ANALIZA GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA TANKERA ZA KEMIKALIJE I NAFTU

Katuša, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:142074

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-11**

Repository / Repozitorij:

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

Diplomski rad

ANALIZA GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA TANKERA ZA KEMIKALIJE I NAFTU

Rijeka, siječanj 2023.

Lucija Katuša

0035201198

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

Diplomski rad

ANALIZA GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA TANKERA ZA KEMIKALIJE I NAFTU

Mentor: Prof. dr. sc. Albert Zamarin

Rijeka, siječanj 2023.

Lucija Katuša

0035201198

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za brodogradnju i inženjerstvo morske tehnologije**
Predmet: **Čvrstoća broda**
Grana: **2.02.01 konstrukcija plovnih i pučinskih objekata**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Lucija Katuša (0035201198)**
Studij: Diplomski sveučilišni studij brodogradnje
Modul: Tehnologija i organizacija brodogradnje

Zadatak: **ANALIZA GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA TANKERA ZA KEMIKALIJE I NAFTU / HULL GIRDER ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS OF A CHEMICAL/OIL TANKER**

Opis zadatka:

Za predloženi tanker za kemikalije i naftu nosivosti 49000 t i glavnih dimenzija Loa = 195,20 m; B = 32,20 m; H = 17,80 m; T = 12,00 m; brzine u službi od 14,5 čv, potrebno je izvršiti analizu granične čvrstoće strukture trupa broda na razini glavnog rebra prema inkrementalno-iterativnoj proceduri sukladno pravilima IACS H-CSR. U tu je svrhu potrebno:
- prikazati zahtjeve za proračunom uzdužne granične čvrstoće trupa broda u neoštećenom i oštećenom stanju u okviru harmoniziranih IACS H-CSR pravila i propisa,
- prikazati pregled metoda koje se koriste kod proračuna granične čvrstoće,
- detaljno prikazati inkrementalno-iterativnu metodu,
- izvršiti proračun granične čvrstoće za predloženi tanker uz prikaz krivulje odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti za slučaj pregiba i progiba,
- prikazati krivulju smanjenja graničnog momenta savijanja u ovisnosti o veličini oštećenja te procijeniti analitičku korelaciju između veličine oštećenja i smanjenja graničnog momenta savijanja, te konačno
- dobivene rezultate usporediti sa proračunom pomoću programskog paketa BV MARS 2000.

Početne veličine oštećenja uslijed nasukivanja ili sudara odrediti u skladu s preporukama IACS H-CSR pravila i propisa.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Lucija Katuša

Mentor:

Prof. dr. sc. Albert Zamarin

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

Prof. dr. sc. Albert Zamarin

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

IZJAVA

Sukladno članku 9. "Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija" Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Analiza granične čvrstoće trupa tankera za kemikalije i naftu" izradila sama, pod voditeljstvom prof. dr. sc Alberta Zamarina.

U Rijeci, siječnja 2023.

Lucija Katuša

0035201198

Sadržaj

SAŽETAK.....1
1. UVOD.....2
2. GRANIČNA ČVRSTOĆA TRUPA BRODA.....3
2.1. Granična čvrstoća.....5
2.2. Lokalna čvrstoća.....7
2.3. Faktor iskoristivosti.....8
3. INKREMENTALNO-ITERATIVNA METODA PRORAČUNA GRANIČNE ČVRSTOĆE.....10
3.1. Teorijske osnove.....10
3.2. Inkrementalno-iterativna metoda.....10
3.3. Smithova metoda za proračun granične čvrstoće trupa.....13
3.4. Savijanje grede prema Euler-Bernolliju.....14
3.5. Krivulje naprezanja σ - deformacije ε.....17
3.5.1. Elastično-plastični slom.....17
3.5.2. Gredno-štapno izvijanje.....19
3.5.3. Torzijsko izvijanje.....21
3.5.4. Lokalno izvijanje struka plošnih ukrepa.....22
3.5.5. Lokalno izvijanje struka složenih ukrepa sa pojasom.....23
3.5.6. Izvijanje opločenja.....24
4. ZAHTJEVI ZA GRANIČNOM ČVRSTOĆOM TRUPA BRODA U OKVIRU HARMONIZIRANIH IACS H CSR PRAVILA I PROPISA.....25
4.1. Proračun granične čvrstoće broda u neoštećenom stanju.....26
4.2. Proračun granične čvrstoće broda u oštećenom stanju.....29

4.2.1. Proračun granične čvrstoće za slučaj oštećenja boka.....29

4.2.2. Proračun granične čvrstoće za slučaj oštećenja dna.....31

5. PRORAČUN GRANIČNE ČVRSTOĆE PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA MARS.....33

5.1. Osnovni podaci.....33

5.2. Kreiranje strukturnog modela.....36

5.3. Odabir opcija proračuna čvrstoće trupa.....38

6. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA I USPOREDBA ZA ZAHTJEVIMA KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA.....40

6.1. Analiza modela za neoštećeno stanje i usporedba prema pravilima IACS H-CSR-a.....41

6.2. Analiza modela za oštećeno stanje i usporedba prema pravilima IACS H-CSR-a.....45

6.2.1. Slučaj nasukavanja /oštećenje dna.....45

6.2.2. Slučaj sudara / oštećenje boka.....49

7. ZAKLJUČAK.....52

LITERATURA.....53

POPIS OZNAKA.....54

POPIS SLIKA.....57

POPIS TABLICA.....59

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu provedena je analiza uzdužne granične čvrstoće trupa broda na razini glavnog rebra prema inkrementalno-iterativnoj metodi sukladno pravilima IACS H-CSR (pravila na razini glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija i naftnih derivate). Rad isto tako obuhvaća i upoznavanje sa zahtjevima za proračunom granične čvrstoće trupa broda u neoštećenom i oštećenom stanju u okviru IACS H-CSR pravila i propisa te upoznavanje s programskim paketom *MARS 2000* koji je kreiran od strane klasifikacijskog društva Bureau Veritas (BV). Cilj propisanih metoda je odrediti iznos graničnog momenta savijanja trupa za predloženi tanker za kemikalije i naftu. Uz proračun granične čvrstoće za zadani tanker u ovom radu su prikazane krivulje odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti za slučaj progiba i pregiba. Prikazani su rezultati dobivenih sa softverom *MARS 2000*. Osim određivanja granične uzdužne čvrstoće broda izračunate su početne veličine za slučaj nasukavanja i sudara u skladu s preporukama IACS H-CSR pravila i propisa.

Ključne riječi:

granična čvrstoća, inkrementalno-iterativna metoda, trup, tanker za kemikalije

SUMMARY

In this thesis, an analysis of the longitudinal limit strength of the ship's hull at the level of the main rib was carried out according to the incremental-iterative method in accordance with the IACS H-CSR rules (rules at the level of the main rib of the ship for the transport of chemicals and petroleum products). The work also includes familiarization with the requirements for calculating the ultimate strength of the ship's hull in undamaged and damaged condition within the framework of IACS H-CSR rules and regulations, and familiarization with the MARS 2000 software package created by the Bureau Veritas (BV) classification society. The aim of the prescribed methods is to determine the amount of the limiting bending moment of the hull for the proposed chemical and oil tanker. In addition to the calculation of the ultimate strength for a given tanker, this paper presents the curves of the relationship between the vertical bending moment and the curvature for the case of buckling and buckling. The results obtained with the MARS 2000 software are presented. In addition to determining the limit longitudinal strength of the ship, the initial values for the case of grounding and collision were calculated in accordance with the recommendations of the IACS H-CSR rules and regulations.

Keywords:

ultimate strength, incremental-iterative method, hull girder, chemical tanker

1. UVOD

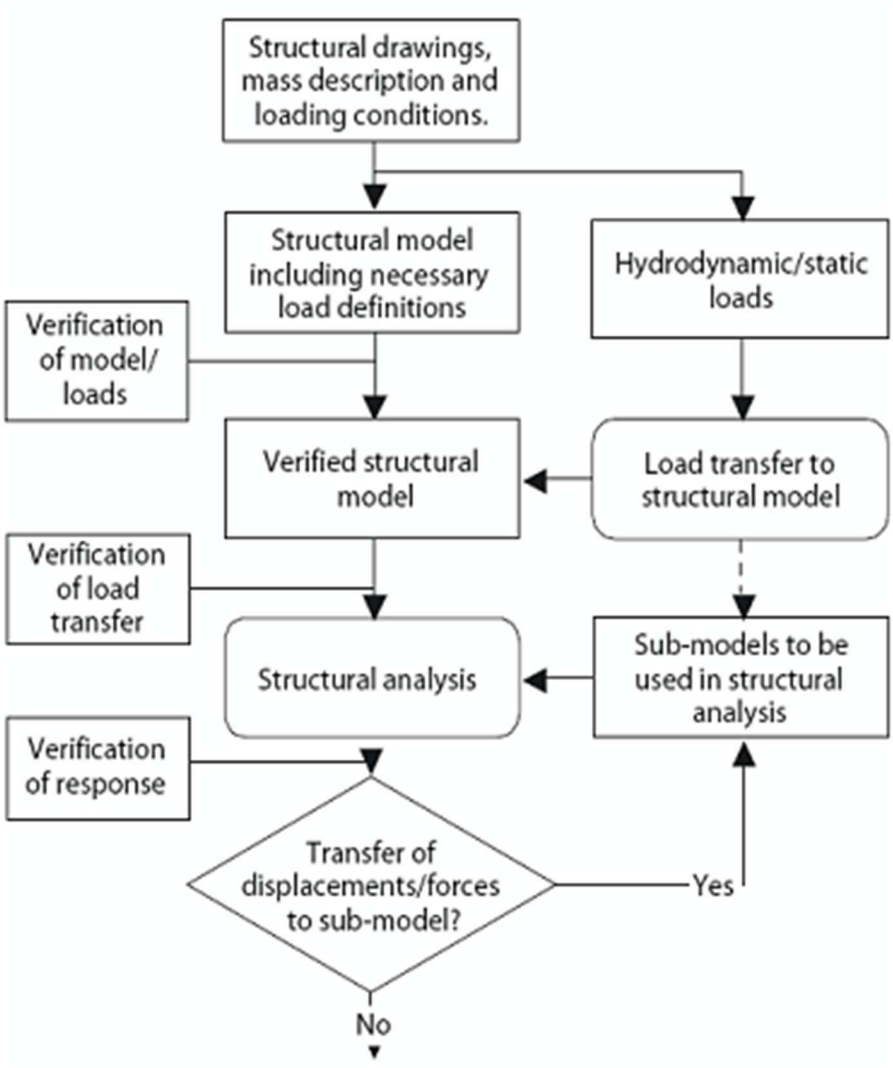
Pri prijelazu sa drvene na čeličnu brodogradnju postepeno se počinje uvoditi proračun čvrstoće. Brodski trup smatra se kao tankostjena konstrukcija koja se sastoji od nepropusne vanjske oplate ukrepljene rebrima ili uzdužnjacima oslonjenima na jake nosače trupa. S gornje strane brodski trup je zatvoren palubom, a unutar trupa može postojati još nekoliko međupaluba. Kobilica je glavni jaki nosač trupa koji prolazi dnom od krme do pramca, te na krmi prelazi prelazi u krmenu statvu, a na pramcu u pramčanu statvu. Obje statve se uzdižu od kobilice do najviše palube. Brod je po duljini podijeljen poprečnim pregradama i one zajedno s palubama omeđuju prostore za smještaj strojeva, tereta, goriva, vode i balasta te ograničavaju prodiranje vode u slučaju oštećenja vanjske oplate, a također daju oslonac jakim nosačima trupa.

Ukupan uzgon broda jednak je težini broda, prema prvom uvjetu plovnosti, ali ukupna raspodjela uzgona se razlikuje od ukupne raspodjele težine po duljini broda. Stoga u nekim presjecima po duljini broda dolazi do stvaranja viškova uzgona ili težine što rezultira savijanjem broda u uzdužnoj vertikalnoj ravnini. Ta nejednolika raspodjela uzgona i težine broda je najviše izražena kad brod plovi u realnom okruženju, na morskim valovima. Brodski trup smatra se tankostjenim nosačem opterećenim silama u vlastitoj ravnini i okomito na nju. Zbog velikog omjera duljine naspram njegove širine brodski trup se može smatrati i vitkom, čime vertikalni moment savijanja postaje dominantnim u odnosu na prestalo vanjska opterećenja. Stoga je i podatak o maksimalnom vertikalnom momentu savijanja kojeg brodski trup može podnijeti, prije kolapsa, od izuzetne važnosti za projektanta, pogotovo u preliminarnoj projektnoj fazi projektiranja strukture trupa broda. U drugom poglavlju je objašnjena važnost granične čvrstoće pri projektiranju strukture brodskog trupa te svrha uzdužne granične čvrstoće za projektante. Uz to je još ukratko opisana lokalna čvrstoća te je provedena provjera lokalne čvrstoće za zadani brod u programskom paketu *MARS-u*. Nadalje, u trećem poglavlju je opisana inkrementalno-iterativna metoda kao i koraci za pristup proračunu graničnog momenta savijanja, uz nju je ukratko objašnjena i Smithova metoda. Također u trećem poglavlju je prikazano i objašnjeno šest vrsta krivulja koje predočavaju odnos naprezanja i deformacija.

2. GRANIČNA ČVRSTOĆA TRUPA BRODA

Pod čvrstoćom broda podrazumijevamo sposobnost brodske konstrukcije da u cijelosti i mjestimično preuzme i izdrži djelovanje vanjskog opterećenja (globalna i lokalna statička i dinamička opterećenja na mirnoj vodi i na valovima) uslijed okolišnih uvjeta koji su neizvjesni u stvarnosti i to u cijelom predviđenom vijeku korištenja, pa tako i moguća dodatna opterećenja pri dokovanju, sudarima, nasukavanju ili pri nekim ekstremnim vremenskim uvjetima. Uobičajeno se čvrstoća broda promatra kao globalna i lokalna. U globalnom se pristupu brodski trup promatra kao greda promijenjivog poprečnog presjeka izložena savijanju i uvijanju uslijeg promijenjivog kontinuiranog opterećenja. Uzdužna čvrstoća broda je primarna čvrstoća (uzdužna vertikalna i horizontalna ravnina) gdje su najbitnija opterećenja vertikalne, horizontalne, poprečne sile i momenti savijanja i torzijski moment. Na osnovi tog opterećenja proračunava se odziv broda u smislu naprezanja i deformacija, koji onda služi za dimenzioniranje ili provjeru pretpostavljenih dimenzija elemenata strukture trupa za pretpostavljene uvjete plovidbe.

Svrha proračuna uzdužne čvrstoće broda je dimenzioniranje uzdužnih elemenata brodske konstrukcije. Na uzdužnu čvrstoću najveći utjecaj ima vertikalno savijanje pa se ona izražava kao najveći iznos momenta unutrašnjih uzdužnih sila kojega je moguće ostvariti na kritičnom poprečnom presjeku, a najčešće je to oko glavnog rebra. Dakle, broda se mora projektirati na način da njegova konstrukcija bude dovoljno čvrsta da bi bila spremna izdržati sve slučajeve opterećenja. Klasifikacijska društva su ta koja određuju najveća dopuštena opterećenja pri kojima je potrebno projektirati brod, a prema velikom broju podataka s brodova u službi, kao i primjenom teorijskih znanjem, metoda iz područja mehanika, hidromehanike, materijala...Pravilima i propisima IACS H-CSR-a najveći dopušteni vertikalni moment savijanja određuje se kao zbroj momenata savijanja na mirnoj vodi i momenata savijanja na valovima s definiranim faktorima sigurnosti. U četvrtom poglavlju su opisani zahtjevi IACS H-CSR pravila i propisa za provjeru granične čvrstoće trupa u neoštećenom i oštećenom stanju, za slučaj nasukavanja i sudara



Slika 2.1. Opći pristupi analize čvrstoće broda kod projektiranja brodske konstrukcije

Jedna od najčešće korištenih metoda proračuna preostale čvrstoće u analizi progresivnog kolapsa brodske konstrukcije je inkrementalno-iterativna metoda, pomoću koje je u ovom radu napravljen proračun uzdužne granične čvrstode za zadani brod u oštećenom i neoštećenom stanju, u program *MARS*.

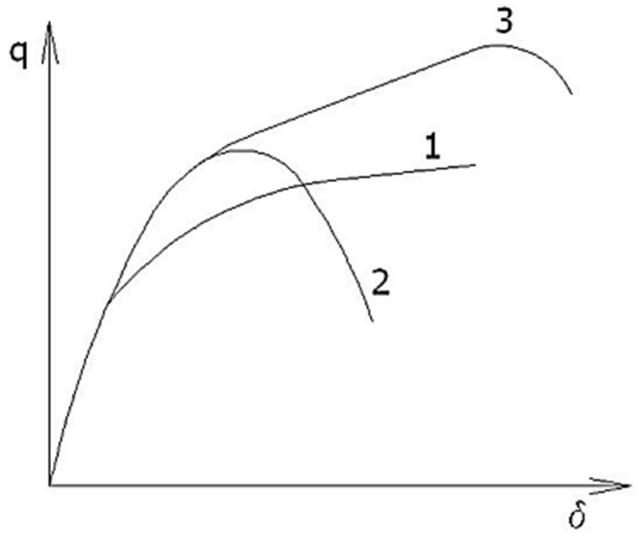
Granično stanje definira se kao stanje strukture ili strukturnog elementa koji postaje nesposoban za izvršavanje predviđene uloge uslijed djelovanja opterećenja. Stoga, granično stanje je stanje oštećenja i temelj je za opis strukture koja može biti neoperativna ili operativna.

Granična stanja (oštećenja) se dijele na:

- granična stanja čvrstoće
- uvjetna granična stanja
- servisna granična stanja

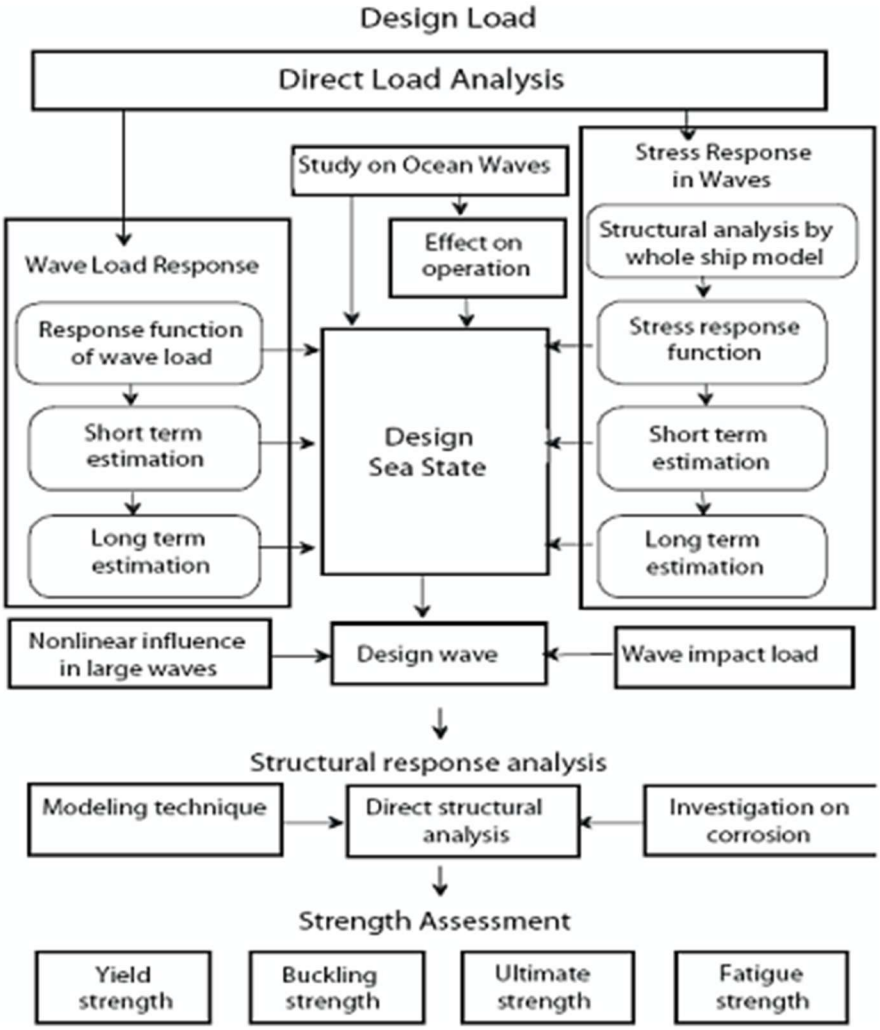
2.1. Granična čvrstoća

Granična čvrstoća strukture trupa postala je važan element kod projektiranja broda zbog toga jer njenom analizom određujemo opterećenja koja dovode do slamanja brodskog trupa. Stanje opterećenja pri kojem dolazi do gubitka nosivosti konstrukcije to jest do njenog kolapsa, definira se kao granično stanje. Granična čvrstoća karakterizirana je plastičnim oštećenjima, bilo kao potpuno popuštanje (full yielding) ili elastično-plastično (odnosno neelastično) izvijanje (elastic plastic buckling) pri čemu se dostiže granica nosivosti konstrukcije. Uslijed geometrijske nelinearnosti materijala (radi izvijanja ili drugog znatnog pomaka) te uslijed nelinearnosti materijala (popuštanje i plastična deformacija) za posljedicu dolazi do loma pojedinih dijelova i cijelog brodskog trupa zbog premašivanja granične čvrstoće je nelinearna pojava [1]. Glavni načini loma strukturnih elemenata prikazuju se na osnovi ovisnosti deformacije δ i opterećenja q za lokalne plastične deformacije (krivulja 1, slika 2.2.), izvijanje nosača (krivulja 2, slika 2.2.) i izvijanje opločenja (krivulja 3, slika 2.2.).



Slika 2.2. Krivulje ovisnosti opterećenja i deformacije za razne načine loma strukturnih elemenata [4]

Zahtjevi za uzdužnu čvrstoću broda vezani su uz projektne kriterije oslonjene uglavnom na teoriju elastičnosti. Plastična deformacija je nepovratna promjena oblika objekta u ovom slučaju broda nastala djelovanjem opterećenja i javlja se prekoračenjem kritičnoga naprezanja granice tečenja, zbog tih razloga je ona nepoželjna za projektanta. Prilikom proučavanja problema čvrstoće brodskog trupa potrebno je voditi računa o adekvatnom modeliranju brodskog trupa, odabiru postupka analize i trebaju se procijeniti utjecaji nedostataka postupaka proračuna i početnih netočnosti na graničnu čvrstoću. Mnogi kriteriji koji utječu na opterećenja i graničnu čvrstoću ne mogu se uvijek točno odrediti, nego se računa s neizvjesnostima njihovih djelovanja, za neoštećena stanja i za moguća oštećenja brodova.



Slika 2.3. Prikaz analize kakvu preporučaju klasifikacijska društva

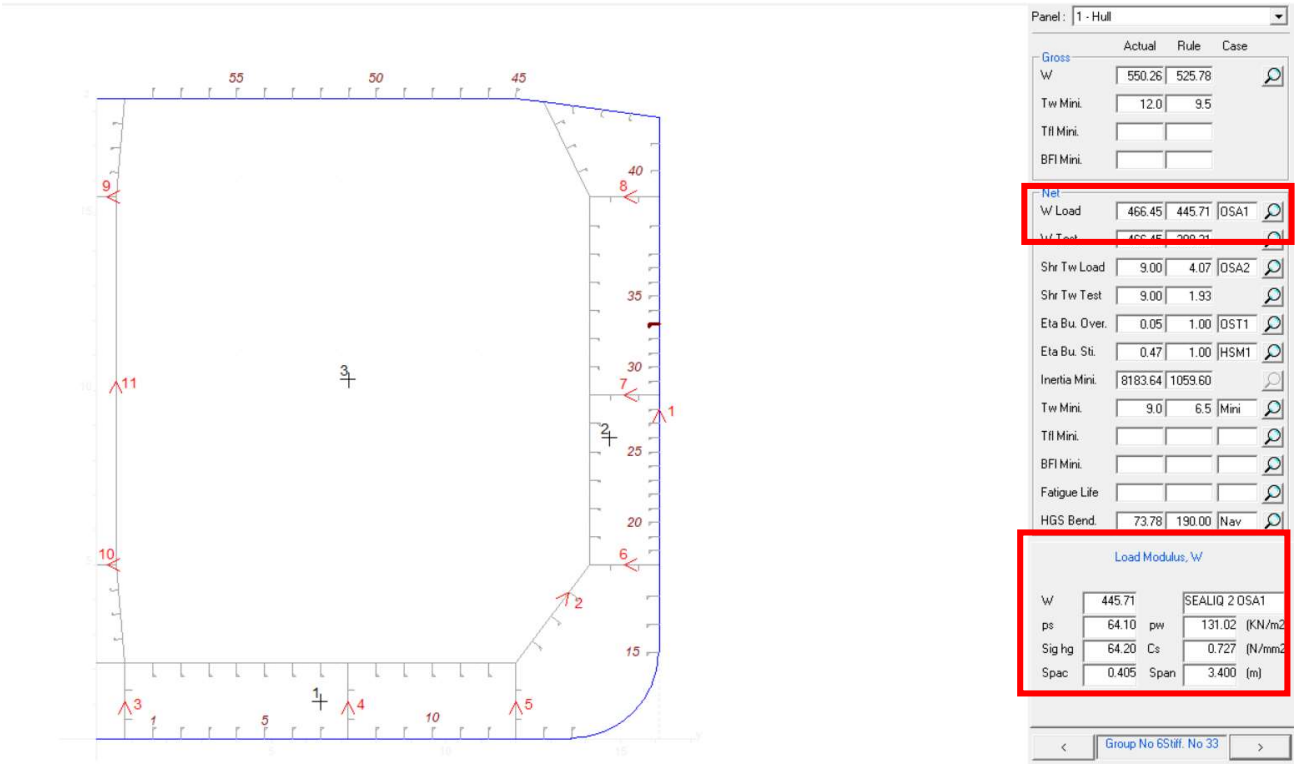
2.2. Lokalna čvrstoća

Lokalna čvrstoća postaje zanimljiva kad opterećenja djeluju koncentrirano, na primjer ispod sidrenih vitala, teških uređaja, a nije raspoređeno po većoj površini. Takva opterećenja su većinom poznata i sastoje se od težina pojedinih elemenata, sila inercije njihovih masa te uslijed gibanja na valovima. Ovo je osobito bitno kod dokovanja ili nasukavanja broda.

Pod lokalnu čvrstoću spada:

- lokalno savijanje i izvijanje uzdužnjaka između okvira (uz uključen utjecaj globalnog savijanja trupa)
- lokalno savijanje i izvijanje opločenja između uzdužnjaka i okvira (uz utjecaj globalnog savijanja trupa)
- provjera minimalnih dimenzija prema pravilima klasifikacijskih društava
- dinamička izdržljivost uzdužnjaka

Provjera lokalne čvrstoće je provedena u program *MARS* te su primjeri nekih od dobivenih rezultata za zadani brod prikazani na slikama 2.4. i 2.5.



Slika 2.4. Lokalna čvrstoća uzdužnjaka u MARS-u

Slika 2.5. Lokalna čvrstoća oplate u MARS-u

2.3. Faktor iskoristivosti

Mjere sigurnosti trebaju biti jednostavno, prepoznatljivo i samorazumljivo kvantitativno izražene veličinama tako da se strukturna izdržljivost (e: resistance, capability, capacity, R ili C) za pojedini strukturni dio može jednostavno i brzo usporediti s najvećim opterećenjem (e: load, demand, L ili D) za neko stanje plovidbe broda. Faktori iskoristivosti su recipročna vrijednost faktora sigurnosti C i D, izraženi kako slijedi prema formuli:

$$i = \frac{d \cdot D}{c \cdot C} \leq 1 \tag{2.3}$$

gdje je:

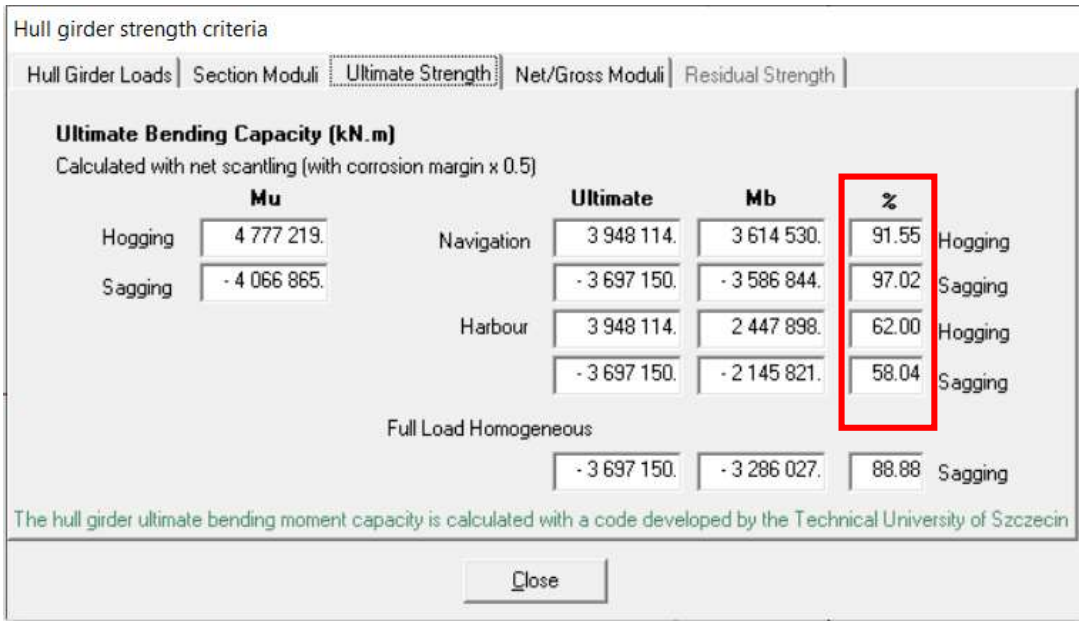
D – najveće opterećenje za neko definirano stanje plovidbe,

d – faktor povećanja opterećenja,

C – strukturna izdržljivost,

c – faktor smanjenja izdržljivosti.

Na slici 2.6. prikazan je primjer faktora iskoristivosti s obzirom na graničnu čvrstoću trupa broda.



Slika 2.6. Primjeri faktora iskoristivosti u MARS-u

3. INKREMENTALNO-ITERATIVNA METODA PRORAČUNA GRANIČNE ČVRSTOĆE

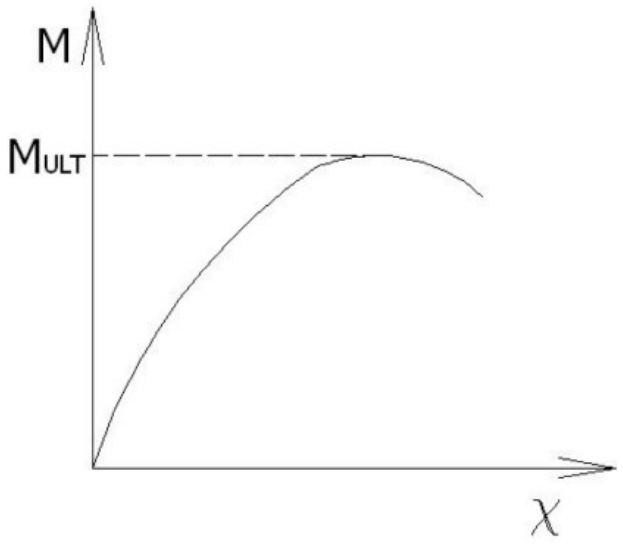
3.1. Teorijske osnove

Kod proračuna graničnog momenta, u okviru projektiranja strukture trupa broda, najviše se upotrebljava numerička metoda analize progresivnoga sloma s primjenom „load–end shortening“ - krivulja za određivanje $\sigma-\varepsilon$ krivulja naprezanje–deformacija pojedinih ukrepljenih panela. Procjenu granične čvrstoće možemo kategorizirati na dva načina. Jedan od tih načina je preko izvođenja analize progresivnoga sloma, a drugi način je izravno računanje granične čvrstoće pomoću empirijskih i teorijskih izraza. Najprecizniji postupak za analizu progresivnoga slamanja je analiza velikih elastoplastičnih deformacija pomoću metode konačnih elemenata, a koja zahtijeva velike računalne resurse, pa se preporuča koristiti jednostavnije alternativne postupke. Pojednostavljenom Smithovom metodom omogućena je poprilično velika točnost kod oponašanja progresivnog sloma trupa broda pri uzdužnom savijanju. Praćenje početka popuštanja panela palube pri progibu brodskog trupa smatra se najjednostavnijim postupkom za proračun granične čvrstoće. Najjednostavniji postupak za proračun granične čvrstoće je postupak kojim se prati početak popuštanja panela palube pri progibu brodskog trupa. Lokalna čvrstoća na izvijanje dna uglavnom je zadovoljavajuća, dok postupak za slučaj pregiba trupa može biti vrlo jednostavan. S prvom metodom se dobivaju malo viši rezultati od pravih vrijednosti dok se s drugom metodom dobivaju nešto manji. Pokazano je da od svih čimbenika najveći utjecaj na graničnu čvrstoću imaju debljina opločenja i dimenzije ukrepa kao i čvrstoća popuštanja materijala.

3.2. Inkrementalno-iterativna metoda

Klasifikacijska društva se, u praktičnim proračunima, većinom oslanjaju na skupinu inkrementalno–iterativnih postupaka analize progresivnoga sloma brodskoga trupa s izračunatim krivuljama naprezanje–deformacija koje su uključene u propise uzdužne čvrstoće IACS-a i to radi jednostavnosti njihove primjene u numeričkim postupcima na elektronskim računalima. Inkrementalni dio postupka očituje se u postupnom povećavanju zamišljene zakrivljenosti trupa broda promatranog kao grede. U svakom koraku postupka se iterativnim putem dobiva novi položaj neutralne osi presjeka trupa zbog mogućih gubitaka čvrstoće pojedinih uzdužnih elemenata. Na kraju svakoga koraka računa se ukupni odzivni moment savijanja tako da zbrojimo doprinose momenata savijanja unutarnjih sila svakoga

pojedinog uzdužnog elementa u promatranom poprečnom presjeku. Na slici 3.1. prikazana je krivulja momenta savijanja *M* u ovisnosti o zakrivljenosti trupa *x*. Pritom da granični moment predstavlja maksimalne vrijednosti krivulje, u slučaju pregiba (pozitivni predznak) i progiba (negativni predznak).



Slika 3.1. Ovisnost momenta savijanja M o zakrivljenosti brodskog trupa χ [4]

Koraci za inkrementalno-iterativni pristup proračunu graničnog momenta savijanja su sljedeći:

1. Podjela poprečnog presjeka na elemente ukrepljenih panela

2. Određivanje neutralne osi za nedeformiranu strukturu

3. Definicija odnosa naprezanje-deformacija za sve elemente

4. Početak postupka određivanjem početne zakrivljenosti

5. Određivanje odgovarajućeg naprezanja za svaki element

6. Pronalaženje nove neutralne osi postavljanjem uvjeta ravnoteže preko cijeloga presjeka

7. Izračun ukupnog momenta savijanja zbrajanjem doprinosa svih elemenata momentu savijanja.

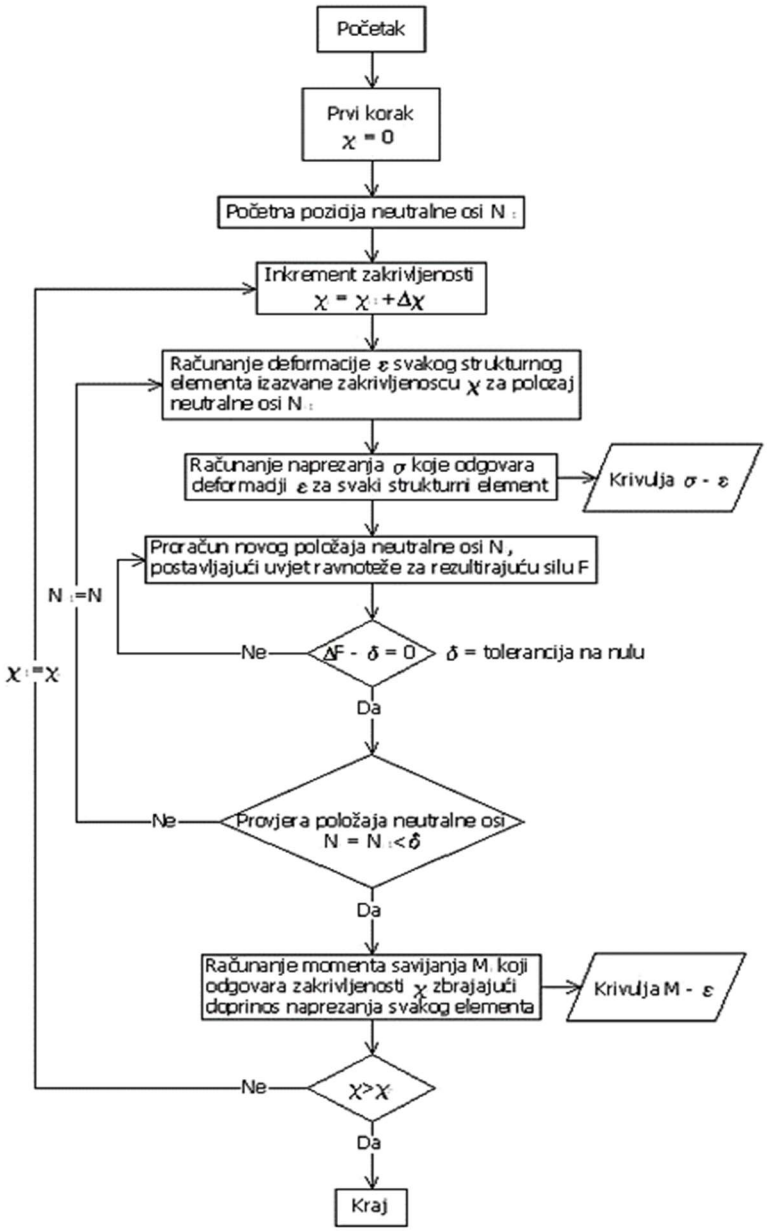
Početna se zakrivljenost dobije pomoću izraza:

$$x_0 = 0{,}01 \cdot \varepsilon_Y \tag{3.1}$$

gdje je ε_Y deformacija popuštanja koja uzima u obzir gornju granicu razvlačenja te modul elastičnosti:

$$\varepsilon_Y = \frac{R_{eh}}{E} \tag{3.2}$$

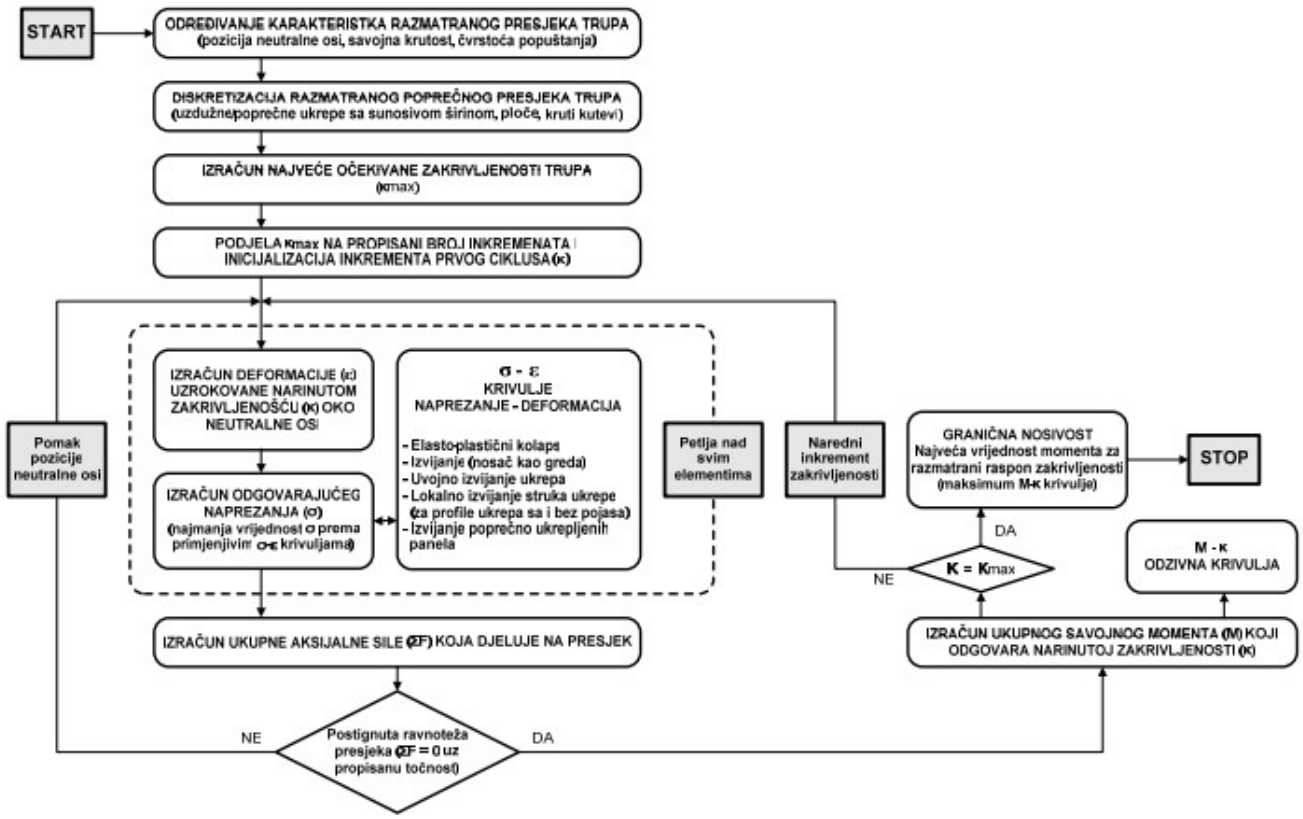
Na slici 3.2. je prikazan algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja.



Slika 3.2. Algoritam numeričkog rješenja za proračun graničnog momenta savijanja [4]

3.3. Smithova metoda za proračun granične čvrstoće trupa

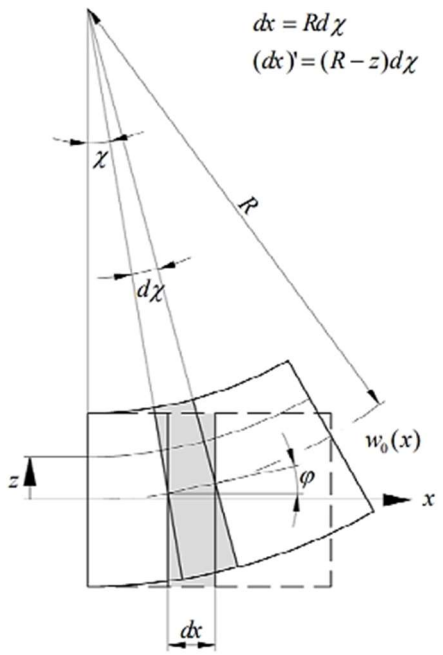
Smithova metoda je pojednostavljena metoda za proračun graničnog momenta savijanja koja se temelji na inkrementalno-iterativnom postupku u kojem se koriste već izračunate krivulje naprezanje-deformacija (eng. load and shortening curves) za određene strukturne elemente konstrukcije. Ovom metodom omogućena je relativna točnost u oponašanju progresivnog sloma brodskog trupa pri uzdužnom savijanju. Smithova metoda prva je omogućila bolji uvid u kolapsnu sekvencu i poslijekritično ponašanje elemenata konstrukcije opterećene savijanjem. Inkrementalni dio postupka odnosi se na postepeno povećavanje opterećenja tj. zamišljene zakrivljenosti trupa broda, a iterativni dio na određivanje položaja neutralne osi presjeka trupa broda koji se mijenja prilikom gubitka čvrstoće pojedinih elemenata [8]. Metoda pretpostavlja pojavu kolapsa presjeka između dva jaka okvira to jest pretpostavlja da je otpornost jakih nosača na pojavu oštećenja veća od sekundarnih ukrepa i oplate između njih. Ova metoda se temelji na diskretizaciji poprečnog presjeka na manje elemente (uzdužnjak i pripadni dio oplate) [13]. Prikaz procedure dan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Blok-dijagram Smithove metode za proračun graničnog momenta savijanja [13]

3.4. Savijanje grede prema Euler-Bernoulliju

Brodski trup idealizira se pomoću Euler-Bernoullijeve grede složenog tankostjenog poprečnog presjeka temeljem čega se dobiva odnos momenta savijanja M i zakrivljenosti grede κ.



Slika 3.4. Savijanje Euler-Bernoullijeve grede

Modul trupa se smatra prizmatičnim, te poprečna struktura okomita na uzdužnu, a do uzdužnog globalnog kolapsa dolazi zbog gubitka nosivosti uzdužno orijentiranih nosivih elemenata konstrukcije.

Za tako idealiziranu gredu vrijedi diferencijalna jednadžba savijanja:

$$\frac{d^2}{dx^2}\left(EI_Y \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2}\right) = q_z(x) \tag{3.3}$$

U jednadžbi (3.3) od qz (x) predstavlja uzdužnu raspodjelu kontinuiranog opterećenja u smjeru osi z. Integral od qz (x) daje uzdužnu raspodjelu smične sile $Qz(x)$ po duljini grede. Dok integral od $Qz(x)$ po duljini grede daje kao rezultat raspored momenta savijanja $My(x)$ oko osi y.

$$M_y(x) = -EI_y \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \tag{3.4}$$

$$M_y(x) = -EI_y \kappa_L \tag{3.5}$$

U jednadžbi (3.4) kao rezultat raspodjele momenta savijanja $My(x)$, EIy predstavlja krutost na savijanje, a w_0 je poprečni pomak čija druga derivacija daje zakrivljenost grede κ_L.

Duljina diferencijalnog dijela *dx,* prema Euler-Bernoullijevoj hipotezi, ostaje ista i nakon deformiranja. Pritom razmatrani diferencijalni element u deformiranom stanju poprima oblik kružnog luka te vrijedi da je $dx = Rd\chi$. Uz jednakost kutova, $\chi = \varphi$ za mali kut φ vrijedi:

$$\varphi = \tan\varphi = \frac{d_{w0}}{d_x} \tag{3.6}$$

slijedi da je zakrivljenost jednaka:

$$\kappa_L = \frac{1}{R} = \frac{d\chi}{dx} = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \tag{3.7}$$

Prva derivacija poprečnog pomaka w_0 po uzdužnoj koordinati jednaka je kutu φ, a druga derivacija daje za rezultat lineariziranu fizikalnu zakrivljenost grede κ_L.

Za uzdužnu linijsku deformaciju po visini grede dobije se sljedeći izraz:

$$\varepsilon_{xL} = -z\kappa_L \tag{3.8}$$

Za tijelo u stanju ravnoteže vrijedi da je i svaki njegov dio u stanju ravnoteže, pa je moguće promatrati deformaciju uslijed narinutog opterećenja na jednom uzdužnom segmentu grede koji je ograničen poprečnim nosačima. Može se odrediti unutarnja uzdužna sila uz poznatu veza između uzdužne linijske deformacije i naprezanja pojedinog diferencijalnog elementa na poprečnom presjeku koja se može odrediti prema izrazu:

$$dN = \sigma_x dA \tag{3.9}$$

Položaj neutralne osi određuje se iz uvjeta ravnoteže prema kojem rezultantne vlačne i tlačne sile po iznosu moraju biti jednake. Ukupni moment unutrašnjih uzdužnih sila oko trenutne neutralne osi dobiva se integriranjem svih produkata diferencijalnih sila i pripadajudih krakova po površini uravnoteženog poprečnog presjeka:

$$M_y(x) = \int_A \sigma_x z dA \tag{3.10}$$

Pri većim vrijednostima promatranog raspona linearizirane fizikalne zakrivljenosti nužno se izlazi van okvira linearno elastičnog režima te je stoga vezu između uzdužne duljinske deformacije i uzdužnog normalnog naprezanja potrebno definirati u (ne)linearnoj elasto-plastičnoj domeni uzimajući u obzir graničnu uzdužnu nosivost te poslije-kolapsno smanjenje uzdužne nosivosti sastavnih elemenata. Kako promjena uzdužne nosivosti sastavnih elemenata uvjetuje i promjenu rezultirajućeg momenta unutrašnjih uzdužnih sila pri različitim razinama narinute zakrivljenosti, tako pri tome niti odnos između narinute zakrivljenosti i odgovarajućeg momenta neće biti linearno proporcionalan unutar razmatranog raspona intenziteta savijanja. S obzirom da se pri progresivnom povećanju zakrivljenosti prirast momenta unutrašnjih uzdužnih sila sve više smanjuje (te nakon dosezanja granične vrijednosti postaje negativan), pri tome se prema (3.9) progresivno smanjuje i savojna krutost razmatranog poprečnog presjeka.

3.5. Krivulje naprezanja σ - deformacija ε

Za ponašanje triju vrsta elemenata pri procesu slomu brodskog trupa: kruti kutovi, poprečno ukrijepljena opločenja i uzdužno ukrepljeni paneli uslijed vlačnog ili tlačnog opterećenja, odnosno u ovisnosti o položaju elementa u odnosu na neutralnu os poprečnog presjeka trupa broda, služi šest vrsta krivulja koje predočavaju odnos naprezanja i deformacija σ–ε zvanih „load–end shortening curves“ IACS [1]:

1. Elastično-plastični slom
2. Gredno-štapno izvijanje
3. Torzijsko izvijanje
4. Lokalno izvijanje struka plošnih ukrepa
5. Lokalno izvijanje struka složenih ukrepa sa pojasom
6. Izvijanje opločenja

3.5.1 Elastično-plastični slom

Krivulja elastično–plastičnog sloma opisuje ponašanje produljenih poprečno ili uzdužno ukrijepljenih panela. Na primjer, taj način sloma prati panel dna pri progibu ili panel palube pri pregibu. Po ovom se načinu slamaju i kruti spojevi kao što su spojevi bočnih nosača dvodna s opločenjem dna ili pokrova dvodna. Naprezanje je pozitivno za produljenje, a negativno za skraćenje [4].

Izraz koji daje naprezanje elementa je sljedeći:

$$\sigma = \Phi \cdot R_e^h \text{ , [N/mm}^2\text{]} \tag{3.11}$$

gdje je:

Φ – granična funkcija za koju vrijedi:

$$\Phi = -1 \text{ za } \varepsilon < -1$$

$$\Phi = \varepsilon \text{ za } -1 < \varepsilon < 1$$

$$\Phi = 1 \text{ za } \varepsilon > 1$$

ε – relativna deformacija, računa se prema sljedećem izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y} \tag{3.12}$$

ε_E – deformacija elementa, dobiva se pomoću izraza:

$$\varepsilon_E = \chi_i \cdot z_i \tag{3.13}$$

ε_Y – deformacija popuštanja materijala određuje se prema izrazu:

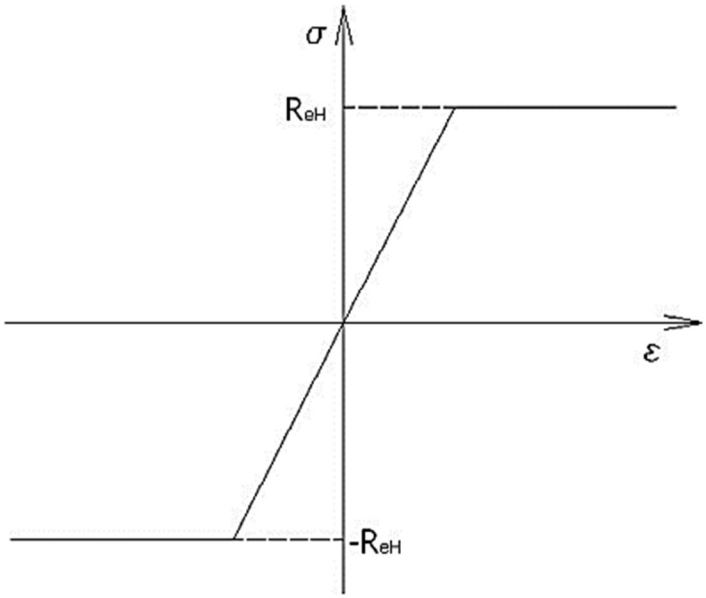
$$\varepsilon_Y = \frac{R_{eh}}{E} \tag{3.14}$$

gdje je:

R_{eh} – naprezanje popuštanja materijala, N/mm^2

E – modul elastičnosti, N/mm^2

Krivulja naprezanja σ – deformacije ε za elastično-plastični slom prikazana je na slici 3.5.



Slika 3.5. Krivulja naprezanja-deformacija za elastično-plastični načina sloma [4]

3.5.2. Gredno-štapno izvijanje

Krivulja gredno-štapnog izvijanja opisuje slom skraćenih uzdužno ukrijepljenih panela. Na primjer, na taj se način slamaju panel palube pri progibu ili panel dna pri pregibu.

Izraz naprezanja za gredno-štapno izvijanje [4]:

$$\sigma = \Phi \cdot \sigma_c \frac{A_s + 10 \cdot b_E \cdot t_p}{A_s + 10 \cdot 2 \cdot t_p}, \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{3.15}$$

gdje je:

σ_c – kritično naprezanje, [N/mm^2], za koju vrijedi:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_{eh}}{2}\varepsilon$$

$$\sigma_c = R_{eh}\left(1 - \frac{\Phi R_{eh}}{4\sigma_E}\right) \quad \text{za} \quad \sigma_E > \frac{R_{eh}}{2}\varepsilon$$

σ_E - Eulerovo naprezanje štapnog izvijanja, [N/mm^2]:

$$\sigma_E = \pi^2 E \frac{I_E}{A_E l^2} 10^{-4} \tag{3.16}$$

I_E – moment tromosti običnih ukrepa, [cm^4], s pridruženom širinom oplate b_{E1}

b_{E1} – širina produžene oplate, [m], za koju vrijedi:

$$b_{E1} = \frac{s}{\beta_E} \quad \text{za} \quad \beta_E > 1$$

$$b_{E1} = s \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1$$

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p}\sqrt{\frac{\varepsilon R_{eh}}{E}} \tag{3.17}$$

gdje su:

A_E – površina presjeka običnih ukrepa s pridruženom širinom oplate b_E, [cm^2]

A_S - površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm^2],

s - razmak uzdužnjaka, [m],

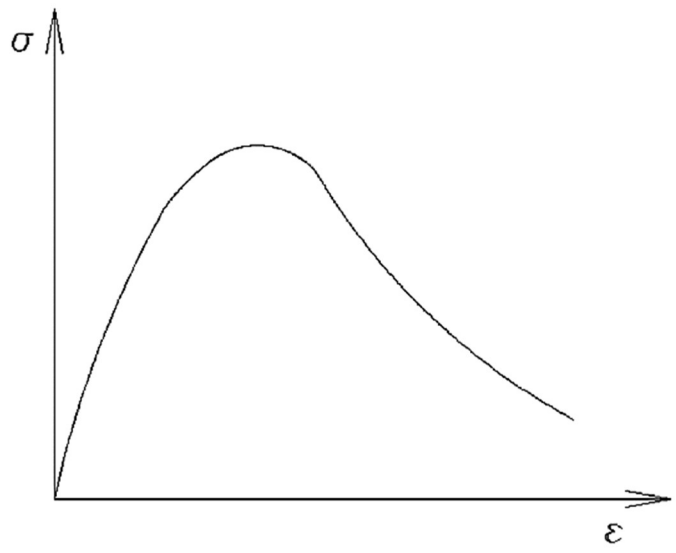
t_P - debljina pridružene oplate, [mm],

b_E - širina pridružene oplate, [m]

$$b_{E1} = \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^{\,2}} \right) \cdot s \quad \text{za} \quad \beta_E > 1,25$$

$$b_E = s \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1,25$$

Izgled krivulje naprezanja σ – deformacije ε za gredno-štapno izvijanje prikazano je na slici 3.6.



Slika 3.6. Krivulja naprezanja-deformacije za slom uslijed gredno-štapnog izvijanja [4]

3.5.3 Torzijsko izvijanje

Po torzijskom se izvijanju također mogu slamati skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli koji trpe lateralno – savojna opterećenja [4].

Izraz koji daje naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \frac{A_s \cdot \sigma_c + 10 \cdot s \cdot t_P \cdot \sigma_{CP}}{A_S + 10 \cdot s \cdot t_P}, \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{3.18}$$

gdje je:

Φ – granična funkcija, kako je već definirano,

σ_C – kritično naprezanje, [N/mm^2]

$$\sigma_C = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_{eh}}{2}\varepsilon$$

$$\sigma_C = R_{eh}\left(1 - \frac{\Phi \cdot R_{eh} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_E}\right) \quad \text{za} \quad \sigma_E > \frac{R_{eh}}{2}\varepsilon$$

σ_{CP} - naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja, [N/mm^2], izraženo preko sljedećih izraza:

$$\sigma_{CP} = \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E{}^2}\right) R_{eh} \quad \text{za} \quad \beta_E > 1,25$$

$$\sigma_{CP} = R_{eh} \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1,25$$

Izgled krivulje naprezanja-deformacije za slom zbog torzijskog izvijanja prikazan je na slici 3.7.

Slika 3.7. Krivulja naprezanja-deformacije za slom uslijed torzijskog izvijanja [4]

3.5.4. Lokalno izvijanje struka plošnih ukrepa

Također ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrijepljeni paneli [4], slika 3.8.

Izraz za naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \frac{10 \cdot s \cdot t_P \cdot \sigma_{CP} + A_S \cdot \sigma_C}{A_S + 10 \cdot s \cdot t_P}, \text{[N/mm}^2\text{]} \tag{3.19}$$

A za σ_C – kritično naprezanje, [N/mm^2], vrijedi sljedeće:

$$\sigma_C = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_{eh}}{2}\varepsilon$$

$$\sigma_C = R_{eh}\left(1 - \frac{\Phi \cdot R_{eh} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_E}\right) \quad \text{za} \quad \sigma_E > \frac{R_{eh}}{2}\varepsilon$$

σ_E - Eulerovo lokalno naprezanje izvijanja, izraz glasi:

$$\sigma_E = 160000\left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2, \text{[N/mm}^2\text{]} \tag{3.20}$$

gdje je:

ε - relativna deformacija, kako je ranije definirano,

A_S - površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm^2],

s - razmak uzdužnjaka, [m],

t_P - debljina pridružene oplate, [mm].

Slika 3.8. Krivulja naprezanja-deformacije za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa [4]

3.5.5. Lokalno izvijanje struka složenih ukrepa sa pojasom

Ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrijepljeni paneli [4].

Izraz za naprezanje elementa je sljedeći:

$$\sigma = \Phi \cdot R_{eh} \frac{10^3 \cdot b_E \cdot t_P + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_P}{10^3 \cdot s \cdot t_P + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_P} \text{ , [N/mm}^2\text{]} \tag{3.21}$$

gdje je:

Φ - granična funkcija, kako je definirano ranije,

b_E - širina pridružene oplate, [m],

h_W - visina struka, [mm],

t_W - debljina struka, [mm],

h_{WE} - efektivna visina struka, [mm]:

$$h_{WE} = \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^{\ 2}} \right) h_W \ \text{ za } \ \beta_W > 1,25$$

$$h_{WE} = h_W \ \text{ za } \ \beta_W \leq 1,25$$

β_W - koeficijent koji se određuje prema izrazu:

$$\beta_W = 10^3 \frac{h_W}{t_W} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot R_{eh}}{E}} \tag{3.22}$$

3.5.6. Izvijanje opločenja

Ovim izrazom opisuje se način slamanja putem izvijanja poprečno ukrepljene oplate [4]:

$$\sigma = R_{eh} \left[\frac{s}{l} \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^{\ 2}} \right) + 0,1 \left(1 - \frac{s}{l} \right) \left(1 + \frac{1}{\beta_E^{\ 2}} \right)^2 \right], \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{3.23}$$

gdje je:

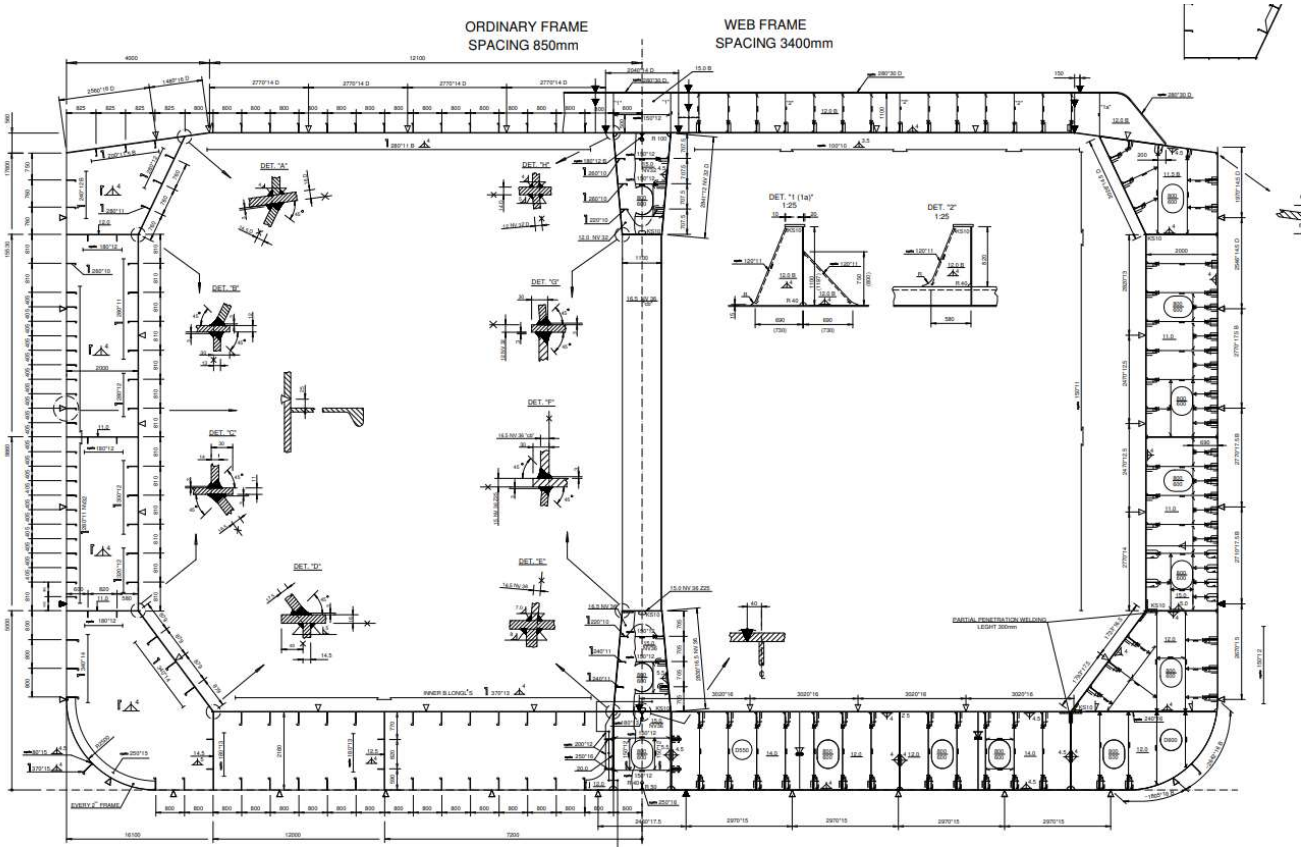
s - razmak rebara, [m],

l - duljina ploče, [m],

β_E - koeficijent definiran ranije.

4. ZAHTJEVI ZA GRANIČNOM ČVRSTOĆOM TRUPA U OKVIRU HARMONIZIRANIH IACS H-CSR PRAVILA I PROPISA

U ovom poglavlju su opisani zahtjevi IACS H-CSR pravila i propisa za provjeru granične čvrstoće trupa u neoštećenom i oštećenom stanju. Prikazana procedura provedena je na razini glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija i nafte. Na slici 4.1. je prikazan nacrt glavnog rebra tankera te u tablici njegove glavne dimenzije.



Slika 4.1. Nacrt glavnog rebra modeliranog broda

Tablica 4.1. Glavne dimenzije broda

Glavni podaci o brodu	
Duljina preko svega L_{OA} [m]	195,21
Duljina između perpendikulara L_{BP} [m]	187,30
Širina B [m]	32,2
Visina H [m]	17,8
Gaz T [m]	12
Nosivost [t]	49000
Brzina [čv]	14,5
Koeficijent istisnine C_B	0,8377

4.1. Proračun granične čvrstoće broda u neoštećenom stanju

Prema IACS H-CSR pravilima, vertikalni granični moment savijanja trupa u neoštećenom stanju mora zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_r} \tag{4.1}$$

gdje je:

M_U - granični moment savijanja trupa koji predstavlja maksimalnu izdržljivost trupa broda uslijed savojnog vlačnog ili tlačnog opterećenja,

M - najveći dopušteni vertikalni moment savijanja.

γ_r - faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja trupa koji se definira kao:

$$\gamma_r = \gamma_m \gamma_{db} \tag{4.2}$$

gdje je:

γ_m - parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja koji uzima u obzir svojstva materijala te neizvjesnost predviđanja geometrijskih svojstva i čvrstoće. Vrijednost faktora iznosi 1,1

γ_{db} - parcijalni faktor sigurnosti za vertiklani granični moment savijanja koji uzima u obzir efekt savijanja dvodna. Vrijednost ovog faktora za tankere iznosi 1,0 u slučaju progiba te 1,1 u slučaju pregiba.

Vertikalni moment savijanja M definiran je jednadžbom:

$$M = \gamma_s M_{sw-U} + \gamma_w M_{wv} \tag{4.3}$$

gdje je:

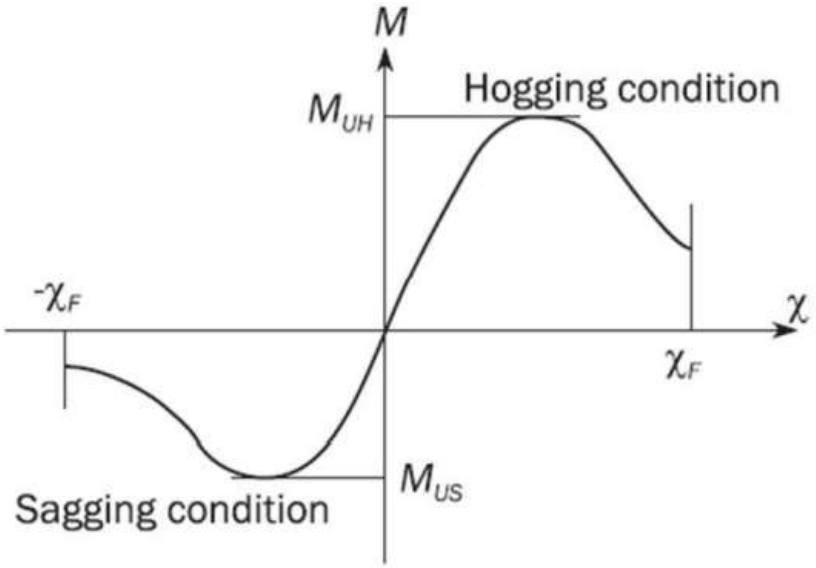
M_{sw-U} – dopušteni vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi

M_{wv} – vertikalni moment savijanja na valovima

γ_S – parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi. Vrijednost ovog faktora za tanker iznosi 1,0.

γ_W – parcijalni su faktori sigurnosti na valovima, te se kod pregiba poprima vrijednost 1,2, a kod progiba 1,3.

Na slici 4.2. prikazana je krivulja momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa koja nastaje kao rezultat analize progresivnog kolapsa



Slika 4.2. Granični moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti brodskog trupa [9]

Izraz za minimalni vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za uvjete pregiba iznosi:

$$M_{sw-U-h} = f_{sw}(171\ C_w\ L^2\ B\ (C_B + 0,7) \cdot 10^{-3} - M_{wv-h}) \tag{4.4}$$

A za uvjete progiba minimalni vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi iznosi:

$$M_{SW-U-s} = -0,85 \cdot f_{sw}(171\ C_w\ L^2\ B\ (C_B + 0,7) \cdot 10^{-3} - M_{wv-s}) \tag{4.5}$$

gdje je:

f_{sw} - faktor distribucije po dužini broda, vrijednost iznosi 1,0 za poziciju glavnog rebra,

L –duljina broda

B – širina broda

C_B – koeficijent istisnine

C_w – valni koeficijent, te se za brodove duljine veće od 90 m i manje od 300 m uzima:

$$C_w = 10,75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1,5} \tag{4.6}$$

Vertikalni moment savijanja na valovima za pregib je definiran prema izrazu:

$$M_{wv-h} = 0,19 f_{nl-vh}\ f_m\ f_p C_w\ L^2 B\ C_B \tag{4.7}$$

A za progib se određuje prema sljedećem izrazu:

$$M_{wv-s} = -0,19 f_{nl-vs}\ f_m\ f_p C_w\ L^2 B\ C_B \tag{4.8}$$

gdje je:

$f_{nl\text{-}vh}$ - koeficijent koji uzima u obzir nelinearne efekte kod pregiba. Vrijednost koeficijenta iznosi 1,0.

$f_p = f_{ps}$ - koeficijent za proračun čvrstoće kod ekstremnih morskih uvjeta opterećenja

f_{sw} - faktor distribucije vertikalnog momenta savijanja na valovima po dužini broda, za poziciju glavnog rebra uzimamo vrijednost 1.0

$f_{nl\text{-}vs}$ - koeficijent koji uzima u obzir nelinearne efekte kod progiba, a vrijednost koeficijenta računa se prema sljedećem izrazu:

$$f_{nl-vs} = 0,58 \cdot \left(\frac{C_B + 0,7}{C_B} \right) \tag{4.9}$$

4.2. Proračun granične čvrstoće broda u oštećenom stanju

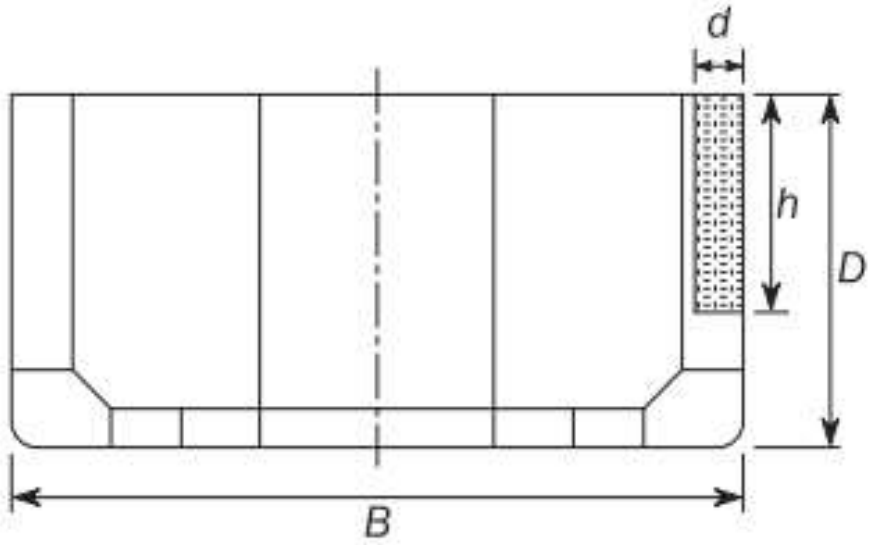
U pravilima i propisima IACS H-CSR [3] opisan je proračun za dva načina oštećenja trupa, a to su: oštećenje dna (nasukavanje) i oštećenje boka (bočni sudar).

4.2.1. Proračun granične čvrstoće za slučaj oštećenja boka

U slučaju *bočnog sudara* dolazi do oštećenja brodskog boka, a mjera oštećenja je definirana prema pravilima i propisima IACS H-CSR pomoću širine i visine mogućeg oštećenja. Pretpostavlja se da je oštećenje brodske konstrukcije smješteno na jednom boku i neposredno uz palubu. Veličina oštećenja prikazana je tablicom 4.2., iz koje su uzete vrijednosti za jednostruku oplatu, te slikom 4.3.

Tablica 4.2. Opseg štete zbog sudara

Dubina oštećenja [m]	Vrsta oplate boka	
	s jednostrukom oplatom	s dvostrukom oplatom
Visina, h	0,75 D	0,6 D
Dubina, d	B/16	B/16



Slika 4.3. Određivanje oštećenja u slučaju sudara

Prema pravilima IACS H-CSR-a kapacitet oštećenog poprečnog presjeka izračunava se s opsegom oštećenja na jednoj strani, to jest brod se drži u uspravnom položaju.

Zahtjev koji je potreban zadovoljiti prema pravila IACS H-CSR-a, za opisano oštećenje boka, jest:

$$\gamma_{SD} \cdot M_{sw-D} + \gamma_{WD} \cdot M_{wv} \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} \cdot C_{NA}} \tag{4.10}$$

gdje su:

M_{UD} – granični moment savijanja trupa

M_{SW-D} - vertikalni moment savijanja u mirnoj vodi za oštećeni bok trupa broda, u kNm

M_{WV} - vertikalni moment savijanja na valovima, u kNm

C_{NA} - koeficijent neutralne linije oštećenog presjeka. Vrijednost za bočni sudar iznosi 1,1

γ_{SD} – parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi u oštećenom stanju, koji iznosi 1,1

γ_{WD} - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima te mu vrijednost iznosi 0,67

γ_{RD} - parcijalni faktor sigurnosti za granični moment moment savijanja u oštećenom stanju. Vrijednost iznosi 1,0.

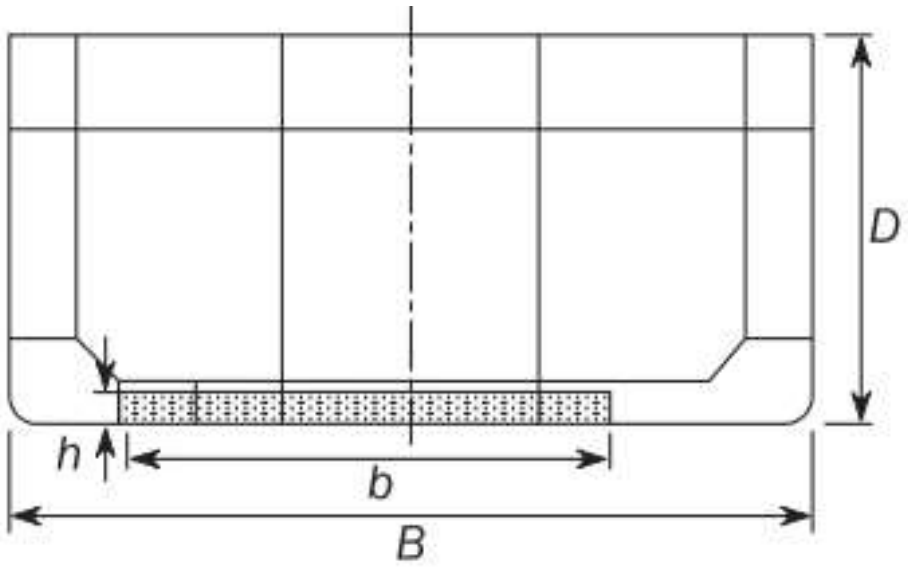
Formule po kojima se računaju momenti $M_{SW\text{-}D}$ i M_{WV} za stanje pregiba i progiba su dane u jednadžbama (4.4), (4.5), (4.7) te (4.8).

4.2.2. Proračun granične čvrstoće za slučaj oštećenja dna

U slučaju nasukavanja dolazi do oštećenja brodskog dna, a mjera oštećenja je također definirana prema pravilima IACS H-CSR pomoću visine i širine mogućeg oštećenja kao i za prethodni slučaj. Za brodove koji prevoze tekući teret, kao što vidimo iz tablice, visina oštećenje definirana je kao niža vrijednost od navedene dvije veličine: $h = \frac{B}{15}$ ili h = 2m te se širina oštećenja definira kao b = 0,60 B.

Tablica 4.3. Opseg štete zbog nasukavanja

Dubina oštećenja [m]	Brodovi za rasuti teret	Tankeri
Visina, h	Min (B/20, 2)	Min (B/15, 2)
Širina, b	0,60 B	0,60 B



Slika 4.4. Opseg oštećenja kod nasukavanja

Vertikalni granični moment savijanja trupa M_{UD} u oštećenom stanju dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$\gamma_{SD} \cdot M_{sw-D} + \gamma_{WD} \cdot M_{wv} \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} \cdot C_{NA}} \tag{4.11}$$

gdje je:

M_{UD} - granični moment savijanja oštećenog trupa

M_{sw-D} - vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za oštećeni trup broda kod nasukavanja

M_{wv} - vertikalni moment savijanja na valovima

C_{NA} - koeficijent neutralne linije oštećenog presjeka. Vrijednost iznosi 1,0 za slučaj nasukavanja

γ_{SD} - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi te mu vrijednost iznosi 1,1

γ_{WD} - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima, koji iznosi 0,67

γ_{RD} - parcijalni faktor sigurnosti za granični moment moment savijanja u oštećenom stanju, čija vrijednost iznosi 1,0

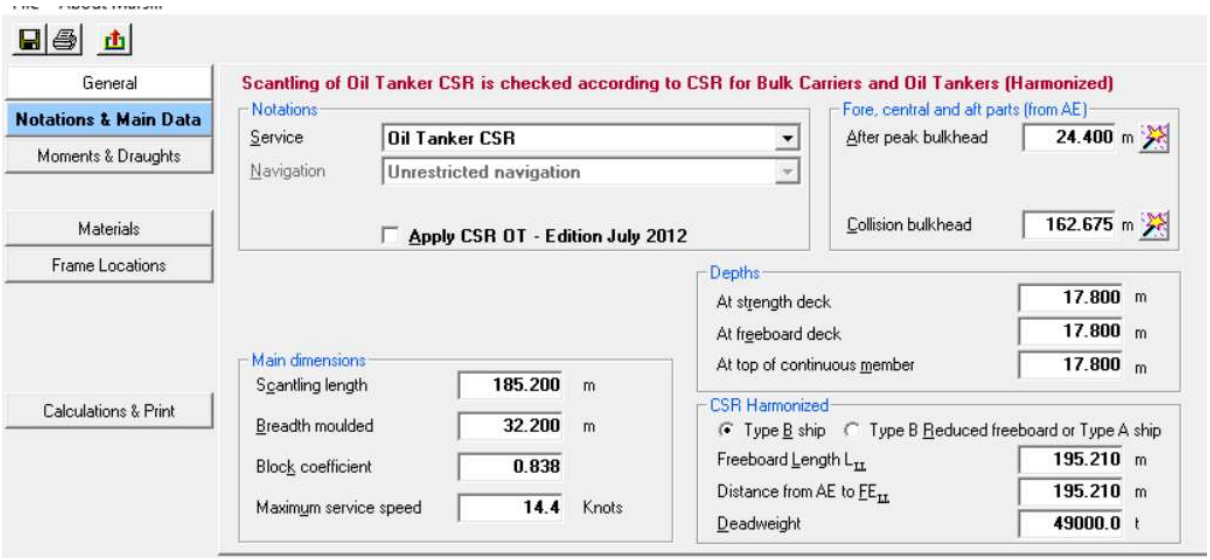
Formule po kojima se računaju momenti M_{SW-D} i M_{WV} za stanje pregiba i progiba također kao i za slučaj bočnog sudara su dane u istim jednadžbama (4.4), (4.5), (4.7) te (4.8).

5. PRORAČUN GRANIČNE ČVRSTOĆE PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA *MARS*

Unutar sučelja programskog paketa *BV MARS 2000* nalaze se tri izbornika: *Basic Data, Edit* te *BV Rule.* Napravljen model tanker provučen je kroz sva tri proračuna. U sljedećim potpoglavljima su prikazani koraci za dimenzioniranje strukturnih elemenata kako bi se zadovoljila projektna ograničenja[10]. Program *MARS* za analizirane modele daje podatke o njihovoj uzdužnoj graničnoj čvrstoći, odnosno o graničnom momentu savijanja strukture trupa broda. Osim graničnog momenta savijanja broda proračun daje i zahtjevani moment savijanja. Na temelju lokalnih i globalnih kriterija, MARS računa gross i net debljine strukturnih elemenata. Razlika između bruto i neto izmjera je što se neto izmjere koriste za proračune dimenzija vojeva i ukrepa, koje uključuju proračun zamora strukturnih detalja, te za proračun granične čvrstoće brodskog trupa. A bruto (eng. gross) izmjere uzimaju u obzir korozijski dodatak. Bruto izmjere se koriste za proračun uzdužne čvrstoće – momenata otpora i provjeru pojave tečenja materijala [15].

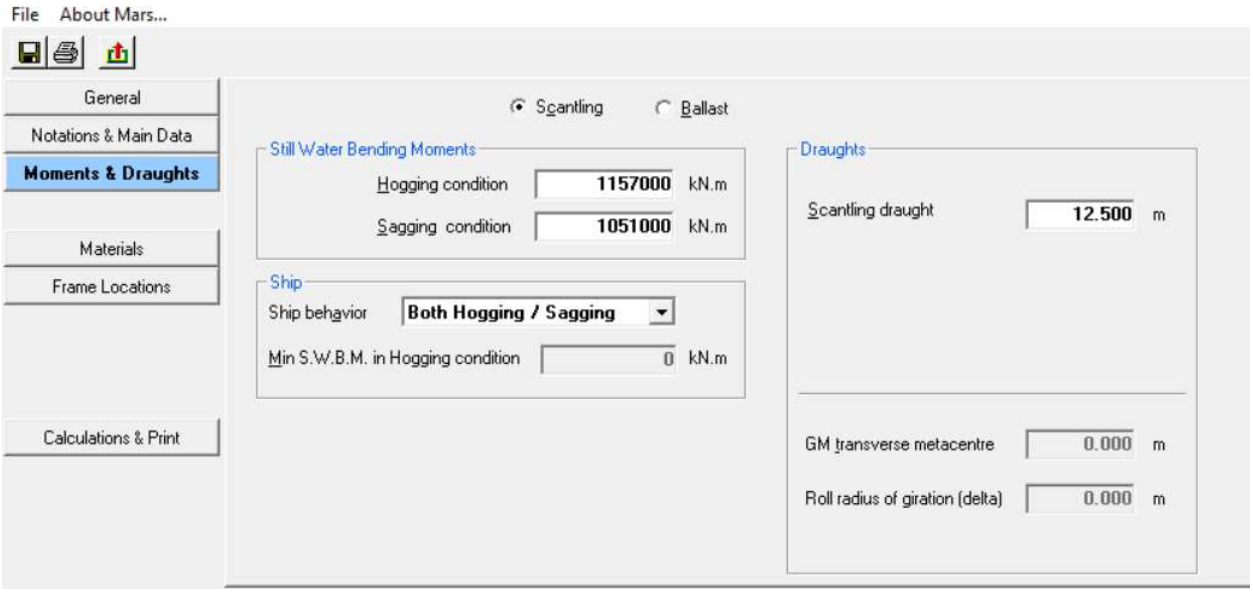
5.1. Osnovni podaci

U *MARS-u* modeliran je poprečni presjek glavnog rebra pomoću podataka koje su izvučene iz nacrta glavnog rebra prikazanog na slici 4.1. Prvo ulazimo u izbornik *Basic Data* gdje pod karticom *Notations & Main Data* unosimo podatke kao što su duljina broda, širina, visinu nadvođa, brzina te koeficijent istinine kao što je prikazano na slici 5.1.



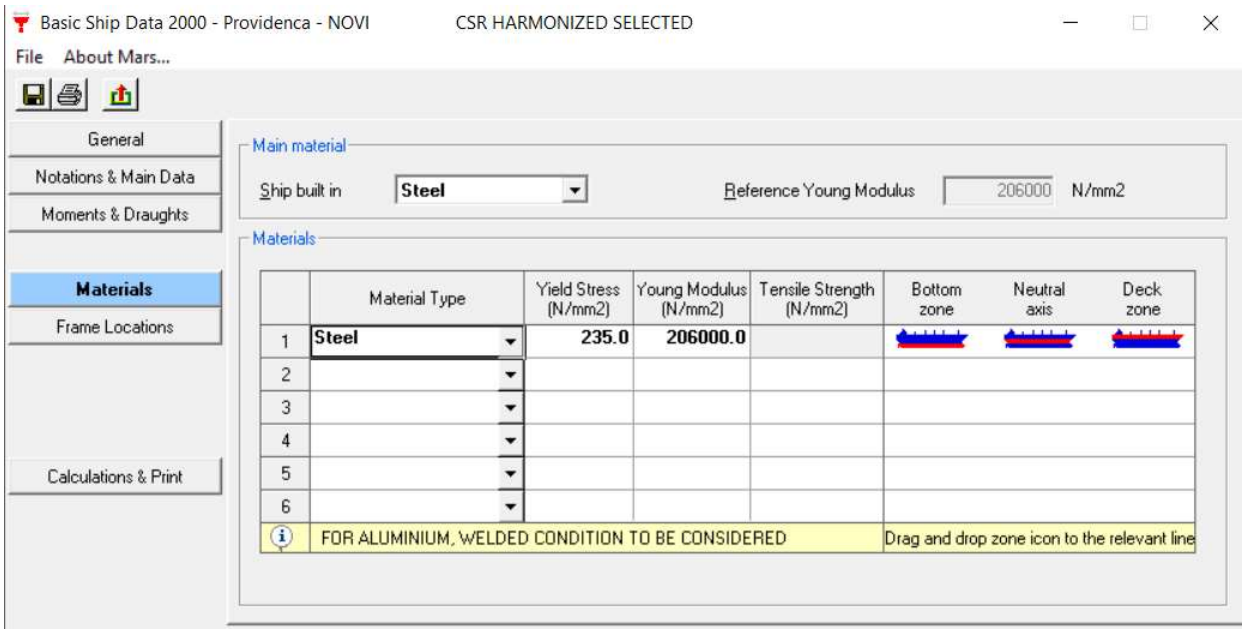
Slika 5.1. Kartica s glavnim podacima broda

Na sljedećoj kartici *Moments & Draughts* unosimo podatke projektnog gaza te vrijednosti statičkog momenata savijanja na mirnoj vodi u pregibu i progibu zadani u diplomskom zadataku. U ovom diplomskom radu pri provođenju analize vrijednost poprečne sile na mirnoj vodi odnosno "shear force" je uzeta za stanje teškog balasta-dolazak u iznosu od 4120,32 tona tj. 40403 kN. Na slici 5.2. je prikazano zadano opterećenje na projektnom gazu od 12,5 m.



Slika 5.2. Moment i gaz

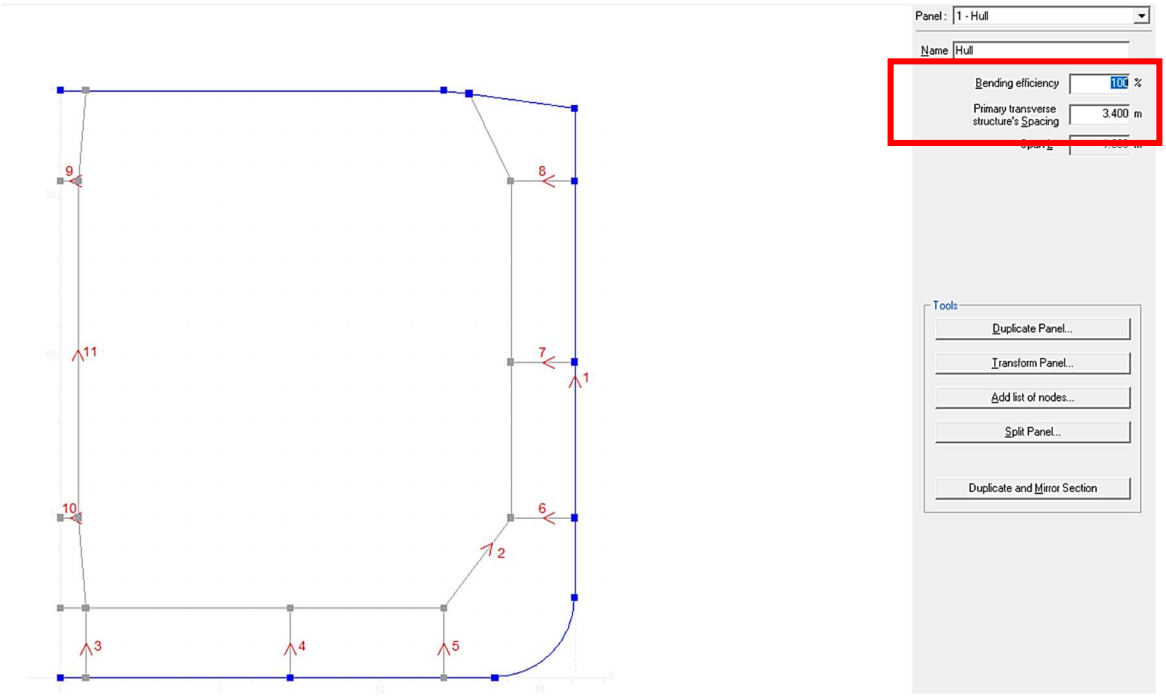
U ovom modelu korišten je obični brodograđevni čelik u svim područjima s minimalnom granicom razvlačenja od 235 N/mm^2, slika 5.3.



Slika 5.3. Materijali trupa broda

5.2. Kreiranje strukturnog modela

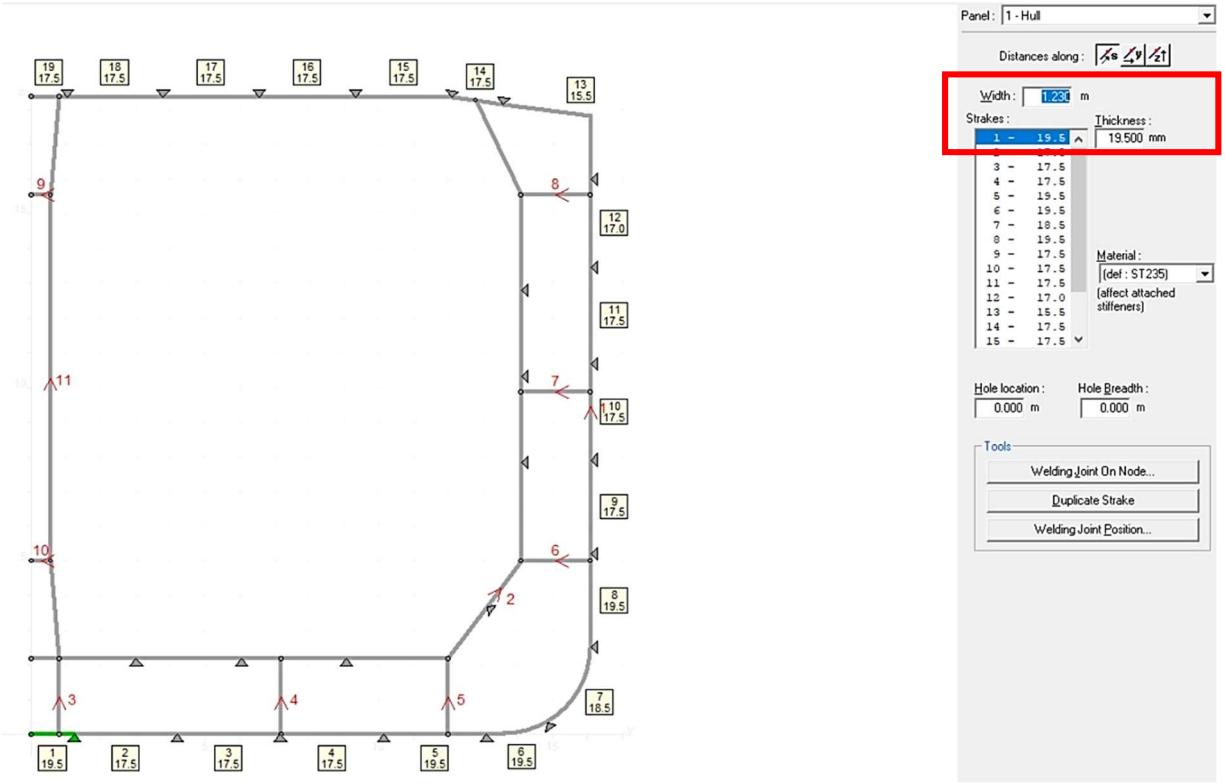
Nakon što su uneseni osnovni podaci broda sljedeće na redu je kreiranje strukture u izborniku *Edit*. Editiranje započinje prvo s kreiranjem panela. Panele dobijemo unoseći točke koje čine taj panel. Točke iliti čvorovi definiraju se Y i Z koordinatama i tipom krivulje. Čvorovi se nalaze na spojevima pojedinih strukturnih elemenata, vidi sliku 5.4.



Slika 5.4. Paneli i čvorovi

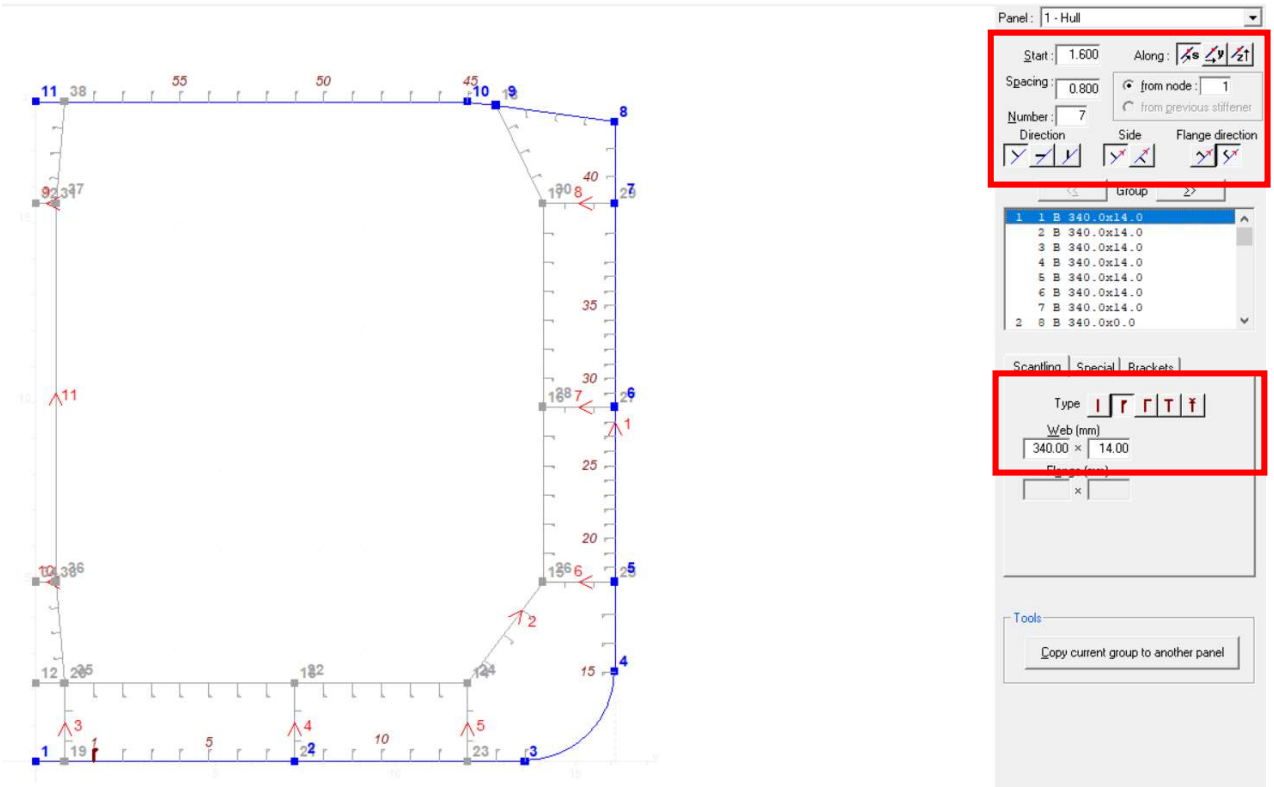
Na slici gore vidimo da je na desnoj gornjoj strani prozora vidljiv naziv odabranog panela, te postotak njegovog sudjelovanja u uzdužnoj čvrstoći odnosno učinkovitost savijanja te raspon između oslonaca.

Sljedeće korak je generiranje granice vojeva, panela definiranjem zavara te unošenje dimenzija debljine opločenja. Vojevi su četverokutni elementi kojima se mora definirati širina, duljina i materijal. Svaki panel je definiran sa nekoliko vojeva. Na slici 5.5. vidi se prikaz svih unesenih vojeva.



Slika 5.5. Prikaz vojeva na poprečnom presjeku glavnog rebra

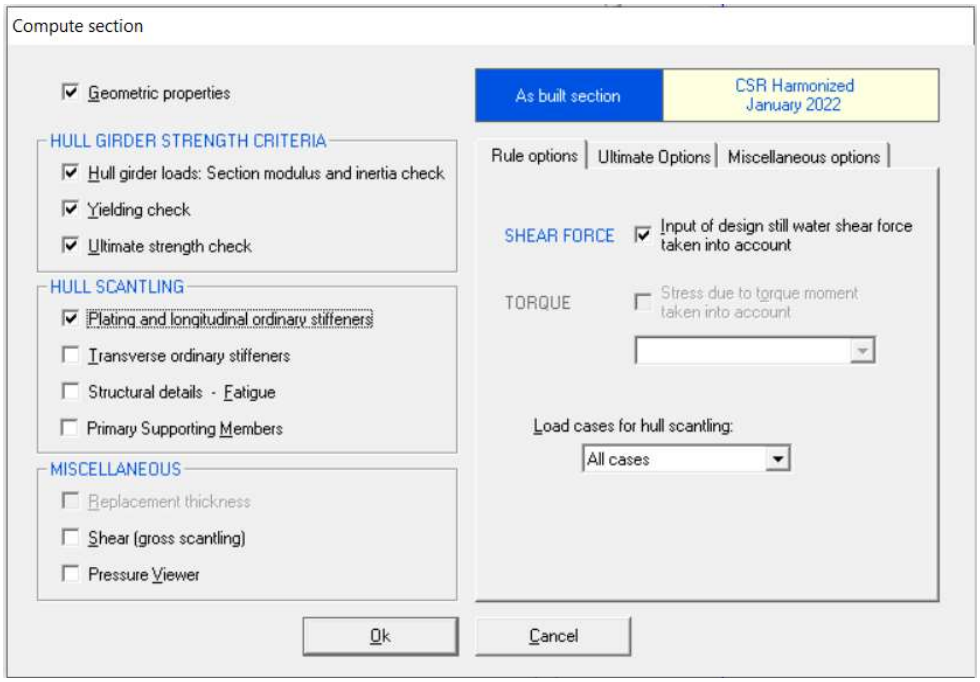
Treći korak je generiranje uzdužnjaka. Uzdužnjaci se zadaju posebno za svaki panel, postavljeni su prema zadanom nacrtu glavnog rebra na slici 4.1. Parametri kojima se definiraju uzdužnjaci su: smjer, orijentacija i tip.



Slika 5.6. Prikaz postavljenih uzdužnjaka

5.3. Odabir opcija proračuna čvrstoće trupa

Konačni izbornik kojem se pristupa je *BV Rule*, slika 5.7. gdje je potrebno čekirati određene kućice koje su nam potrebne pri provođenju analize. Prva čekirana kućica predstavlja mogućnost prikazivanja geometrijskih karakteristika te je ona označena jer želimo dobiti geometrijske karakteristike. Sljedeći niz od tri kućice koje se nalaze unutar kriterija čvrstoće redom označavaju provjeru momenta otpora presjeka glavnog rebra i inercije, sljedeća kućica predstavlja provjeru popuštanja, a treća kućica predstavlja provjeru granične čvrstoće. Sve ove kućice moraju biti označene pošto želimo da naša konstrukcija bude podobna prema svih kriterijima. Idući niz od tri kućice predstavlja prikazivanje dimenzija presjeka glavnog rebra i označena je samo prva kućica, budući da nas zanimaju dimenzije debljine opločenja i uzdužnjaka. Sljedeće tri kućice omogućavaju prikazivanje poprečnih sila i prikazivanje tlakova na konstrukciju. Te kućice je korisno označiti kako bi vidjeli raspodjelu tlakova i raspodjelu poprečnih sila na pojedinom modelu [12]. Na desnoj strani pozora je čekirana i kućica koja predstavlja uključivanje utjecaja poprečne sile na mirnoj vodi. I nakon odabranih potrebnih kućica provedi se analiza i dobivaju se rezultati granične čvrstoće.



Slika 5.7. Kartica izbornika BV Rule

6. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA MODELA

U ovom diplomskom radu analizirano je glavno rebro broda za prijevoz kemikalija i nafte. Glavne dimenzije broda prikazane su tablici.

Tablica 6.1. Glavni podaci o brodu

Glavni podaci o brodu	
Duljina L [m]	195,2
Širina B [m]	32,2
Visina H [m]	17,8
Gaz T [m]	12
Brzina v [čv]	14,5
Koeficijent istisnine C_B	0,8377
Razmak između rebara w [m]	3,4

Uz glavne dimenzije broda su dane i vrijednosti momenata savijanja na mirnoj vodi, uzete iz knjige trima i stabiliteta, koje iznose:

Pregib: 1157000 kNm

Progib: -1051000 kNm

Model je izrađeni u programu *BV MARS 2000* kojem su modelirani svi konstrukcijski elementi koji doprinose uzdužnoj čvrstoći. Analiza odnosa zakrivljenosti, vertikalnog momenta savijanja te kolapsna sekvenca prikazani su za neoštećeni presjek i dva tipa oštećenja presjeka, a to su 0,6B kod nasukavanja odnosno 0,75D kod bočnog sudara jer su između ostalog te veličine oštećenja relevantne prema zahtjevima IACS-a. Rezultat proračuna granične uzdužne čvrstoće je krivulja odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti trupa za slučaj pregiba i progiba, te krivulja smanjenja graničnog momenta savijanja u ovisnosti o veličini oštećenja i također je uspostavljena analitička veza između veličine oštećenja i smanjenja graničnog momenta savijanja trupa.

6.1. Analiza modela za neoštećeno stanje prema pravilima IACS H-CSR-a

Svrha proračuna uzdužne čvrstoće je određivanje dimenzija elemenata strukture trupa broda uz zadovoljenje kriterija čvrstoće i sigurnosti. Pri provjeri uzdužne čvrstoće uobičajeni kriterij koji se koristi, a propisuju ga klasifikacijska društva je moment otpora presjeka (eng. section modulus). Moment otpora ili modul presjeka glasi:

$$W_g = \frac{I_y}{z},\ W_d = \frac{I_y}{z}\ ,[\mathrm{m}^3] \tag{6.1}$$

gdje je:

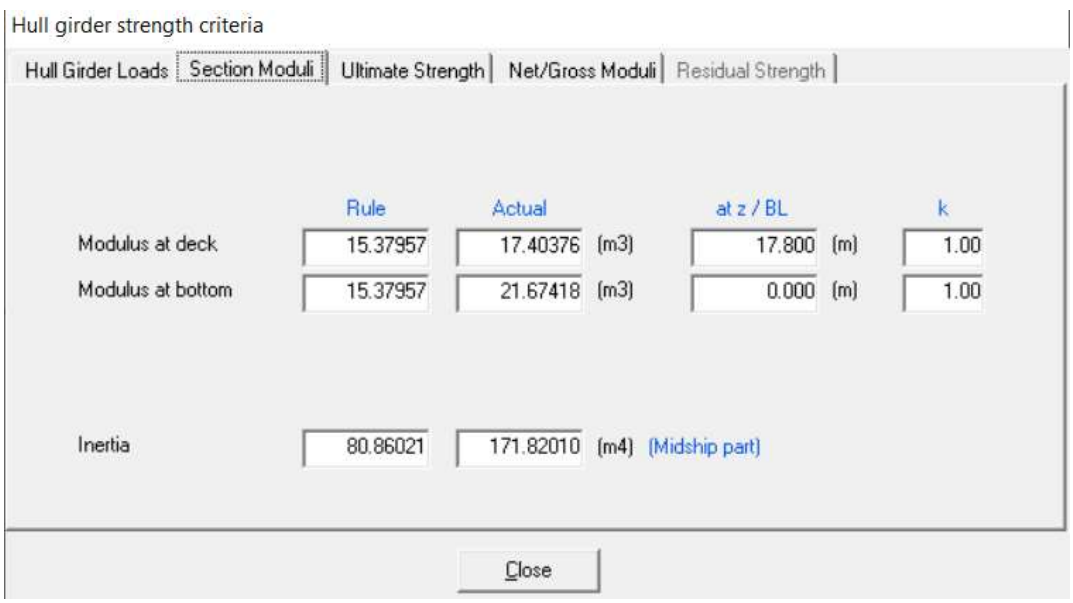
z - udaljenost od neutralne osi, dobiveno u *MARS-u* i iznosi 8,06 metara,

W_d – moment otpora za dno [m^3],

W_g – moment otpora za palubu [m^3],

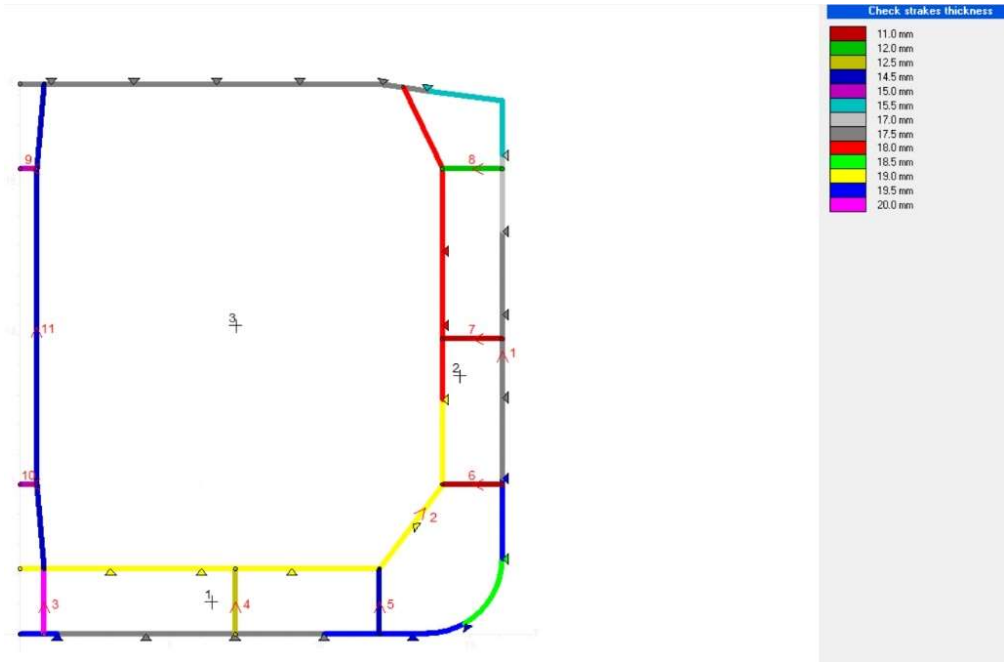
I_y – moment inercije [m^4]

Na slici 6.1. su prikazane vrijednosti minimalnog otpora momenta površine poprečnog presjeka glavnog rebra za palubu i za dno, jer su ti elementi najopterećeniji, i oba su zadovoljena.



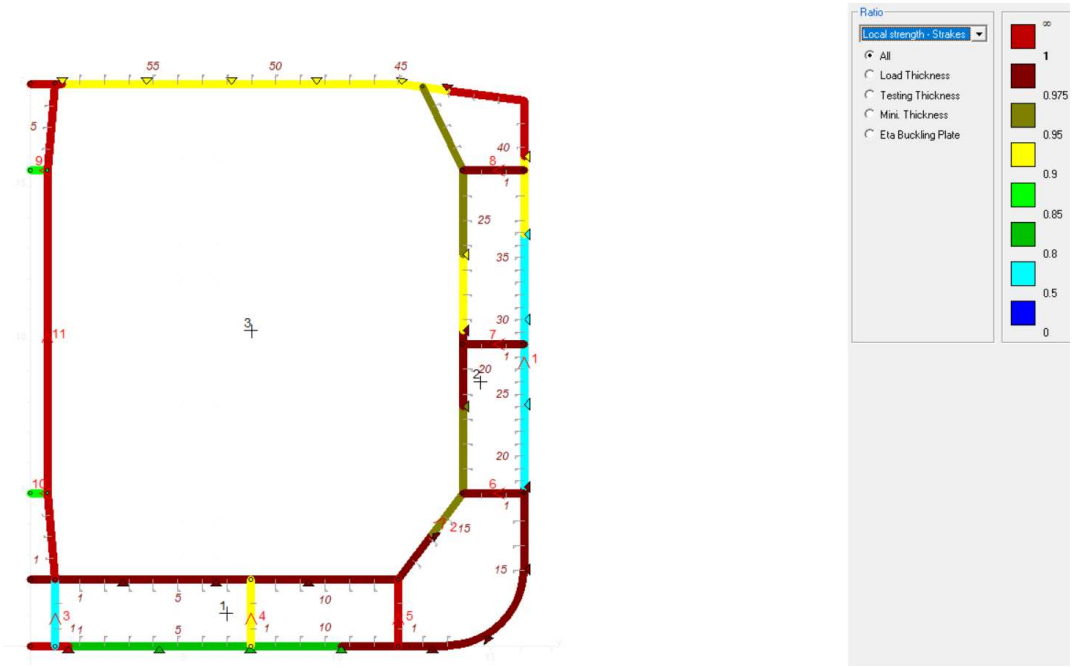
Slika 6.1. Kartica s rezultatima za moment otpora

Na slici 6.2. prikazane su odabrane debljine konstrukcijskih cjelina/vojeva za model.

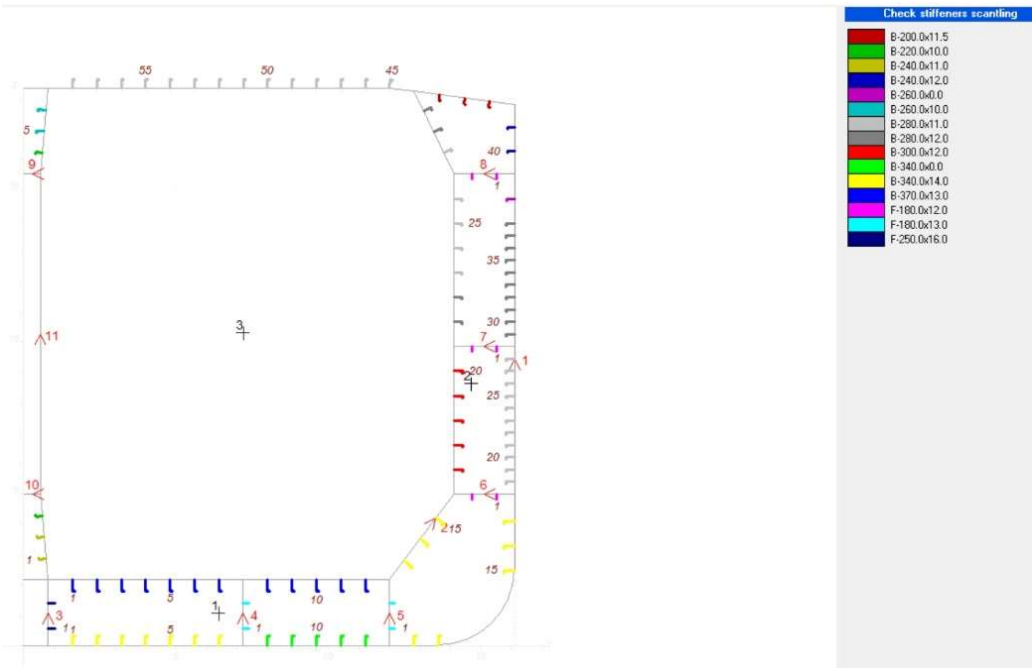


Slika 6.2. Prikaz debljina

Program *MARS* nudi grafički prikaz faktora iskoristivosti (Ratio). Na slici 6.3. dan je prikaz faktora iskoristivosti debljine vojeva uslijed lokalnih opterećenja. Za debljinu oplate može se izraziti kao $\frac{\mathrm{tmin}}{\mathrm{t}}$ ili za naprezanja kao $\frac{\sigma}{\sigma\mathrm{krit}}$. Cilj je zadovoljiti uvjete čvrstoće na način da faktor iskoristivosti bude što bliži vrijednosti 1.



Slika 6.3. Prikaz debljine lokalne čvrstoće vojeva



Slika 6.4. Dimenzije uzdužnjaka za zadovoljenje uzdužne čvrstoće

Pomoću formule (4.1), navedene u prethodnom poglavlju 4.1., možemo iterativnim putem izračunati uzdužnu čvrstoću zadanog tankera tako što nam je program *MARS* izbacio konačne vrijednosti vertikalnog graničnog momenta savijanja trupa M_U koje moramo usporediti s vertikalnim momentom savijanja M. Rezultati za progib te pregib su prikazani u sljedećoj tablici 6.2.

Tablica 6.2. Rezultati uzdužne granične čvrstoće neoštećenog trupa sukladno pravilima IACS-a

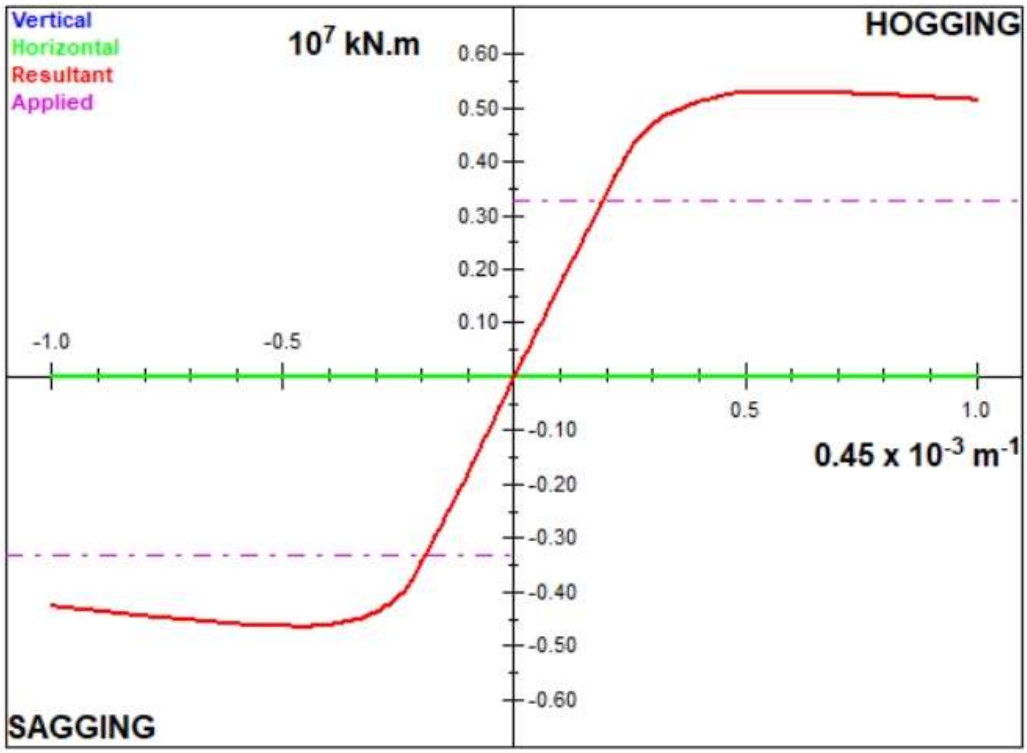
	$\mathbf{M_{wv}}$ [kNm]	$\mathbf{M_{sw\text{-}U}}$ [kNm]	**M** [kNm]	$\mathbf{M_U}$ [kNm]	$\mathbf{M_U / \gamma_r}$	$\mathbf{M \leq (M_U/\gamma_r)}$
PROGIB	-2012181.93	-4364353.21	-6980189.72	-4641444	-4219494.55	ne zadovoljava
PREGIB	1889975.40	1232375.87	3500346.35	5290366	4372203.31	zadovoljava

Na slici 6.5. prikazan je granični moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa za dva slučaja opterećenja, pregiba i progiba. Na krivuljama $M - \kappa$ označena je vrijednost graničnog momenta kao ekstrema krivulje i vrijednosti momenata koji su doveli do kolapsa pojedinih strukturnih elemenata.

Iznosi očitanih maksimalnih vrijednosti graničnih momenata za pregib i progib su:

M_{Uh} = 5 290 366 kNm

M_{Us} = -4 641 444 kNm

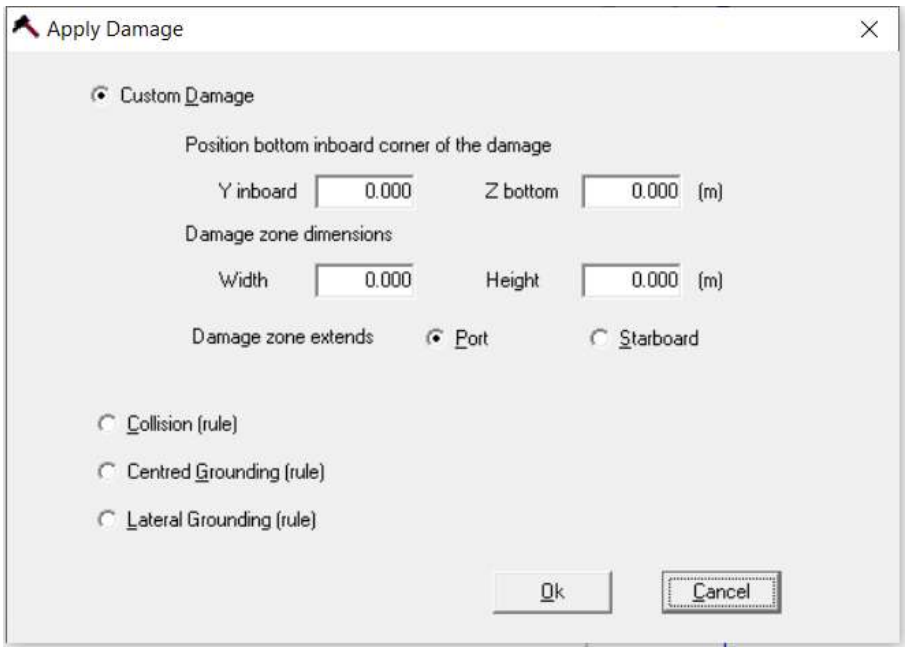


Slika 6.5. Krivulja graničnog momenta savijanja i zakrivljenosti trupa za slučaj pregiba i progiba

6.2. Analiza modela za oštećeno stanje prema pravilima IACS H-CSR-a

6.2.1. Za slučaj nasukavanja iliti oštećenja dna

U MARS-u postoji opcija "*Apply Damage To Section*" gdje na prethodno kreirani model biramo tip oštećenja, Y i Z koordinate tog oštećenja te veličinu oštećenja. Vidi sliku 6.6.



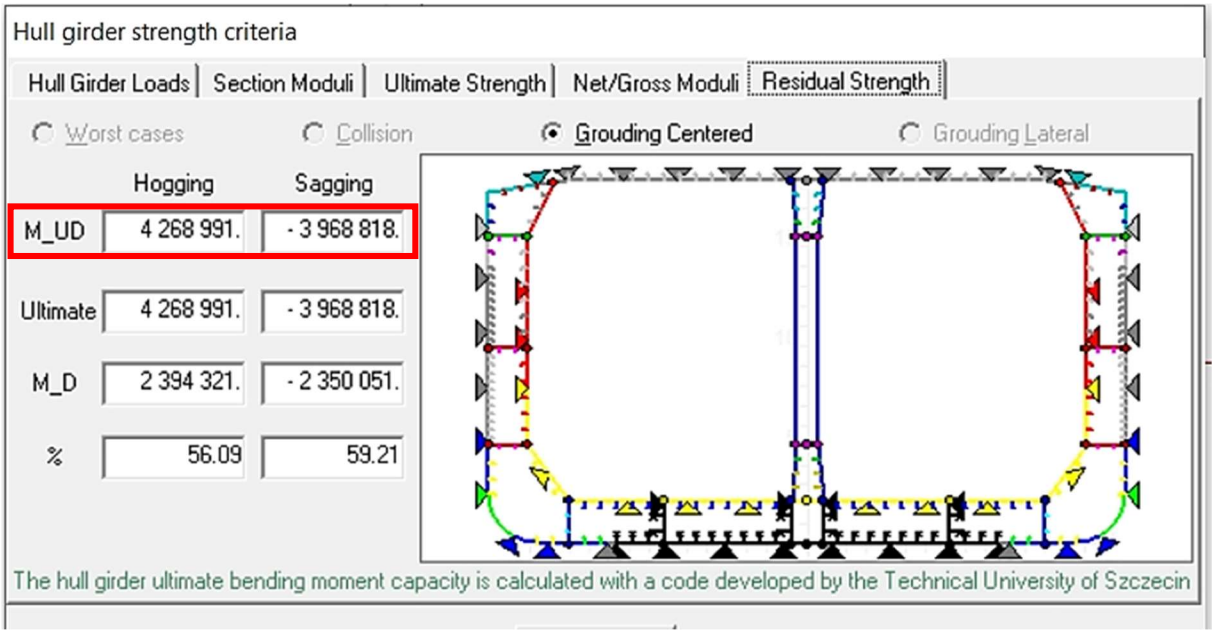
Slika 6.6. Kartica s odabirom tipa i veličine oštećenja

Veličina oštećenja određena je prema zahtjevima i pravilima IACS-a, koja su prikazana u potpoglavlju 4.2.2. Nakon toga *MARS* nam proračuna vrijednosti vertikalni granični moment savijanja trupa M_{UD} u oštećenom stanju, za pregib i progib, sukladno inkrementalno-iterativnoj metodi prikazanoj u poglavlju 3.2. U tablici su prikazane vrijednosti oštećenja za zadani tanker za naftu.

Tablica 6.3. Veličina oštećenja za slučaj nasukavanja

Dubina oštećenja, [m]	Naftni tanker	Oštećenje na modelu, [m]
Visina, h	min (B/15, 2)	2
Širina, b	0,60 B	19,32

Dobivene vrijednosti vertikalnog graničnog momenta trupa M_{UD} moraju zadovoljavati formulu (4.11.) i za pregib i za progib. Izgled oštećenja i vrijednosti graničnog momenta prikazani su na slici 6.7.



Slika 6.7. Rezultati dobiveni u MARS-u za nasukavanje

- za slučaj pregiba

$$\gamma_{SD} \cdot M_{sw-D} + \gamma_{WD} \cdot M_{wv} \leq \frac{M_{UDh}}{\gamma_{RD} \cdot C_{NA}}$$

Uvjet je zadovoljen!

- za slučaj progiba

$$\gamma_{SD} \cdot M_{sw-D} + \gamma_{WD} \cdot M_{wv} \leq \frac{M_{UDs}}{\gamma_{RD} \cdot C_{NA}}$$

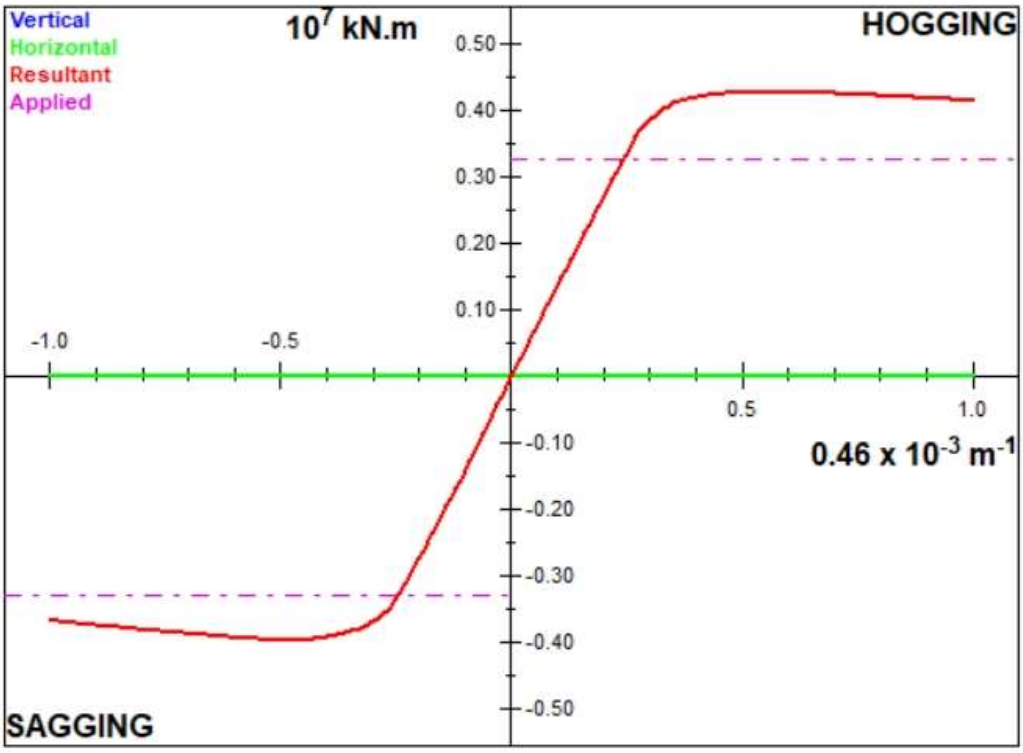
Uvjet nije zadovoljen!

Na slici 6.8. je prikazan dobiveni dijagram zakrivljenosti u *MARS-u* za slučaj oštećenja dna.

Iznosi očitanih maksimalnih vrijednosti, za oštećenje pri nasukavanju, za pregib i progib su:

M_{UDh} = 4 268 991 kNm

M_{UDs} = -3 968 818 kNm



Slika 6.8. Dijagram zakrivljenosti za slučaj oštećenja dna

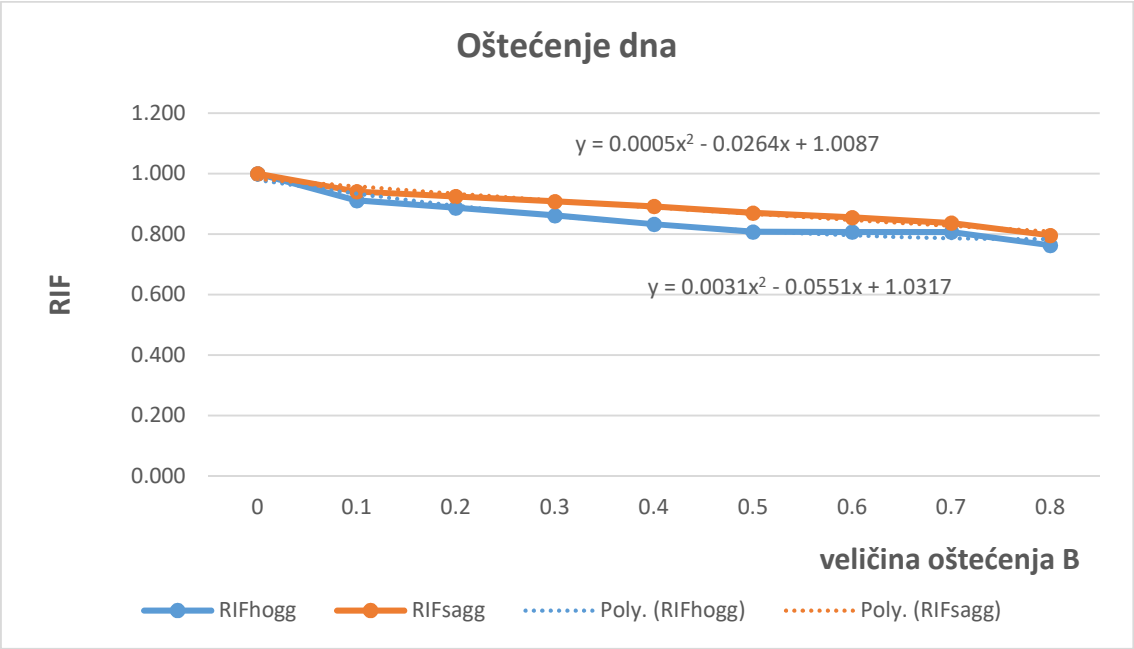
Dodatno provedena je analiza analitičke korelacije između veličine oštećenja i smanjenja graničnog momenta savijanja koja je izražena prema sljedećem izrazu:

$$RIF = \frac{M_{U_damaged}}{M_U} \tag{6.2}$$

Rezultati analize modela prikazani su tablično, tablica 6.4., i grafički, slika 6.9., za slučajeve pregiba i progiba oštećenog trupa u rasponu od 0.1B do 0.8B, a provedeni su pomoć programa *BV MARS*.

Tablica 6.4. Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenje dna

veličina oštećenja B	M_{UD-H}, [kNm]	M_{UD-S}, [kNm]	RIF_{hogg}	RIF_{sagg}
0	5290366	-4641444	1.000	1.000
0.1 B	4820314	-4365328	0.911	0.941
0.2 B	4689750	-4290718	0.886	0.924
0.3 B	4557448	-4215030	0.861	0.908
0.4 B	4407052	-4138796	0.833	0.892
0.5 B	4270413	-4036898	0.807	0.870
0.6 B	4268991	-3968818	0.807	0.855
0.7 B	4268017	-3883039	0.807	0.837
0.8 B	4037603	-3694421	0.763	0.796



Slika 6.9. Grafički prikaz odnosa oštećenja dna i smanjenja graničnog momenta savijanja

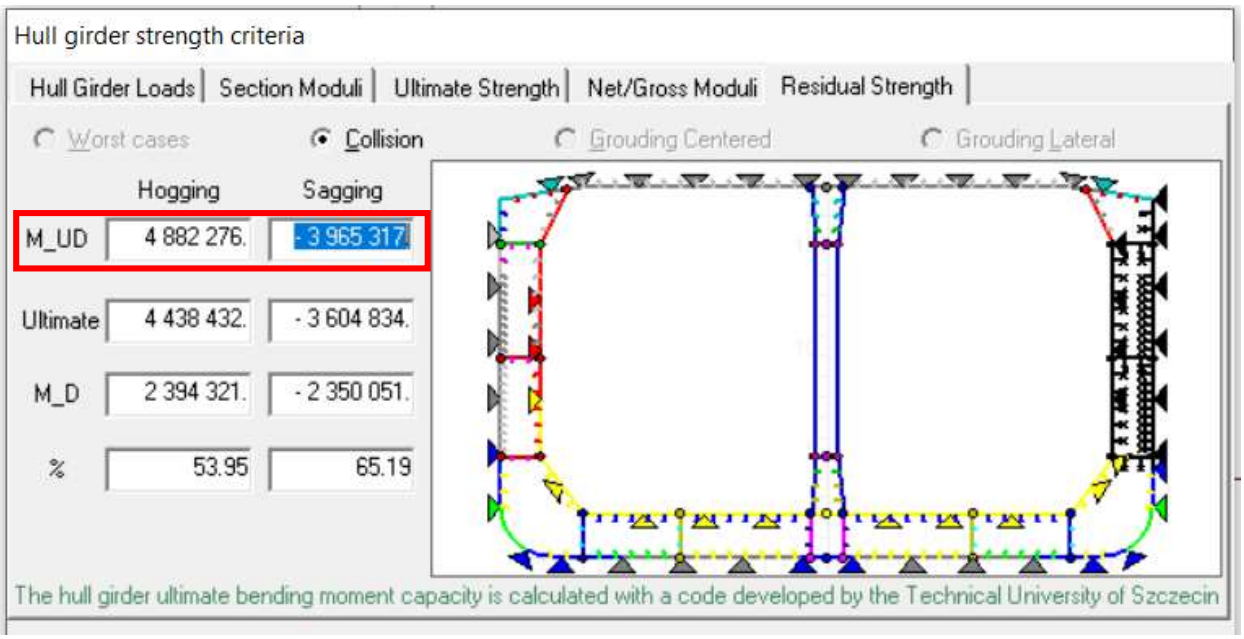
6.2.2. Za slučaj sudara iliti oštećenja boka

Kao i za nasukavanje unesene su Y i Z koordinate te veličina oštećenja, jedino što se mijenja je tip oštećenja, a u ovom slučaju radi se o sudaru. Također kao i kod nasukavanja veličina oštećenja dobivena je prema zahtjevima IACS H CSR-a, koja su prikazana u potpoglavlju 4.2.2. U tablici 6.5. su prikazane vrijednosti unešenih oštećenja u program MARS.

Tablica 6.5. Veličina oštećenja za slučaj oštećenje boka

Dubina oštećenja, [m]	Vrsta oplate boka	Oštećenje na modelu, [m]
	s jednostrukom oplatom	
Visina, h	0,75 D	13,35
Širina, b	B/16	2,0125

Nadalje, dobivene su vrijednosti vertikalnog graničnog momenta trupa M_{UD} koje moraju zadovoljavati formulu 4.11., za slučaj pregiba i progiba. Vidi sliku 6.10.



Slika 6.10. Rezultati dobiveni u MARS-u za sudar

- za slučaj pregiba

$$\gamma_{SD} \cdot M_{sw-D} + \gamma_{WD} \cdot M_{wv} \leq \frac{M_{UD_h}}{\gamma_{RD} \cdot C_{NA}}$$

Uvjet je zadovoljen !

- za slučaj progiba

$$\gamma_{SD} \cdot M_{sw-D} + \gamma_{WD} \cdot M_{wv} \leq \frac{M_{UDs}}{\gamma_{RD} \cdot C_{NA}}$$

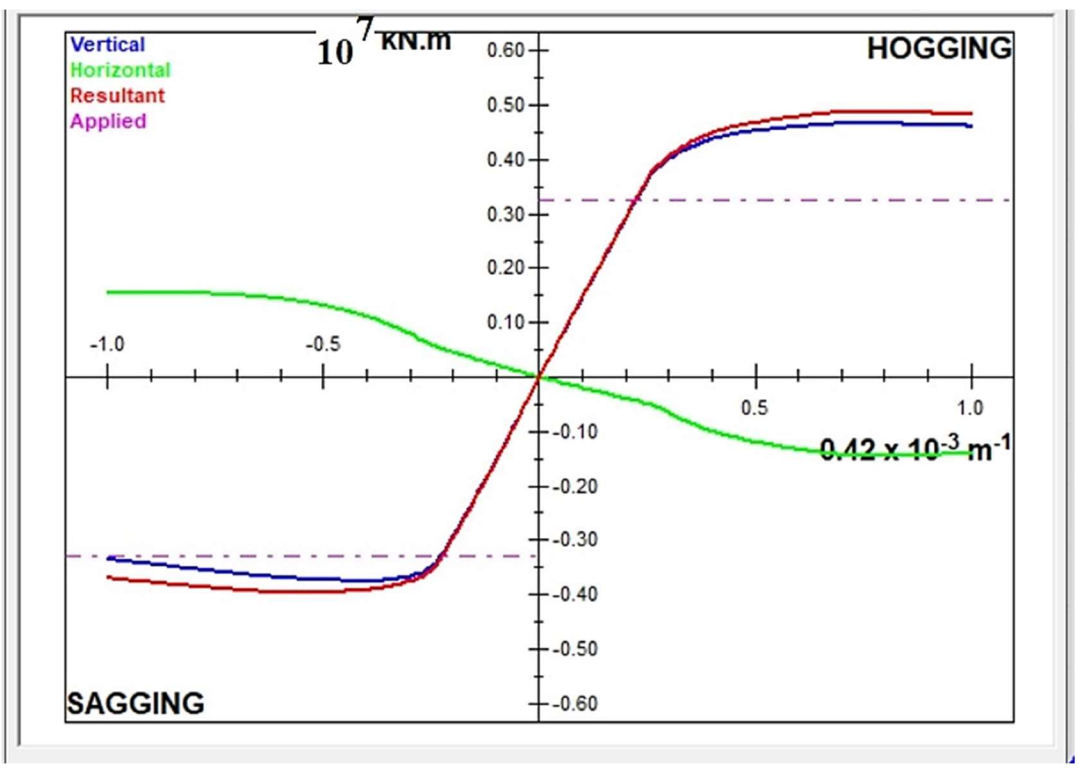
Uvjet nije zadovoljen !

Na slici 6.11. je prikazan dobiveni dijagram zakrivljenosti u MARS-u za slučaj oštećenja boka.

Iznosi očitanih maksimalnih vrijednosti, za oštećenje boka, za pregib i progib su:

M_{UDh} = 4 882 276 kNm

M_{UDs} = -3 965 317 kNm

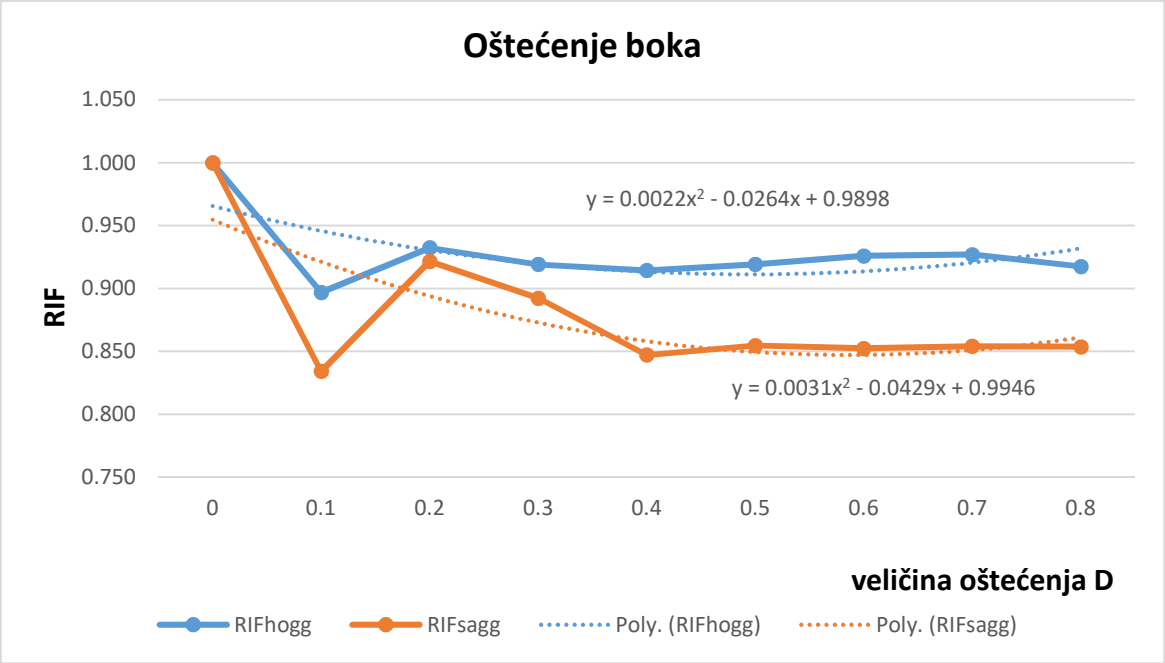


Slika 6.11. Dijagram zakrivljenosti momenta savijanja za slučaj oštećenja boka

Rezultati odnosa između veličine oštećenja boka te smanjenja graničnog momenta savijanja prikazani su u sljedećoj tablici 6.6. te slici 6.12.

Tablica 6.6. Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenje boka

veličina oštećenja D	**$M_{UD\text{-}H}$, [kNm]**	**$M_{UD\text{-}S}$, [kNm]**	**RIF_{hogg}**	**RIF_{sagg}**
0	5290366	-4641444	1.000	1.000
0.1 D	4745504	-3872484	0.897	0.834
0.2 D	4933343	-4278074	0.933	0.922
0.3 D	4863251	-4141981	0.919	0.892
0.4 D	4837603	-4092182	0.914	0.847
0.5 D	4862908	-3967268	0.919	0.855
0.6 D	4898953	-3956818	0.926	0.852
0.7 D	4904305	-3964469	0.927	0.854
0.8 D	4854267	-3962380	0.918	0.854



Slika 6.12. Odnos veličine oštećenja boka te smanjenja graničnog momenta savijanja

7. ZAKLJUČAK

U radu je bilo potrebno izvršiti proračun granične čvrstoće broda za prijevoz kemikalija i nafte uz prikaz krivulja odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti za slučaj pregiba i progiba. U četvrtom poglavlju su opisani zahtjevi IACS H-CSR pravila i propisa za provjeru granične čvrstoće trupa u neoštećenom i oštećenom stanju. Prikazana procedura provedena je na razini glavnog rebra tankera. Stoga kreiran je presjek glavnog rebra u neoštećenom stanju i oštećenom stanju u programu *MARS*, koji se temelji na inkrementalno-iterativnoj metodi. Potom je prvo provedena analiza broda u neoštećenom stanju te su rezultati ispali nezadovoljavajući za stanje progiba (eng. sagging). Također je bilo potrebno odrediti početne veličine oštećenja uslijed nasukavanja ili sudara u skladu s preporukama IACS H-CSR pravila i propisa. Za navedena oštećenja koja variraju od 10% oštećenja do 80% s korakom od 10% kao rezultat proračuna prikazani su dijagrami momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa. Iz slika krivulja odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti možemo vidjeti trenutak dosezanja graničnog momenta savijanja, odnosno gubitak nosivosti konstrukcije. Uz to su prikazani i rezultati analize ovisnosti indeksa preostale čvrstoće *RIF* o veličini oštećenja trupa. Kao što vidimo pri analizi modela u oštećenom stanju, u programu *MARS*, za oba slučaja i za nasukavanja i za sudar uvjet za progib odnosno dobivene vrijednosti vertikalnog graničnog momenta trupa M_{UD} nisu zadovoljile propisana pravila IACS-a opisana u poglavlju 4.2. Za ovaj brod je vidljivo da je granični moment savijanja u progibu manji je od onog u pregibu, te bi mogli pretpostaviti da je progibni slučaj opterećenja kritičniji za sigurnost broda od pregibnog. Utvrđeno je da od svih čimbenika najveći utjecaj na graničnu čvrstoću imaju debljina opločenja, dimenzije ukrepa i čvrstoća popuštanja materijala. Možda bi bilo dobro ponoviti analizu modela za oštećeno i neoštećeno stanje, s povećanim debljinama oplate i s drugačije odabranim materijalima za trup broda odnosno s drugačijim iznosima modula elastičnosti, pa vidjeti bi li takav model zadovoljio zahtjeve IACS-a za slučaje progiba.

LITERATURA

[1] Žiha, K., Parunov, J., Tušek, B.: “Granična čvrstoća brodskog trupa “, Brodogradnja, 2007, Vol.58, No.1, p. 29-41.

[2] Kitarović, S., "Analiza uzdužne granične nosivosti u konceptualnoj sintezi tankostjenih konstrukcija", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[3] CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers assessment within MARS, July 2015.

[4] Common Structural Rules for Bulk carriers and Oil Tankers, International association of classification societies, January 2022.

[5] El-Saleh, A.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.

[6] Žarko, A.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.

[7] Pavšić, M.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.

[8] Deković, M.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.

[9] Subašić, D.: Završnii rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.

[10] Ilić, E.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.

[11] Dupor, N.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.

[12] Farkas, A.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.

[13] Andrić, J.: Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2007.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_E	cm^2	površina presjeka običnih ukrepa s pridruženom širinom oplate
A_S	cm^2	površina presjeka struka uzdužnjaka
B	m	širina
b_E	m	širina produžene oplate
c	/	faktor smanjenja izdržljivosti
C_B	/	koeficijent istisnine
C_{NA}	/	koeficijent neutralne linije oštećenog presjeka
C_w	/	valni koeficijent
d	/	faktor povećanja opterećenja
D	m	visina trupa
E	N/m^2	Youngov modul elastičnosti
$f_{nl\text{-}vh}$	/	koeficijent nelinearne efekte kod pregiba
$f_{nl\text{-}vs}$	/	koeficijent nelinearne efekte kod progiba
$f_p = f_{ps}$	/	koeficijent za proračun čvrstoće kod ekstremnih morskih uvjeta opterećenja
f_{sw}	/	faktor distribucije po dužini broda
h_W	mm	visina struka
h_{WE}	mm	efektivna visina struka
i	/	faktor sigurnosti
I_E	m^4	moment tromosti običnih ukrepa
l	m	duljina ploče

L	m	duljina broda
M	kNm	najveći dopušteni vertikalni moment savijanja.
$M_{sw\text{-}D}$	kNm	vertikalni moment savijanja u mirnoj vodi za oštećeni bok trupa broda
$M_{sw\text{-}U}$	kNm	dopušteni vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi
$M_{sw\text{-}U_h}$	kNm	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za uvjete pregiba
$M_{sw\text{-}U_s}$	kNm	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za uvjete progiba
M_{UD}	kNm	granični moment savijanja trupa
M_{wv}	kNm	vertikalni moment savijanja na valovima
M_{wv_h}	kNm	vertikalni moment savijanja na valovima za uvjete pregiba
M_{wv_s}	kNm	vertikalni moment savijanja na valovima za uvjete progiba
R_{eh}	N/m^2	gornja granica razvlačenja
RIF	/	indeks preostale čvrstoće
s	m	razmak uzdužnjaka
t_P	mm	debljina pridružene oplate
t_W	mm	debljina struka
w	m	razmak između okvira
w_0	m	poprečni pomak
z	m	udaljenost od neutralne linije
ε_{xL}	/	uzdužna linijska deformacija
φ	rad	prikloni kut
Φ	/	granična funkcija

κ_L	1/m	zakrivljenost
σ_C	N/m^2	kritično naprezanje
σ_{CP}	N/m^2	Eulerovo lokalno naprezanja izvijanja
σ_E	N/m^2	naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja
σ_x	N/m^2	naprezanja u smjeru osi x
γ_{db}	/	parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja
γ_m	/	parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja
γ_r	/	parcijalni faktor sigurnosti
γ_{RD}	/	parcijalni faktor sigurnosti
γ_S	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi
γ_{WD}	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima
γ_{RD}	/	parcijalni faktor sigurnosti za granični moment moment savijanja u oštećenom stanju
γ_{SD}	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi oštećenog presjeka
γ_W	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima
χ	rad	prikloni kut

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Opći pristupi analize čvrstoće broda kod projektiranja brodske konstrukcije.....4

Slika 2.2. Krivulje ovisnosti opterećenja i deformacije za razne načine loma strukturnih elemenata.....5

Slika 2.3. Prikaz analize kakvu preporučaju klasifikacijska društva.....6

Slika 2.4. Lokalna čvrstoća uzdužnjaka u MARS-u.....7

Slika 2.5. Lokalna čvrstoća oplate u MARS-u.....8

Slika 2.6. Primjeri faktora iskoristivosti u MARS-u.....9

Slika 3.1. Ovisnost momenta savijanja M o zakrivljenosti brodskog trupa χ.....11

Slika 3.2. Algoritam numeričkog rješenja za proračun graničnog momenta.....12

Slika 3.3. Blok-dijagram Smithove metode za proračun graničnog momenta savijanja.....13

Slika 3.4. Savijanje Euler-Bernoullijeve grede.....14

Slika 3.5. Krivulja naprezanja-deformacija za elastično-plastični načina sloma.....18

Slika 3.6. Krivulja naprezanja-deformacije za slom uslijed gredno-štapnog izvijanja.....20

Slika 3.7. Krivulja naprezanja-deformacije za slom uslijed torzijskog izvijanja.....22

Slika 3.8. Krivulja naprezanja-deformacije za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa.....23

Slika 4.1. Nacrt glavnog rebra modeliranog broda.....25

Slika 4.2. Granični moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti brodskog.....27

Slika 4.3. Određivanje oštećenja u slučaju sudara.....30

Slika 4.4. Opseg oštećenja kod nasukavanja.....31

Slika 5.1. Kartica s glavnim podacima broda.....33

Slika 5.2. Moment i gaz.....34

Slika 5.3. Materijali trupa broda.....35

Slika 5.4. Paneli i čvorovi.....36

Slika 5.5. Prikaz vojeva na poprečnom presjeku glavnog rebra.....37

Slika 5.6. Prikaz postavljenih uzdužnjaka.....38

Slika 5.7. Kartica izbornika BV Rule.....39

Slika 6.1. Kartica s rezultatima za moment otpora.....41

Slika 6.2. Prikaz debljina.....42

Slika 6.3. Prikaz debljine lokalne čvrstoće vojeva.....42

Slika 6.4. Dimenzije uzdužnjaka za zadovoljenje uzdužne čvrstoće.....43

Slika 6.5. Krivulja graničnog momenta savijanja i zakrivljenosti trupa za slučaj pregiba i progiba.....44

Slika 6.6. Kartica s odabirom tipa i veličine oštećenja.....45

Slika 6.7. Rezultati dobiveni u MARS-u za nasukavanje.....46

Slika 6.8. Dijagram zakrivljenosti za slučaj oštećenja dna.....47

Slika 6.9. Grafički prikaz odnosa oštećenja dna i smanjenja graničnog momenta savijanja.....48

Slika 6.10. Rezultati dobiveni u MARS-u za sudar.....49

Slika 6.11. Dijagram zakrivljenosti momenta savijanja za slučaj oštećenja boka.....50

Slika 6.12. Odnos veličine oštećenja boka te smanjenja graničnog momenta savijanja.....51

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Glavne dimenzije broda.....26

Tablica 4.2. Opseg štete zbog sudara.....29

Tablica 4.3. Opseg štete zbog nasukavanja.....31

Tablica 6.1. Glavni podaci o brodu.....40

Tablica 6.2. Rezultati uzdužne granične čvrstoće neoštećenog trupa sukladno pravilima IACS-a.....43

Tablica 6.3. Veličina oštećenja za slučaj nasukavanja.....45

Tablica 6.4. Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenje dna.....48

Tablica 6.5. Veličina oštećenja za sluačj oštećenja boka.....49

Tablica 6.6. Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenje boka.....51