

# Analiza uzdužne granične čvrstoće trupa broda

---

**Subašić, David**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:270671>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**David Subašić**

Zagreb, 2020. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

David Subašić

Zagreb, 2020. godina

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

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću na pruženoj podršci, stručnom vodstvu te susretljivosti prilikom pisanja ovog rada.

Najveću zahvalu dugujem svojoj dragoj obitelji na neizmjenoj podršci tijekom studiranja te im stoga posvećujem ovaj rad.

David Subašić



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **David Subašić** Mat. br.: 0035208872

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA UZDUŽNE GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA BRODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ULTIMATE STRENGTH ANALYSIS OF SHIP HULL**

Opis zadatka:

U radu je potrebno provesti analizu uzdužne granične čvrstoće trupa broda prema inkrementalno-iterativnoj proceduri propisanoj u okviru IACS H-CSR Pravila, na razini glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija i naftnih derivata prema podacima danim u predlošku. Zadatak obuhvaća:

- 1) Upoznavanje s konceptom inkrementalno-iterativnog proračuna uzdužne granične čvrstoće trupa broda i računalnim programom LUSA.
- 2) Upoznavanje sa zahtjevima za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda u neoštećenom i oštećenom stanju u okviru harmoniziranih IACS H-CSR Pravila.
- 3) Izrada strukturnog modela glavnog rebra trupa broda sukladno preporukama IACS H-CSR Pravila. Model je potrebno izraditi za neoštećeni brod kao i za nekoliko varijanti modela s oštećenjem uslijed nasukavanja i bočnog sudara.
- 4) Početnu veličinu oštećenja uslijed nasukavanja i sudara definirati u skladu s preporukama iz IACS H-CSR Pravila. Sistematski varirati početnu veličinu i položaj oštećenja i za svaku novu veličinu i položaj oštećenja proračunati vrijednost graničnog momenta.
- 5) Kao rezultat proračuna uzdužne granične čvrstoće potrebno je:
  - Prikazati krivulju odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti za slučaj pregiba i progiba.
  - Prikazati krivulju smanjenja graničnog momenta savijanja u ovisnosti o veličini oštećenja. Uspostaviti analitičku vezu između veličine oštećenja i smanjenja graničnog momenta savijanja trupa.
  - Analizirati sekvencu kolapsa za neoštećeni presjek te presjeka oštećene uslijed nasukavanja i sudara za slučajeve oštećenja sukladno zahtjevu IACS H-CSR Pravila.

Zadatak zadan:  
28. studenog 2019.

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

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

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. INKREMENTALNO-ITERATIVNA METODA PRORAČUNA UZDUŽNE GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA BRODA.....	2
2.1. Teorijske osnove .....	2
2.2. Diskretizacija modela.....	5
2.3. Krivulje naprezanje-deformacija.....	6
2.4. Postupak inkrementalno-iterativne metode.....	6
2.5. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca .....	9
3. ZAHTJEVI ZA PRORAČUN UZDUŽNE GRANIČNE ČVRSTOĆE BRODA PREMA PRAVILIMA IACS H-CSR [2] .....	10
3.1. Proračun uzdužne granične čvrstoće trupa u neoštećenom stanju .....	10
3.2. Proračun uzdužne granične čvrstoće trupa u oštećenom stanju.....	12
3.2.1. Proračun uzdužne granične čvrstoće za slučaj oštećenja dna (nasukavanje).....	12
3.2.2. Proračun uzdužne granične čvrstoće za slučaj oštećenja boka (bočni sudar).....	12
4. ANALIZA ZADANIH MODELA .....	15
4.1. Analiza neoštećenog modela.....	16
4.1.1. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca .....	17
4.1.1.1. Pregib .....	19
4.1.1.2. Progib.....	21
4.1.2. Proračun uzdužne čvrstoće prema zahtjevima IACS.....	23
4.2. Analiza oštećenog modela uslijed nasukavanja .....	23
4.2.1. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca .....	26
4.2.1.1. Pregib .....	27
4.2.1.2. Progib.....	28
4.2.2. Indeks preostale čvrstoće .....	29
4.2.3. Proračun uzdužne čvrstoće prema zahtjevima IACS.....	30
4.3. Analiza oštećenog modela uslijed sudara .....	31
4.3.1. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca .....	33
4.3.1.1. Pregib .....	34
4.3.1.2. Progib.....	35
4.3.2. Indeks preostale čvrstoće .....	36
4.3.3. Proračun uzdužne čvrstoće prema zahtjevima IACS.....	37
5. ZAKLJUČAK .....	38
PRILOZI.....	40

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Savijanje Euler-Bernoullijeve grede [1].....	3
Slika 2.	Diskretizirani model tankostijenog kutijastog nosača [1] .....	5
Slika 3.	Algoritam numeričkog rješavanja proračuna graničnog momenta savijanja [3] ....	8
Slika 4.	Momenti savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa.....	9
Slika 5.	Određivanje oštećenja za slučaj nasukavanja broda [2] .....	12
Slika 6.	Određivanje oštećenja u slučaju bočnog sudara [2] .....	14
Slika 7.	Nacrt glavnog rebra modeliranog broda.....	16
Slika 8.	Model glavnog rebra neoštećenog presjeka u Maestru .....	17
Slika 9.	Moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa za neoštećen presjek.....	18
Slika 10.	Kolapsna sekvenca za neoštećeni presjek u stanju pregiba.....	19
Slika 11.	Pozicija neutralne linije u ovisnosti o zakrivljenosti za progib i progib neoštećenog presjeka .....	20
Slika 12.	Kolapsna sekvenca za neoštećeni presjek u stanju progiba.....	21
Slika 13.	Usporedba nekolabiranog i kolabiranog presjeka pri $0.95 \mu$ .....	22
Slika 14.	Modeli oštećenog dna uslijed nasukavanja .....	25
Slika 15.	Moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa oštećenog pri nasukavanju .	26
Slika 16.	Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed nasukavanja u stanju pregiba .....	27
Slika 17.	Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed nasukavanja u stanju progiba.....	28
Slika 18.	Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenja.....	30
Slika 19.	Modeli oštećenog dna uslijed nasukavanja .....	32
Slika 20.	Moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa oštećenog uslijed bočnog sudara.....	33
Slika 21.	Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara u stanju pregiba...	34
Slika 22.	Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara u stanju progiba ..	35
Slika 23.	Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini boka .....	36

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Veličina oštećenja kod sudara .....	13
Tablica 2. Glavni podaci o brodu .....	15
Tablica 3. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju pregiba neoštećenog presjeka	19
Tablica 4. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju progiba neoštećenog presjeka	21
Tablica 5. Proračun uzdužne čvrstoće neoštećenog trupa sukladno IACS .....	23
Tablica 6. Veličine oštećenja dna.....	26
Tablica 7. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju pregiba za oštećeni presjek uslijed nasukavanja.....	27
Tablica 8. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju progiba za oštećeni presjek uslijed nasukavanja.....	28
Tablica 9. Vrijednosti momenata u progibu i pregibu te indeksa granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenja dna.....	29
Tablica 10. Proračun uzdužne čvrstoće oštećenog trupa sukladno IACS .....	30
Tablica 11. Veličine oštećenja.....	33
Tablica 12. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju pregiba za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara .....	34
Tablica 13. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju progiba za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara .....	35
Tablica 14. Vrijednosti momenata u progibu i pregibu te indeksa granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenja boka.....	36
Tablica 15. Proračun uzdužne čvrstoće oštećenog trupa sukladno IACS .....	37



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$m^2$	površina
$B$	$m$	širina trupa
$C_B$	/	koeficijent istisnine
$C_{NA}$	/	koeficijent neutralne linije oštećenog presjeka
$C_W$	/	valni koeficijent
$D$	$m$	visina trupa
$E$	$N/m^2$	Youngov modul elastičnosti
$f_{nl-vh}$	/	koeficijent nelinearnih efekata kod pregiba
$f_{nl-vs}$	/	koeficijent nelinearnih efekata kod progiba
$f_p$	/	koeficijent za proračun čvrstoće kod ekstremnih morskih uvjeta opterećenja
$I_y$	$m^4$	moment inercije poprečnog presjeka oko osi $y$
$f_{sw}$	/	faktor distribucije po dužini broda
$L$	$m$	dužina broda
$M_{SW-D}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za oštećeni trup
$M_{SW-U}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi
$M_{SW-U-h}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za uvjete pregiba
$M_{SW-U-s}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za uvjete progiba
$M_{UD}$	$kNm$	granični moment savijanja oštećenog trupa
$M_{UH}$	$kNm$	uzdužni granični moment savijanja za pregib
$M_{US}$	$kNm$	uzdužni granični moment savijanja za progib
$M_{wv}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na valovima
$M_{wv-h}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na valovima za stanje pregiba
$M_{wv-s}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na valovima za stanje progiba
$M_{SW-U}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi
$M_{wv}$	$kNm$	vertikalni moment savijanja na valovima
$M_y$	$kNm$	moment savijanja oko osi $y$

$N$	N	uzdužna sila
$Q_z$	N	smična sila u smjeru osi z
$q_z$	N/m	kontinuirano opterećenje u smjeru osi z
$R$	m	radijus zakrivljenosti progibne linije
$Re^H$	N/m <sup>2</sup>	gornja granica razvlačenja
RIF	/	indeks preostale čvrstoće
$w$	m	razmak između okvira
$w_o$	m	poprečni pomak
$z$	m	udaljenost od neutralne linije
$\varepsilon_{xL}$	/	uzdužna linijska deformacija
$\varphi$	rad	prikloni kut
$\kappa_L$	1/m	zakrivljenost
$\sigma_x$	N/m <sup>2</sup>	naprezanja u smjeru osi x
$\gamma_{db}$	/	parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja
$\gamma_m$	/	parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja
$\gamma_r$	/	parcijalni faktor sigurnosti
$\gamma_{RD}$	/	parcijalni faktor sigurnosti
$\gamma_S$	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi
$\gamma_{WD}$	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima
$\gamma_{RD}$	/	parcijalni faktor sigurnosti za granični moment moment savijanja u oštećenom stanju
$\gamma_{SD}$	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi oštećenog presjeka
$\gamma_W$	/	parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima
$\chi$	rad	prikloni kut

## SAŽETAK

U radu je provedena analiza uzdužne granične čvrstoće trupa broda prema inkrementalno-iterativnoj metodi propisanoj u okviru IACS H-CSR Pravila na razini glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija i naftnih derivata. Radom je obuhvaćeno upoznavanje sa konceptom inkrementalno-iterativnog proračuna, zahtjevima za proračun uzdužne granične čvrstoće trupa broda u neoštećenom i oštećenom stanju u okviru harmoniziranih IACS H-CSR pravila te programom LUSA koji je modul za navedeni proračun. Strukturni modeli glavnog rebra modelirani su u MAESTRO Modeleru. Modeli su izrađeni za neoštećeni brod kao i za nekoliko varijanti modela s oštećenjem uslijed nasukavanja i bočnog sudara. Sistemski su varirane veličine oštećenja i za svaku novu veličinu i položaj oštećenja proračunata je vrijednost graničnog momenta. Veličine oštećenja dna uslijed nasukavanja i boka uslijed sudara definirane su u skladu sa preporukama IACS H-CSR Pravila te je kao rezultat proračuna prikazana krivulja odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti za slučaj pregiba i progiba. Također, analizirana je sekvenca kolapsa za neoštećeni presjek kao i za oštećene te je prikazana krivulja smanjenja graničnog momenta savijanja u ovisnosti o veličini oštećenja koja je opisana analitički.

Ključne riječi:

granična čvrstoća, inkrementalno-iterativna metoda, granični moment savijanja, sekvenca kolapsa.

## **SUMMARY**

This study analyzes the longitudinal ultimate strength of the hull for tankers according to the incrementally-iterative method prescribed by International Association of Classification Societies (IACS) through harmonized Rules (H-CSR). Firstly, the study introduces to concept of incremental-iterative calculation of longitudinal ultimate strength of the hull in intact and damaged condition within the harmonized IACS H-CSR rules. For ultimate vertical bending moment calculation program LUSA developed at FSB was used. Structural models of midship section are modeled in MAESTRO Modeler. The models are made for an intact hull as well as several variants of the model with damage due to grounding and collision. The sizes of the damages are defined in accordance with recommendations of IACS H-CSR Rules. As a result of the calculation curve of the vertical bending moment and the curvature are shown. Finally, the collapse sequence was analyzed for intact section as well as for damaged sections and curve which presents reduction of ultimate bending moment depending on the size of damage is shown and described analytically.

Key words:

ultimate strength, incremental-iterative method, ultimate bending moment, collapse sequence.

## 1. UVOD

Brodski trup je trodimenzionalno tijelo u obliku tankostijenog kutijastog nosača. Ukoliko takvo tijelo ima izraženu dimenziju duljine naspram širine i visine, uzdužna čvrstoća ima presudnu ulogu. Uzdužna čvrstoća broda temelji se na promatranju broskog trupa kao grede te se zbog svog značaja za sigurnost broda smatra primarnom čvrstoćom. Zadovoljenje primarne čvrstoće jedan je od glavnih kriterija pri projektiranju brodske konstrukcije. Prilikom projektiranja primarni cilj je ostvariti sigurnu i funkcionalnu konstrukciju koja će izdržati sva opterećenja kojima će biti izložena u službi. Najveći utjecaj na čvrstoću ima vertikalno savijanje pa se stoga uzdužna granična čvrstoća definira kao najveći iznos momenta unutrašnjih uzdužnih sila kojega je moguće ostvariti na kritičnom poprečnom presjeku. Općenito se kolaps nosive konstrukcije može definirati kao granično stanje nosivosti pri kojem konstrukcija gubi sposobnost otpora narinutom vanjskom opterećenju (vlačenje/tlačenje, savijanje, smik, uvijanje) [1]. Klasifikacijska društva, imajući u vidu značaj problema, okupljena u udruhu International Association of Classification Societies (IACS) [2] razvila su harmonizirana zajednička pravila uzdužne čvrstoće broda uključujući i provjeru granične čvrstoće trupa. Dakle, klasifikacijska društva određuju najveća dopuštena (projektna) opterećenja. Najveći dopušteni moment savijanja prema IACS-u sastoji se od zbroja momenta savijanja na mirnoj vodi i momenta savijanja na valovima uvećanima za faktore sigurnosti, što je detaljnije opisano u poglavlju 3. Tako izračunati najveći dopušteni moment prema pravilima mora biti manji (ili u graničnom slučaju jednak) vertikalnom graničnom momentu savijanja trupa uz faktor korekcije. Taj zahtjev pravila proširio se i na provjeru trupa u oštećenom stanju stoga ovaj rad obuhvaća analizu promjene uzdužne granične čvrstoće kod oštećenja dna (nasukavanje) i boka (bočni sudar). Neke od metoda proračuna uzdužne granične čvrstoće složenih tankostijenih konstrukcija jesu: metode temeljene na teoriji plastičnosti, metoda spregnutih greda, nelinearna metoda konačnih elemenata te metode analize progresivnog kolapsa od kojih je Smithova inkrementalno-iterativna metoda korištena u ovom radu.

## 2. INKREMENTALNO-ITERATIVNA METODA PRORAČUNA UZDUŽNE GRANIČNE ČVRSTOĆE TRUPA BRODA

### 2.1. Teorijske osnove

Brodski trup idealizira se Euler-Bernoullijevom gredom pri čemu do sloma dolazi gubitkom krutosti grede na savijanje, smik ili uvijanje. Modul trupa smatra se prizmatičnim, poprečna struktura okomita na uzdužnu te do uzdužnog globalnog kolapsa dolazi gubitkom nosivosti uzdužno orijentiranih nosivih elemenata konstrukcije. Svi poprečni presjeci smatraju se dovoljno čvrstim/krutim tako da uzdužni elementi kolabiraju između dva poprečna presjeka. Uzdužni i poprečni kolaps nisu nezavisni, ali postupak određivanja granične nosivosti koji bi u obzir uzeo sve načine gubitka nosivosti (poprečne i uzdužne) iznimno je zahtjevan te teško izvediv. Stoga se pri projektiranju konstrukcije uvode dodatna ograničenja vezano uz geometrijske i materijalne karakteristike poprečnih okvirnih nosača kako bi se osigurala izvjesnost pojave između-okvirnog kolapsa (eng. *Interframe collapse*) uzdužno nosivih elemenata prije pojave bilo kojeg složenijeg načina kolapsa koji bi obuhvatio više od jednog uzdužnog segmenta konstrukcije [1]. Time je omogućeno analizirati svaki uzdužni segment zasebno.

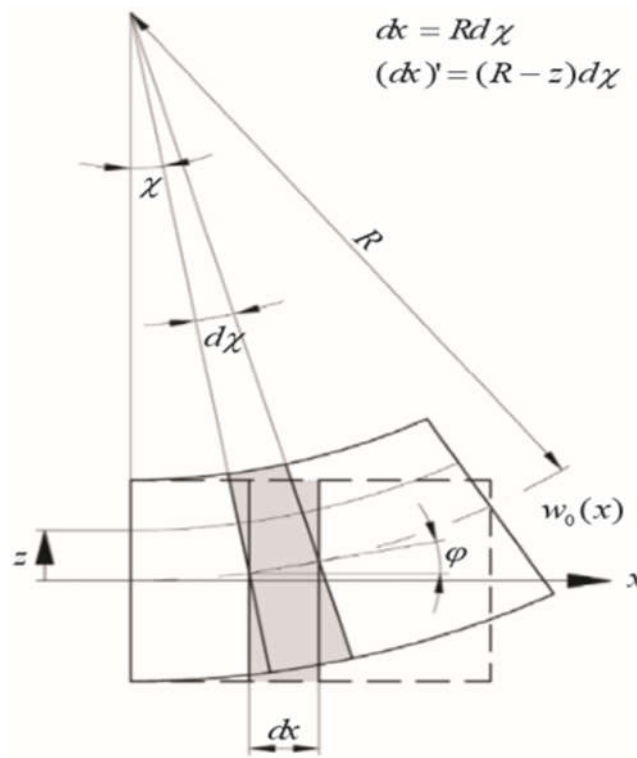
Odnos momenta savijanja  $M$  i zakrivljenosti grede  $\kappa$  moguće je dobiti iz diferencijalne jednadžbe Euler-Bernoullijeve grede [1]:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI_y \frac{d^2 w_o(x)}{dx^2} \right) = q_z(x) \quad (2.1)$$

gdje  $q_z(x)$  predstavlja kontinuirano opterećenje u smjeru osi  $z$ . Integriranjem kontinuiranog opterećenja dobiva se raspodjela smične sile  $Q_z(x)$ , a daljnjim integriranjem moment savijanja  $M_y(x)$  oko osi  $y$ .

$$M_y(x) = -E \frac{d^2 w_o(x)}{dx^2} \quad (2.2)$$

Krutost na savijanje označena je kao  $EI_y$ , dok je poprečni pomak označen kao  $w_o$ .



Slika 1. Savijanje Euler-Bernoullijeve grede [1]

Duljina diferencijalnog dijela  $dx$  sukladno Euler-Bernoullijevoj hipotezi ostaje ista i nakon deformiranja. S obzirom da u deformiranom stanju razmatrani segment neutralnog sloja poprima oblik kružnog luka, može se uočiti da vrijedi  $dx = R d\chi$  [1]. Uz jednakost kutova,  $\chi = \varphi$  te za mali kut  $\varphi$  vrijedi :

$$\varphi = \tan\varphi = \frac{dw_0}{dx} \quad (2.3)$$

Slijedi:

$$\kappa_L = \frac{1}{R} = \frac{d\chi}{dx} = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{d^2 w_0(x)}{dx^2} \quad (2.4)$$

Vidljivo je da prvom derivacijom poprečnog pomaka  $w_0$  po uzdužnoj koordinati  $x$  dobivamo kut  $\varphi$ , a daljnjim deriviranjem lineariziranu fizikalnu zakrivljenost grede  $\kappa_L$ .

Sada jednačba (2.2) poprima oblik:

$$M_y(x) = -EI_y \kappa_L \quad (2.5)$$

Time je dobiven odnos momenta savijanja i zakrivljenosti grede.

Razmatranjem duljine proizvoljnog sloja diferencijalnog uzdužnog segmenta grede (na udaljenosti  $z$  od neutralnog sloja grede) u nedeformiranom i deformiranom stanju, može se odrediti poprečna raspodjela uzdužnih linijskih deformacija po visini grede [1] :

$$\varepsilon_{xL}(x, z) = \frac{(dx)' - dx}{dx} = \frac{(R-z)d\chi - Rd\chi}{Rd\chi} = -\frac{z}{R} \quad (2.6)$$

Uvrštavanjem (2.4) u (2.6) dobiva se odnos fizikalne zakrivljenosti grede i uzdužne linijske deformacije:

$$\varepsilon_{xL}(x, z) = -z\kappa_L \quad (2.7)$$

Za tijelo u ravnoteži zaključuje se da je i svaki dio tog tijela u ravnoteži pa uzdužni odziv pri promjeni zakrivljenosti  $\kappa_L$  može se promatrati na izdvojenom uzdužnom segmentu grede koji je ograničen poprečnim nosačima na prednjoj odnosno stražnjoj strani. Prema (2.7) vidljivo je da različite zakrivljenosti  $\kappa_L$  uzrokuju različite (linearne) raspodjele uzdužnih linijskih deformacija po poprečnom presjeku promatranog uzdužnog segmenta [1]. Poznavajući vezu između linijske deformacije i njome uzrokovanog uzdužnog naprezanja, za svaki diferencijalni element određena je unutrašnja uzdužna sila:

$$dN = \sigma_x dA \quad (2.8)$$

Položaj neutralne osi određuje se iz uvjeta ravnoteže prema kojem su resultantne vlačne i tlačne sile po iznosu jednake. Nadalje, kako je hvatište proizvoljne diferencijalne uzdužne sile (težište površine  $dA$ ) udaljeno od neutralne osi presjeka za iznos  $z$ , integriranjem svih produkata diferencijalnih sila i pripadajućih krakova po površini uravnoteženog poprečnog presjeka dobiva se ukupni moment unutrašnjih uzdužnih sila oko trenutne neutralne osi: [1]

$$M_y(x) = \int_A \sigma_x z dA \quad (2.9)$$

Pri većim vrijednostima linearizirane fizikalne zakrivljenosti veza između uzdužne linijske deformacije i uzdužnog normalnog naprezanja nije linearno-elastična te ju je potrebno definirati u elasto-plastičnoj domeni pri čemu se u obzir uzima granična uzdužna nosivost te poslije-kolapsno smanjenje uzdužne nosivosti sastavnih elemenata zbog prisutnog opterećenja.

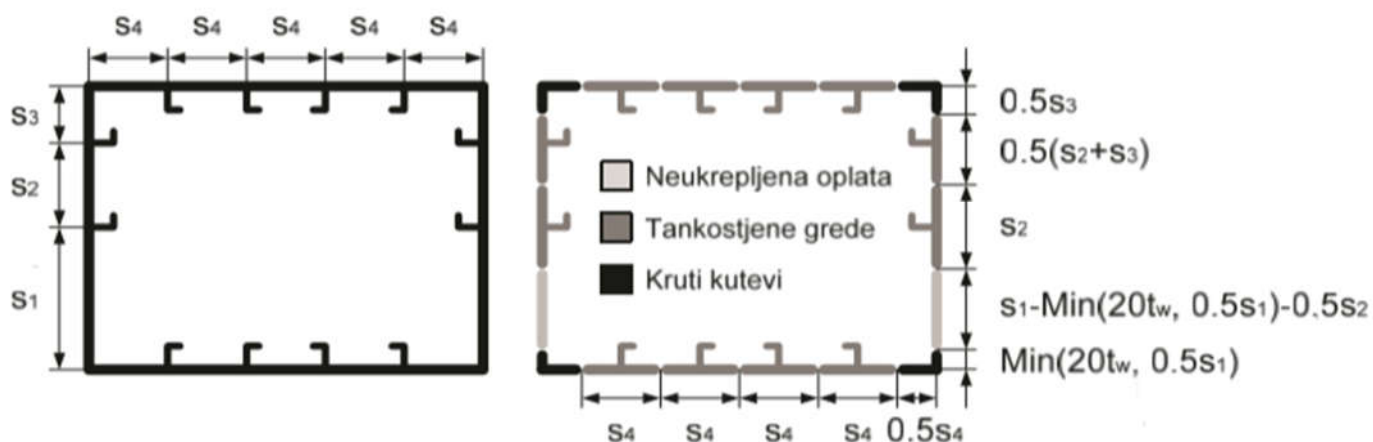


Promjena uzdužne nosivosti sastavnih elemenata povezana je s promjenom rezultirajućeg momenta unutrašnjih uzdužnih sila pri različitim vrijednostima zakrivljenosti te stoga niti odnos narinute zakrivljenosti i momenta neće biti linearan. S obzirom da se prirast momenta pri progresivnom povećanju zakrivljenosti sve više smanjuje, a nakon dostizanja granične vrijednosti poprima negativnu vrijednost, iz formule (2.5) zaključuje se kako se i savojna krutost razmatranog poprečnog presjeka progresivno smanjuje.

## 2.2. Diskretizacija modela

U okviru inkrementalno-iterativne metode potrebno je materijal promatranog modela koji sudjeluje u uzdužnoj nosivosti konstrukcije diskretizirati sa tri vrste diskretnih sastavnih elemenata (vidi sliku 2.) :

- Grede tankostijenog presjeka koje čine uzdužne ukrepe sa pridruženom sunosivom širinom oplata
- Kruti kutovi- njima se diskretiziraju spojevi oplata koji leže u različitim ravninama te zatvaraju pozitivni ili negativni kut od najviše 270 stupnjeva, a zbog svoje velike krutosti nosivost gube isključivo popuštanjem materijala
- Poprečno orebrena oplata- uzdužno neukrepljena oplata kojoj relevantni uzdužni raspon određuje poprečno orebrenje



Slika 2. Diskretizirani model tankostijenog kutijastog nosača [1]

Duljina svih elemenata određena je uzdužnim rasponom razmatranog uzdužnog segmenta između jakih poprečnih nosača i/ili relevantnim poprečnim elementima unutar tog raspona [1].

### 2.3. Krivulje naprezanje-deformacija

Veza između linearizirane fizikalne zakrivljenosti  $\kappa_L$  i uzdužne linijske deformacije  $\varepsilon_{xL}$  dana je jednadžbom (2.7). Nadalje, potrebno je odrediti normalno naprezanje pojedinog diskretnog elementa. Za određivanje normalnog naprezanja koristi se skup različitih fenomenoloških  $\sigma - \varepsilon$  krivulja. One prikazuju odnos srednjeg naprezanja i srednje deformacije za karakteristični način gubitka nosivosti diskretnih sastavnih elemenata konstrukcije. Za svaki diskretizirani element koji je opterećen vlačno ili tlačno, u linearnoj ili nelinearnoj elastično-plastičnoj domeni, pomoću  $\sigma - \varepsilon$  krivulja za određeni način gubitka nosivosti određuje se naprezanje uzrokovano pripadajućom deformacijom.

Načini gubitka nosivosti opisani  $\sigma - \varepsilon$  krivuljama jesu:

- Elasto-plastični kolaps (popuštanje)
- Globalno gredno-štapno izvijanje
- Globalno lateralno-uvojno izvijanje
- Lokalno izvijanje struka ukrepe s pojasom
- Lokalno izvijanje struka ukrepe bez pojasa
- Izvijanje oplate

### 2.4. Postupak inkrementalno-iterativne metode

U propisima IACS-a [2], na koje se oslanjaju klasifikacijska društva, navedeni su koraci inkrementalno iterativnog postupka (vidi sliku 3.) :

1. Podjela poprečnog presjeka na elemente ukrepljenih panela
2. Određivanje neutralne osi za nedeformiranu strukturu
3. Definicija odnosa naprezanje-deformacija za sve elemente  $\sigma - \varepsilon$  krivuljama
4. Početak postupka određivanjem početne zakrivljenosti
5. Određivanje odgovarajuće deformacije za svaki element te korištenjem  $\sigma - \varepsilon$  krivulja određivanje naprezanja za svaki element

6. Nalaženje nove neutralne osi postavljenjem uvjeta ravnoteže presjeka
7. Proračun ukupnog momenta savijanja zbrajanjem doprinosa svih elemenata savijanja

Rezultat postupka je krivulja momenta u ovisnosti o zakrivljenosti trupa.

Inkrementalni dio se odnosi na progresivno povećavanje zakrivljenosti trupa, a iterativni na određivanje novog položaja neutralne osi presjeka za svaki korak metode.

Početna zakrivljenost određuje se iz izraza: [3]

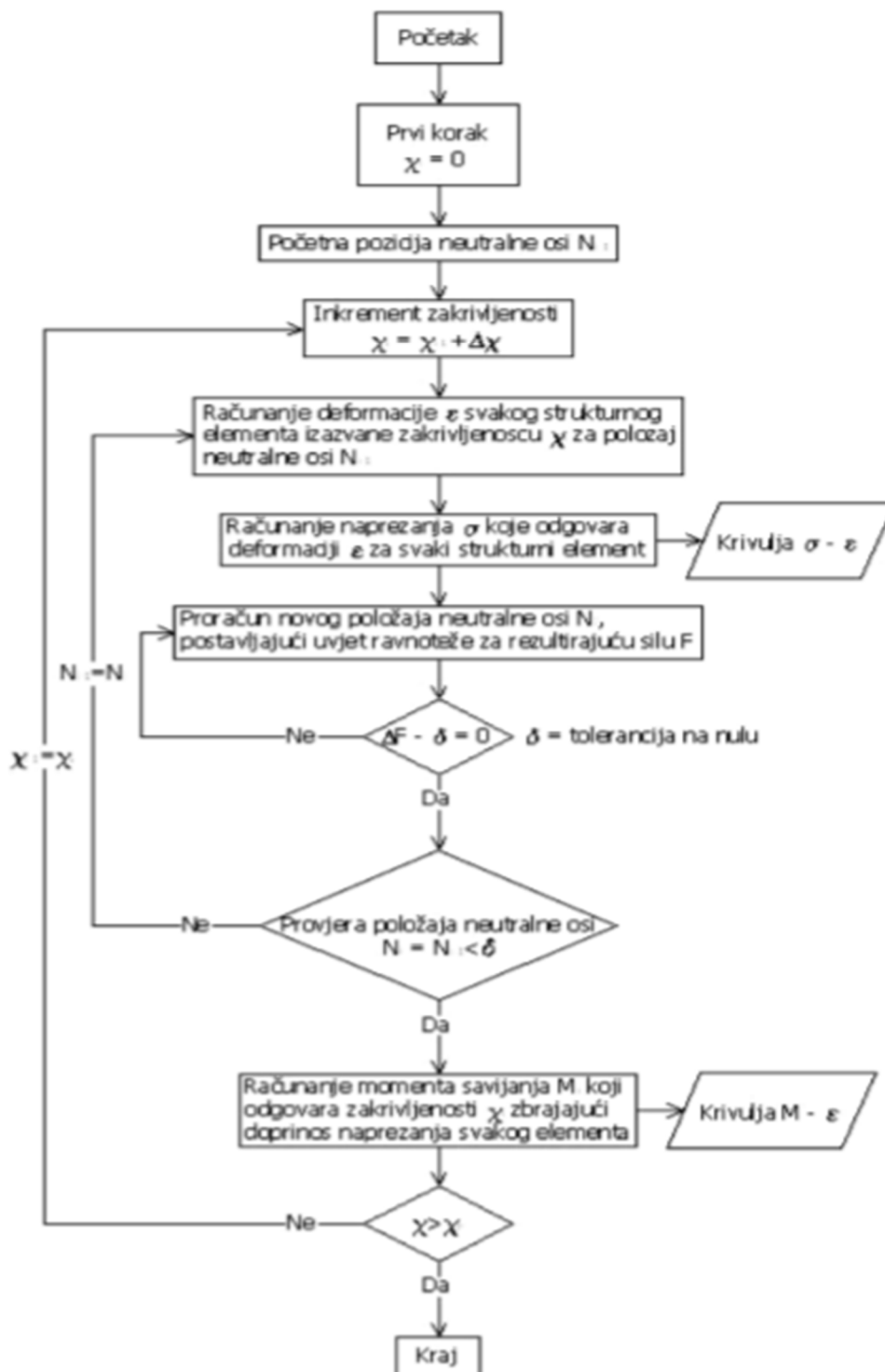
$$\chi_o = 0,01\varepsilon_y \quad (2.10)$$

gdje je  $\varepsilon_y$  deformacija popuštanja koja se određuje prema:

$$\varepsilon_y = \frac{Re^H}{E} \quad (2.11)$$

$Re^H$  - gornja granica razvlačenja

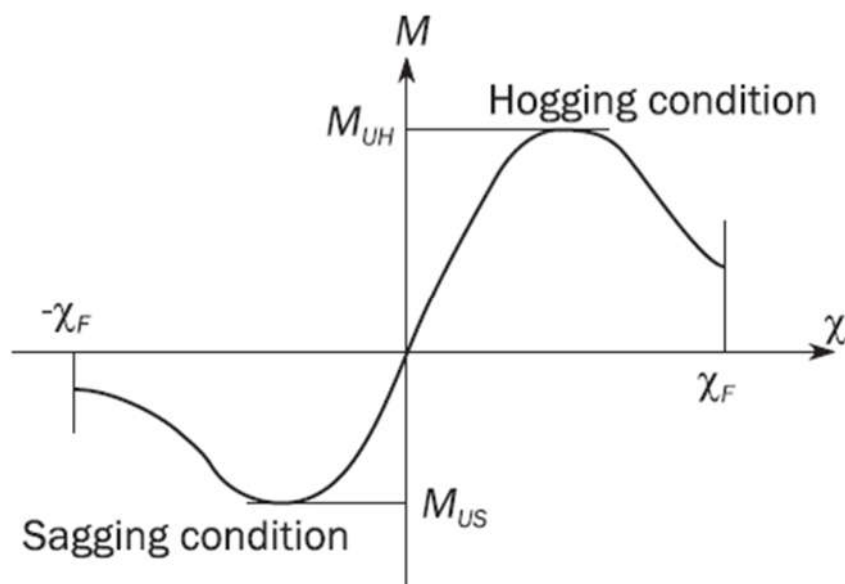
$E$  – modul elastičnosti



Slika 3. Algoritam numeričkog rješavanja proračuna graničnog momenta savijanja [3]

## 2.5. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca

Rezultat analize progresivnog kolapsa jest krivulja momenta  $M$  savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $\kappa$  prikazana slikom 4. Iz krivulje određuju se uzdužni granični momenti za slučaj pregiba  $M_{UH}$  (eng. *Hogg*) i slučaj progiba  $M_{US}$  (eng. *Sagg*). Za svaki korak metode uzdužna nosivost se može promatrati i lokalno za svaki diskretizirani element. Dobivene vrijednosti momenata moraju zadovoljiti zahtjeve za proračun uzdužne čvrstoće broda prema pravilima IACS H-CSR.



Slika 4. Momenti savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa

### 3. ZAHTJEVI ZA PRORAČUN UZDUŽNE GRANIČNE ČVRSTOĆE BRODA PREMA PRAVILIMA IACS H-CSR [2]

U ovom poglavlju detaljno su opisani zahtjevi IACS H-CSR pravila za provjeru uzdužne čvrstoće trupa u neoštećenom i oštećenom stanju. Prikazana procedura provedena je na razini glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija i naftnih derivata.

#### 3.1. Proračun uzdužne granične čvrstoće trupa u neoštećenom stanju

Vertikalni granični moment savijanja trupa u neoštećenom stanju mora zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_r} \quad (3.1)$$

pri čemu  $M$  predstavlja vertikalni moment savijanja,  $M_U$  predstavlja vertikalni granični moment savijanja trupa koji je proračunat inkrementalno-iterativnom metodom u ovom radu korištenjem programa LUSA, a  $\gamma_r$  je parcijalni faktor sigurnosti koji je definiran kao:

$$\gamma_r = \gamma_m \gamma_{db} \quad (3.2)$$

gdje su:

$\gamma_m$  – 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

$\gamma_{db}$  – parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja koji uzima u obzir efekt savijanja dvodna. Vrijednost faktora za tankere iznosi 1,1 u slučaju pregiba te 1,0 u slučaju progiba.

Vertikalni moment savijanja  $M$  određen je sljedećom jednadžbom:

$$M = \gamma_S M_{SW-U} + \gamma_W M_{wv} \quad (3.3)$$

gdje je:

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

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

$\gamma_S$  – parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi. Vrijednost faktora iznosi 1,0

$\gamma_W$  – parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima. Vrijednost za pregib iznosi 1,2, dok za progib iznosi 1,3

Vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za uvjete pregiba (eng. *Hogg*) definiran je kao:

$$M_{SW-U-h} = f_{sw}(171 C_W L^2 B(C_B + 0,7)10^{-3} - M_{wv-h}) \quad (3.4)$$

dok za uvjete progiba (eng. *Sagg*) vrijedi:

$$M_{SW-U-s} = -0,85 f_{sw}(171 C_W L^2 B(C_B + 0,7)10^{-3} - M_{wv-s}) \quad (3.5)$$

Pri čemu su:

$f_{sw}$  – faktor distribucije po dužini broda. Vrijednost faktora za poziciju glavnog rebra iznosi 1,0

$C_W$  – valni koeficijent. Vrijednost za brodove duljine veće od 90 m i manje od 300 m određena je kao:

$$C_W = 10,75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5} \quad (3.6)$$

Vertikalni moment savijanja na valovima za stanje pregiba određuje se prema izrazu:

$$M_{wv-h} = 0,19 f_{nl-vh} f_m f_p C_W L^2 B C_B \quad (3.7)$$

dok za stanje progiba vrijedi izraz:

$$M_{wv-s} = -0,19 f_{nl-vs} f_m f_p C_W L^2 B C_B \quad (3.8)$$

gdje je:

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

$f_{nl-vs}$  - koeficijent koji uzima u obzir nelinearne efekte kod progiba. Vrijednost se računa prema izrazu:

$$f_{nl-vs} = 0,58 \left( \frac{C_B + 0.7}{C_B} \right) \quad (3.9)$$

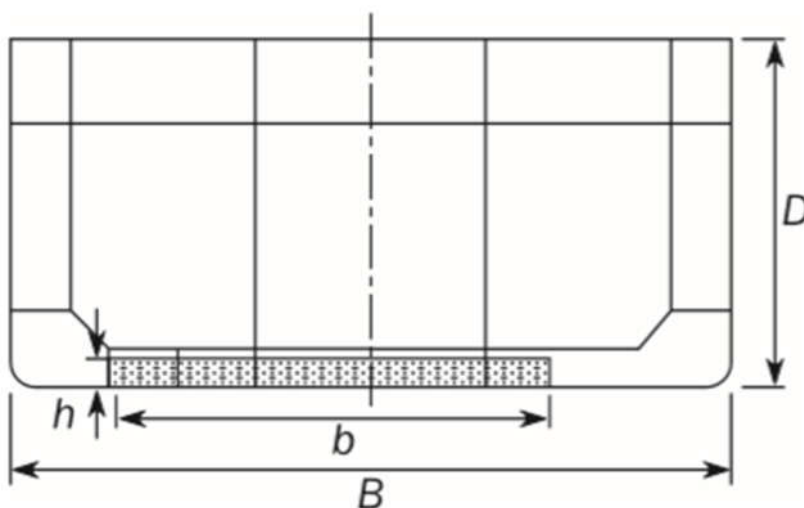
$f_p$  - koeficijent za proračun čvrstoće kod ekstremnih morskih uvjeta opterećenja. Vrijednost iznosi 1,0

### 3.2. Proračun uzdužne granične čvrstoće trupa u oštećenom stanju

U pravilima IACS H-CSR [2] opisan je proračun za dva načina oštećenja trupa, a to su: oštećenje boka te oštećenje dna. U ovom radu biti će napravljena analiza za slučaj bočnog sudara te nasukavanja.

#### 3.2.1. Proračun uzdužne granične čvrstoće za slučaj oštećenja dna (nasukavanje)

U slučaju nasukavanja dolazi do oštećenja broskog dna, a mjera oštećenja definirana je u pravilima IACS H-CSR [2] pomoću visine i širine mogućeg oštećenja. Za brodove koji prevoze tekući teret, visina oštećenje definirana je kao niža vrijednost od navedene dvije veličine:  $h = \frac{B}{15}$  ili  $h = 2$  m. Širina oštećenja definira se kao  $b = 0,60 B$ .



Slika 5. Određivanje oštećenja za slučaj nasukavanja broda [2]



Zahtjev pravila koji je za opisano oštećenje potrebno zadovoljiti jest:

$$\gamma_{SD} M_{sw-D} + \gamma_{WD} M_{wv} \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} c_{NA}} \quad (3.10)$$

gdje su:

$M_{UD}$ - 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 nasukavanje

$\gamma_{SD}$ - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi. Vrijednost iznosi 1,1

$\gamma_{WD}$  - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima. Vrijednost iznosi 0,67

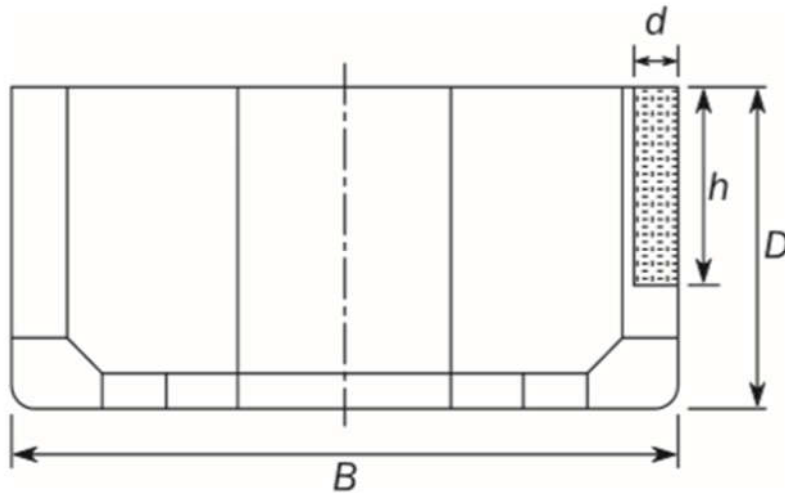
$\gamma_{RD}$  - parcijalni faktor sigurnosti za granični moment moment savijanja u oštećenom stanju.  
Vrijednost iznosi 1,0

### 3.2.2. Proračun uzdužne granične čvrstoće za slučaj oštećenja boka (bočni sudar)

U slučaju bočnog sudara dolazi do oštećenja broskog boka, a mjera oštećenja definirana je u pravilima IACS H-CSR [2] pomoću visine i širine mogućeg oštećenja. Pretpostavlja se da je oštećenje konstrukcije smješteno na jednom boku i neposredno uz palubu. Veličina oštećenja prikazana je u tablici 1. te prikazana slikom 6.

Dubina oštećenja [m]	Vrsta oplata boka	
	S jednostrukom oplatom	S dvostrukom oplatom
Visina	0,75D	0,6D
Širina	B/16	B/16

**Tablica 1. Veličina oštećenja kod sudara**



Slika 6. Određivanje oštećenja u slučaju bočnog sudara [2]

Zahtjev pravila koji je za opisano oštećenje potrebno zadovoljiti jest:

$$\gamma_{SD} M_{sw-D} + \gamma_{WD} M_{wv} \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} c_{NA}} \quad (3.11)$$

gdje su:

$M_{UD}$ - granični moment savijanja trupa

$M_{sw-D}$  – vertikalni moment savijanja na mirnoj vodi za oštećeni bok trupa broda

$M_{wv}$ - vertikalni moment savijanja na valovima

$M_{UD}$ - granični moment savijanja trupa

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

$\gamma_{SD}$ - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi. Vrijednost iznosi 1,1

$\gamma_{WD}$  - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima. Vrijednost iznosi 0,67

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

Formule po kojima se računaju momenti  $M_{sw-D}$  i  $M_{wv}$  za stanje prebiga i progiba dane su redom u jednadžbama (3.4), (3.5), (3.7) te (3.8).

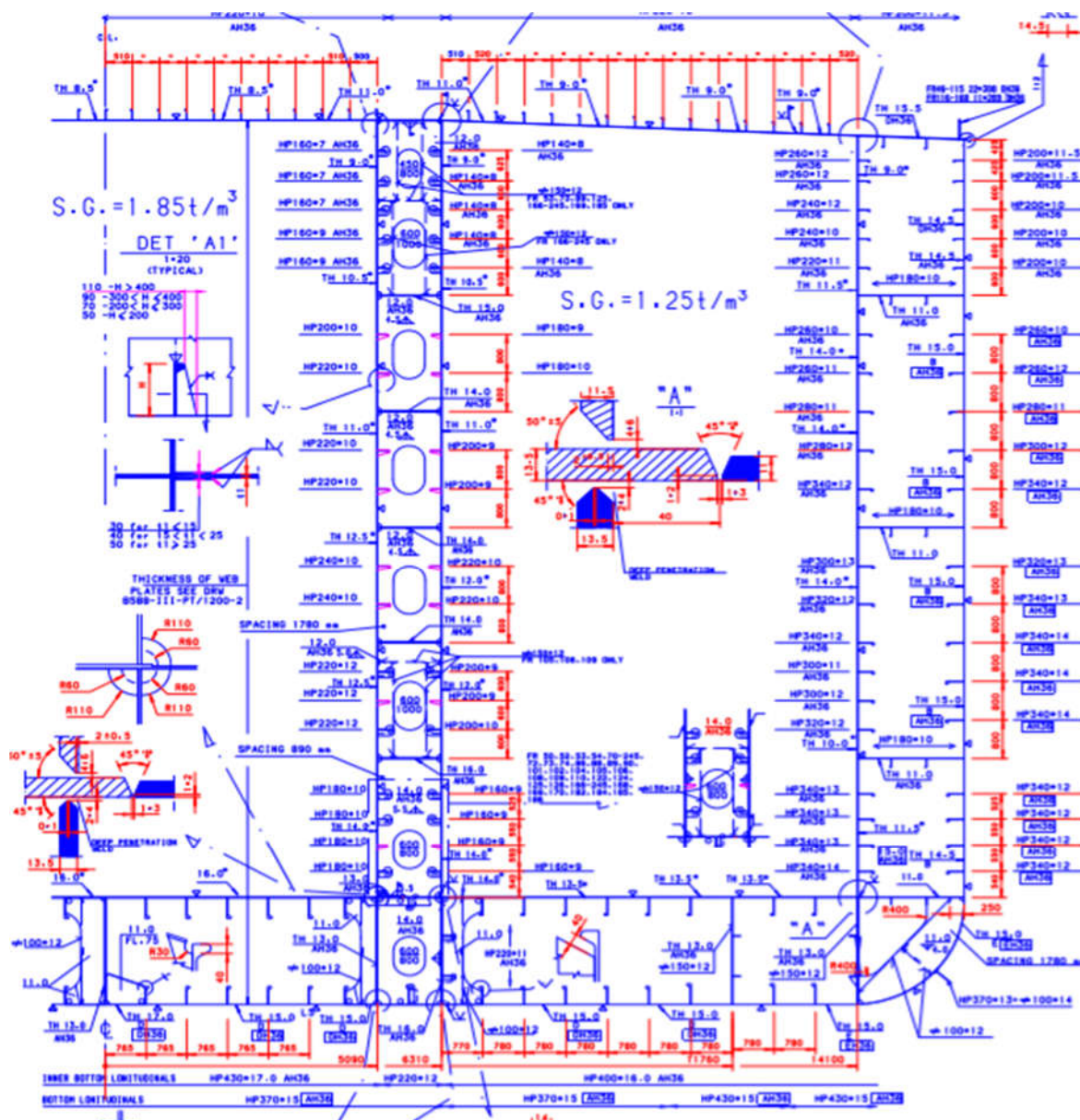
#### 4. ANALIZA ZADANIH MODELA

U ovom radu analizirano je glavno rebro broda za prijevoz kemikalija i naftnih derivata. Nacrt glavnog rebra prikazan je slikom 7., a glavne dimenzije broda tablicom 2. Modeli su izrađeni u programu MAESTRO [4] u kojem su modelirani svi konstrukcijski elementi koji doprinose uzdužnoj čvrstoći. Osim modela sa neoštećenim glavnim rebrom, napravljeni su modeli sa oštećenjem dna te modeli sa oštećenjem boka. Oštećenje je za nasukavanje i bočni sudar modelirano u rasponu od 10% do 80% širine oštećenja sa korakom 10%. Za slučaj nasukavanja oštećenje je simetrično s obzirom na centralnu liniju presjeka, a za slučaj sudara oštećenje je na jednom boku i smješteno je neposredno uz palubu. Analiza odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti te kolapsa sekvenca prikazani su za neoštećeni presjek i dva tipa oštećenja presjeka, a to su 0,6B kod nasukavanja odnosno 0,6D kod bočnog sudara jer su upravo te veličine oštećenja relevantne prema zahtjevima IACS-a [2]. Kao rezultat proračuna uzdužne granične čvrstoće osim krivulje odnosa vertikalnog momenta savijanja i zakrivljenosti trupa za slučaj pregiba i progiba, prikazana je krivulja smanjenja graničnog momenta savijanja u ovisnosti o veličini oštećenja te je uspostavljena analitička veza između veličine oštećenja i smanjenja graničnog momenta savijanja trupa. Također, na krivuljama  $M - \kappa$  je označen te potom tablično prikazan kolaps pojedinih elemenata modela. Odnos vrijednosti graničnog momenta u oštećenom stanju i graničnog momenta u neoštećenom stanju naziva se indeks preostale čvrstoće (RIF eng. *Residual strenght index*), a dan je izrazom:

$$RIF = \frac{M_{U-damaged}}{M_{U-intact}} \quad (4.1)$$

Duljina $L$ [m]	177
Širina $B$ [m]	32,2
Visina $D$ [m]	17,98
Razmak između okvira $w$ [m]	3,56
Koeficijent punoće $C_B$	0,821

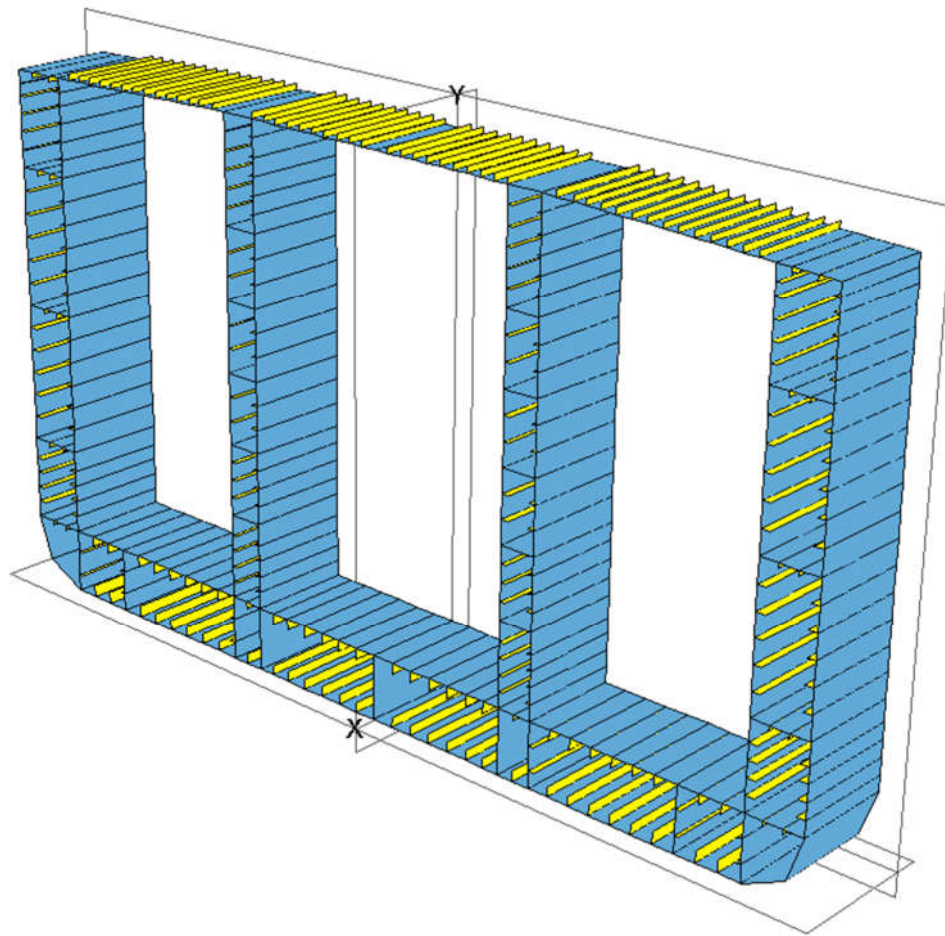
**Tablica 2. Glavni podaci o brodu**



Slika 7. Nacrt glavnog rebra modeliranog broda

#### 4.1. Analiza neoštećenog modela

Prema nacrtu glavnog rebra u Maestro Modeleru izrađen je model neoštećenog trupa u kojem svi konstrukcijski elementi doprinose uzdužnoj graničnoj čvrstoći što je sukladno pravilima. Izrađena je polovica modela koja je zbog simetrije naredbom „mirror“ preslikana oko centralne linije.



**Slika 8. Model glavnog rebra neoštećenog presjeka u Maestru**

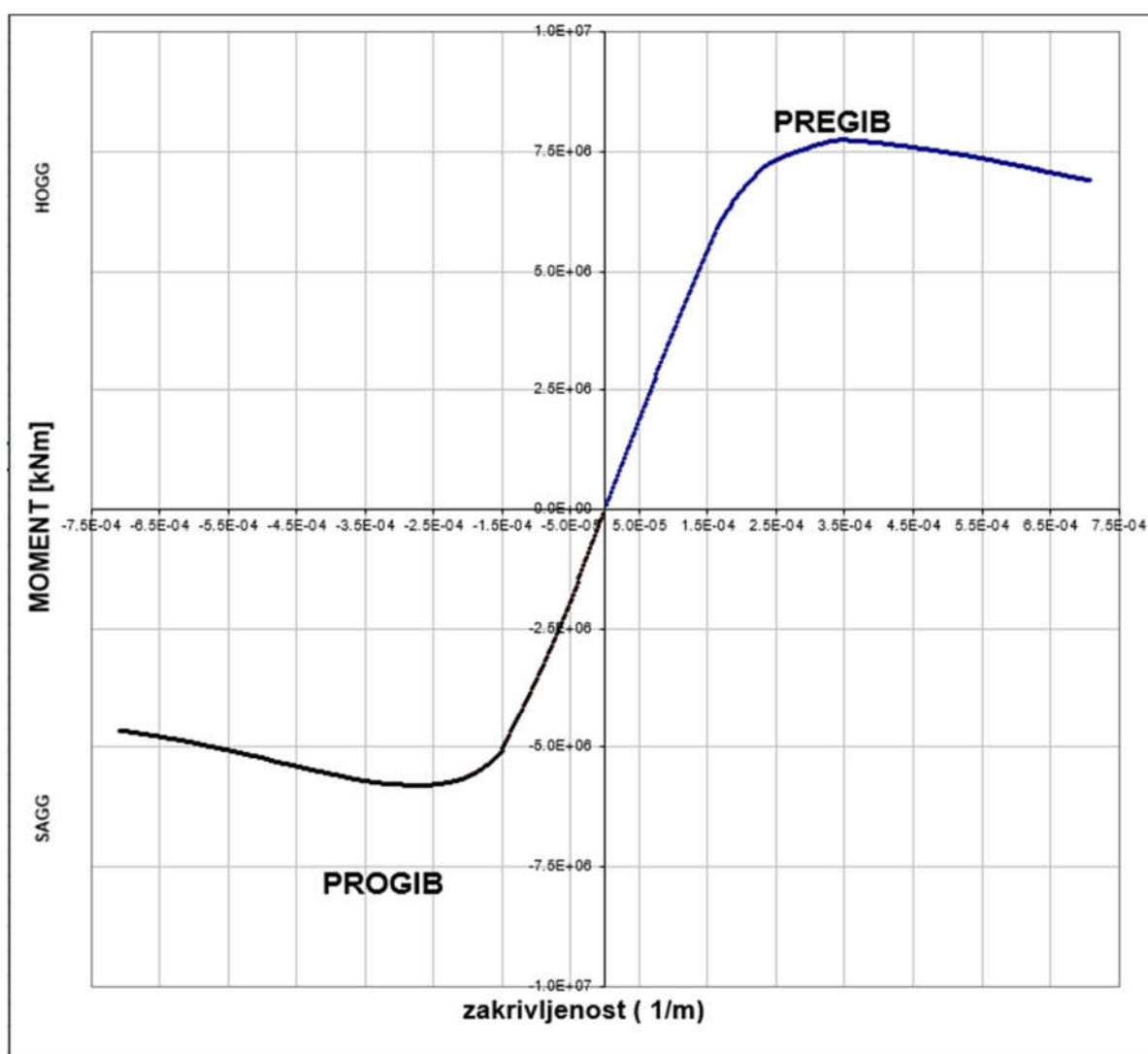
#### **4.1.1. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca**

Granični moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa prikazan je za dva slučaja opterećenja, a to su pregib i progib. U slučaju pregiba na palubi se javljaju vlačna naprezanja, dok u dnu tlačna. U slučaju progiba naprezanja mijenjaju predznak u odnosu na pregib.

Kolapsna sekvenca daje uvid u ponašanje cijelog presjeka, ali i svakog elementa tog presjeka. Tako je na krivuljama  $M-\kappa$  označena vrijednost graničnog momenta kao ekstrema krivulje te vrijednosti momenata koji su doveli do kolapsa pojedinih strukturnih dijelova. Navedeno je također prikazano tablicom 3. koja daje podatke o rednom broju ciklusa kod kojeg su pojedini elementi kolabirali, pri kojem iznosu naprezanja te načinu kolapsa. Numeracija koja odgovara opisu vrste kolapsa u tablicama:

1. Tlačni elasto-plastični kolaps
2. Vlačni elastoplastični kolaps
3. Globalno gredno-štapno izvijanje
4. Torzijsko izvijanje
5. Lokalno izvijanje struka ukrepe s pojasom
6. Lokalno izvijanje struka ukrepe bez pojasa
7. Izvijanje oplata

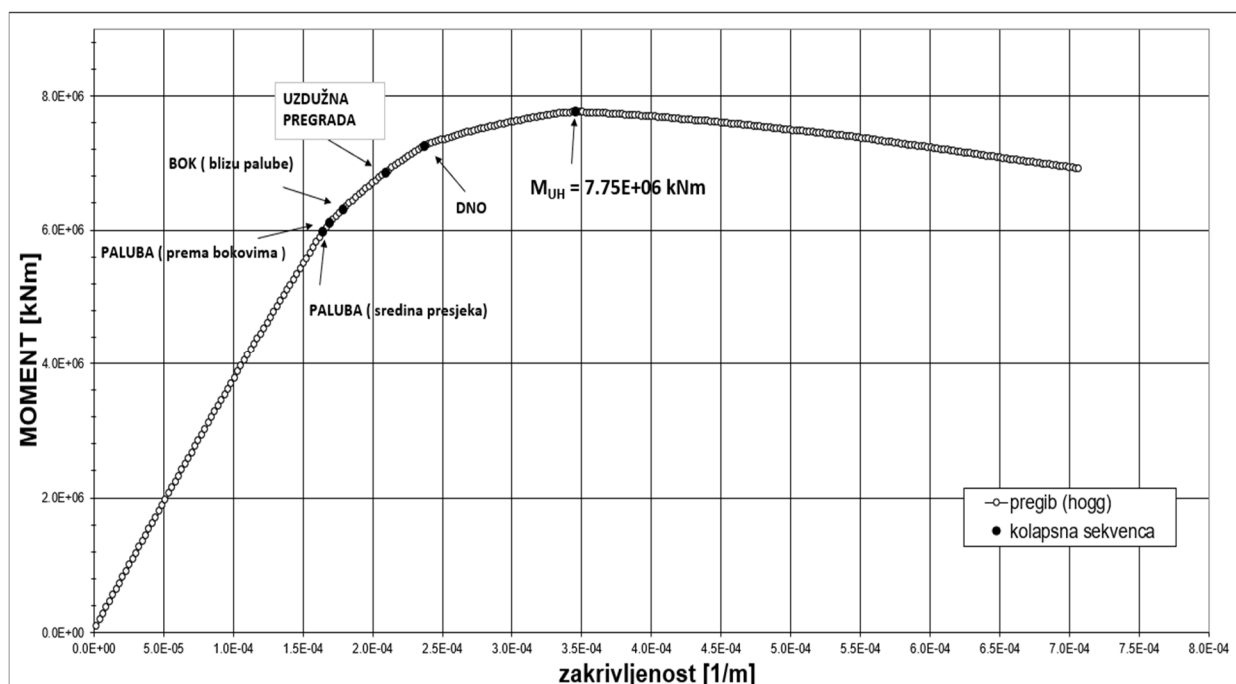
Slikom 9. prikazan je rezultat provedbe inkrementalno-iterativne metode, a to je krivulja  $M-\kappa$ .



Slika 9. Moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa za neoštećen presjek

#### 4.1.1.1. Pregib

Proračunom dobivena krivulju prikazanu slikom 9. može se podijeliti prema dijelu gdje je moment savijanja pozitivan te dijelu gdje je negativan. Na slici 10. prikazano je područje djelovanja pozitivnog momenta u kojem je trup u stanju pregiba, označen je ekstrem funkcije koji predstavlja granični moment savijanja u stanju pregiba, označen je kolaps pojedinih strukturnih elemenata te su tablično prikazane vrijednosti naprezanja, zakrivljenosti, vrste kolapsa i ciklus kod kojih je došlo do takvog kolapsa za karakteristične elemente.



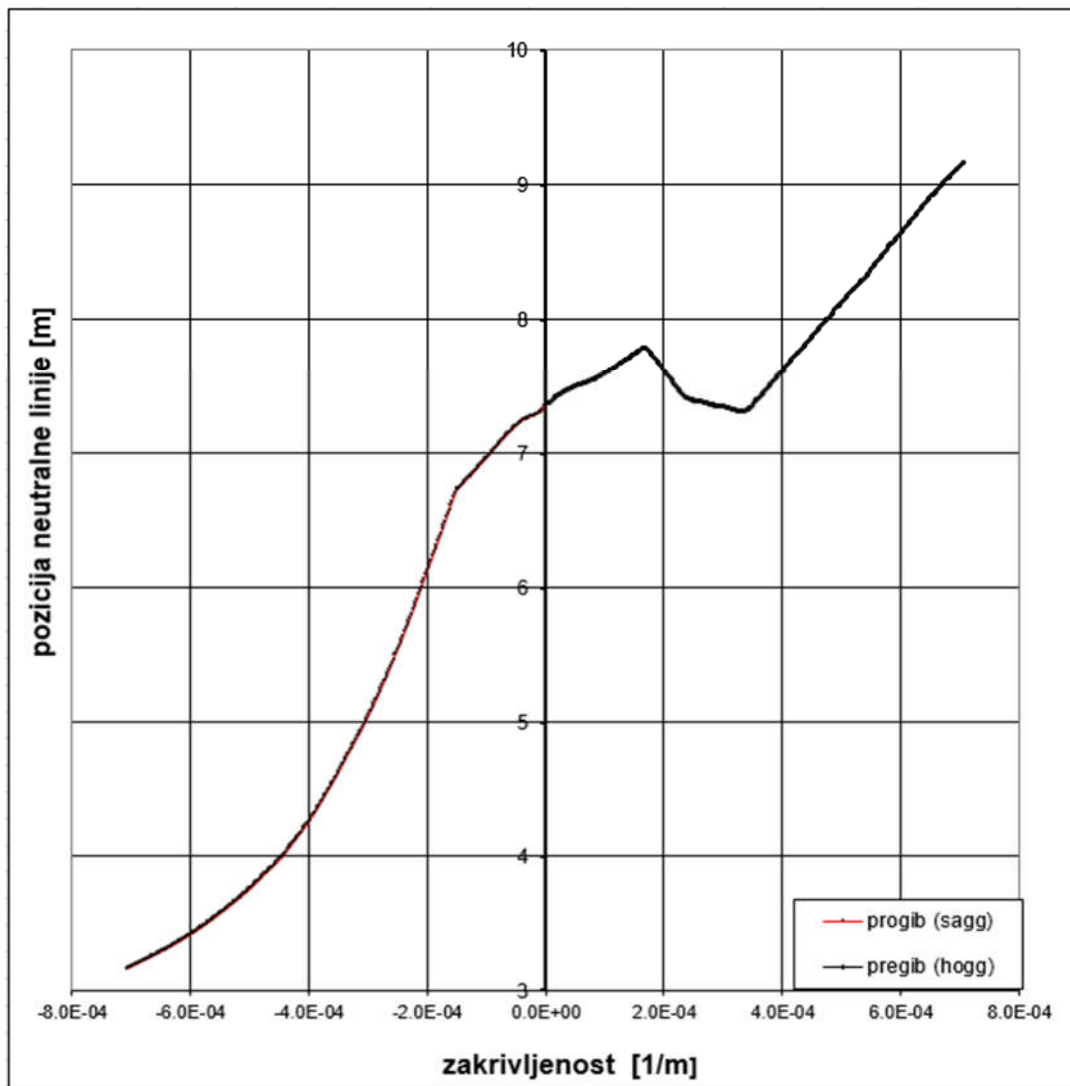
Slika 10. Kolapsna sekvenca za neoštećeni presjek u stanju pregiba

element	StrakeNo	ElementNo	StressCOLLAPSE [N/mm <sup>2</sup> ]	Collapse Mode	CycleCOLLAPSE	CurvatureHULL [1/m]	MomentHULL [kNm]
elementi palube (sredina presjeka)	72	441	355	2	70	1.65E-04	5.96E+06
elementi palube ( prema bokovima)	48	418	355	2	72	1.70E-04	6.09E+06
elementi boka (blizu palube)	235	559	355	2	76	1.79E-04	6.29E+06
elementi uzdužne pregrade (blizu palube)	135	490	355	2	89	2.10E-04	6.84E+06
elemeni dna	1	382	-293.52	4	101	2.38E-04	7.24E+06
granični moment						3.47E-04	7.75E+06

Tablica 3. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju pregiba neoštećenog presjeka

Vrijednost graničnog momenta u slučaju pregiba za neoštećeni trup je  $7,75 \cdot 10^6$  kNm. Paluba neoštećenog trupa kolabirala je uslijed popuštanja pri 77% graničnog momenta.

Nakon toga počeo je kolaps boka te uzdužne pregrade te na kraju dna. S obzirom da je neutralna linija presjeka smještena zbog topologije presjeka prema dnu, očekivano je paluba prva kolabirala. Pozicija neutralne linije u ovisnosti o zakrivljenosti prikazana je slikom 11. na kojoj je vidljivo kako se neutralna linija kretala po visini presjeka tijekom provedbe metode odnosno prilikom povećavanja zakrivljenosti.

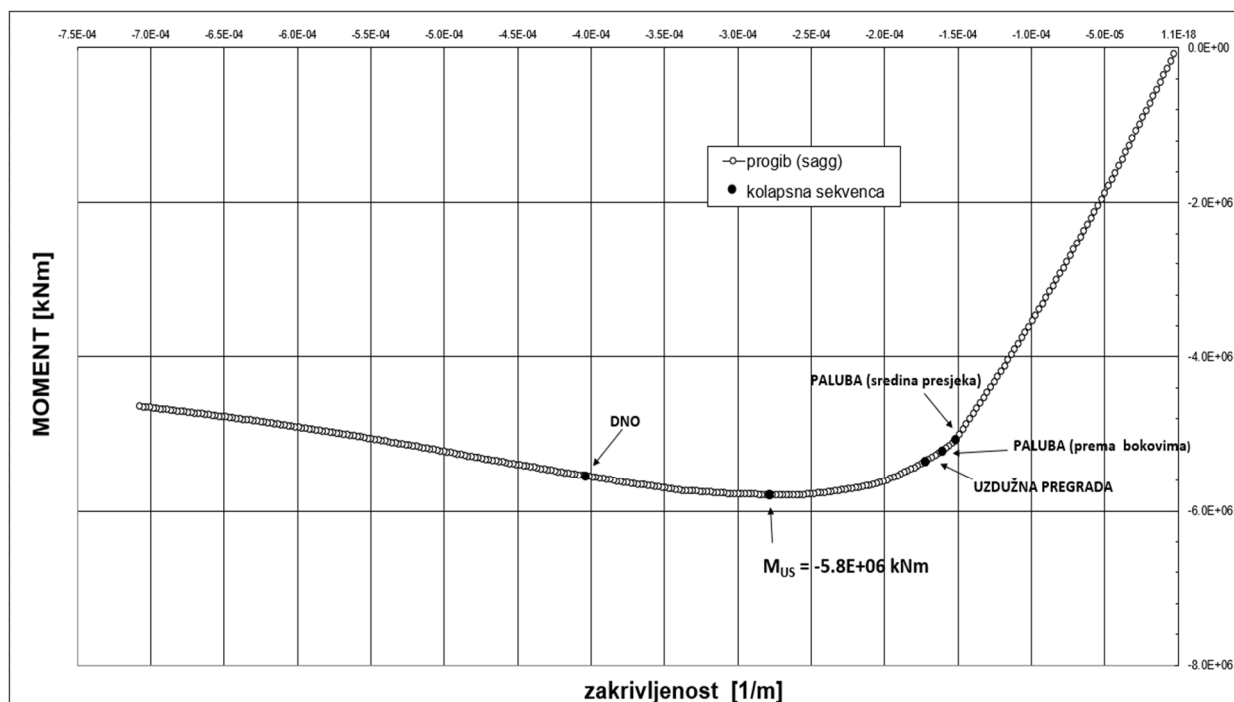


**Slika 11. Pozicija neutralne linije u ovisnosti o zakrivljenosti za pregib i progib neoštećenog presjeka**



#### 4.1.1.2. Progib

Drugi dio krivulje  $M-\kappa$  prikazane slikom 9. u kojemu su vrijednosti momenta savijanja negativne te presjek u stanju progiba prikazan je slikom 12. Označen je ekstrem funkcije koji predstavlja granični moment savijanja u stanju progiba, kolaps pojedinih strukturnih elemenata te su tablično prikazane vrijednosti naprezanja, zakrivljenosti, vrste kolapsa i ciklus kod kojih je došlo do takvog kolapsa za karakteristične elemente.



Slika 12. Kolapsna sekvenca za neoštećeni presjek u stanju progiba

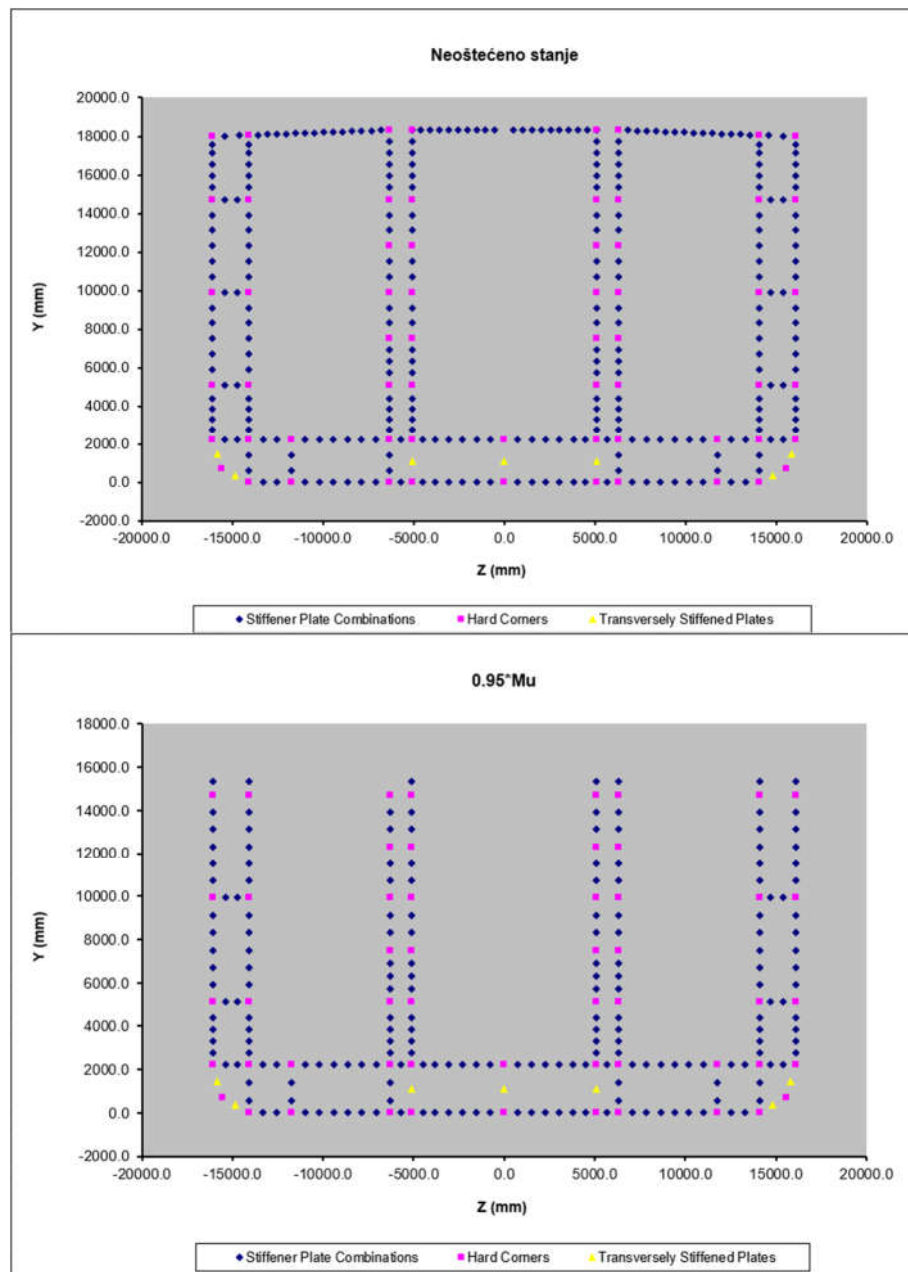
element	StrakeNo	ElementNo	StressCOLLAPSE [N/mm <sup>2</sup> ]	Collapse Mode	CycleCOLLAPSE	CurvatureHULL [1/m]	MomentHULL [kNm]
elementi palube (sredina presjeka)	72	441	-256.72	3	64	-1.51E-04	-5.08E+06
elementi palube ( prema bokovima)	43	415	-300.06	3	68	-1.60E-04	-5.23E+06
elementi uzdužne pregrade (blizu palube)	136	491	-190.39	3	73	-1.72E-04	-5.37E+06
elementi boka (blizu palube)	41	413	-262.12	3	73	-1.72E-04	-5.37E+06
elemeni dna	193	526	355	2	171	-4.03E-04	-5.55E+06
elementi boka (niže)	296	611	-262.16	3	118	-2.78E-04	-5.80E+06
granični moment						-2.78E-04	-5.80E+06

Tablica 4. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju progiba neoštećenog presjeka

Vrijednost graničnog momenta u slučaju progiba za neoštećeni trup je  $-5,8 \cdot 10^6$  kNm. Vidljivo je da su elementi palube gdje je udaljenost od neutralne linije najveća prvi doživjeli kolaps pri 87% graničnog momenta, a kolaps je izazvan izvijanjem.

Naknadno su izvijeni elementi uzdužne pregrade, potom je došlo do izvijanja elemenata boka u blizini palube te na koncu popuštanja dna. Za primjer te vizualizaciju kolapsa slikom 13. prikazana je usporedba neopterećenog presjeka te presjeka pri 95% graničnog momenta.

Na slici je također vidljiva diskretizacija elemenata presjeka koja je obrađena poglavljem 2.2.



Slika 13. Usporedba nekolabiranog i kolabiranog presjeka pri 0,95 Mu

#### 4.1.2. Proračun uzdužne čvrstoće prema zahtjevima IACS

Vertikalni granični moment savijanja trupa u neoštećenom stanju mora zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_r} \quad (4.2)$$

pri čemu je  $M_U$  određen u točkama 4.1.1.1. za pregib te 4.1.1.2. za progib korištenjem inkrementalno iterativne metode programom LUSA, a vrijednosti su prikazane kao maksimalna vrijednost krivulje na slici 10. (pregib) te slici 12. (progib). Vrijednost  $M$  računa se prema jednadžbi 3.3. uz odgovarajuće parcijalne faktore sigurnosti. Rezultati proračuna prikazani su tablično.

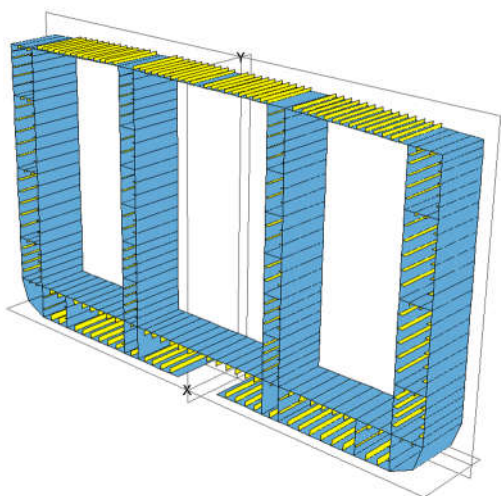
	$M_{wv}$ [kNm]	$M_{sw-u}$ [kNm]	$M$ [kNm]	$M_U$ [kNm]	$M_U/\gamma_r$	$M \leq (M_U/\gamma_r)$
PROGIB	-1.58E+06	-3.43E+06	-5.49E+06	-5.80E+06	-5.27E+06	ne zadovoljava
PREGIB	1.47E+06	9.82E+05	2.65E+06	7.75E+06	6.40E+06	zadovoljava

**Tablica 5. Proračun uzdužne čvrstoće neoštećenog trupa sukladno IACS**

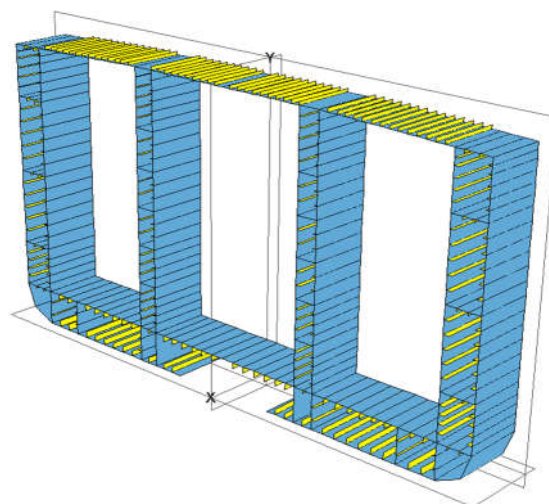
Iz tablice 5. vidljivo je da konstrukcija ne zadovoljava zahtjev Pravila u stanju progiba.

#### 4.2. Analiza oštećenog modela uslijed nasukavanja

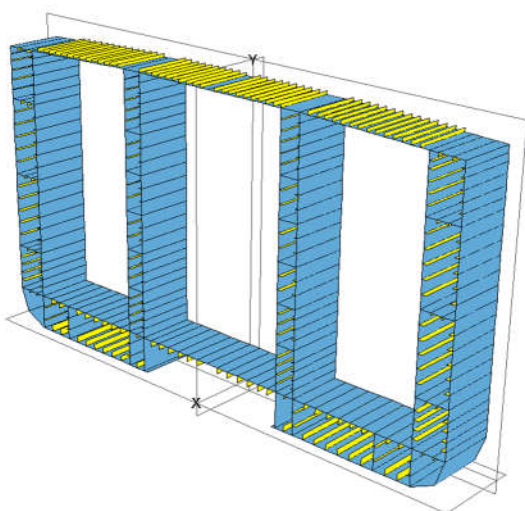
Modeli su izrađeni korištenjem programa MAESTRO [4] te je veličina oštećenja počevši od 0,1B sistemski varirana sa korakom 0,1B do 0,8B. Važno je napomenuti da su oštećenja simetrična s obzirom na centralnu liniju što je prikazano slikom 14.



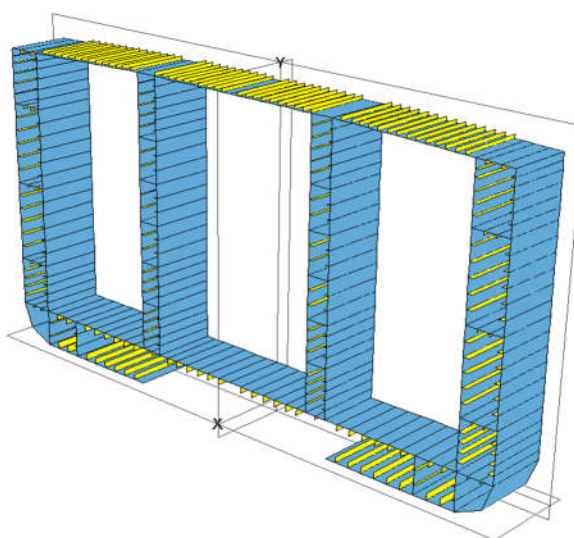
a) 0,1B



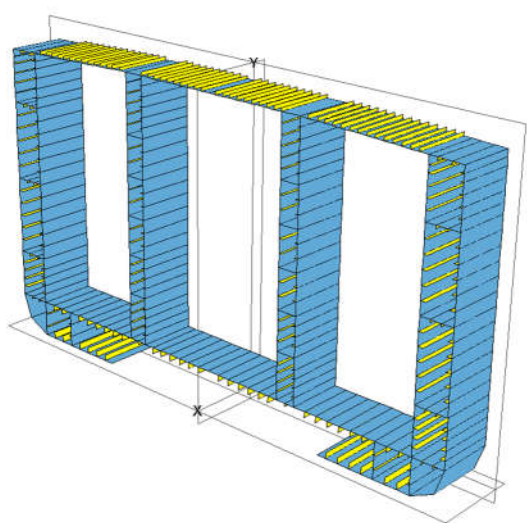
b) 0,2B



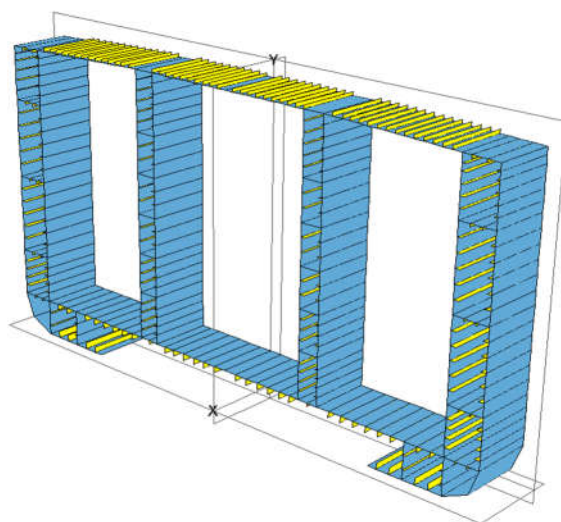
c) 0,3B



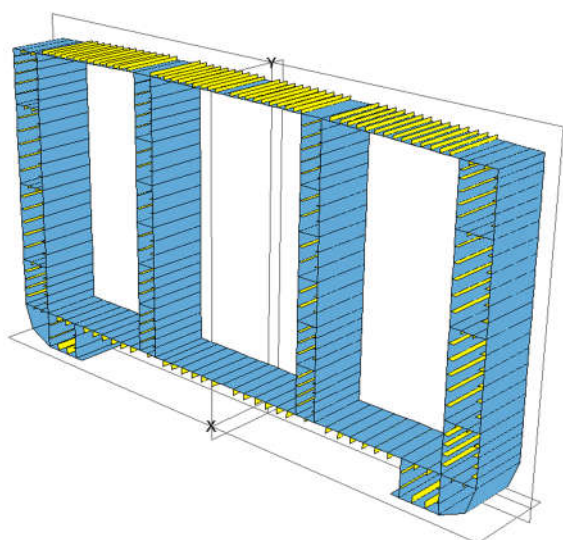
d) 0,4B



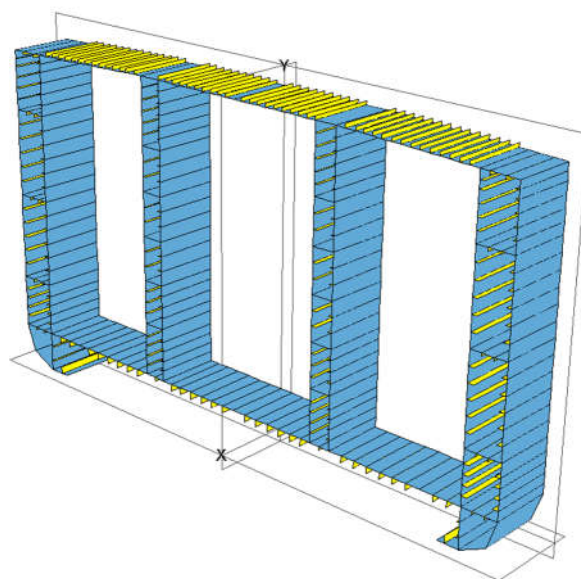
e) 0,5B



f) 0,6B



g) 0,7B



h) 0,8B

**Slika 14. Modeli oštećenog dna uslijed nasukavanja**

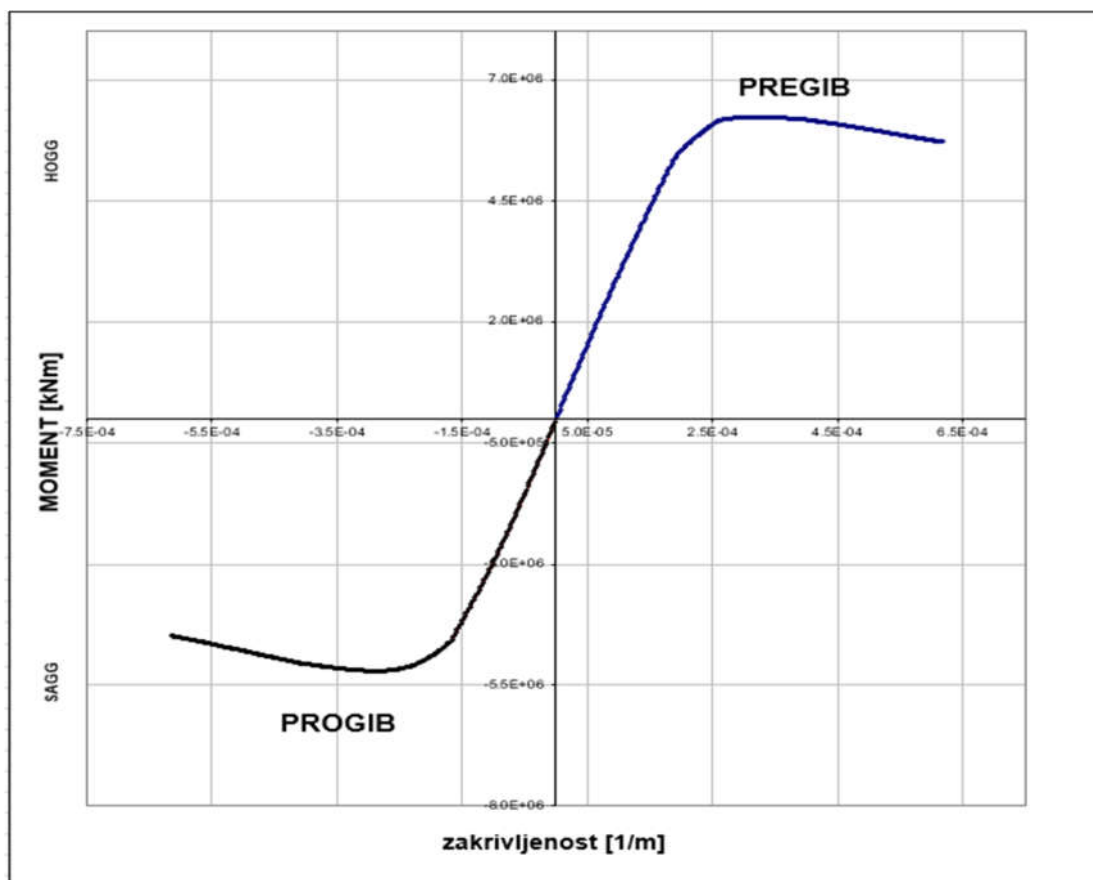
Tablično je prikazana veličina oštećenja sa konkretnim vrijednostima u odnosu na zadani brod. U tablici 6. vidljive su i veličine oštećenja koje odgovaraju zadanom trupu broda.

Tip	Širina oštećenja	Veličina oštećenja [mm]
a)	0,1B	3220
b)	0,2B	6440
c)	0,3B	9660
d)	0,4B	12880
e)	0,5B	16100
f)	0,6B	19320
g)	0,7B	22540
h)	0,8B	25760

Tablica 6. Veličine oštećenja dna

#### 4.2.1. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenc

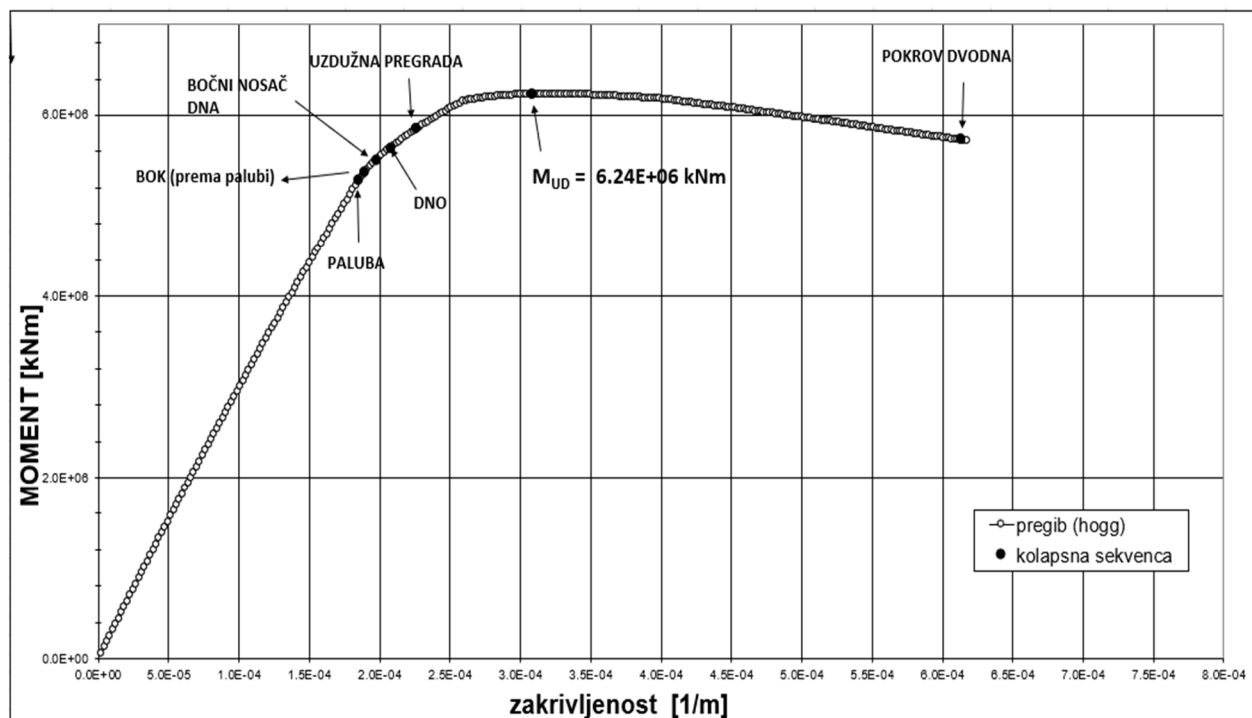
Sukladno zahtjevima IACS H-CSR [2] Pravila veličina oštećenja za koju je potrebno analizirati granični moment iznosi 0,6B odnosno 60% širine trupa pa je ovdje prikazan proračun takvog modela. Proračunski model prikazan je slikom 14. pod f).



Slika 15. Moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa oštećenog pri nasukavanju

#### 4.2.1.1. Pregib

Na slici 16. prikazan je dijagram ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti te kolapsna sekvenca za oštećenje dna u iznosu  $0,6B$  za stanje pregiba. Tablica 7. prikazana niže daje uvid na koji način i pri kojim vrijednostima opterećenja su kolabirali karakteristični elementi strukture.



Slika 16. Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed nasukavanja u stanju pregiba

element	StrakeNo	ElementNo	StressCOLLAPSE [N/mm <sup>2</sup> ]	Collapse Mode	CycleCOLLAPSE	CurvatureHULL [1/m]	MomentHULL [kNm]
elementi palube		257	355	2	90	1.85E-04	5.28E+06
elementi boka (prema palubi)		242	355	2	92	1.89E-04	5.37E+06
element bočnog nosača dna		15	-262.74	4	96	1.97E-04	5.51E+06
elemeni dna		196	-151	3	101	2.08E-04	5.64E+06
elementi pokrova dna		30	-279.7	4	298	6.13E-04	5.73E+06
element uzdužne pregrade		170	-134.1	3	110	2.26E-04	5.85E+06
granični moment						3.09E-04	6.24E+06

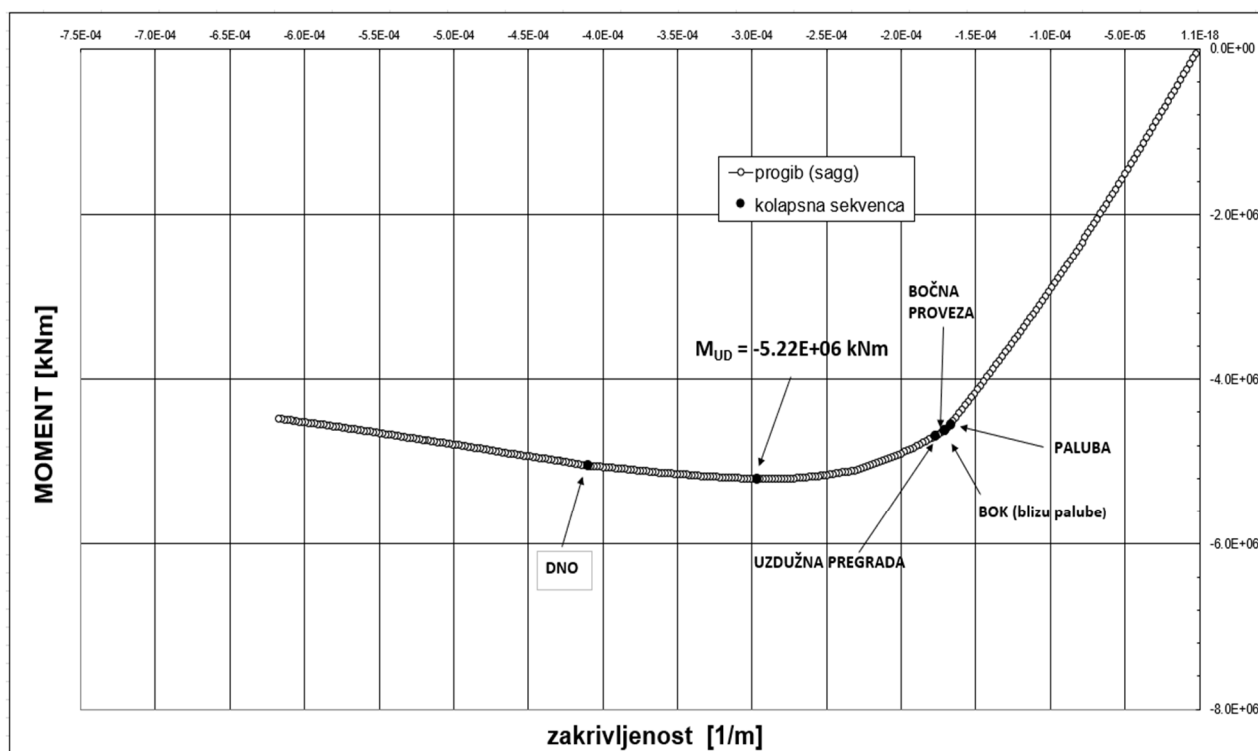
Tablica 7. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju pregiba za oštećeni presjek uslijed nasukavanja

Vrijednost graničnog momenta u slučaju pregiba za oštećeni trup veličine oštećenja  $0,6B$  je  $6,24 \cdot 10^6$  kNm. Vidljivo je da su elementi palube uslijed vlačnih naprezanja popustili najprije, pri 85% vrijednosti graničnog momenta savijanja. Na isti način dogodio se kolaps elemenata

boka uz palubu, dok su elementi dna i pokrova uslijed tlačnog opterećenja kolabirali izvijanjem. Na kraju dolazi i do popuštanja uzdužne pregrade.

#### 4.2.1.2. Progib

Na slici 17. prikazan je dijagram ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti te kolapsna sekvenca za oštećenje dna u iznosu  $0,6B$  za stanje progiba. Tablica 8. prikazana niže daje uvid na koji način i pri kojim vrijednostima opterećenja su kolabirali karakteristični elementi strukture.



Slika 17. Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed nasukavanja u stanju progiba

element	StrakeNo	ElementNo	StressCOLLAPSE [N/mm <sup>2</sup> ]	Collapse	CycleCOLLAPSE	CurvatureHULL [1/m]	MomentHULL [kNm]
elementi palube	264	549	-256.89	3	81	-1.67E-04	-4.56E+06
elementi boka (blizu palube)	237	524	-238.33	3	83	-1.71E-04	-4.63E+06
element bočne proveze	237	524	-238.33	3	83	-1.71E-04	-4.63E+06
element uzdužne pregrade	114	440	-285.73	4	86	-1.77E-04	-4.70E+06
elementi dna	167	352	355	2	199	-4.09E-04	-5.06E+06
granični moment						-2.96E-04	-5.22E+06

Tablica 8. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju progiba za oštećeni presjek uslijed nasukavanja



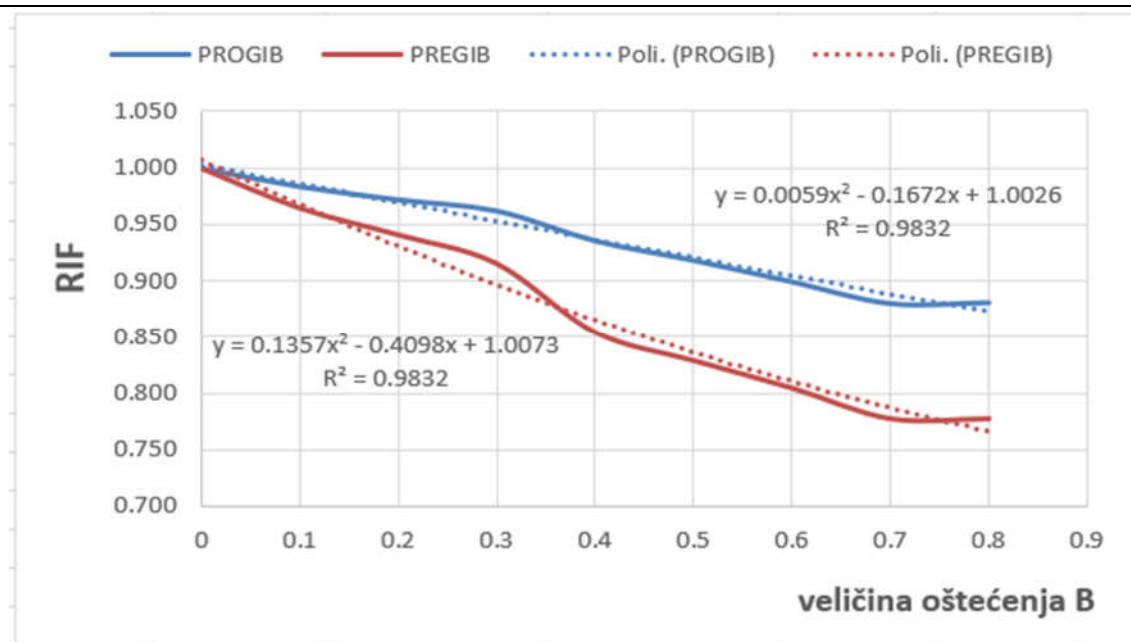
Vrijednost graničnog momenta u slučaju progiba za oštećeni trup veličine oštećenja 0,6B je  $-5,22 \cdot 10^6$  kNm. Vidljivo je da elementi palube prvi doživljavaju kolaps pri 87% vrijednosti graničnog momenta savijanja. Potom do kolapsa dolazi na elementima boka i bočne proveze. Pri vrijednosti 90% graničnog momenta dolazi do izvijanja uzdužne pregrade, dok elementi dna kolabiraju pri 97% graničnog momenta.

#### 4.2.2. Indeks preostale čvrstoće

Odnos vrijednosti graničnog momenta u oštećenom stanju i graničnog momenta u neoštećenom stanju naziva se indeks preostale čvrstoće (RIF eng. *Residual strenght index*), a dan je izrazom (4.1). Tablično su prikazane vrijednosti indeksa za sistemski varirane veličine oštećenja u rasponu od 0,1B do 0,8B te je krivuljom na slici 18. prikazano na koji način i kojom brzinom granični moment opada s povećanjem oštećenja. Također, uspostavljena je analitička veza između veličine oštećenja dna i graničnog momenta savijanja trupa.

Veličina oštećenja B	$M_{UD-S}$ [kNm]	$M_{UD-H}$ [kNm]	RIF <sub>sagg</sub>	RIF <sub>hogg</sub>
0	-5,80E+06	7,75E+06	1,000	1,000
0,1B	-5,71E+06	7,48E+06	0,984	0,965
0,2B	-5,64E+06	7,29E+06	0,972	0,941
0,3B	-5,58E+06	7,09E+06	0,962	0,916
0,4B	-5,43E+06	6,62E+06	0,936	0,855
0,5B	-5,33E+06	6,43E+06	0,919	0,829
0,6B	-5,22E+06	6,24E+06	0,900	0,805
0,7B	-5,11E+06	6,03E+06	0,880	0,778
0,8B	-5,11E+06	6,03E+06	0,881	0,778

**Tablica 9. Vrijednosti momenata u progibu i pregibu te indeksa granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenja dna**



Slika 18. Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenja

#### 4.2.3. Proračun uzdužne čvrstoće prema zahtjevima IACS

Proračun je opisan detaljnije u poglavlju 3.2.1. Vertikalni granični moment savijanja trupa u oštećenom stanju mora zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$M \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} C_{NA}} \quad (4.3)$$

pri čemu je  $M_{UD}$  određen u točkama 4.2.1. za pregib te 4.2.2. za progib korištenjem inkrementalno-iterativne metode programom LUSA, a vrijednosti su prikazane kao maksimalna vrijednost krivulje na slici 16. (pregib) te slici 17. (progib). Vrijednost  $M$  računa se prema jednadžbi 3.10 uz odgovarajuće parcijalne faktore sigurnosti. Rezultati proračuna prikazani su tablično.

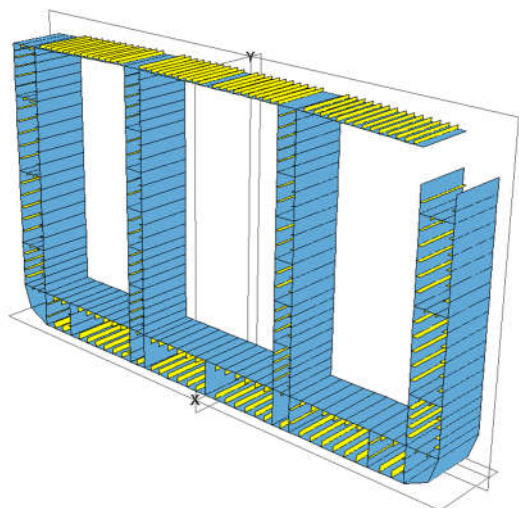
	$M_{wv}$ [kNm]	$M_{sw-D}$ [kNm]	$M$ [kNm]	$M_U$ [kNm]	$M_U / \gamma_{RD} * C_{NA}$	$M \leq (M_U / \gamma_{RD} * C_{NA})$
PROGIB	-1.58E+06	-3.43E+06	-4.83E+06	-5.22E+06	-5.22E+06	zadovoljava
PREGIB	1.47E+06	9.82E+05	2.07E+06	6.24E+06	6.24E+06	zadovoljava

Tablica 10. Proračun uzdužne čvrstoće oštećenog trupa sukladno IACS

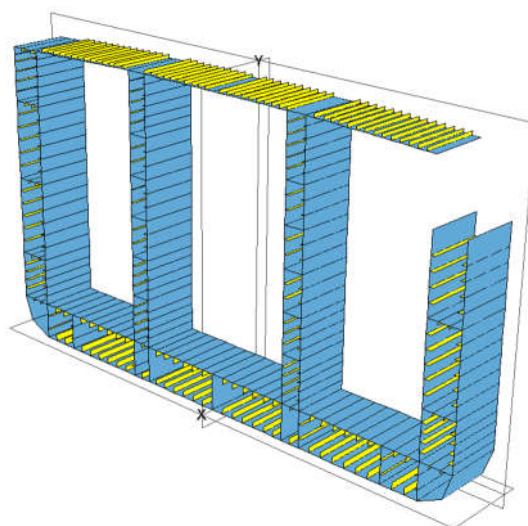
Iz tablice 10. vidljivo je da konstrukcija zadovoljava zahtjev pravila u slučaju progiba te u slučaju pregiba.

### 4.3. Analiza oštećenog modela uslijed sudara

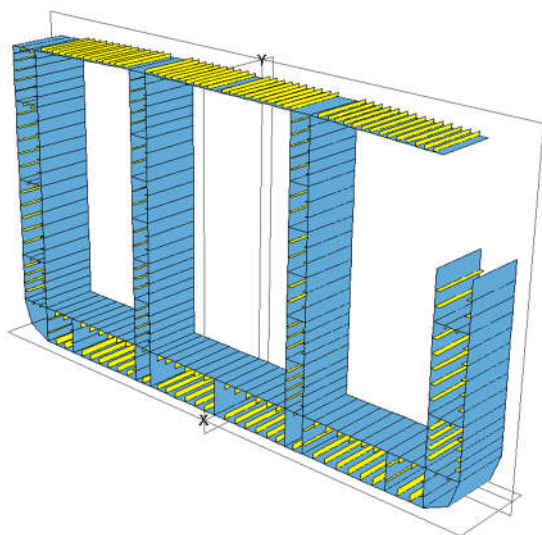
Modeli su izrađeni korištenjem programa MAESTRO [4] te je veličina oštećenja počevši od 0,1D sistemski varirana sa korakom 0,1D do 0.8D. Važno je napomenuti da su oštećenja smještena na jednom boku neposredno uz palubu što je prikazano slikom 19.



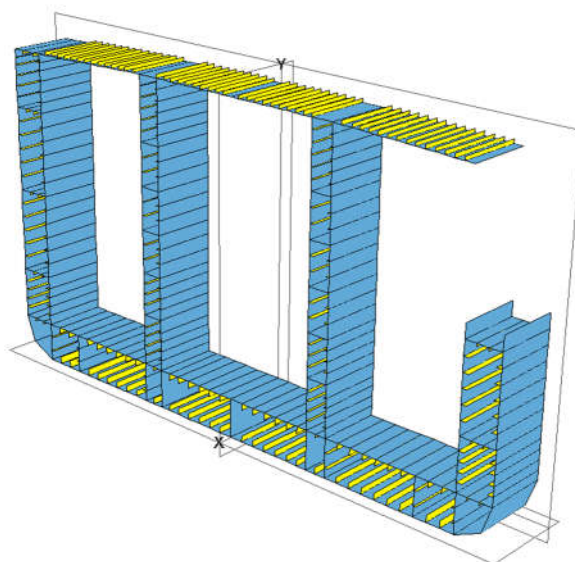
a) 0,1D



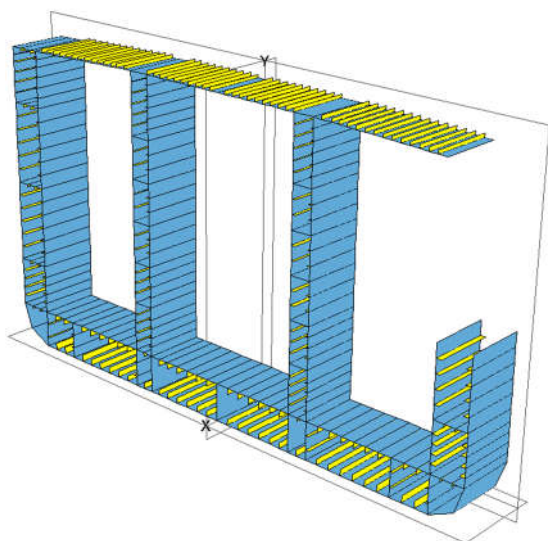
b) 0,2D



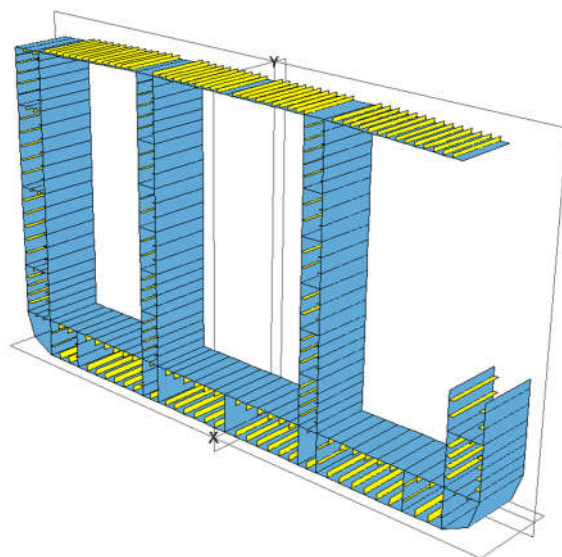
c) 0,3D



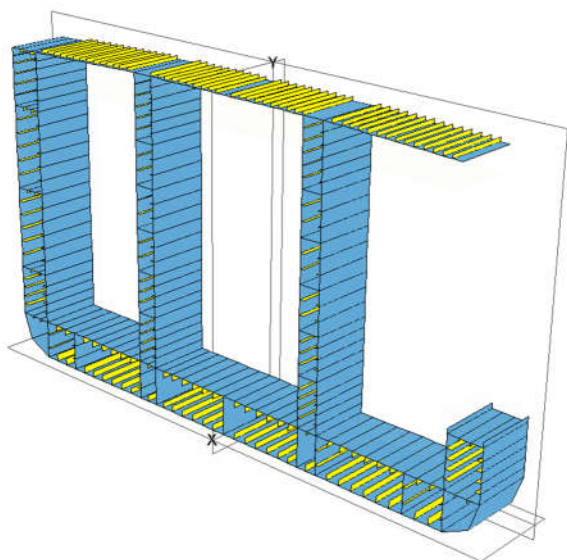
d) 0,4D



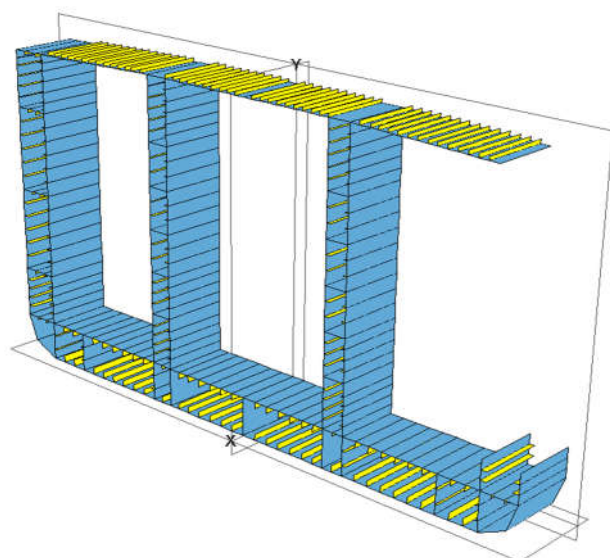
e) 0,5D



f) 0,6D



g) 0,7D



h) 0,8D

**Slika 19. Modeli oštećenog dna uslijed nasukavanja**

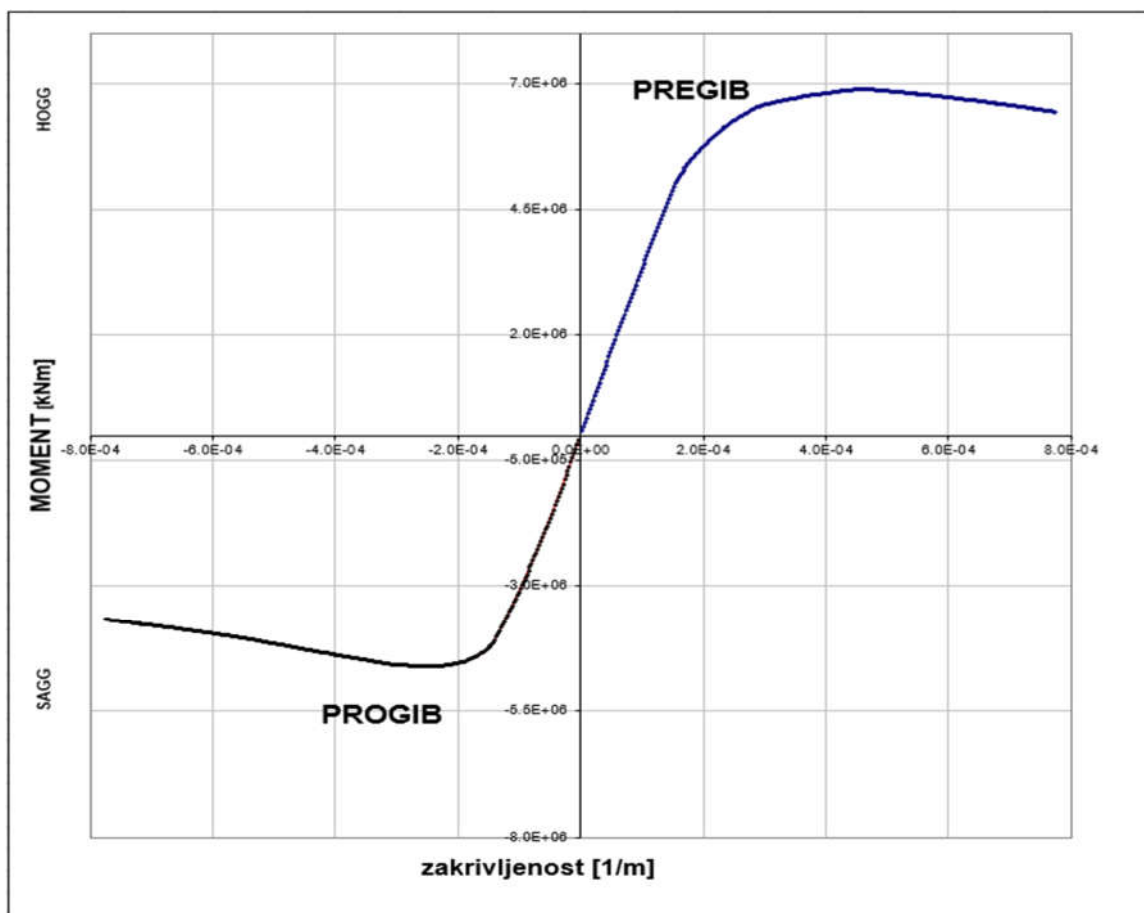
Tablicom 11. prikazana je veličina oštećenja sa konkretnim vrijednostima u odnosu na zadani brod.

Tip	Širina oštećenja	Vrijednost oštećenja [mm]
a)	0,1D	1798
b)	0,2D	3596
c)	0,3D	5394
d)	0,4D	7192
e)	0,5D	8990
f)	0,6D	10788
g)	0,7D	12586
h)	0,8D	14384

Tablica 11. Veličine oštećenja

#### 4.3.1. Granični moment savijanja i kolapsna sekvenca

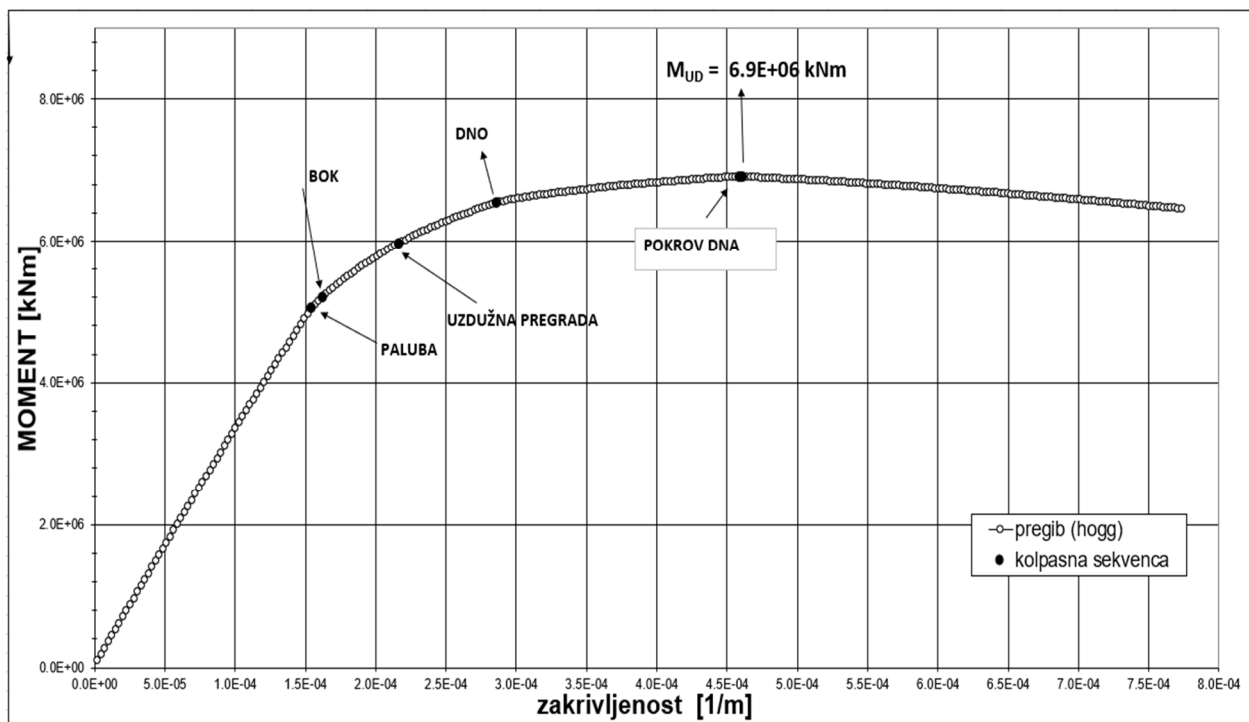
Sukladno zahtjevima IACS H-CSR [2] Pravila veličina oštećenja za koju je potrebno analizirati granični moment iznosi 0,6D odnosno 60% visine trupa pa je ovdje prikazan proračun takvog modela. Proračunski model prikazan je slikom 19. pod f).



Slika 20. Moment savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa oštećenog uslijed bočnog sudara

### 4.3.1.1. Pregib

Na slici 21. prikazan je dijagram ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti te kolapsna sekvenca za oštećenje boka u iznosu  $0,6D$  za stanje pregiba. Tablica 12. prikazana niže daje uvid na koji način i pri kojim vrijednostima opterećenja su kolabirali karakteristični elementi strukture.



Slika 21. Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara u stanju pregiba

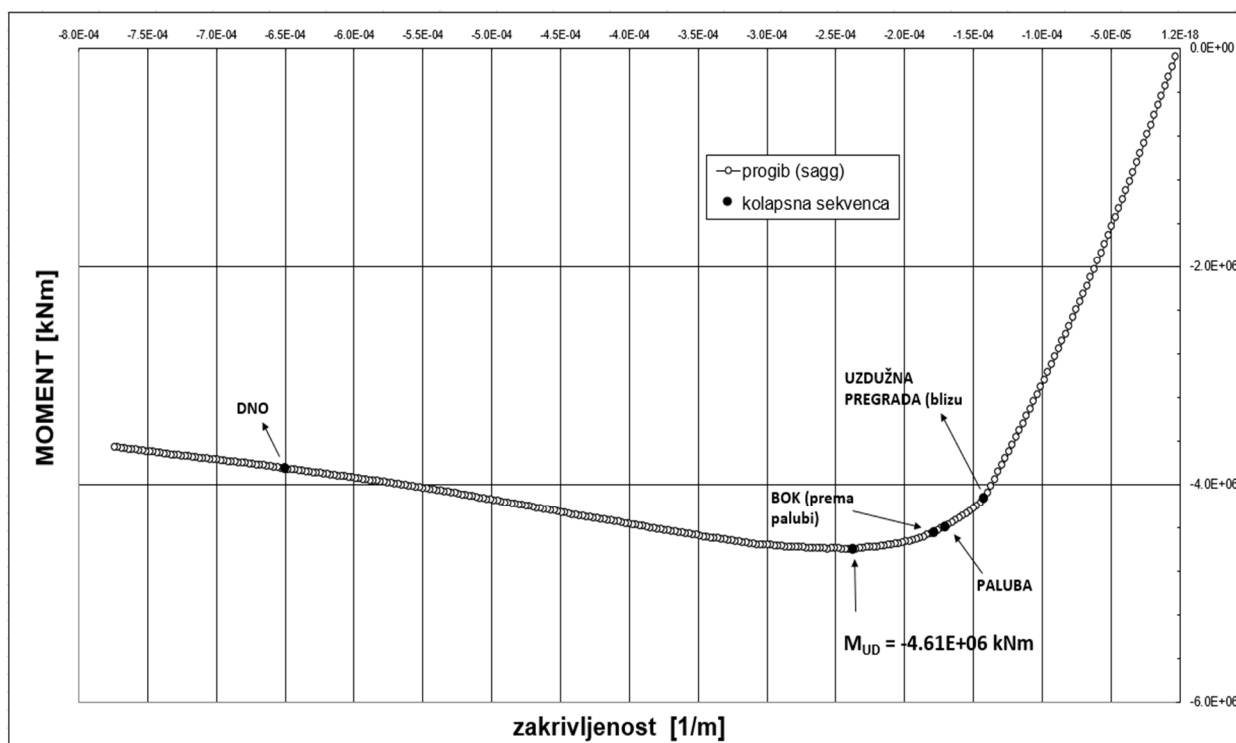
element	StrakeNo	ElementNo	StressCOLLAPSE [N/mm <sup>2</sup> ]	Collapse Mode	CycleCOLLAPSE	CurvatureHULL	MomentHULL	
elementi palube		59	390	355	2	60	1.55E-04	5.04E+06
elementi boka		219	506	-36.881	4	63	1.63E-04	5.19E+06
element uzdužne pregrade		184	485	355	2	84	2.17E-04	5.96E+06
elemeni dna		10	350	-284.44	4	111	2.86E-04	6.53E+06
elementi pokrova dna		75	404	-293.46	4	178	4.59E-04	6.90E+06
granični moment							4.62E-04	6.90E+06

Tablica 12. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju pregiba za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara

Vrijednost graničnog momenta u slučaju pregiba za oštećeni trup veličine oštećenja  $0,6D$  je  $6,9 \cdot 10^6$  kNm. Vidljivo je da prvi kolabiraju elementi palube uslijed popuštanja pri 73% vrijednosti graničnog momenta savijanja. Pri nešto većem momentu uslijed izvijanja došlo je do kolapsa boka, potom popuštanja uzdužne pregrade da bi na koncu elementi dna i pokrova doživjeli kolaps pri vrijednostima bliskim graničnom momentu savijanja.

### 4.3.1.2. Progib

Na slici 22. prikazan je dijagram ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti te kolapsna sekvenca za oštećenje boka u iznosu 0,6D za stanje progiba. Tablica 13. prikazana niže daje uvid na koji način i pri kojim vrijednostima opterećenja su kolabirali karakteristični elementi strukture.



Slika 22. Kolapsna sekvenca za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara u stanju progiba

element	StrakeNo	ElementNo	StressCOLLAPSE [N/mm <sup>2</sup> ]	Collapse Mode	CycleCOLLAPSE	CurvatureHULL	MomentHULL
elementi dna	15	355	355	2	252	-6.50E-04	-3.86E+06
uzdužna pregrada (blizu palube)	56	386	-257.99	3	55	-1.42E-04	-4.14E+06
elementi palube	111	433	-268.51	3	66	-1.70E-04	-4.40E+06
elementi boka (prema palubi)	39	372	-263.27	3	69	-1.78E-04	-4.45E+06
granični moment						-2.37E-04	-4.61E+06

Tablica 13. Kolaps pojedinih strukturnih elemenata u slučaju progiba za oštećeni presjek uslijed bočnog sudara

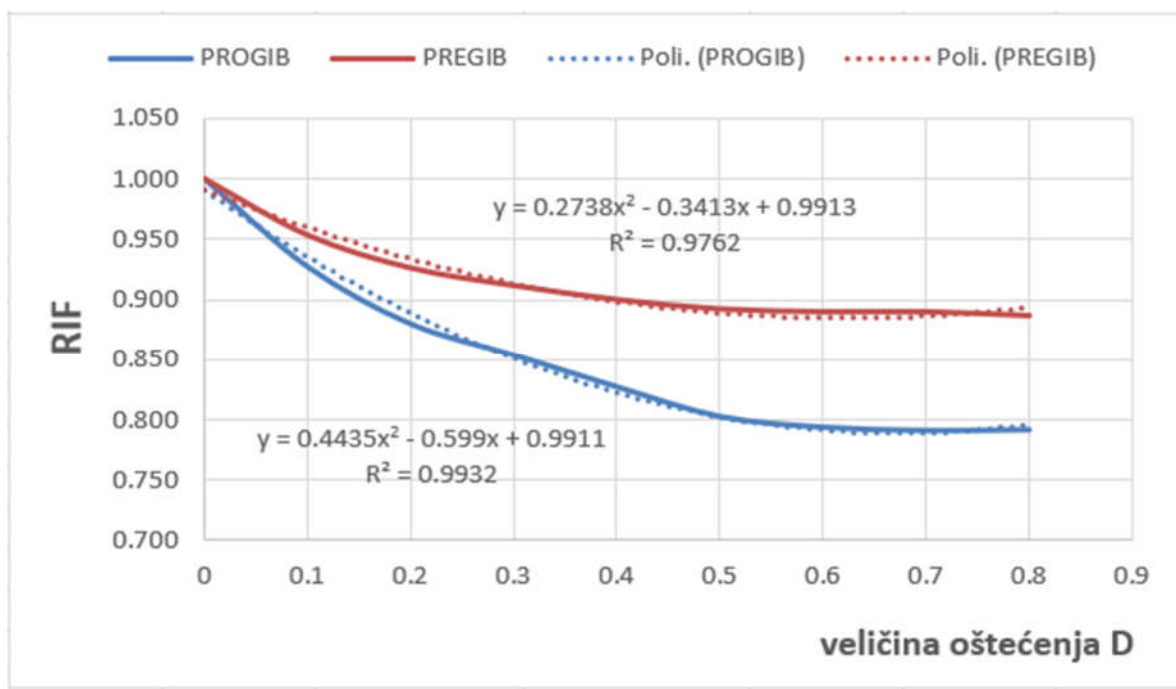
Vrijednost graničnog momenta u slučaju progiba za oštećeni trup veličine oštećenja 0,6D je  $-4,61 \cdot 10^6$  kNm. Pri najnižoj vrijednosti zakrivljenosti na kojem počinje kolaps elemenata nalaze se elementi uzdužne pregrade nedaleko od palube što odgovara 90% vrijednosti graničnog momenta savijanja. Povećanjem zakrivljenosti trupa kolabiraju elementi palube i boka pri izvijanju, dok će elementi dna kolaps doživjeti pri većim vrijednostima zakrivljenosti trupa.

### 4.3.2. Indeks preostale čvrstoće

Tablično su prikazane vrijednosti indeksa granične čvrstoće (RIF) za sistemski varirane veličine oštećenja u rasponu od 0,1D do 0,8D te je krivuljom na slici 23. prikazano na koji način i kojom brzinom granični moment opada s povećanjem oštećenja. Također, uspostavljena je analitička veza između veličine oštećenja boka i graničnog momenta savijanja trupa.

Veličina oštećenja	$M_{UD-S}$ [kNm]	$M_{UD-H}$ [kNm]	RIF <sub>sagg</sub>	RIF <sub>hogg</sub>
0	-5,80E+06	7,75E+06	1,000	1,000
0.1D	-5,38E+06	7,39E+06	0,927	0,954
0.2D	-5,11E+06	7,18E+06	0,880	0,926
0.3D	-4,95E+06	7,06E+06	0,854	0,912
0.4D	-4,80E+06	6,97E+06	0,827	0,900
0.5D	-4,66E+06	6,91E+06	0,803	0,893
0.6D	-4,61E+06	6,90E+06	0,794	0,890
0.7D	-4,59E+06	6,90E+06	0,791	0,890
0.8D	-4,59E+06	6,87E+06	0,792	0,887

Tablica 14. Vrijednosti momenata u progibu i pregibu te indeksa granične čvrstoće u ovisnosti o veličini oštećenja boka



Slika 23. Indeks granične čvrstoće u ovisnosti o veličini boka



### 4.3.3. Proračun uzdužne čvrstoće prema zahtjevima IACS

Proračun je opisan detaljnije u poglavlju 3.2.1. Vertikalni granični moment savijanja trupa u oštećenom stanju mora zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$M \leq \frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} C_{NA}} \quad (4.4)$$

pri čemu je  $M_{UD}$  određen u točkama 4.2.1. za pregib te 4.2.2. za progib korištenjem inkrementalno iterativne metode programom LUSA, a vrijednosti su prikazane kao maksimalna vrijednost krivulje na slici 21. (pregib) te slici 22. (progib). Vrijednost  $M$  računa se prema jednadžbi 3.10 uz odgovarajuće parcijalne faktore sigurnosti. Rezultati proračuna prikazani su tablično.

	$M_{ww}$ [kNm]	$M_{sw-D}$ [kNm]	$M$ [kNm]	$M_U$ [kNm]	$M_U / \gamma_{RD} * C_{NA}$	$M \leq (M_U / \gamma_{RD} * C_{NA})$
PROGIB	-1.58E+06	-3.43E+06	-4.83E+06	-4.61E+06	-4.19E+06	ne zadovoljava
PREGIB	1.47E+06	9.82E+05	2.07E+06	6.90E+06	6.27E+06	zadovoljava

**Tablica 15. Proračun uzdužne čvrstoće oštećenog trupa sukladno IACS**

Iz tablice 15. vidljivo je da analizirana konstrukcija u stanju progiba ne zadovoljava zahtjev IACS H-CSR Pravila u stanju progiba, dok je u stanju pregiba taj zahtjev zadovoljen.

## 5. ZAKLJUČAK

Brodski trup je u službi izložen mnogim vrstama opterećenja. Glavni problem i zadatak projektanta je obuhvatiti sva predvidiva i nepredvidiva opterećenja čiji su uzrok prirodne pojave s kojima se brod susreće te projektirati takvu konstrukciju koja će biti u stanju odoliti tim opterećenjima kako bi bila očuvana sigurnost broda, ljudi te tereta. Primarni zahtjev je uzdužna granična čvrstoća u neoštećenom stanju. Nadalje, kako su brodovi izloženi nasukavanju te sudaru zahtjev IACS Pravila proširen je i na ispunjavanje zahtjeva uzdužne granične čvrstoće u oštećenom stanju. Veličine oštećenja za koje je potrebno napraviti proračun uzdužne granične čvrstoće Pravilima su propisane kao 60% dijela na kojem je nastupilo oštećenje. To znači da se za nasukavanje proračun vrši za 60% širine broda, a za slučaj sudara 60% visine broda. U ovome je radu osim neoštećenog presjeka glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija i naftnih derivata, napravljeno i glavno rebro sa navedenim oštećenjima koja su sistemski varirana od 10% oštećenja do 80% sa korakom 10%. Modeli su izrađeni u MAESTRO programu, a za proračun granične čvrstoće korišten je program LUSA koji koristi inkrementalno-iterativnu metodu proračuna. Kao rezultat proračuna prikazani su dijagrami momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa. Ova metoda proračuna zbog diskretizacije strukturnih elemenata omogućuje promatranje svakog elementa zasebno pa je tako za karakteristične elemente na krivuljama  $M-\kappa$  označen kolaps tih elemenata. Iz takve analize dobiva se uvid koji elementi, na koji način te pri kojem momentu prvi kolabiraju čime projektant može utjecati na neka projektna rješenja. Iz rezultata se zaključuje da većinom prvi kolabiraju elementi palube te dna, što se slaže sa Euler-Bernoullijevom teorijom grede jer su upravo ti elementi, zbog topologije presjeka, najudaljeniji od neutralne linije što ih čini najopterećenijima. Za sve trupove brodova, one u oštećenom i neoštećenom stanju, granični moment savijanja veći je u stanju pregiba nego u stanju progiba. Time se zaključuje da je progibni slučaj kritičniji za sigurnost broda od pregibnog. Uzrok tome je što je paluba u takvom stanju opterećenja tlačno pa dolazi do izvijanja iste. Prikazani su i rezultati analize indeksa preostale čvrstoće (RIF) u ovisnosti o veličini oštećenja trupa. Iz rezultata je vidljivo da prosječan pad graničnog momenta savijanja sa povećanjem veličine oštećenja za korak od 10% iznosi približno 2%. Takav trend vrijedi kako za pregib tako i progib. Uspostavljena je i analitička veza između veličine oštećenja i graničnog momenta savijanja. Stoga, zbog iznimne važnosti uzdužne čvrstoće, zaključuje se kako je potrebno i dalje otkrivati i razvijati metode proračuna kako bi što jasnije odredili opterećenja i ostvarili primarni cilj-sigurnost broda, ljudi i tereta.

## LITERATURA

- [1] Kitarović, S.: Analiza uzdužne granične nosivosti u konceptualnoj sintezi tankostijenih konstrukcija, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] IACS: Harmonized Common Structural Rules for Bulk Carriers and Double Bottom Tankers, International Association of Classification Societies, London, UK, 2013.
- [3] Žiha, K., Parunov, J., Tušek, B., Granična čvrstoća broskog trupa, Brodogradnja 58 (1), pp 29-41, 2007.
- [4] MAESTRO Software Documentation, DRS-C3 Advanced Technology Center, Stevensville, 2007.
- [5] Žiha, K., Nastavni materijali za predavanja iz konstrukcije broda II., Uzdužna čvrstoća broda,  
<https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/main/trgovbrod/11uzduznacvrstoca.pdf>

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc