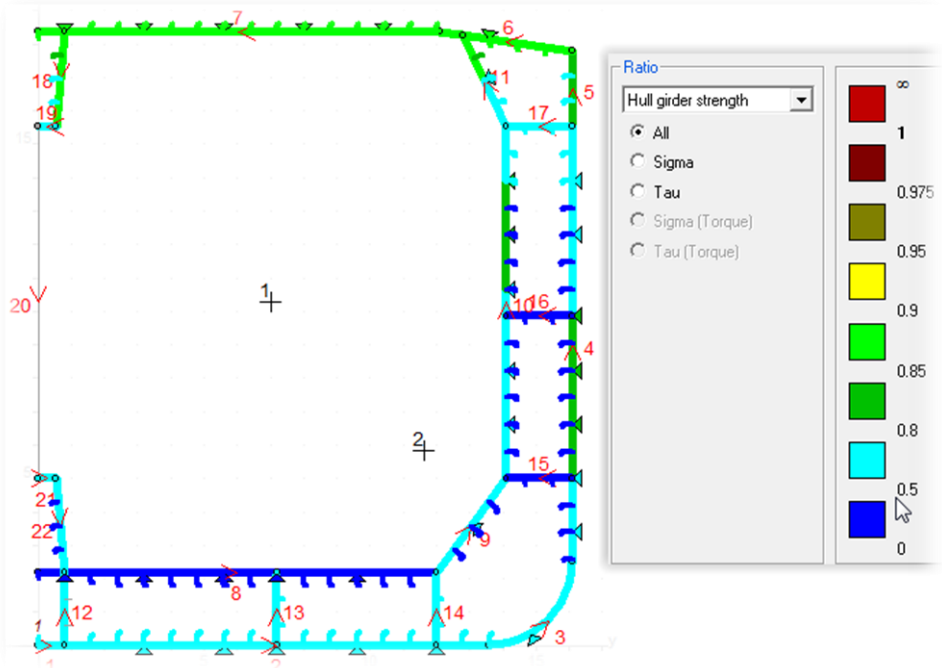
1) običan brodograđevni čelik ST24
2) čelici povišene čvrstoće AH32
3) čelici povišene čvrstoće AH36
4) kombinacija čelika povišene čvrstoće AH32 i običnog brodograđevnog čelika ST24

Cilj različitih varijanti bio je pokušaj ravnopravnog analiziranja i pokušaj dobivanja što bolje iskoristivosti površine glavnog rebra. Također je uspoređeno kako različiti materijali utječu na globalnu i lokalnu čvrstoću. Treba napomenuti da nam program MARS , za slučaj progiba, izračunava dvije vrijednosti za zahtijevani moment savijanja: momente za *Navigation*, odnosno u uvjetima službe, te momente za *Full Load Homogeneus*, odnosno za puno opterećenje. Za usporedbu rezultata se uzimaju momenti savijanja za puno opterećenje, *Full Load Homogeneus*. Promjenom debljine oplate (voja) se utječe na M_{ULT} i na postotak (%) u progibu. Taj se postotak izračuna preko omjera vertikalnog graničnog momenta savijanja M_B i graničnog momenta M_{ULT}. Primjerice, povećanjem debljine oplate povećava se moment M_{ULT}, a smanjuje se % , dok M_B ne ovisi o promjeni dimenzija.

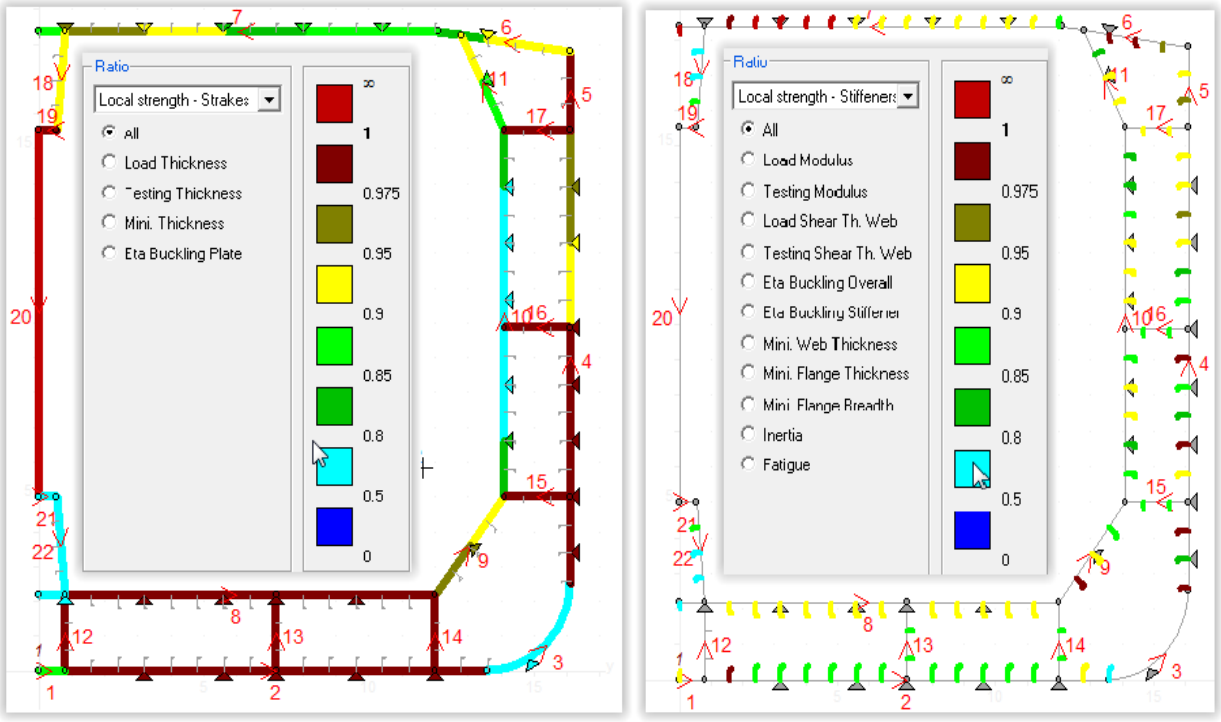
Prije analize rezultata, objasnit će se terminologija MARS-a, odnosno usporediti sa terminologijom koja se koristi kod Harmoniziranih pravila. Oznaka vertikalnog momenta graničnog savijanja *M* kod Harmoniziranih pravila predstavlja $M_{B,}$ dok se preko formule $\frac{M_U}{\gamma_R}$ izračuna M_{ULT} u programu MARS.

$$M_{ULT} = \frac{M_U}{\gamma_R} \qquad (4.1)$$

4.1 Varijante glavnog rebra sa različitim materijalima

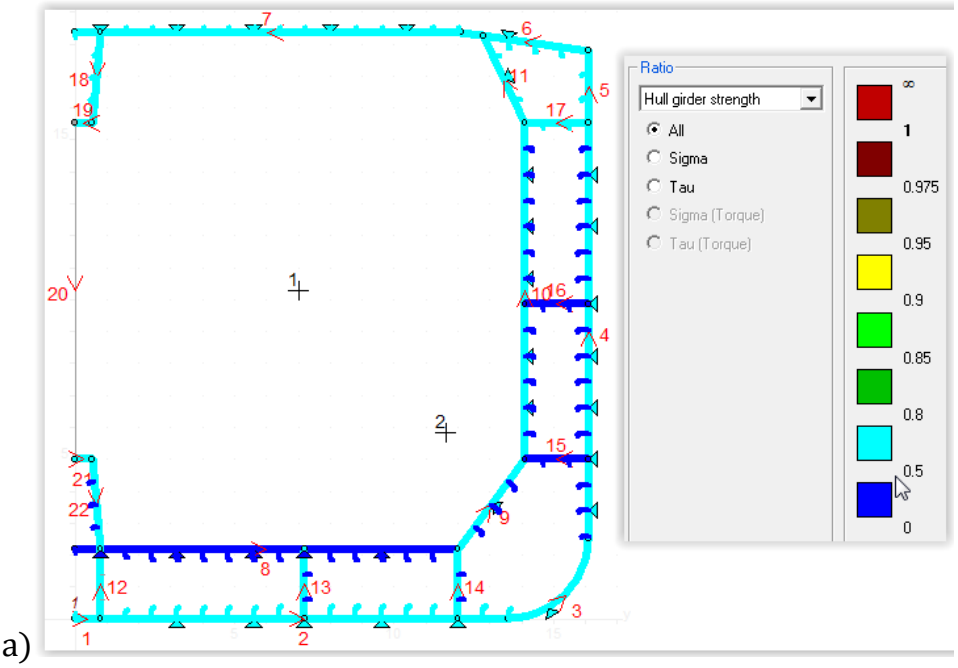


a)

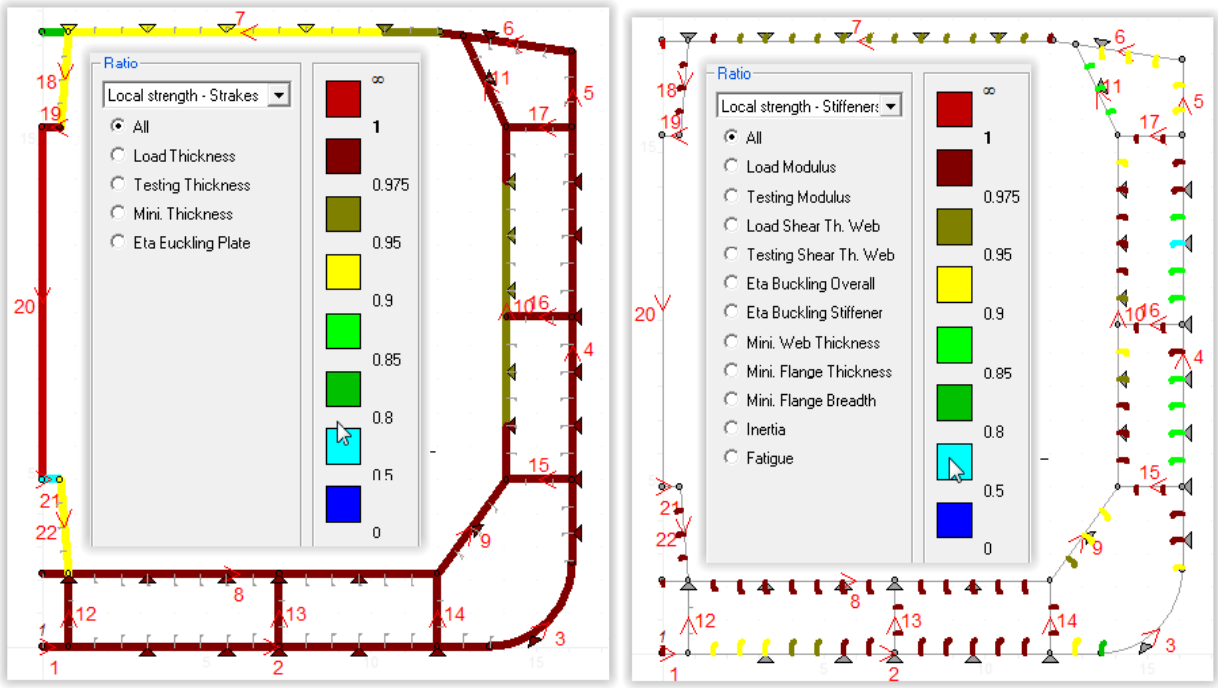


b)

Slika 20 Kriteriji za a) globalnu i b) lokalnu čvrstoću glavnog rebra od običnog brodograđevnog čelika ST24

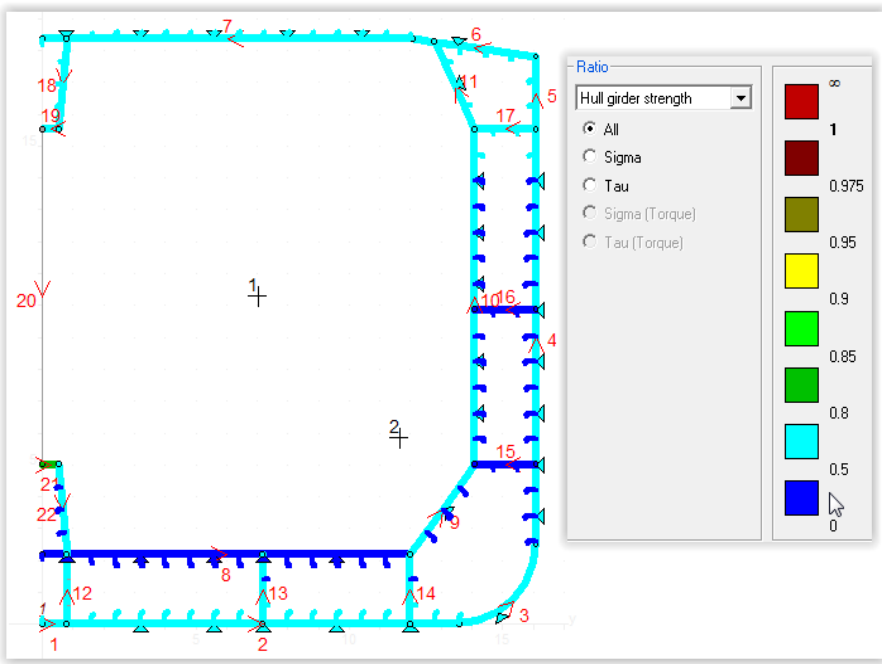


a)

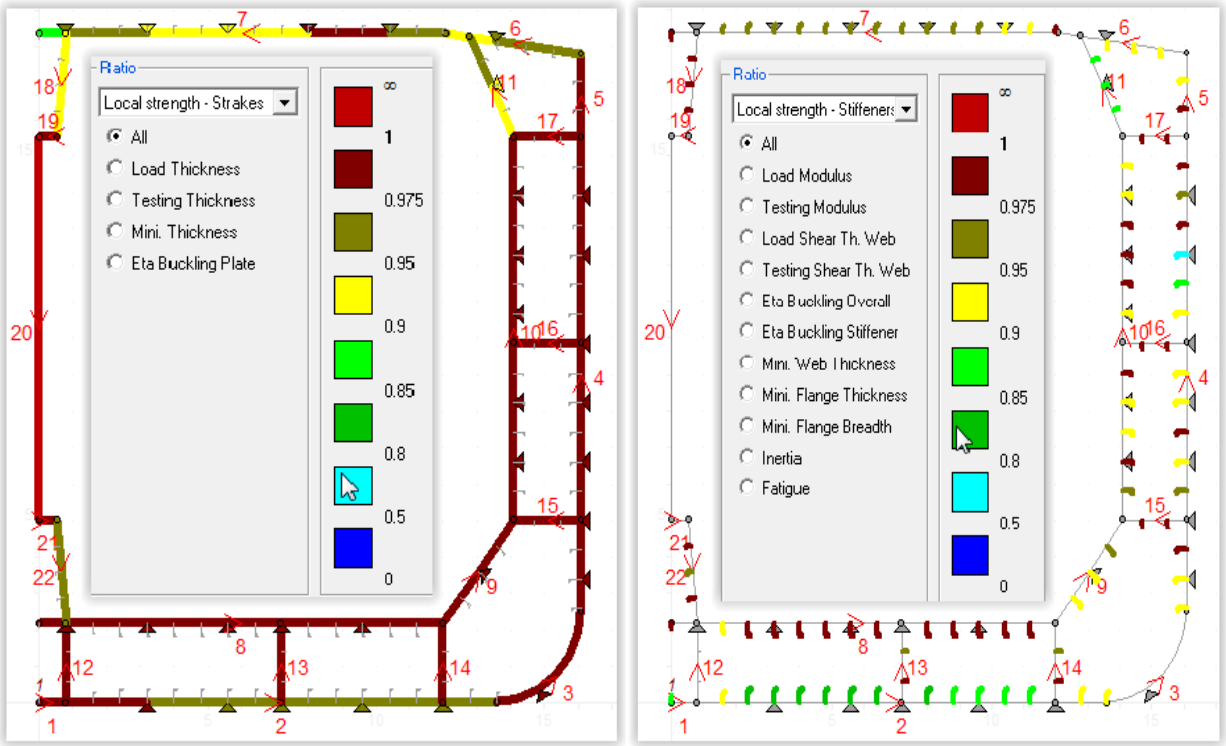


b)

Slika 21 Kriteriji za a) globalnu čvrstoću i b) lokalnu čvrstoću glavnog rebra od čelika povišene čvrstoće (AH36)

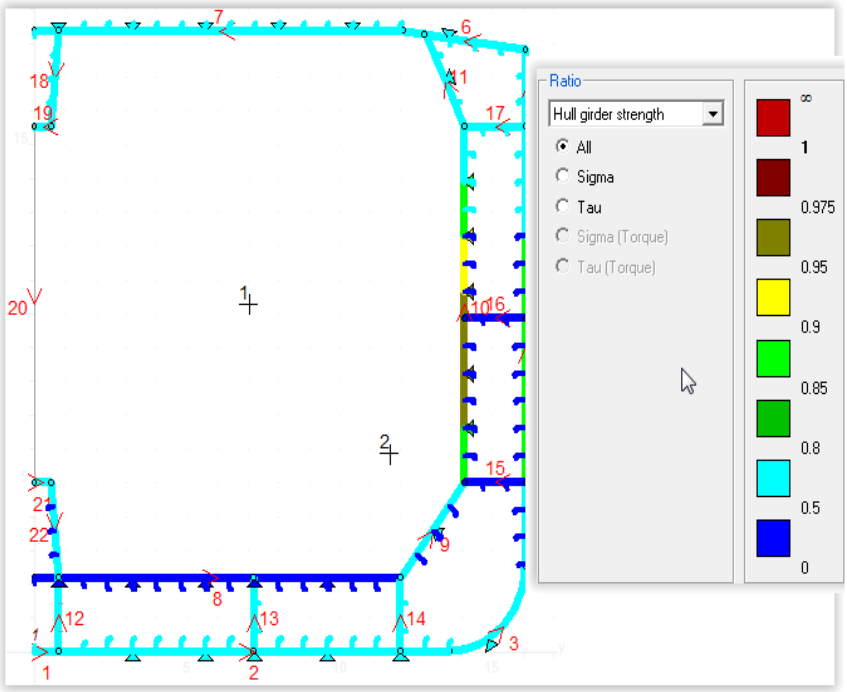


a)

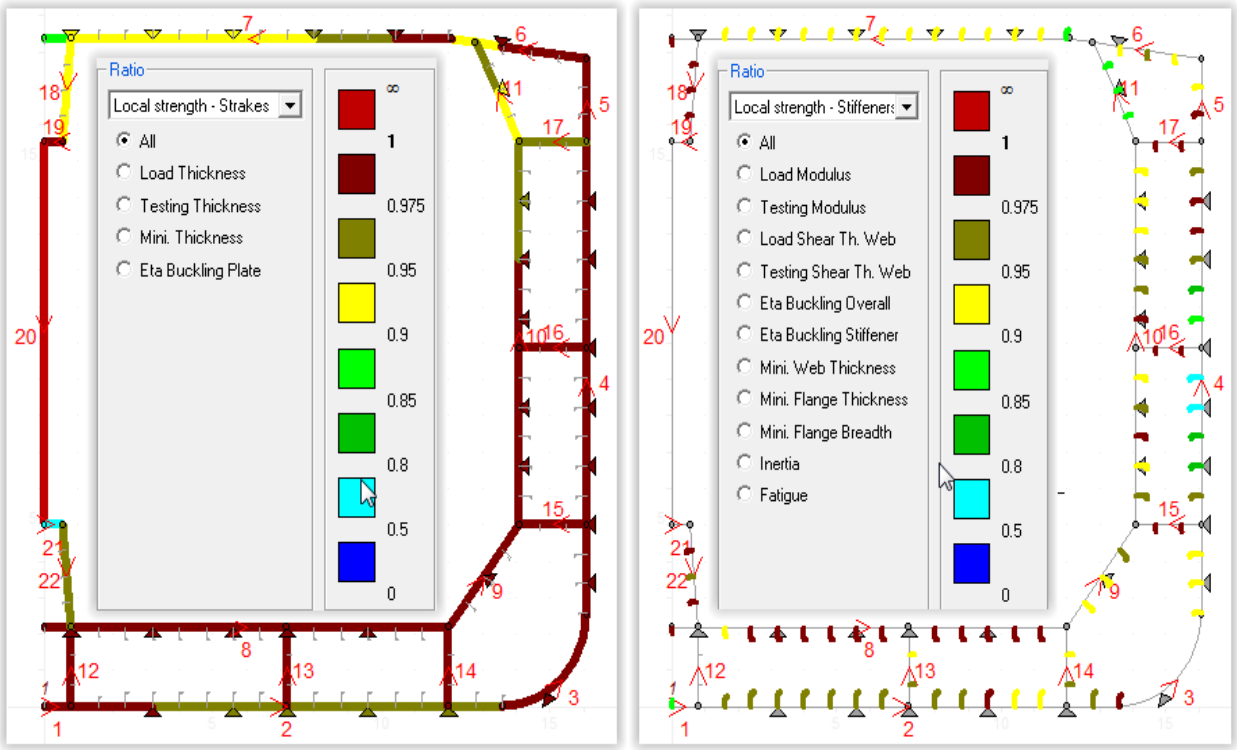


b)

Slika 22 Kriteriji za a) globalnu čvrstoću i b) lokalnu čvrstoću glavnog rebra od čelika povišene čvrstoće (AH32)

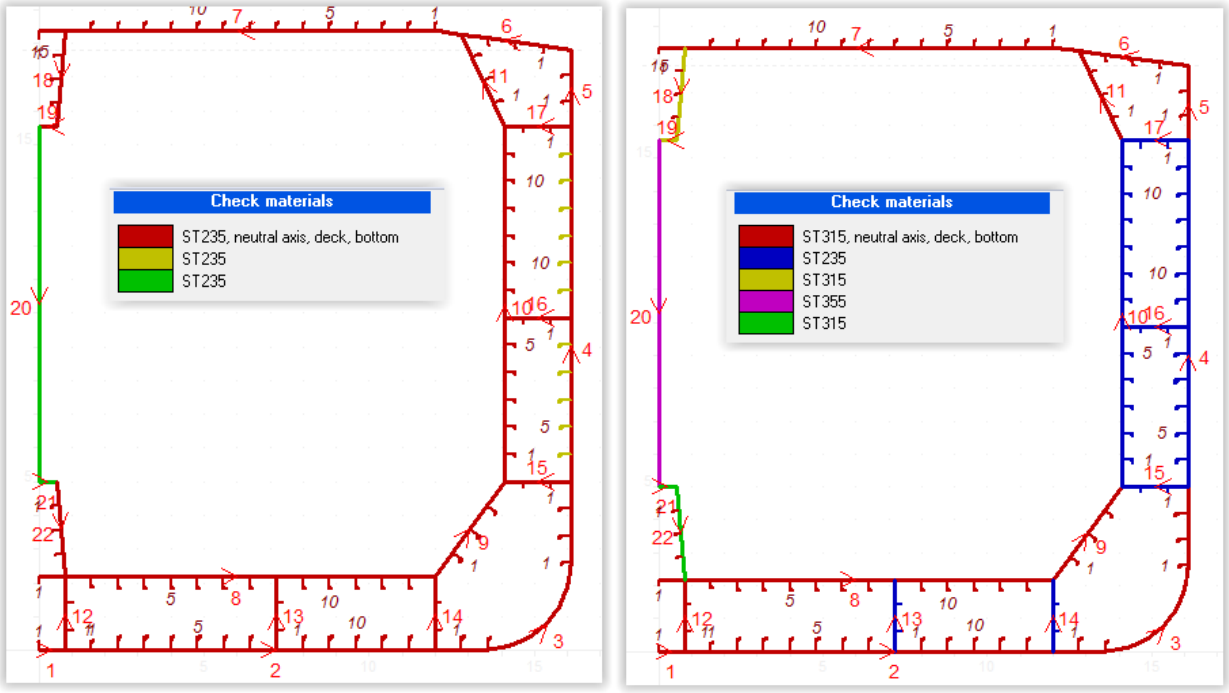


a)



b)

Slika 23 Kriteriji za a) globalnu čvrstoću i b) lokalnu čvrstoću kod glavnog rebra kombiniranih materijala (AH32-ST24)



Slika 24 Prikaz materijala a) kod varijante glavnog rebra ST24 (desno) i b) kod varijante glavnog rebra kombinacije AH32 i ST24 (lijevo)

Varijante glavnog rebra sa čelikom povišene čvrstoće AH32 i AH36 su slične slici 24 pod a), kao i varijanta glavnog rebra sa običnim brodograđevnim čelikom ST24. Varijanta kombinacije AH32 i ST24 glavnog rebra je uobičajena u praksi.

4.1.1 Analiza varijanti konstrukcije glavnog rebra

Na slikama 20, 21, 22 i 23 su prikazani kriteriji za globalnu i lokalnu čvrstoću kod različitih materijala od kojih je konstruirano glavno rebro. Sve varijante glavnog rebra zadovoljavaju navedene kriterije koji su opisani u poglavlju 3.2.1. i 3.2.2. Kućica *All* nam prikazuje kriterije koji su najzastupljeniji na određenim zonama glavnog rebra. U navedenim slikama spominje se pojam *RATIO*, koji predstavlja faktor iskoristivosti, odnosno omjer između opterećenja (e: *load*, *demand*, *L* ili *D*) i izdržljivosti(e: *capability*, *R* ili *C*), čime se omogućuje jednostavno i prepoznatljivo izražavanje mjera sigurnosti kvantitativnim veličinama.

$$RATIO = \frac{D}{C} \qquad (4.2)$$

Na primjer

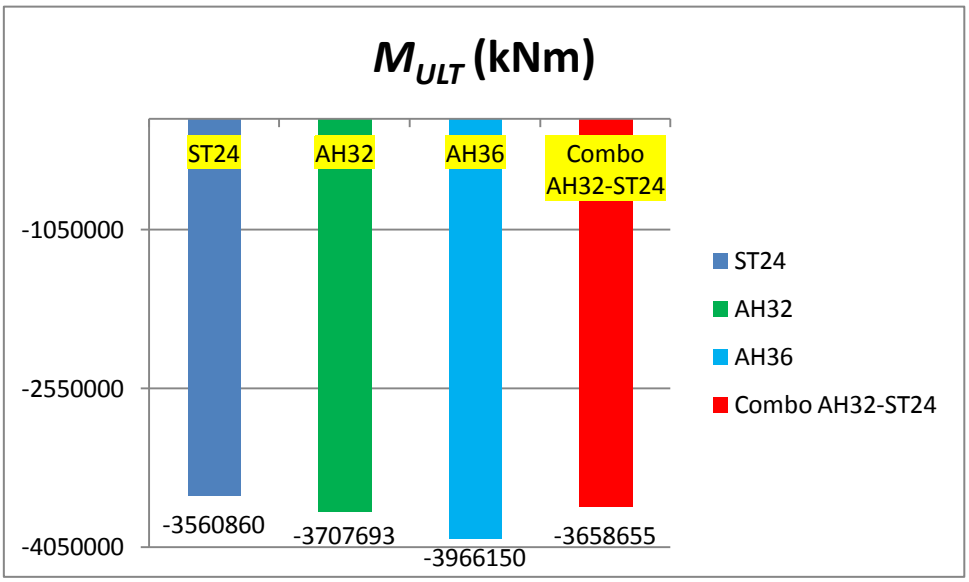
- za minimalni debljinu: $RATIO = \frac{t_{min}}{t_{actual}}$ (4.3)

- za izvijanje: $RATIO = \frac{\sigma}{\sigma_{ekv}}$ (4.4)

a) Kriteriji za globalnu čvrstoću se razlikuju kod običnog brodograđevnog čelika i čelika za povišenu čvrstoću. Kod običnog brodograđevnog čelika ST24 izraženija su normalna naprezanja (Sigma) na palubi, koja iznose 80 % iskoristivosti, dok kod čelika povišene čvrstoće AH32 i AH36 normalna i smična naprezanja iznose od 0 do 50 % iskoristivosti. To se događa zbog različite granice razvlačenja R_e, koja je kod čelika povišene čvrstoće AH32 i AH36 veća od običnog brodograđevnog čelika ST24.

Granice razvlačenja pojedinog čelika iznose [3]:
-R_e=235 N/mm^2 za običan brodograđevni čelik ST24
-R_e=315 N/mm^2 za čelik povišene čvrstoće AH32
-R_e=355 N/mm^2 za čelik povišene čvrstoće AH36

Palube se većinom rade u uzdužnom sustavu gradnje jer dosta doprinose pri računanju uzdužne čvrstoće broda. Opterećene su tlakom uslijed dinamičkog djelovanja mora pri naplavljivanju mora na palubu te tlakovima tekućeg tereta koji ima tendenciju podizanja palube kad su teretni prostori nakrcani – to se najviše odnosi na tankere [3]. Najčešća praksa je da se dijelovi koji su izloženi najvećim naprezanjima rade od čelika povišene čvrstoće. To se najbolje vidi kod varijante glavnog rebra projektiranog od kombiniranog materijala AH32-ST24, gdje su izraženija smična naprezanja (Tau) na sredini. Kod te kombinacije bok je napravljen od običnog brodograđevnog čelika ST24. Elementi koji se nalaze blizu neutralne osi imaju veća smična naprezanja od onih kojih se nalaze na palubi ili dnu broda. Još jedna bitna karakteristika kojom se prikazuje razlika globalne čvrstoće kod brodova sa različitim materijalima je granični moment savijanja trupa u stanju progiba za vrijeme pune opterećenosti, *Full Load Homogeneus*. Kriterij globalne čvrstoće zadovoljava kod svih varijanti glavnog rebra sa različitim materijalom. Iskoristivost bi se mogla povećati ako bi se u proračunu promijenile dimenzije oplate, uzdužnjaka i ostalih strukturnih elemenata , ali treba paziti na zadovoljenje kriterija lokalne čvrstoće.



Slika 25 Dijagram graničnog momenta savijanja trupa za različite varijante u stanju progiba

Varijante glavnog rebra	M_{ULT}(kNm) -stanje progiba (*SAGG*)	*RATIO %*	M_i/M_P
ST24	-3560860	97.51	100 %
AH32	-3707693	93.65	104%
AH36	-3966150	87.54	111%
Komb. AH32-ST24	-3658655	94.90	103%

Tablica 5 Iznos graničnog momenta savijanja za različite materijale

gdje je :

- RATIO – predstavlja iskoristivost graničnog momenta savijanja u progibu
- M_p – početni granični moment savijanja početnog modela ST24
- M_i – varijante ostalih graničnih momenata savijanja presjeka glavnog rebra
- M_i/M_p – povećanje graničnog momenta savijanja u odnosu na početni, izraženo u postotcima

U tablici 5 se vidi da varijante glavnog rebra sa čelicima povišene čvrstoće AH32 i AH36, te kombinacija AH32-ST24 imaju veći granični moment M_{ULT} od običnog

brodograđevnog čelika ST24, budući da granični moment, osim o geometriji presjeka glavnog rebra, ovisi o karakteristikama materijala.

b) Kriterij lokalne čvrstoće dijeli se na kriterije vezane za vojeve i uzdužnjake. Lokalna čvrstoća je zadovoljena kod svih varijanti glavnog rebra. Minimalna debljina oplate je bolje zadovoljena kod varijanti glavnog rebra sa povišenim čelicima AH32 i AH36, te kombinacije AH32-ST24, gdje iskoristivost iznosi preko 90 % . S druge strane, kod običnog brodograđevnog čelika iskoristivost (*RATIO*) varira: na palubi iznosi 80% zbog kriterija na lokalno izvijanje oplate i lokalnog opterećenja u vlastitoj ravnini, uslijed prenošenja tlakova sa bokova broda i drugih susjednih elemenata na palubu [5], a na dvodnu, dnu i boku broda iznosi preko 90 % . Oplata dvodna broda je pogodna za preuzimanje globalnih savojnih opterećenja brodskog trupa kao grede, osobito tlačnih opterećenja koja nastaju u pregibu broda, a izlažu elemente dna izvijanju [5].

Uzdužnjaci sudjeluju u proračunu uzdužne čvrstoće broda. Također, lokalna čvrstoća je kod uzdužnjaka zadovoljena za sve varijante glavnog rebra. Kod svih varijanti glavnog rebra iskoristivost prelazi 90 %, što znači da je za svaki uzdužnjak njegova iskoristivost dovedena gotovo do maksimuma. Pri dimenzioniranju se treba paziti na oblik profila. Svaki odabrani profil mora imati proračunati moment otpora *W* koji zadovoljava pravilima klasifikacijskog društva, te naravno, doprinosi čvrstoći broda [3]. Vrijednost određenog momenta otpora *W* jednog profila odgovara za debljinu efektivnog pojasa lima koja je jednaka debljini profila [3]. Jedan od bitnih kriterija na koje treba pripaziti kod uzdužnjaka je zamor materijala. Zamor materijala se pojavljuje zbog učestalosti promjene opterećenja koja se pojavljuju kod slobodnih krajeva limova, veznih struktura i zavarenih spojeva [5]. Kriterij zamora materijala na varijantama glavnog rebra različitih materijala pojavljuje se na uzdužnjacima dna, boka i palube broda. Ta su mjesta pod utjecajem globalnih dinamičkih opterećenja, pa bi se veličina uzdužnjaka trebala povećati da bi se zadovoljio taj kriterij. Isto tako, treba se pripaziti na lokalno izvijanje uzdužnjaka koje je najkritičnije na palubi kod svake varijante glavnog rebra.

4.2 Usporedba površine presjeka glavnog rebra sa odabirom materijala

Nakon provedene analize rezultata, iz programa MARS se izvlače podatci o površini glavnog presjeka glavnog rebra i neutralne linije za različite varijante glavnog rebra.

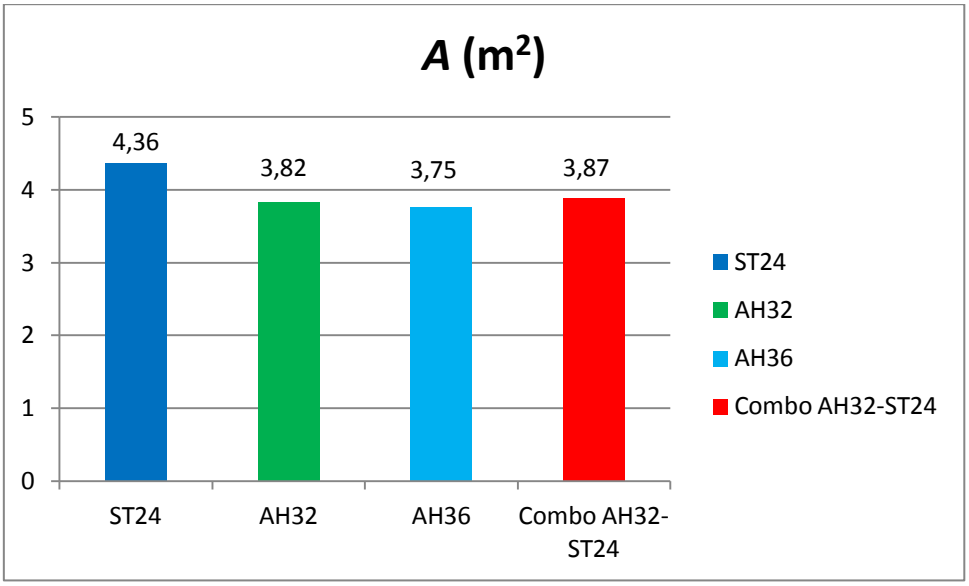
Varijante	A [m^2]	z [m]	A_i/A_p (i=1,..,4)
ST24	4.36	7.646	100 %
AH32	3.82	7.702	88 %
AH36	3.75	7.733	86 %
Komb. AH32-ST24	3.87	7.783	89 %

Tablica 6 Površine presjeka glavnog rebra i neutralne linije za sve varijante

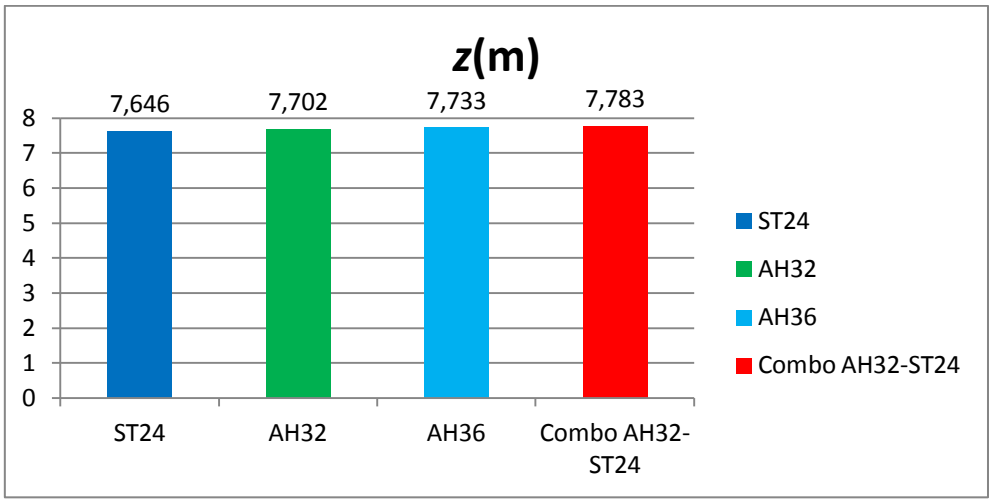
Gdje je : A_p - površina presjeka glavnog rebra početnog modela ST24

A_i - varijante ostalih površina presjeka glavnog rebra

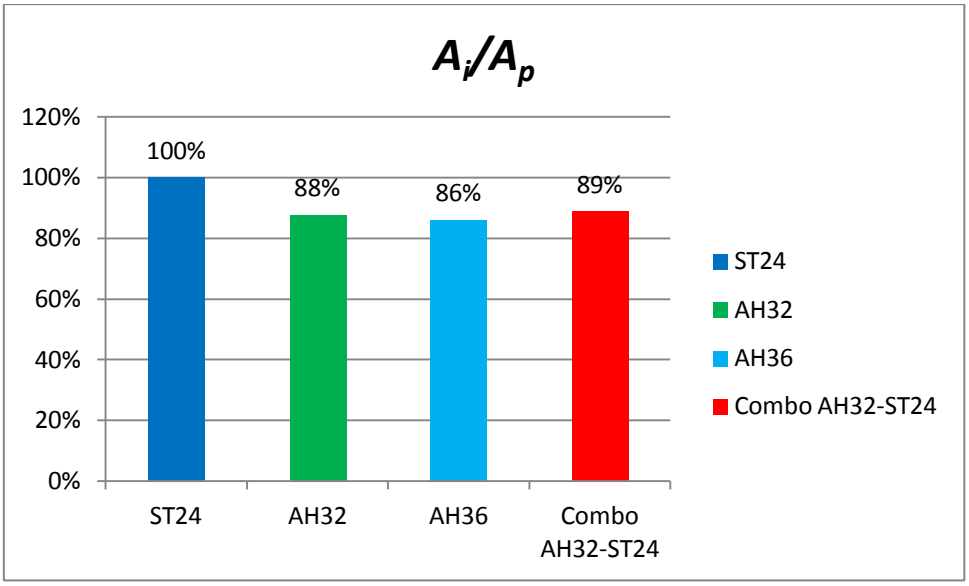
A_i/A_p - predstavlja smanjenje površine presjeka glavnog rebra u odnosu na početni model ST24, izraženo u postotcima



Slika 26 Površina presjeka glavnog rebra po različitim varijantama



Slika 27 Položaj neutralne linije po različitima varijantama



Slika 28 Dijagram različitih varijanti o početnom modelu ST24

Na slici 26 se vidi dijagram ovisnosti površine *A* sa različitim varijantama. Običan brodograđevni čelik ima najveću površinu zbog male granice popuštanja R_e= 235 N/mm^{2,} pa se može iskoristiti više površine presjeka glavnog rebra, za razliku od čelika povišene čvrstoće. Površina varijante glavnog rebra sa čelikom povišene čvrstoće AH36 ima malu površinu presjeka glavnog rebra. Njegova granica popuštanja iznosi R_e= 355 N/mm^2. Slika 27 nam prikazuje dijagram ovisnosti neutralne linije *z* sa različitim varijantama. Najveću neutralnu liniju ima varijanta kombinacije materijala AH32-ST24. Slika 28 nam govori kako se ponašaju površine drugih varijanti u ovisnosti na površinu

početnog modela projektiranog od običnog brodograđevnog čelika ST24. Najveće smanjenje površine ima varijanta glavnog rebra projektirana od čelika povišene čvrstoće AH36 zbog jako velike granice popuštanja.

4.2.1 Analiza cijena u odnosu na varijante glavnog rebra

Različite površine kod varijanti glavnog rebra utječu na njegovu ukupnu masu koja se sastoji od limova i profila.. U ovom radu su cijene limova i profila uzete prema dostupnim podacima iz brodogradilišta ULJANIK. Cijene se dinamički mijenjaju ovisno o stanju cijene čelika na svjetskom tržištu. Cijena je zadana u €/t za pojedini materijal. Sljedeća tablica nam prikazuje cijene limova i profila za materijale korištene u radu, pomoću kojih su izračunate ukupne cijene pojedinih varijanti glavnog rebra.

€/t	Limovi	Profili
ST24	500	600
AH32	525	675
AH36	535	685

Tablica 7 Jedinična cijena za pojedini čelik

Gustoća čelika je konstantna i iznosi ρ=7.85 t/m^3. Iz MARSa su očitane površine limova i profila pojedinih materijala za varijante glavnog rebra.

Varijante od istog čelika	***A* (m^2)**		**$\sum m$ (t)**		**c (€)**		**Ukupna cijena(€)**
	limovi	**profili**	**limovi**	**profili**	**limovi**	**profili**	
ST24	3.372	0.985	26.471	7.732	13235	4639	17875
AH32	2.947	0.870	23.134	6.829	12146	4609	16755
AH36	2.924	0.822	22.953	6.452	12280	4419	16699

Tablica 8 Ukupna cijena presjeka od istog čelika

Kombinirana varijanta	***A* (m^2)**		***m* (t)**		***c* (€/t)**		**Ukupna cijena(€/m)**
Comb. AH32-ST24	**limovi**	**profili**	**limovi**	**profili**	**limovi**	**profili**	
ST24	0.869	0.287	6.823	2.253	3411	1352	4763
AH32	1.937	0.591	15.208	4.642	7984	3134	11118
AH36	0.184		1.447		774		774
		∑	23.477	6.895		∑	16655

Tablica 9 Kombinirani presjek varijante glavnog rebra

Tablice 8 i 9 nam prikazuju varijante presjeka glavnog rebra. Formule koje su korištene za izračun ukupne cijene:

$$m = \rho V$$

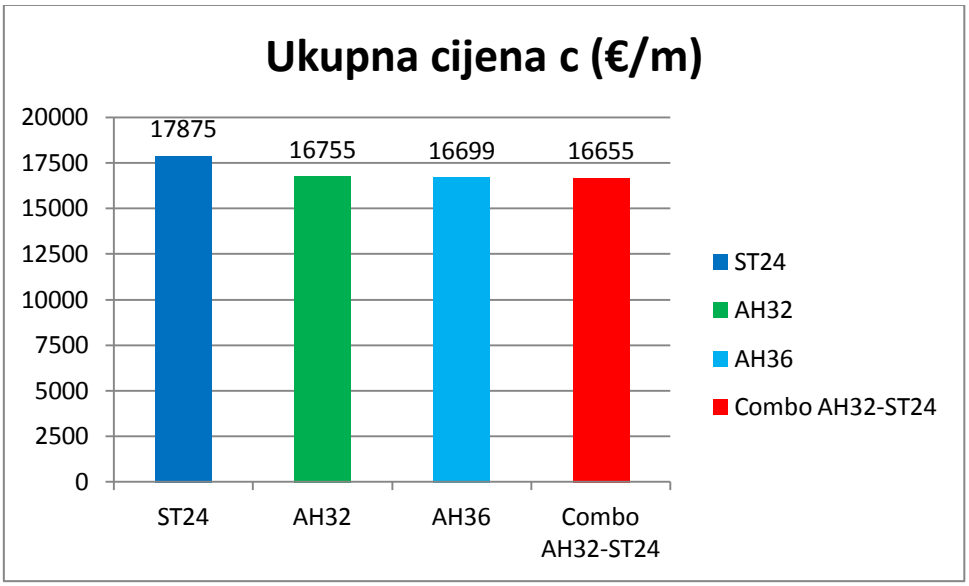
$$c = mi$$

gdje je:

m – masa pojedinih limova i profila koji se nalaze u pojedinim varijantama
V – volumen tanka koji se dobije množenjem površine A sa jediničnom širinom
i – jedinična cijena koja je zadana u tablici 7 za limove i profile pojedine vrste čelika

Odabir pojedinog čelika za konstruiranje presjeka glavnog rebra utječe na njegovu ukupnu površinu. Površina limova i profila je proporcionalna sa njenom masom. Iz toga proizlazi da povećanjem površine limova i profila dobivamo veću ukupnu cijenu te varijante glavnog rebra. U tablicama 8 i 9 vidi se da je najskuplja varijanta glavnog rebra od običnog brodograđevnog čelika ST24, a najjeftinija je varijanta glavnog rebra konstruirana od kombinacije AH32-ST24. Upotreba čelika povišene čvrstoće utječe na limove koji su tanji nego kod običnog brodograđevnog čelika. Zavarivanju pojedinih detalja strukturnih elemenata treba se posvetiti više pažnje zbog granice popuštanja koja je viša od granice popuštanja kod običnog brodograđevnog čelika. Javljaju se velika zaostala naprezanja. Presjek kombiranog AH32-ST24 biti će olakšan, biti će lakše raditi sa tanjim limovima i uštedit će se na težini trupa. Ušteda na težini trupa utječe na povećanje nosivosti, što odgovara i brodovlasniku.

Promjenom te jedinične cijene sigurno se mijenja cijena pojedine varijante glavnog rebra (tablica 7). Sljedeća slika daje najbolji uvid u cijenu glavnog rebra u ovisnosti o varijanti uporabljenog čelika, uzeto iz tablice 8 i 9.



Slika 29 Usporedba jedinične cijene za različite varijante glavnog rebra

Varijante	A_{uk}(m^2)	A_{lim}(m^2)	A_{prof} (m^2)	A_{lim}/A_{uk}	A_{prof}/A_{uk}
ST24	4.36	3.372	0.985	77.39%	22.61%
AH32	3.82	2.947	0.870	77.21%	22.79%
AH36	3.75	2.924	0.822	78.06%	21.94%
Combo AH32-ST24	3.87	2.991	0.878	77.30%	22.70%

Tablica 10 Odnos površine limova i profila na ukupnu površinu

Varijante	Cijena materijala uzdužnih elemenata po dužnom metru (€/m)	Odnos cijena
ST24	17875	100.00%
AH32	16755	93.73%
AH36	16699	93.42%
Combo AH32-ST24	16655	93.17%

Tablica 11 Odnos cijena pojedine varijante na početnu

4.2.2 Zaključak na dobivene rezultate cijena i površina

Na slici 29 vidi se da je najjeftinija varijanta sa kombinacijom čelika povišene čvrstoće AH32 i običnog brodograđevnog čelika ST24, a najskuplja varijanta sa običnim brodograđevnim čelikom ST24.

Varijanta kombinacije AH32 i ST24 je odabrana zbog jedinične cijene limova i profila. Jedinična cijena limova i profila (tablica 7) je povezana sa ukupnom površinom presjeka (proporcionalna je sa masom) glavnog rebra koja iznosi A_{uk} = 3.87 m^2. Još jedan od razloga odabira te varijante AH32-ST24 je odnos površine limova i profila sa ukupnom površinom i pojedine varijante ST24 i AH32, za limove: A_{lim}/A_{uk} (ST24)=77.39 % i A_{lim}/A_{uk} (AH32) = 77.21 % , a za profile: A_{prof}/A_{uk} (ST24) = 22.61 % , A_{prof}/A_{uk} = 22.79 % . Prednost kombinacije AH32-ST24 vidljiva je na temelju proračuna kombinacija raznih varijanta, na primjer : ST24-AH36, ST24-AH32-AH36 itd. Osim odnosa površina, na odabir varijante AH32-ST24 utjecao je granični moment savijanja u stanju progiba čije povećanje iznosi 3% u odnosu na početni model. Kao što je prije spomenuto, granični moment savijanja ovisi o geometriji presjeka i odabira pojedinog materijala.

Cilj proračuna je bio dobiti što lakši brod, a upotreba kombinacije čelika povišene čvrstoće i običnog brodograđevnog čelika pospješuje taj proračun. Čelik povišene čvrstoće utječe na težinu trupa tako što je smanjuje, ali povećava nosivost. Smanjenje površine u odnosu na početni model vidi se na slici 28. Kod varijanti sa AH32 i AH36 površina se smanjila za 12 % , odnosno 14 % . Koriste se tanji limovi nego kod običnog brodograđevnog čelika, dok su limovi i profili običnog brodograđevnog čelika relativno jeftini i dobro zavarljivi. Jedinične cijene su im prikazane u tablici 7 . Limovi i profili običnog brodograđevnog čelika su jeftini (tablica 10) . Vidi se da površina lima nosi približno 80 %, a površina profila 20 % od ukupne površine presjeka glavnog rebra tankera. Cijena se materijala i ugradnje čelika za jedan brod kreće od 25 do 50 % ukupne cijene broda [3] . U tablici 11 vidi se da varijante sa čelicima povišene čvrstoće smanjuju ukupnu cijenu u odnosu na početnu varijantu običnog brodograđevnog čelika. Cijene varijanti projektirane sa čelikom povišene čvrstoće smanjile su se za 7 %.

5. Zaključak

U radu je proveden proračun projektiranja različitih varijanti glavnog rebra tankera za prijevoz naftnih prerađevina, uporabom običnog brodograđevnog čelika i čelika povišene čvrstoće. Proračun se provodio prema novim zajedničkim Harmoniziranim pravilima, koja se odnose na brodove za prijevoz rasutog tereta i tankera za naftu, a koja su propisana od Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava i stupila su na snagu 1.srpnja.2015.

Na osnovi početnog modela koji je projektiran korištenjem običnog brodograđevnog čelika ST24, projektirana su dva modela sa uporabom čelika povišene čvrstoće AH32 i AH36, te jedan model sa kombinacijom čelika povišene čvrstoće AH32 i običnog brodograđevnog čelika ST24. Modeli i svi proračuni provedeni su korištenjem programa MARS klasifikacijskog društva BV.

Sve varijante presjeka glavnog rebra trebale su zadovoljiti globalnu graničnu i lokalnu čvrstoću. Neki od kriterija na koje se trebala obratit pažnja -: minimalna debljina, izvijanje, zamor materijala, granični moment savijanja, normalna i smična naprezanja.

Usporedba rezultata provela se na temelju ukupne površine presjeka A_{uk}, površine limova A_{lim} i profila A_{prof}, cijene (po dužnom metru poprečnog presjeka uzdužne strukture) i graničnog momenta savijanja M_{ult} u odnosu na običan brodograđevni čelik ST24.

U prikazanim dijagramima se jasno vidi da cijena ovisi o upotrebi određene vrste čelika. Najskuplja varijanta je sa običnim brodograđevnim čelikom ST24 koja iznosi 17875 €/m, a najjeftinija sa kombinacijom AH32-ST24 16655 €/m, što predstavlja smanjenje cijene za 7 %. Upotrebom čelika povišene čvrstoće smanjuje se površina A_{uk} glavnog presjeka, kod AH32 se smanji za 12 %, kod AH36 za 14%, a kod kombinacije AH32-ST24 za 11%. Smanjivanje površine utječe na granični moment savijanja M_{ult} u progibu koji se za čelike povišene čvrstoće povećava u odnosu na početni model, na primjer : kod AH32 se poveća za 4 %, AH36 za 11 %, te kombinacije AH32-ST24 za 3 %.

Iz ovog se rada može zaključiti da racionalnom upotrebom čelika povišene čvrstoće utječemo na smanjenje mase konstrukcije (pozitivni efekt je povećanje nosivosti) i na

cijenu čelika, a istovremeno utječemo na povećanje graničnog momenta savijanja trupa kao mjere globalne sigurnosti, uz zadovoljenje svih ostalih strukturnih kriterija.

Literatura

[1] IACS: Harmonize Common Structural Rules for Bulk Carrier and Oil Tankers, London, 2015.

[2] Radelja N, Srdoč A., "Čimbenici utjecaja na vlastitu masu broda" , XVIII Simpozij Teorija i praksa brodogradnje – SORTA, Rijeka, 2008..

[3] Grubišić M., Brodske konstrukcije, Sveučilište u Zagrebu, 1992.

[4] Alfirević, I., Nauka o čvrstoći, DD. Zagreb, Tehnička knjiga, 1995.

[5] Žiha K., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Nastavni materijali za predavanja iz kolegija Konstrukcije Broda II