

Modeliranje pramca u analizi sudara brodova

Blažeka, Tin

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:912799>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tin Blažeka

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan, dipl. ing.

Student:

Tin Blažeka

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru, prijateljima i obitelji na pružanoj potpori tijekom cijelog studija pa tako i na kraju.

Također, zahvaljujem se čitavoj ulici Vrapčanska draga na podršci u zadnjim trenucima studija.

Tin Blažeka



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



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tin Blažeka**

JMBAG: 0035211635

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje pramca u analizi sudara brodova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Bow structure modelling in ship collision analysis**

Opis zadatka:

Sudari brodova rijetki su događaji, ali takvi koji mogu imati katastrofalne posljedice: gubitak ljudskih života, oštećenje brodske konstrukcije i onečišćenje okoliša. Zbog praktičnih razloga eksperimentalna istraživanja sudara brodova vrlo su rijetka te se umjesto toga provode numerička istraživanja. Važan dio analize jest pažljivo modeliranje brodske konstrukcije, odnosno izrada adekvatne mreže konačnih elemenata, te postavljanje parametara proračuna korištenjem nelinearne metode konačnih elemenata.

U prvom dijelu diplomskog zadatka treba pregledati dostupnu literaturu i upoznati se s problemom sudara brodova, s naglaskom na strukturnu analizu takvih događaja. Posebno treba razmotriti inovativna rješenja pramčane konstrukcije broda koja mogu umanjiti posljedice sudara te literaturu koja razmatra čvrstoću pramca prilikom sudara brodova ili sudara broda s nekom drugom pomorskom konstrukcijom.

Zatim, na osnovi dostupnih nacrtā, potrebno je modelirati pramac brodske konstrukcije na način prikladan za analizu sudara brodova. Potrebno je odabrati veličinu i vrstu konačnih elemenata, karakteristike materijala, proučiti i razumjeti kontrolne parametre proračuna te odabrati početne i rubne uvjete. Numeričke proračune obaviti korištenjem softverskog paketa LS-Dyna. Proračun treba pojednostaviti zanemarivanjem utjecaja okolne vode.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Smiljko Rudan

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SUDARI I NASUKAVANJA	3
2.1. Kroz povijest.....	3
2.1.1. „Titanic“, 15.travnja.1912 [7]	3
2.1.2. „Exxon Valdez“ 23.ožujka.1989 [8].....	3
2.1.3. „Andrea Doria“ i „Stockholm“ 25.srpnja.1956. [9]	4
2.2. Vanjska dinamika i unutarnja mehanika sudara	5
2.2.1. Vanjska dinamika sudara	5
2.2.1.1. Petersenov model sudara dva broda [3]	5
2.2.1.2. Zhangov model sudara	6
2.2.2. Unutarnja mehanika sudara	7
3. NELINEARNA METODA KONAČNIH ELEMENATA	9
3.1. Uvod u nelinearnu metodu konačnih elemenata.....	9
3.1.1. Jednostruka i dvostruka preciznost rješavača nelinearnog problema	10
3.2. Materijal i stvarna krivulja naprezanja-istezanja	12
3.3. Kriterij popuštanja.....	15
3.3.1. „DNV RP-C204“ kriterij [23]	15
3.3.2. „Germanischer Lloyd“ kriterij [23]	15
3.3.3. Kriterij baziran na Peschmannu [23]	16
3.4. Dodatna masa okolne vode.....	16
3.5. Hourglass energy	17
4. MODELIRANJE PRAMCA, DEFINIRANJE SCENARIJA I PRIPREMA ANALIZE ..	18
4.1. 3D modeliranje pramca	18
4.1.1. Geometrija broda	18
4.1.2. „Front Century“	20
4.1.3. Model pramca	21
4.2. Izrada mreže konačnih elemenata	22
4.3. Debljine strukturnih elemenata	24
4.4. Priprema scenarija sudara.....	26
4.4.1. Rubni uvjeti	26
4.4.2. Materijal	28
4.4.3. Definiranje kontakta.....	28
4.4.4. Izlazne datoteke	29
4.4.4.1. Standardna LS-DYNA izlazna datoteka (d3plot datoteka)	29
4.4.5. Način prikaza rezultata.....	30
5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA	31
5.1. Scenarij 1 – odabir preciznosti rješavača	31

5.2. Scenarij 2 – Fina, srednje gruba i gruba mreža	34
5.2.1. Fina mreža	34
5.2.2. Srednja mreža	35
5.2.3. Srednje gruba mreža	36
5.2.4. Gruba mreža	37
5.2.5. Analiza rezultata za scenarij 2	38
5.3. Scenarij 3 – Sudar pramca pod kutem od 90°	39
5.3.1. Puno stanje krcanja	39
5.3.2. Balastno stanje krcanja.....	41
5.4. Scenarij 4 – Sudar pramca pod kutem od 60°	43
5.4.1. Stanje punog krcanja.....	43
5.4.2. Balastno stanje krcanja.....	45
5.5. Scenarij 5 – Frontalni sudar dva pramca	48
6. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Sudar brodova Gas Roman i Springok u blizini obale Singapura koji se dogodio 2003. godine.....	1
Slika 2.1	Petersenov model sudara dva broda (1982).....	5
Slika 2.2	Zhangov model sudara brodova	6
Slika 3.1	Primjer modela dvodna broda modeliranog konačnim elementima	9
Slika 3.2	Usporedba rezultata simulacije i eksperimentalnih ispitivanja korugiranog panela u koji se sudario cilindar.....	10
Slika 3.3	Dijagram naprezanja-istezanje za čelik	12
Slika 3.4	Krivulja naprezanje-istezanje za plastično područje „MAT24“	13
Slika 3.5	Krivulja naprezanje-istezanje za meki čelik za četiri različite brzine istezanja	14
Slika 3.6	Hourglass energy efekt	17
Slika 4.1	Nacrt rebara modeliranog broda	18
Slika 4.2	Uzdužnice i vodne linije modeliranog broda.....	19
Slika 4.3	Brod „Front Century“	20
Slika 4.4	3D model konstrukcije pramca	21
Slika 4.5	3D model konstrukcije pramca sa oplatom	21
Slika 4.6	Primjer mreže konačnih elemenata sa različitim tipovima elemenata	22
Slika 4.7	Geometrijski model sa raskrojenim površinama prikazan u Femap-u.....	22
Slika 4.8	Generirani model srednje grube mreže konačnih elemenata	23
Slika 4.9	Debljine strukturnih elemenata (presjek na CL-u).....	24
Slika 4.10	Debljine strukturnih elemenata (presjek na 3000mm od CL-a).....	25
Slika 4.11	Detalj konstrukcije (pogled s krme)	25
Slika 4.12	Rubni uvjet krutog zida	26
Slika 4.13	Položaj masenih čvorova po dužini broda.....	27
Slika 5.1	Von Mises naprezanje deformiranog modela sa jednostrukom preciznošću.....	32
Slika 5.2	Von Mises naprezanje deformiranog modela sa dvostrukom preciznošću	32
Slika 5.3	Kinetička i apsorbirana energija u ovisnosti o vremenu za scenarij 1	33
Slika 5.4	Deformirani model fine mreže s prikazom Von Mises naprezanja.....	34
Slika 5.5	Deformirani model srednje mreže s prikazom Von Mises naprezanja	35
Slika 5.6	Deformirani model srednje grube mreže s prikazom Von Mises naprezanja	36
Slika 5.7	Deformirani model grube mreže s prikazom Von Mises naprezanja.....	37
Slika 5.8	Dijagram usporedbe energija za sve generirane mreže	38
Slika 5.9	Deformirani model 3. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka na presjeku CL	39
Slika 5.10	Deformirani model 3. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije.....	40
Slika 5.11	Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 3. scenarij i puno stanje krcanja	40
Slika 5.12	Deformirani model 3. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka na presjeku CL	41
Slika 5.13	Deformirani model 3. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije.....	42
Slika 5.14	Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 3. scenarij i balastno stanje krcanja.....	42
Slika 5.15	Kut sudara za scenarij 4.....	43
Slika 5.16	Deformirani model 4. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije.....	44
Slika 5.17	Deformirani model 4. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka.....	44
Slika 5.18	Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 4. scenarij i puno stanje krcanja	45

Slika 5.19	Deformirani model 4. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije.....	46
Slika 5.20	Deformirani model 4. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka.....	46
Slika 5.21	Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 4. scenarij i balastno stanje krcanja.	47
Slika 5.22	Deformirani model 5. scenarija s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka	48
Slika 5.23	Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 5. scenarij.....	49

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Koeficijenti dodatne mase	16
Tablica 4.1 Značajke korištenog materijala	28
Tablica 4.2 Vrste rezultata koji su sadržani u datoteci d3plot	29
Tablica 5.1 Parametri korišteni za scenarij 1	31
Tablica 5.2 Parametri korišteni u scenariju 2 za finu mrežu.....	34
Tablica 5.3 Parametri korišteni u scenariju 2 za srednju mrežu	35
Tablica 5.4 Parametri korišteni u scenariju 2 za srednje grubu mrežu	36
Tablica 5.5 Parametri korišteni u scenariju 2 za grubu mrežu	37
Tablica 5.6 Parametri korišteni u scenariju 3 za puno stanje krcanja.....	39
Tablica 5.7 Parametri korišteni u scenariju 3 za balastno stanje krcanja	41
Tablica 5.8 Parametri korišteni u scenariju 4 za puno stanje krcanja.....	43
Tablica 5.9 Parametri korišteni u scenariju 4 za balastno stanje krcanja	45
Tablica 5.10 Parametri korišteni u scenariju 5.....	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v_{ax}	m/s	Brzina broda A u smjeru X osi
v_{ay}	m/s	Brzina broda A u smjeru Y osi
t	s	Vrijeme
α	°	Kut između osi X i osi η
β	°	Kut između osi X i osi 1
M_a	kg	Masa broda A
M_b	kg	Masa broda B
m_{ax}		Koeficijent dodatne mase za posrtanje broda A
m_{ay}		Koeficijent dodatne mase za zanošenje broda A
j_a		Koeficijent dodatne mase za zaošijanje broda A
ω_a	rad/s	Kutna brzina broda A
v_{b1}	m/s	Brzina broda B u smjeru X osi
v_{b2}	m/s	Brzina broda B u smjeru Y osi
m_{bx}		Koeficijent dodatne mase za posrtanje broda B
m_{by}		Koeficijent dodatne mase za zanošenje broda B
j_b		Koeficijent dodatne mase za zaošijanje broda B
ω_b	rad/s	Kutna brzina broda B
R_a	m	Radijus inercije broda A
R_b	m	Radijus inercije broda B
F_η	N	Komponenta sile u smjeru η
F_ξ	N	Komponenta sile u smjeru ξ
x_c	m	X koordinata točke sudara
y_c	m	Y koordinata točke sudara
x_a	m	X koordinata centra težišta broda A
x_b	m	X koordinata centra težišta broda B
y_b	m	Y koordinata centra težišta broda B
σ_{eq}^D	Mpa	Dinamičko naprezanje tečenja materijala
σ_{eq}	Mpa	Kvazistatičko ekvivalentno naprezanje tečenja materijala
C	s ⁻¹	Koeficijent brzine promjene naprezanja (Cowper-Symonds)
P		Koeficijent brzine promjene naprezanja (Cowper-Symonds)
ϵ_f		Koeficijent korekcije za popuštanje materijala
t_e	m	Debljina elementa
l_e	m	Duljina elementa
ϵ_g		Eksperimentalno dobiveni koeficijent za popuštanje materijala
ϵ_e		Eksperimentalno dobiveni koeficijent za izduženje
α		Koeficijent ovisan o deformaciji tijekom suženja materijala
$F_{sb\check{c}}$		Statički koeficijent trenja beton-čelik

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_{dbč}$		Dinamički koeficijent trenja beton-čelik
E	N/m ²	Youngov modul elastičnosti
ν		Poissonov omjer
ρ	Kg/m ³	Gustoća čelika
σ_{yield}	MPa	Granica razvlačenja
L_{pp}	m	Duljina između perpendikulara
L_{oa}	m	Duljina preko svega
B	m	Širina broda
$D_{scantling}$	m	Stvarni gaz
m_{full}	kg	Ukupna masa broda u punom stanju krcanja
m_{balast}	kg	Ukupna masa broda u balastnom stanju krcanja
α_s	°	Kut između simetrale broda i krutog zida

SAŽETAK

Sudari brodova rijetki su događaji, ali takvi koji mogu imati katastrofalne posljedice: gubitak ljudskih života, oštećenje brodske konstrukcije i onečišćenje okoliša. Zbog toga, tijekom konstruiranja brodske konstrukcije veoma je bitno obratiti pažnju na odziv konstrukcije uslijed takvog događaja. Zbog praktičnih razloga kao što su cijena i vrijeme, eksperimentalna istraživanja su rijetka te se umjesto njih provode numerička istraživanja. Također, kao dobar izvor podataka za konstruiranje novog broda s obzirom na odziv tijekom sudara, na raspolaganju stoje podatci o nesrećama koje su se već dogodile. Na početku ovog rada bit će spomenute neke od njih kako bi se stvorila općenita slika problematike. Cilj ovog rada je prikazati proces detaljnog modeliranja pramca broda za prijevoz sirove nafte, izrada adekvatne mreže konačnih elemenata te priprema nekoliko scenarija sudara takvog pramca s krutim zidom. Proračun sudara bit će proveden korištenjem nelinearne metode konačnih elemenata s naglaskom na analizu unutarnje mehanike sudara i strukturnu analizu konstrukcije. Priprema scenarija sudara uključuje prikaz postavljanja parametara proračuna kojima se pokušava što vjernije opisati stvarni događaj. Na kraju će biti analizirani i prikazani najbitniji podatci dobiveni proračunom. Proračun je proveden uz pomoć programskog paketa „LS-DYNA“.

Ključne riječi: sudar broda, strukturna analiza konstrukcije, nelinearna metoda konačnih elemenata, LS-DYNA, 3D model pramca broda, numeričko istraživanje

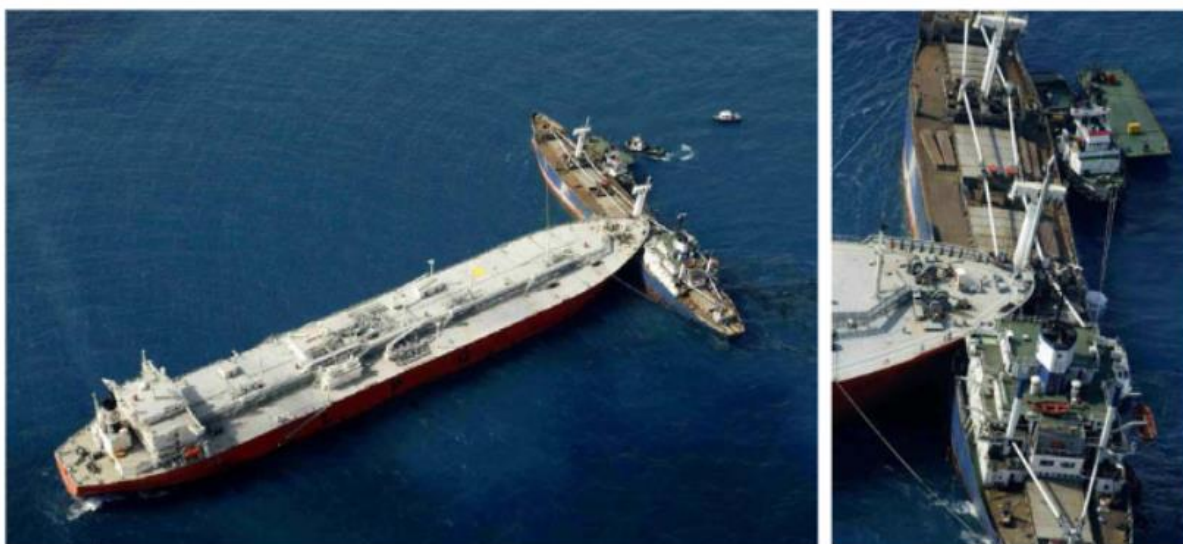
SUMMARY

Ship collisions are rare events, but they can have catastrophic consequences: loss of human lives, damage to the ship's structure, and environmental pollution. Therefore, during the design of a ship's structure, it is crucial to pay attention to its response in such an event. Due to practical reasons such as cost and time, experimental research is scarce, and numerical investigations are conducted instead. Additionally, data from accidents that have already occurred serve as valuable sources of data for designing a new ship, specifically regarding the structural response during a collision. Some of these accidents will be mentioned at the beginning of this paper to provide a general overview of the issue. The aim of this paper is to present the process of detailed modeling of the bow of a crude oil carrier ship, the creation of an appropriate finite element mesh, and the preparation of several collision scenarios involving striking bow and rigid wall. The calculation of collision will be performed using a nonlinear finite element method, focusing on the analysis of internal collision mechanics and structural analysis of the construction. The preparation of collision scenarios includes defining calculation parameters that aim to accurately describe the real event. Finally, the most important data obtained from the calculation will be analyzed and presented. The calculation was carried out using the software package "LS-DYNA."

Key words: ship collision, structural analysis of the construction, nonlinear finite element method, LS-DYNA, ship bow 3D model, numerical investigation

1. UVOD

Glavnu značajku suvremenoga svijeta čini globalizacija koje je temelj jeftin i masovan prijevoz sirovina i roba diljem svijeta. Oko 80% svjetske trgovine po obujmu i 70% po vrijednosti odvija se morem. [1] Sudari brodova događali su se oduvijek te će se, pogotovo uslijed velikog porasta u svjetskom pomorskom prometu, takvi događaji i nastaviti događati. Brodovi i morski objekti mogu biti izloženi raznim vrstama nesreća kao što su već navedeni sudari, a osim sudara i nasukavanja, požari i eksplozije. Sudar, prikazan na Slika 1.1., jedna je od najčešćih tipova nesreća u pomorskom prometu i može dovesti do ozbiljnih posljedica za brod, ljude pa tako i za okoliš [2].



Slika 1.1. Sudar brodova Gas Roman i Springok u blizini obale Singapura koji se dogodio 2003. godine [3]

Uzrok nesrećama je u većini slučajeva ljudska pogreška [3], ali uzrok može biti i kvar broda kao i teški vremenski uvjeti. Tankeri za prijevoz nafte čine oko 48% svjetske flote i to je pomorski segment u kojem se grade najveći brodovi [3]. Kod brodova koji prevoze opasne terete, uključujući sirovu naftu, pitanje curenja tereta izaziva ozbiljnu zabrinutost s aspekta javne sigurnosti [4]. Razvoj pomorskog prometa konstantno zahtjeva ažuriranje pravila kako bi se sigurnost ovakvih brodova dovela na najveću moguću razinu, te tako zaštitila ljudske živote, imovinu i okoliš.

Prema standardu temeljenom na ciljevima, „Global based standards“ (GBS-a) koji razvija Međunarodna pomorska organizacija (IMO), obvezno će biti zahtijevano da preostala uzdužna čvrstoća oštećenog trupa broda zadovoljava funkcionalne zahtjeve razine II. To implicira da će u skoroj budućnosti zajednička strukturna pravila, „Classification society rules“ (CSR), koja odgovaraju razini IV pružiti određene i kvantitativne smjernice i metodologije za predviđanje procjene preostale čvrstoće oštećenih brodova. Autori očekuju da će se u novim pravilima propisati izravan pristup poput nelinearne metode konačnih elemenata (FEA) ili alternativne procedure za procjenu preostale čvrstoće [5].

Sustav pet razina sastoji se od:

- Razine I – Ciljevi gradnje broda i njihove službe
- Razine II – Funkcionalni zahtjevi broda koji podupiru razinu I
- Razine III – Provjera sukladnosti
- Razine IV – Detaljni zahtjevi (zakoni i regulacije)
- Razine V – Industrijski standardi i ustanovljeni načini gradnje i konstruiranja

U ovom radu provest će se analiza odziva pramčane konstrukcije broda za prijevoz sirove nafte uslijed sudara nelinearnom metodom konačnih elemenata koja je trenutačno najpouzdanija proračunska metoda za procjenu oštećenja i odziv brodske konstrukcije. Iako je proces numeričkog modeliranja ovakvog problema dug i zahtjevan, te za sami proračun zahtjeva veliku količinu računalne snage, dobiveni rezultati su visoke točnosti. Za provjeru točnosti rezultata najbolje je usporediti ih sa eksperimentalnim modelom. Kada takvi rezultati nisu dostupni potrebno je primijeniti dodatnu analizu sa naglaskom na gustoću generirane mreže, parametrima koji definiraju materijal, vrstu odabranog elementa i pravilnost u geometriji generiranih elemenata [6]. U skorijoj budućnosti proces prikazan u ovom diplomskom radu biti će zahtjevan od strane klasifikacijskih društva pa je tako ovaj rad, iako pojednostavljen zanemarivanjem utjecaja okolne vode i modeliranjem samo dijela broda, u korak sa vremenom.

2. SUDARI I NASUKAVANJA

2.1. Kroz povijest

Glavni uzrok promjene pravila gradnje i konstruiranja brodova su nesreće koje su se dogodile u zadnjih 100 godina. Bitne informacije o sudarima i nasukavanjima dobivene su analizom olupina i rekonstrukcijom nesreće. Ovdje će ukratko biti prikazana 3 najznačajnija brodoloma i navedena pravila koja su promijenila sigurnost u pomorskom prometu.

2.1.1. „Titanic“, 15.travnja.1912 [7]

Početak gradnje Titanica kreće 31. svibnja 1911. godine. Brod isplovlja na svoje prvo putovanje iz Southamptona 10. travnja 1912. godine s 2.240 putnika i posade. 15. travnja 1912. godine, nakon što je udario u ledenjak, Titanic je potonuo na dno oceana, odnoseći sa sobom živote više od 1.500 putnika i posade. Ova nesreća potaknula je zakonodavce na djelovanje, te su uvedene nove regulative kako bi se osigurala sigurnost putnika prilikom plovidbe otvorenim morem, uključujući Zakon o radiju iz 1912. godine i prvu verziju Međunarodne konvencije o sigurnosti života na moru (SOLAS). Ovdje će biti navedeni novi pomorski zakoni nakon nesreće.

- Brodovi moraju osigurati dovoljno čamaca za spašavanje za sve putnike
- Komunikacija radijskim valovima je strože regulirana a brodovi moraju imati 24-satnu radijsku stanicu i dežurstvo
- Oformljena je (IIP) međunarodna patrola za praćenje lokacija i kretanja ledenjaka
- Općenita svijest tijekom konstruiranja broda je promijenjena, te se sada brodovi konstruiraju sa stajališta sigurnosti

2.1.2. „Exxon Valdez“ 23.ožujka.1989 [8]

Onečišćenje naftom koju je prevozio brod Exxon Valdez katastrofa uzrokovana ljudskim faktorom koja se dogodila kada je brod Exxon Valdez, tanker u vlasništvu tvrtke Exxon Shipping Company, izlio 265 tisuća tona sirove nafte u Prince William Sound zaljevu u Aljasci. Do izlivanja nafte došlo je zbog sudara broda sa grebenom. Do sudara je došlo uslijed loše reakcije i komunikacije posade. To je bila najveća katastrofa izlivanja nafte u povijesti Sjedinjenih Američkih Država sve do izlivanja nafte s platforme Deepwater Horizon 2010. godine. Naftna mrlja s Exxon Valdezom pokrivala je 1.300 milja obale i ubila stotine tisuća morskih ptica, vidri, tuljana i kitova. Gotovo 30 godina kasnije, u nekim

područjima još uvijek postoje lokacije s tragovima sirove nafte. Nakon izlijevanja, brod Exxon Valdez je ponovno počeo s radom pod drugim imenom i radio je više od dva desetljeća kao tanker za prijevoz sirove nafte i rasutog tereta.

Promjene nakon izlijevanja nafte iz broda Exxon Valdez:

- Zakon o onečišćenju naftom, 1990 („Oil pollution act,1990“) u kojem su povećane kazne za vlasnike brodova čija se nafta izlije u okoliš
- Svi brodovi koji prevoze sirovu naftu moraju imati dvostruko dno i dvostruki bok. Ovaj zakon je prvo donesen u SAD-u, a zatim u Europi
- Certificiranje i edukacija radnika, te češće inspekcije
- Mnoge promjene u regulaciji i praćenju onečišćenja okoliša

2.1.3. „Andrea Doria“ i „Stockholm“ 25.srpnja.1956. [9]

25.srpnja 1956. godine talijanski ocean liner SS Andrea Doria sudarila se s MS Stockholm, južno od otoka Nantucket. Do nesreće je uslijed ljudskog faktora i guste magle. Razlozi nesreće su greške u očitavanju radara, nedovoljno regulacija uslijed susreta dva broda i loš način komunikacije i signalizacije. U nesreći je poginula 51 osoba. Iako je bila veća od dva broda, Andrea Doria prevrнула se i potonula, dok je teško oštećena Stockholm uspjela otploviti do New Yorka. Promjene nakon ove nesreće:

- Poboljšanje u edukaciji posade u vidu korištenja radarske opreme i komunikacije
- Obavezna uspostava kontakta sa dugim brodom kada ga se detektira na radaru
- Poboljšanja pravila u trenutku kada se brodovi nađu na otvorenom moru

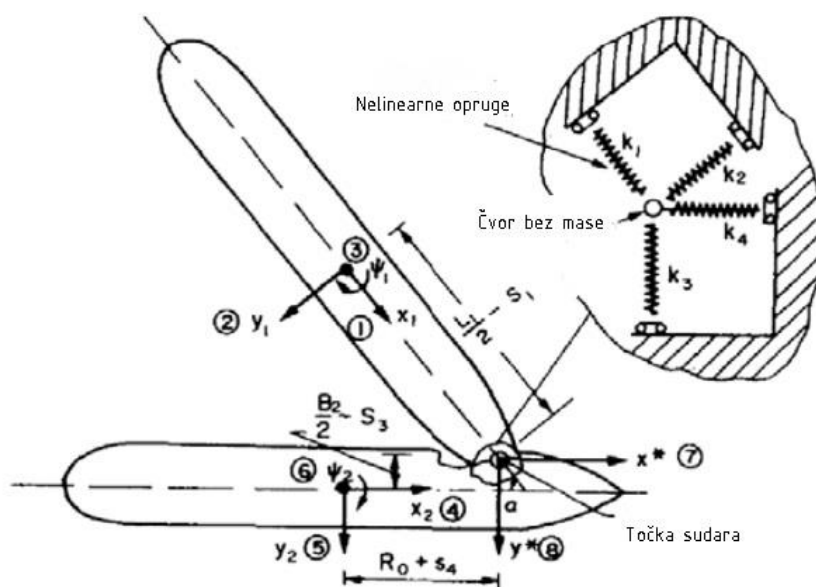
2.2. Vanjska dinamika i unutarnja mehanika sudara

2.2.1. Vanjska dinamika sudara

U ovom dijelu analizira se dinamičko ponašanje događaja sudara. Brodovi se obično smatraju krutim tijelima, a kretanje broda ograničeno je na ravninu površine vode. Cilj analize vanje dinamike sudara je procjena pomaka, sila i impulsa generiranih u oba broda, kao i apsorbiranu energiju brodova tijekom sudara [3].

2.2.1.1. Petersenov model sudara dva broda [3]

Minorsky 1959.godine prvi je pokušao analizirati dinamiku sudara dva broda. Njegova metoda ispituje izravan frontalni sudar u bok udarenog broda, što je autor smatrao najgorim scenarijem. Brodovi se smatraju krutim tijelima, sudar se pretpostavlja potpuno neelastičnim, a pretpostavljaju se linearni pomaci oba broda, bez rotacija. Procjena disipirane energije temelji se na očuvanju momenta, kinetičke energije i neelastičnog rada. Dodana masa okolne vode povezana s udarenim brodom procijenjena je na 40% mase udarenog broda. Kasnije, Petersen 1982.godine uključuje hidrodinamičke sile koje djeluju tijekom horizontalnog kretanja udarajućeg broda koristeći dodane mase i prigušenje u svakom dijelu trupa. Sudar, reakcijska sila i deformacija konstrukcije modelirani su korištenjem nelinearnih opruga, Slika 2.1. [3].

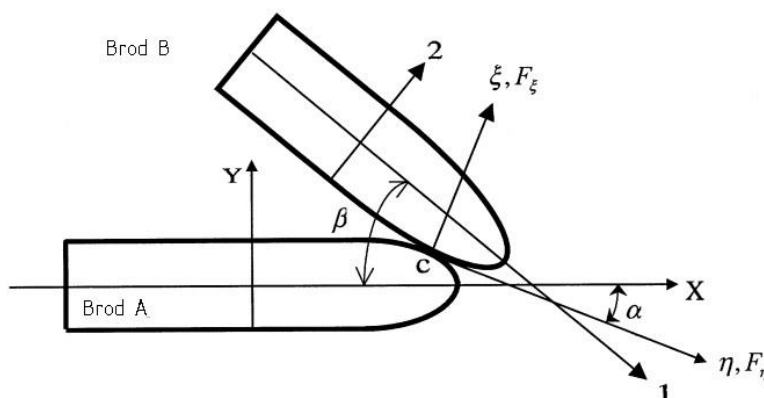


Slika 2.1 Petersenov model sudara dva broda (1982) [3]

2.2.1.2. Zhangov model sudara

Nekoliko godina kasnije, Pedersen i Zhang (1998) te Zhang (1999) također su razvili slične generalizirane formulacije za vanjsku dinamiku sudara dva broda, broda s fleksibilnom platformom i broda s krutom stijenkom [3].

Promotrimo udarajući brod A, koji plovi brzinom v_{ax} prema naprijed i brzinom v_{ay} u smjeru zanošenja te koji se sudara s udarenim brodom (B), koji plovi brzinom v_{b1} prema naprijed i brzinom v_{b2} u smjeru zanošenja. Koordinatni sustav XYZ je fiksiran na dno mora. Os Z pokazuje prema vanjskoj površini vode, os X leži u simetričnoj ravnini udarnog broda i usmjerena je prema pramcu, a ishodište XYZ-sustava postavljeno je tako da je poprečni presjek u ravni YZ u trenutku $t=0$. Ishodište sustava $\xi-\eta$ se nalazi na točki sudara C, smjer ξ je normalan na površinu sudara, kut između osi X i osi η je α , a kut između osi X i osi 1 je β (Slika 2.2) [10].



Slika 2.2 Zhangov model sudara brodova [10]

Jednadžbe gibanja udarajućeg broda [10]

$$M_a (1 + m_{ax}) v_{ax}' = -F_{\xi} \sin(\alpha) + F_{\eta} \cos(\alpha) \quad (2.1)$$

$$M_a (1 + m_{ay}) v_{ay}' = -F_{\xi} \cos(\alpha) + F_{\eta} \sin(\alpha) \quad (2.2)$$

$$M_a R_a^2 (1 + j_a) \omega_a' = F_{\xi} [y_c \sin(\alpha) - (x_c - x_a) \cos(\alpha)] + F_{\eta} [y_c \cos(\alpha) + (x_c - x_a) \sin(\alpha)] \quad (2.3)$$

Jednadžbe gibanja udarenog broda [10]

$$M_b(1+m_{b1})v_{b1}' = -F_\xi \sin(\beta - \alpha) + F_\eta \cos(\beta - \alpha) \quad (2.4)$$

$$M_b(1+m_{b2})v_{b2}' = F_\xi \cos(\beta - \alpha) + F_\eta \sin(\beta - \alpha) \quad (2.5)$$

$$M_b R_b^2(1+j_b)\omega_b' = F_\xi [(y_c - y_b)\sin(\alpha) - (x_c - x_b)\cos(\alpha)] - F_\eta [(y_c - y_b)\cos(\alpha) + (x_c - x_b)\sin(\alpha)] \quad (2.6)$$

U prikazanim jednadžbama M_a i M_b označavaju mase broda A i broda B koje se množe sa koeficijentom dodatne mase m_a ili m_b za posrtanje ili za zanošenje. Sa desne strane nalaze se sile definirane u koordinatnom sustavu ξ - η . R_a odnosno R_b označava radijus zakretnog momenta oko centra težišta broda A ili broda B za zaošijanje, te je analogno prijašnjim jednadžbama j_b koeficijent dodatne mase za zaošijanje a ω_b kutna brzina. U jednadžbama (2.3) i (2.6) bitno je definirati centar težišta broda A ($x_a, 0$) i težište broda B (x_b, y_b), dok je (x_c, y_c) koordinata točke sudara [10].

Iz ovih jednadžbi lako se izvode izrazi za proračun akceleracije broda A i broda B, relativna gibanja oba broda i brzine. Izvodi izraza za oslobođenu energiju tijekom sudara i impulsa kao i brzine na kraju sudara navedeni su u [10].

2.2.2. Unutarnja mehanika sudara

Unutarnja mehanika se fokusira na odziv konstrukcije pramca koji udara i boka broda koji je udaren pri sudaru. Cilj je razviti pojednostavljene metode za proračun krivulje sila-prodiranje, odnos apsorbirane energije i prodiranja, te veličinu oštećenja u boku udarenog broda koja je rezultat sudara [10].

Metode za analizu strukturnog oštećenja u sudaru broda možemo podijeliti u četiri kategorije [10]:

- Empirijske metode
- Metode konačnih elemenata
- Eksperimentalne metode
- Pojednostavljene metode

Konstrukcija boka broda je veoma složena kao što je i konstrukcija pramca koji udara. Međutim, brod se može promatrati kao skup pločastih elemenata, poprečnih okvira, vodoravnih paluba i pregrada koje su izgrađene od raznih ploča. [10]

Analizom nesreća na brodovima u stvarnosti i modelskim ispitivanjima može se ustanoviti da su mehanizmi apsorpcije energije bočne strukture [10]:

- Deformacija uzdužnjaka i oplata
- Preklapanje i gnječenje rebara i ukrepa
- Preklapanje, rezanje i gnječenje paluba
- Rezanje i gnječenje dvodna
- Gnječenje pregrada

Iako analitičke i empirijske metode izostavljaju neke karakteristike stvarnih konstrukcija, poput zavora, pružaju brzu i relativno točnu metodu za procjenu čvrstoće konstrukcije pri sudaru u preliminarnom konstruiranju broda. Općenito se pojednostavljene analitičke metode temeljene na gornjoj granici teorema plastičnosti, te su prikladne za procjenu kolapsa strukture broda. To je najčešće slučaj kod predviđanja deformacije pramca. Nažalost, ove analitičke metode manje su točne kada je potrebno procijeniti početak loma materijala. U tom slučaju, empirijske formule ili poluanalitičke metode imaju prednost u procjeni apsorbirane energije povezane sa strukturnim oštećenjem [11].

Sa druge strane, nedostaci eksperimentalnih metoda koje koriste modele sa velikim koeficijentom skaliranja, odnosno male modele imaju sljedeće nedostatke [4]:

- Skalirani modeli koriste tanke čelične ploče koje ne mogu vjerno replicirati stvarno oštećenje trupa broda pri sudaru. To se događa zato što se tanka čelična ploča ponaša drugačije od stvarne čelične ploče, te zakon sličnosti ovdje nije primjenjiv
- Dinamički eksperiment zahtjevan je, stoga je za prikupljanje podataka tijekom sudara prikladnije provoditi statičke eksperimente kod kojih su uvedena pojednostavljenja
- Početak loma ploče uvjetovan je debljinom ploče

Iz navedenih razloga potrebno je eksperimentalne metode provoditi na modelima sa malim koeficijentom skaliranja, odnosno na velikim modelima. Takva ispitivanja zahtijevaju puno vremena i sredstava te su kao takva rijetka ali pružaju dobar uvid u strukturni odziv brodske konstrukcije [11].

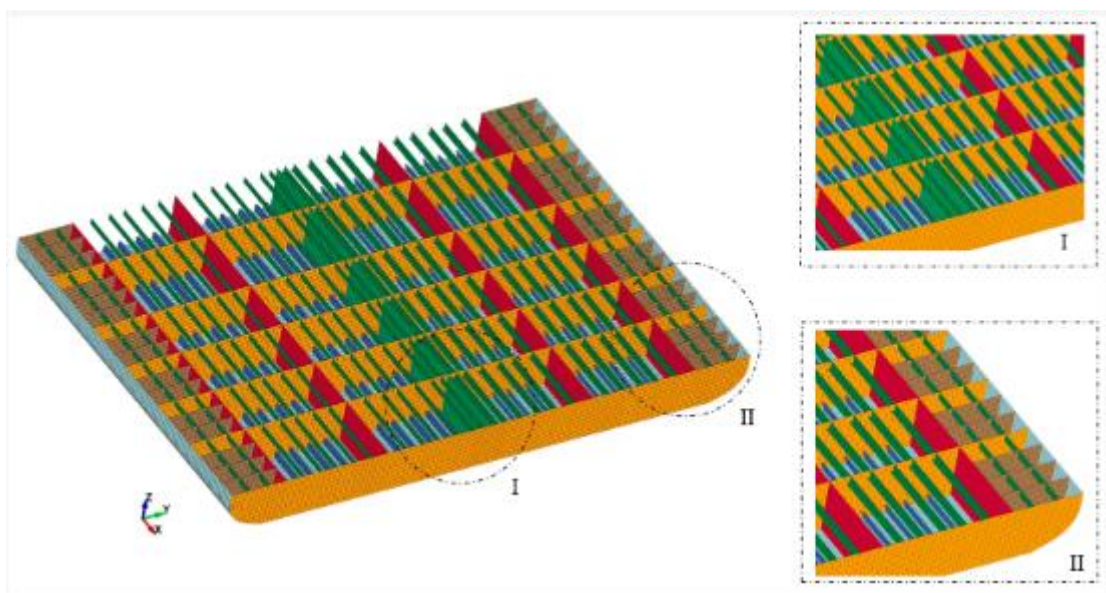
U sljedećem poglavlju biti će analizirana nelinearna metoda konačnih elemenata koja također ima svoje prednosti i nedostatke ali je trenutno, sa razvojem tehnologije i računala, najpogodnija za analizu sudara brodova.

3. NELINEARNA METODA KONAČNIH ELEMENATA

U ovom poglavlju bit će opisane glavne značajke nelinearne metode konačnih elemenata koja je korištena za strukturnu analizu pramca tijekom sudara sa krutim zidom. Bit će navedeni i objašnjeni najbitniji parametri čijim se odabirom kontrolira proračun, te realistično modelira stvarnu unutarnju mehaniku sudara. Na kraju će biti nabrojani prednosti i nedostaci ove metode te će biti analizirane greške uvjetovane ovakvom analizom problema.

3.1. Uvod u nelinearnu metodu konačnih elemenata

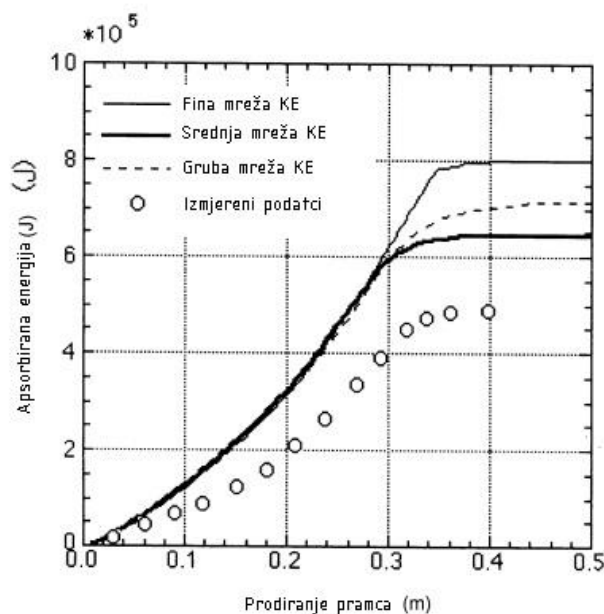
Danas numerička analiza sudara brodova može poprilično dobro predvidjeti posljedice nesreće zbog razvoja nelinearne metode konačnih elemenata u posljednjih 10 godina. Generiranje mreže konačnih elemenata zahtijeva definiranje različitih parametara, a većina njih postala je standardni ulazni parametar u numeričke kodove. Struktura broda često se modelira pomoću ljuskastih elemenata s četiri čvora i s pet točaka integracije kroz debljinu elementa, koristeći Belytschko-Lin-Tsay formulaciju ljuskastog elementa. Nedavni razvoji u analizi konačnih elemenata uglavnom su usmjereni na definiranje nelinearnosti materijala i loma [12].



Slika 3.1 Primjer modela dvodna broda modeliranog konačnim elementima [13]

Pod brojem I prikazan je detalj kobilice dok je pod brojem II prikazana konstrukcija uzvoja.

Metoda konačnih elemenata (FEM) je koristan je alat u analizi strukturnog odziva u sudarima. Dostupni su mnogi komercijalni programski paketi poput LS-DYNA3D, ABAQUS, MSC/DYTRAN. Obično se smatra da FEM proračun može pružati precizne rezultate i da može zamijeniti modelska ispitivanja. Međutim, to nije uvijek istina. Slika 3.2 prikazuje primjer značajne razlike između rezultata simulacije i eksperimentalnih rezultata dobivenih mjerenjem. Zbog velikog broja elemenata i potrebe za rješavanjem dinamičkih problema korak po korak, simulacija sudara i nasukavanja pomoću FEM-a zahtijeva puno vremena [10].



Slika 3.2 Usporedba rezultata simulacije i eksperimentalnih ispitivanja korugiranog panela u koji se sudario cilindar [10]

Treba uzeti u obzir da su rezultati prikazani na Slika 3.2 mjereni 1997.godine a da je u posljednjih 25 godina računalna snaga neusporediva sa tadašnjom te da ona sada omogućuje da se do pogrešnih rezultat dođe u kraće vrijeme. Kao što je već navedeno vrlo je važno pažljivo odabrati parametre kako bi što vjernije opisali stvarno ponašanje materijala i unutarnju mehaniku sudara. Ti parametri su navedeni i objašnjeni u sljedećim podnaslovima.

3.1.1. Jednostruka i dvostruka preciznost rješavača nelinearnog problema

Programski paket LS-DYNA omogućava proračun sa dvije vrste preciznošću, jednostrukom (sedam fiksnih znamenki) i dvostrukom (šesnaest fiksnih znamenki). Obje vrste proračuna rade grešku. Greške su podijeljene u dvije kategorije[14]:

- Greška zaokruživanja
- Greška skraćivanja ili greška ulaznih parametara

Pogreška zaokruživanja nastaje zaokruživanjem rezultata u matematičim operacijama s velikim brojevima. Najjednostavniji primjer pogreške zaokruživanja je umnožak dvaju brojeva s 7 znamenki u simulaciji jednostruke preciznosti. Točan umnožak (13 ili 14 znamenki) se ne može koristiti u daljnjim izračunima. Što je više operacija s pomičnim zarezm, to se više pogrešaka nakuplja. Kod LS-DYNA-e, što je veći broj vremenskih koraka, to je veća pogreška zaokruživanja. Zbog toga svaki LS-DYNA model koji zahtijeva simulaciju dugog trajanja, poput prevrtanja, zahtijeva dvostruku preciznost. Pogreška zaokruživanja na kraju postaje toliko velika da rješenje divergira ako se koristi jednostruka preciznost [14].

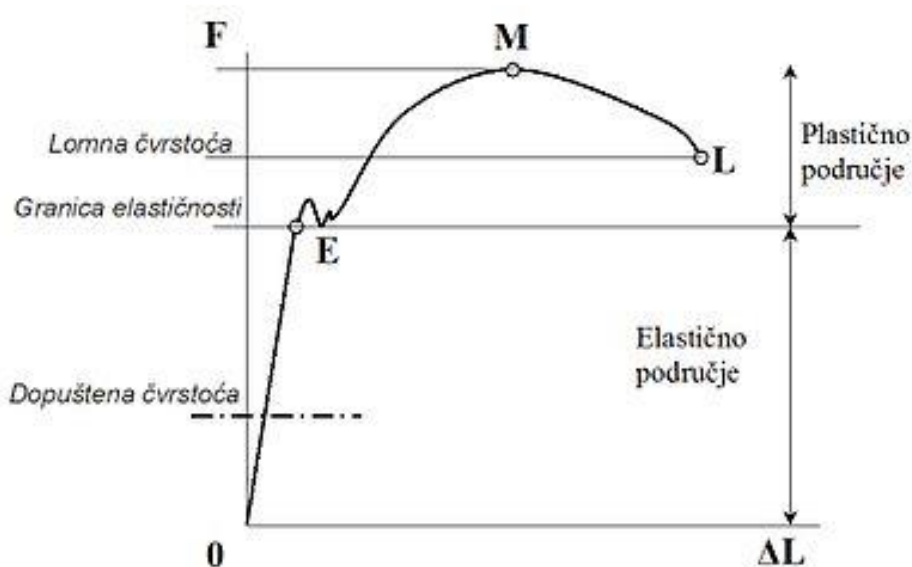
Greška skraćivanja ili greška ulaznih parametara nastaje zbog vrste i veličine ulaznih parametara kojima opisujemo problem. Ti ulazni parametri mogu biti geometrija, brzina, veličina mreže, veličina elemenata itd. Što je broj elemenata veći to je greška skraćivanja veća. [14].

Zbog toga što dvostruka preciznost ima manju grešku zaokruživanja i manju grešku ulaznih podataka, korisnici radije odabiru dvostruku preciznost umjesto jednostruke [14].

Datoteka rješavača jednostruke preciznosti ima oznaku "_s" u nazivu datoteke, dok ona dvostruke preciznosti ima "_d" u nazivu datoteke. Vrijeme potrebno za proračun u dvostrukom preciznošću bit će otprilike 30% duže od vremena potrebnog za proračun u jednostrukoj preciznosti. Nije uvijek unaprijed poznato kada je potreban proračun dvostruke preciznosti. Jedini siguran način je pokretanje oba načina (jednostruka i dvostruka preciznost) i provjera podudaranja rezultata. Općenito su implicitne analize osjetljivije na grešku zaokruživanje od eksplicitnih analiza [15].

3.2. Materijal i stvarna krivulja naprežanja-istezanja

Pouzdanost i točnost simulacije konačnih elemenata ovisi o pristupu računalnog modeliranja, uključujući kvalitetu mreže, veličinu elemenata, vremenski korak, materijalni model, itd. [16]. Uobičajeno, mehanička svojstva materijala određuju se ispitivanjem vlačne čvrstoće. Stalna deformacija materijala do loma može se dobro opisati stvarnom krivuljom naprežanja i deformacije Slika 3.3, koja predstavlja osnovne karakteristike plastičnog toka materijala. Stvarna veza naprežanja i deformacije često se dobiva pretvaranjem zabilježenih podataka dobivenim mjerenjima naprežanja i deformacije do početka suženja [11].



Slika 3.3 Dijagram naprežanja-istezanje za čelik [17]

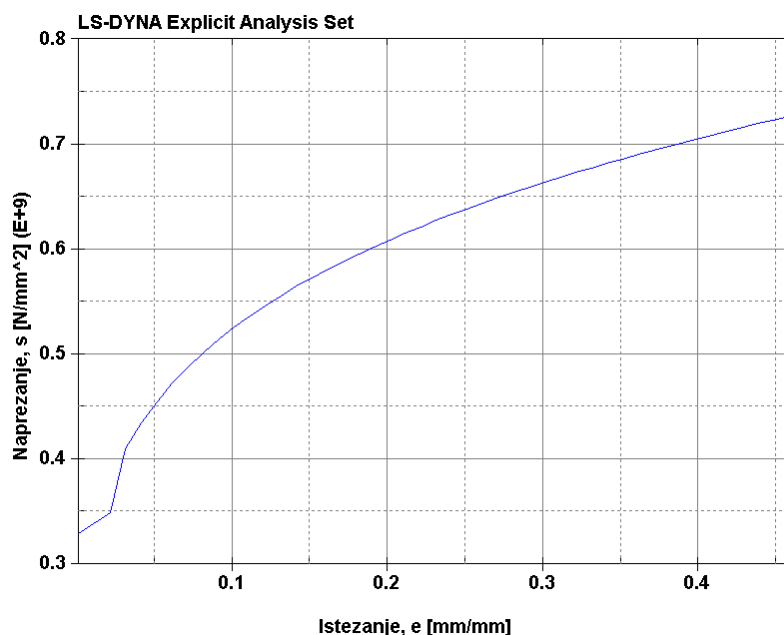
Za odabir prikladnog materijalnog modela potrebno je definirati kriterij. Glavni kriteriji odabira su:

- primjenjivost modela materijala za metale i legure
- mogućnost definiranja kriterija loma ili mogućnost dodatnog opisa odziva materijala tijekom loma

Programski paket LS-DYNA sadrži više od 200 materijalnih modela implementiranih u samom programu. Neki od materijalnih modela koji dobro opisuju karakteristike metala i legura su [18]:

- MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003)
- MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MAT_018)
- MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLACTICITY (MAT_024)
- MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK (MAT_098)

Najbolji kandidat od navedenih materijalnih modela je MAT_024. LS-DYNA MAT_024 je najrašireniji materijalni model koji se u današnje vrijeme koristi za modeliranje sudara. Njegova najjednostavnija i najčešće korištena značajka povezuje Cowper-Symondsov model s elastično-plastičnom krivuljom. Elastično područje modelira se neovisno o brzini i definirano je Youngovim modulom elastičnosti E [19]. Na slika 3.4, prikazana je krivulja koja unutar modela materijala „MAT24“ opisuje plastično područje ponašanja čelika.

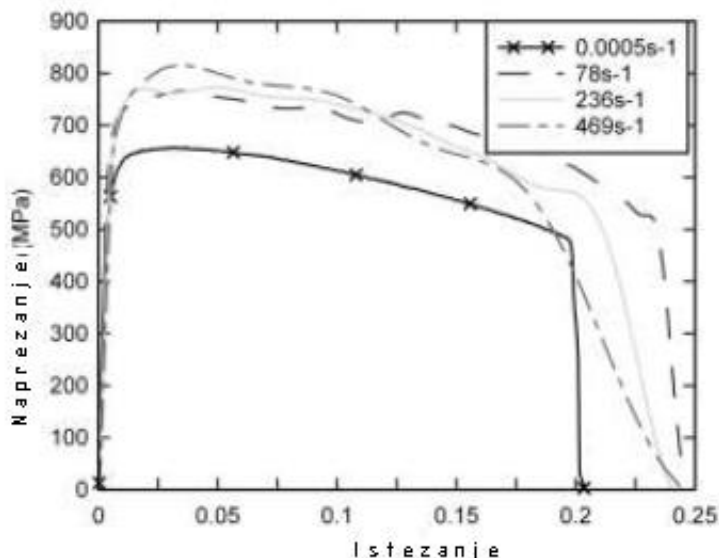


Slika 3.4 Krivulja naprezanje-istezanje za plastično područje „MAT24“

Brzina deformacije se često definira koristeći Cowper-Symondsov parametar, koji je uključen u spomenutom modelu materijala. Parametar je izvorno opisan u empirijskom izrazu (3.1).

$$\frac{\sigma_{eq}^D}{\sigma_{eq}} = 1 + \left(\frac{\sigma_{eq}'}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.1)$$

Gdje je σ_{eq}^D dinamičko naprezanje tečenja materijala, σ_{eq} kvazistatičko ekvivalentno naprezanje tečenja materijala, C i m konstante ili drugim imenom Cowper-Symonds koeficijenti koji se inače označavaju sa C i P [20].



Slika 3.5 Krivulja naprezanje-istezanje za meki čelik za četiri različite brzine istezanja [21]

Na Sliku 3.5 prikazan je dijagram naprezanje-istezanje za meki čelik za četiri različite brzine istezanja. Iz ovog dijagrama može se vidjeti kako je za meki čelik, od kojeg izrađena pramčana konstrukcije broda u ovom radu, značajan utjecaj brzine istezanja, te brzine deformacije. Zanimljivo je što npr. kod aluminija ne postoji utjecaj brzine promjene istezanja.[20]

Međutim, izazovno je i vrlo vremenski zahtjevno uzeti u obzir učinak brzine deformacije u sudarima. Za čelik niskog udjela ugljika i spore promjene naprezanja preporučuju se razumne vrijednosti Cowper-Symondsovih parametara koje iznose $C = 40,4 \text{ s}^{-1}$ i $P = 5$. Bitan faktor u modeliranju oštećenja tijekom sudar i nasukavanja je priroda sudara kao nelinearnog događaja koji uzrokuje brze promjene u odzivu pramčane konstrukcije. U takvom stanju, često se preferira veća vrijednost Cowper-Symondsovog parametra C . Kao primjer ove pretpostavke, tijekom eksperimentalnog ispitivanja ojačanih panela Alsosa i Amdahla, primijenjen je $C = 4000 \text{ s}^{-1}$, dok su Prabowo i suradnici za analizu sudara koristili $C = 3200 \text{ s}^{-1}$. Prema ovoj literaturi odabrani su, kانسije navedene odabrane vrijednosti parametra C, P koje će se koristiti u proračunu[20].

3.3. Kriterij popuštanja

Znanost o teoriji popuštanja materijala predviđa uvjete koji dovode do popuštanja čvrstog materijala uslijed vanjskog opterećenja. Pri modeliranju sudara brodova koristi se nekoliko kriterija popuštanja povezanih s modelima inicijacije pukotina. Kriteriji maksimalne plastične deformacije najčešće se koristi ali osim njega koriste se još i Germanischer Lloyd kriterij, Rice-Tracey-Crockfort-Latham kriterij i Bressan-Williams-Hill kriterij koji su objašnjeni u [22]. Kriterij maksimalne plastične deformacije koristi se zbog njegove jednostavnosti, jer se oslanja samo na jednu varijablu (ekvivalentnu plastičnu deformaciju) i može se lako mjeriti. Kriteriji maksimalne plastične deformacije također se temelji na svojstvima materijala, kao što su uniformna deformacija i suženje. Kako bi definirali materijal zahtijeva se unos prethodno izračunatih vrijednosti kritičnih deformacija. Zbog utjecaja duljine konačnog elementa i njegove debljine potrebno je korigirati faktor popuštanja prema sljedećim formulacijama [23].

3.3.1. „DNV RP-C204“ kriterij [23]

„DNV RP-C204“ nudi jednostavan korekciju temeljenu na odnosu opisanom u jednadžbi (3.2)

$$\varepsilon_f = 0,02 + 0,65 \frac{t_e}{l_e}, \frac{l_e}{t_e} \geq 5 \quad (3.2)$$

3.3.2. „Germanischer Lloyd“ kriterij [23]

Ova korekcija temeljena je na eksperimentalnom mjerenju naprezanja oštećenih ploča u stvarnim brodskim strukturama izloženim sudarima i nasukavanjima, prvobitno je predložen od strane „Germanischer Lloyd AG“.

$$\varepsilon_f(l_e) = \varepsilon_g + \varepsilon_e \left(\frac{t_e}{l_e} \right) \quad (3.3)$$

Ove dvije komponente su eksperimentalno dobivene, rezultirajući vrijednostima $\varepsilon_g = 0.056$ i $\varepsilon_e = 0.54$ za čelične konstrukcije brodova (uzimajući u obzir pločaste strukture), $\varepsilon_g = 0.079$ i $\varepsilon_e = 0.76$ za grede ili rešetke. Parametar t_e predstavlja debljinu, a l_e duljinu elementa. Vrijedi za omjer $l_e/t_e \geq 5$.

3.3.3. Kriterij baziran na Peschmannu [23]

Sljedeći izraz se može koristiti za procjenu ekvivalentnog plastičnog naprezanja pri popuštanju materijala, izraz je baziran na Peschmannu:

$$\varepsilon_f(l_e) = \varepsilon_g + \alpha \frac{t_e}{l_e} \quad (3.4)$$

gdje ε_g predstavlja konstantnu deformaciju, α je faktor koji ovisi o deformaciji pri suženju i diktira duljini suženja, t_e je debljina ploče, a l_e je duljina elemenata. Eksperimentalno izmjerene vrijednosti za ovaj izraz u testu sudara trupa tankera rezultirale su sa sljedećim vrijednostima $\varepsilon_g = 0,1$ i $\alpha = 0,8$ za debljine ploča ≤ 12 mm i $\varepsilon_g = 0,08$ i $\alpha = 0,65$ za debljine ploča između 12,5 i 20 mm.

3.4. Dodatna masa okolne vode

Koeficijenti dodatne mase uzimaju u obzir interakciju između broda i okolne vode, te ovise o obliku trupa broda i trajanju sudara. Radi jednostavnosti, Minorsky predlaže korištenje konstantnih vrijednosti koeficijenata dodane mase broda [10].

Tablica 3.1. Koeficijenti dodatne mase [10]

m_{ax}	0,02-0,07
m_{ay}	0,4
j_a	0,21

Postoje još neki načini kako uračunati inerciju i masu okolne vode u sudaru a jedan od najpodobnijih je modul MCOL. MCOL kao sastavni dio programskog paketa LS-DYNA. Kako bi se smanjilo vrijeme izračuna u smislu računalnog vremena i povezala interakcija vanjskih globalnih gibanja, brodovi su podijeljeni u deformabilne zone od interesa koje se uzimaju u obzir tijekom proračuna. Pomoću FEM mreža, rješenje svih unutarnjih sila dobiva se putem kontaktnih interakcija u procesu deformacije. Zatim se sile prenose na MCOL koji koristi informacije o hidrostatičkoj matrici koja se redovito osvježava, matrici dodatne mase i matricama frekvencijski ovisnog dodanog prigušivanja (matrice dodatne i prigušivanja za svaku frekvenciju) [24].

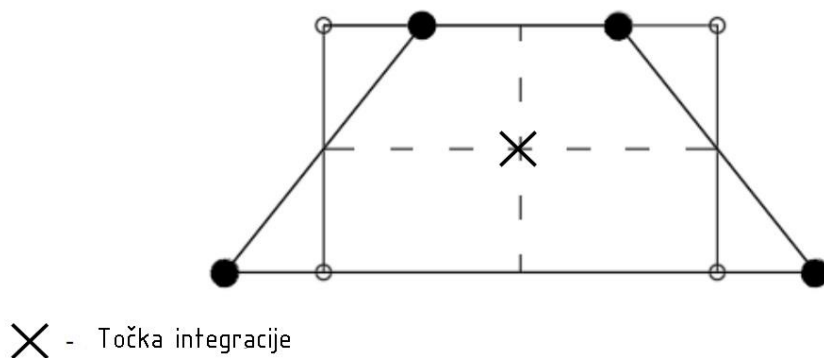
Zbog kompleksne prirode dodane mase i nestabilnosti simulacija sa MCOL programom, matrice su proračunate ali je ovaj fenomen izostavljen iz simulacije u ovom radu.

3.5. Hourglass energy

Utjecaj energije hourglass energy uzrokuje generiranje umjetne energije u strukturi, što se u modelu može uočiti kao prividna deformacija mreže konačnih elemenata. Izgleda kao skup oblika pješčanog sata. Neki računalni programi u okviru metode konačnih elemenata mogu minimizirati ovaj učinak i, primjerice, izračunati intenzitet pješčanog sata [25].

Napomenimo da općenito u metodi konačnih elemenata definiramo matricu krutosti elementa koristeći numeričku integraciju, najčešće Gaussovu metodu. Gaussova metoda omogućuje potpunu ili reduciranu integraciju. Prednost reduciranog pristupa je kraće vrijeme računanja, ali može dovesti do netočnih rješenja, među njima je i efekt hourglass energy [25].

Na Sliku 3.6 može se vidjeti primjer takvog elementa a zbog greške dolazi zato što program računa deformaciju na sredini elementa gdje se on uopće ne deformira.



Slika 3.6 Hourglass energy efekt [25]

Rezultat ovog efekta može se vidjeti na izračunatoj ukupnoj energiji tijekom sudara koja raste dok je u stvarnom sudaru to nemoguće.

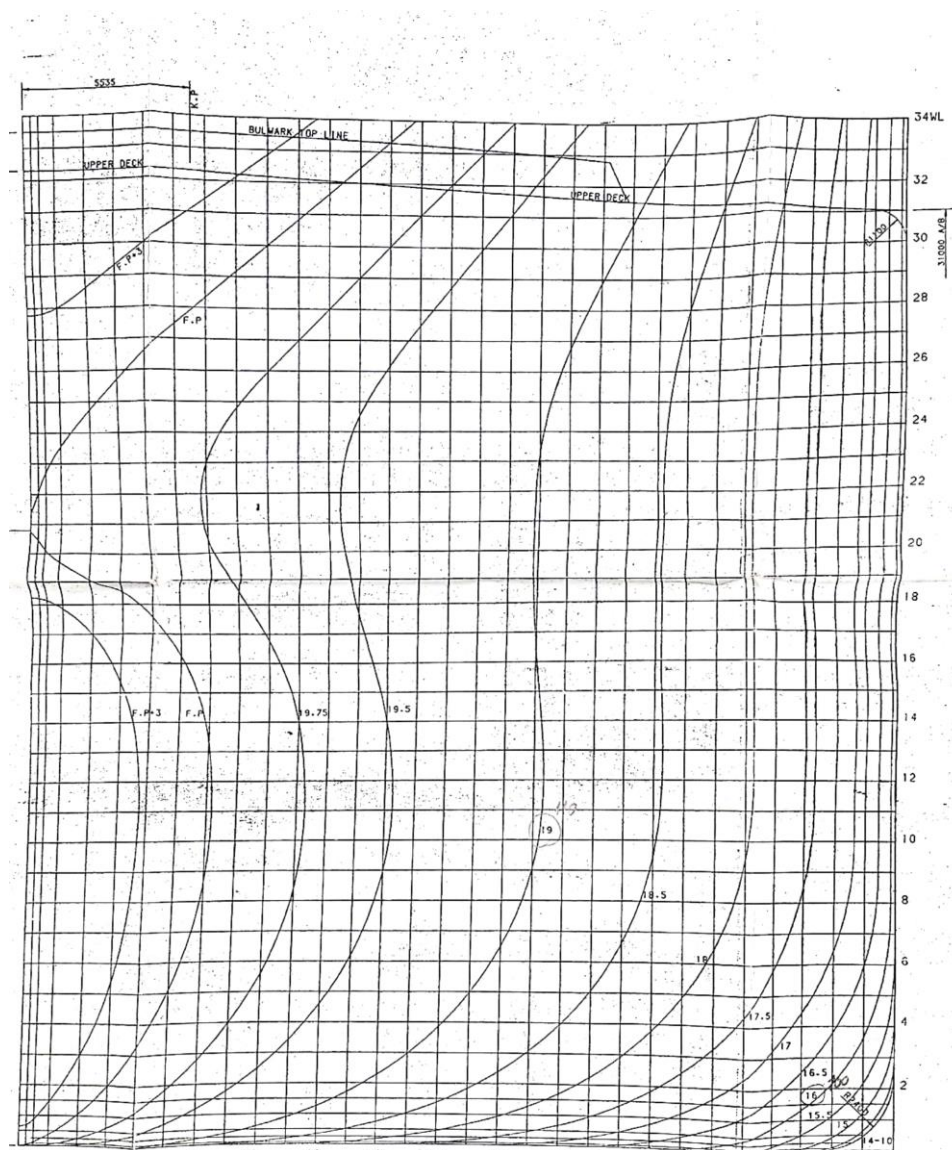
4. MODELIRANJE PRAMCA, DEFINIRANJE SCENARIJA I PRIPREMA ANALIZE

U ovom poglavlju bit će prikazan proces modeliranja pramca broda za prijevoz sirove nafte te će biti odabrani svi parametri koji su važni kod proračuna scenarija sudara.

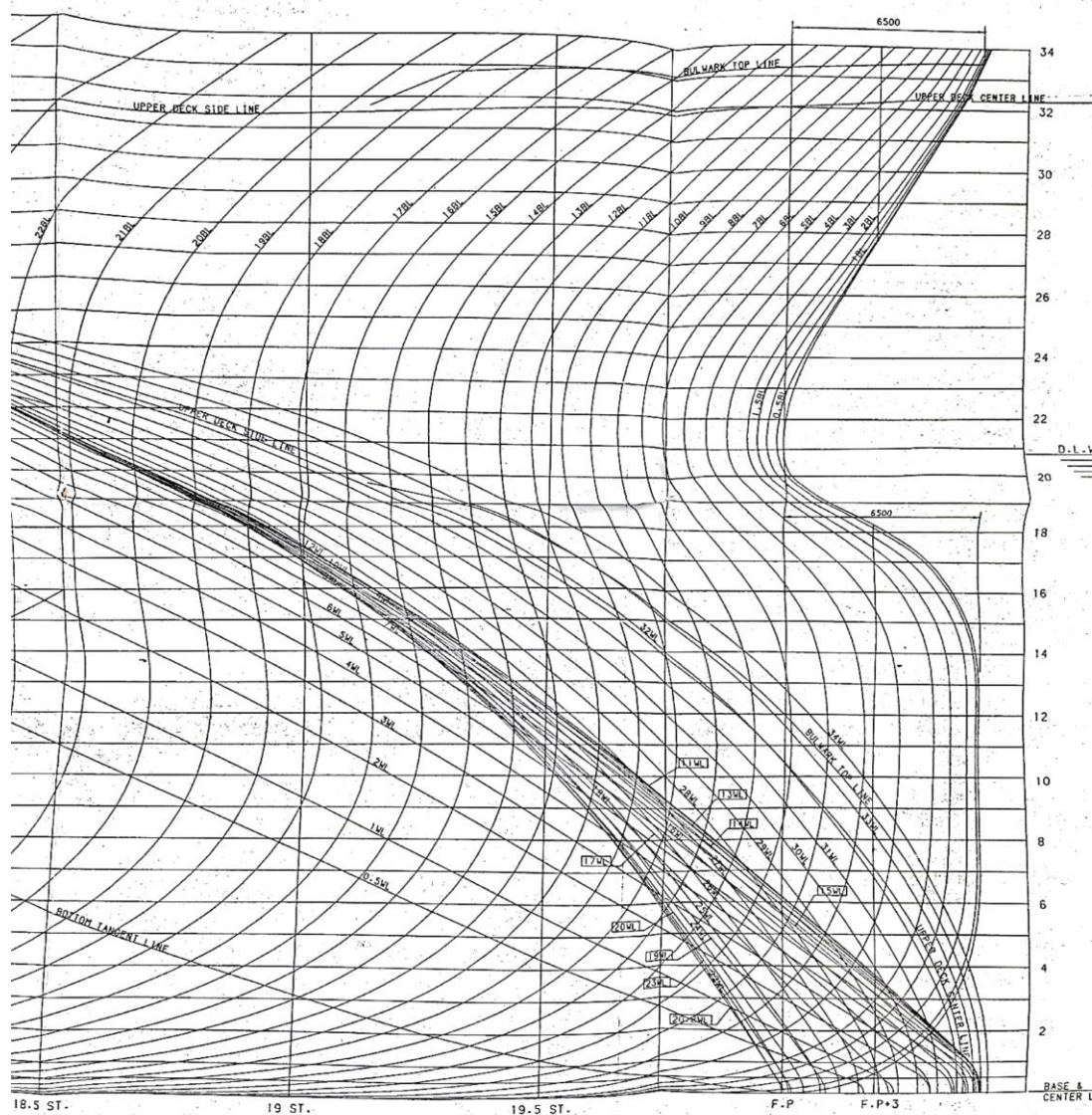
4.1. 3D modeliranje pramca

4.1.1. Geometrija broda

3D model pramca modeliran je prema dobivenim nacrtima. Slika 4.1 prikazuje nacrt rebara a Slika 4.2 prikazuje uzdužnice i vodne linije modeliranog pramca.



Slika 4.1 Nacrt rebara modeliranog broda



Slika 4.2 Uzdužnice i vodne linije modeliranog broda

Pramac je modeliran od rebra 19 nadalje prema pramcu, u mjerilu 1:1. Svi strukturni elementi biti će prikazani na samom modelu.

4.1.2. „Front Century“

Modelirani brod u potpunosti odgovara brodu „Front Century“ koji je izgrađen 1999. godine. Slika 4.3 prikazuje osnovne podatke broda kao što su istisnina, brzina itd.



FRONT CENTURY: energy-saving VLCC design

Shipbuilder:Hyundai Heavy Industries Co Ltd, Korea
Vessel's name:Front Century
Hull number:1106
Owner/operator:Frontline Ltd, Bermuda
Designer:Hyundai Heavy Industries Co Ltd, Korea
Flag:Panama
Total number of sister ships already completed:Nil
Total number of sister ships still on order:4

FRONT CENTURY is the first of five C-class VLCCs ordered by Frontline from Hyundai, and constructed to a design which incorporates energy-saving and marine environmental protection features within a new hullform, which has a bluff forebody and wide (58m) beam. Much emphasis has been placed on the structural design in order to reduce hull deflections - which place high stress on secondary members, and a range of detailed structural analyses has been performed. These include fore end tank structure and secondary members' fine mesh analyses; examination of vibration throughout the entire ship range; also bow impact and fatigue strength.

Three of the vessels are being built to Det Norske Veritas rules, where they satisfy the requirements of the CSA-1 structural strength and fatigue strength notation, and two to Lloyd's Register, with the inclusion of the ShipRight PC-based advanced procedures for design, construction and life-time ship care.

The single-decked hull has no forecastle, and within a double skin it is divided into 15 cargo tanks, plus two for slops which are coated with coal tar epoxy. The side spaces are combined with centrally divided double-bottom tanks to form water ballast compartments which, with the pumproom, are continuously monitored for hydrocarbon gases. The cargo pumping system uses three Shinko steam turbine pumps which together provide a maximum unloading rate of 15,000m³/h, whilst a loading rate of 20,500m³/h is possible through the cargo manifolds.

A Super Cargo cargo control system allows one-man operation of loading and discharging duties, including safety and monitoring functions. Another support system incorporated is Super Plant, designed to detect difficulties in the main engine, alternator prime movers and other machinery, using artificial intelligence and sophisticated data acquisition techniques.

The main engine is a Hyundai-MAN B&W 7S80MC(VI) unit with a maximum output of 34,650bhp at 79rev/min. Service rating is 92% MCR (31,920bhp at 76.9rev/min), which enables a service

speed of 15.7knots to be attained using a 9700mm four-bladed propeller.

A complement of 33 is housed in the six-tier deck-house aft, above which is a wheelhouse equipped with an advanced integrated navigation system carrying out route planning, collision manoeuvring, grounding avoidance and navigation monitoring.

PRINCIPAL PARTICULARS

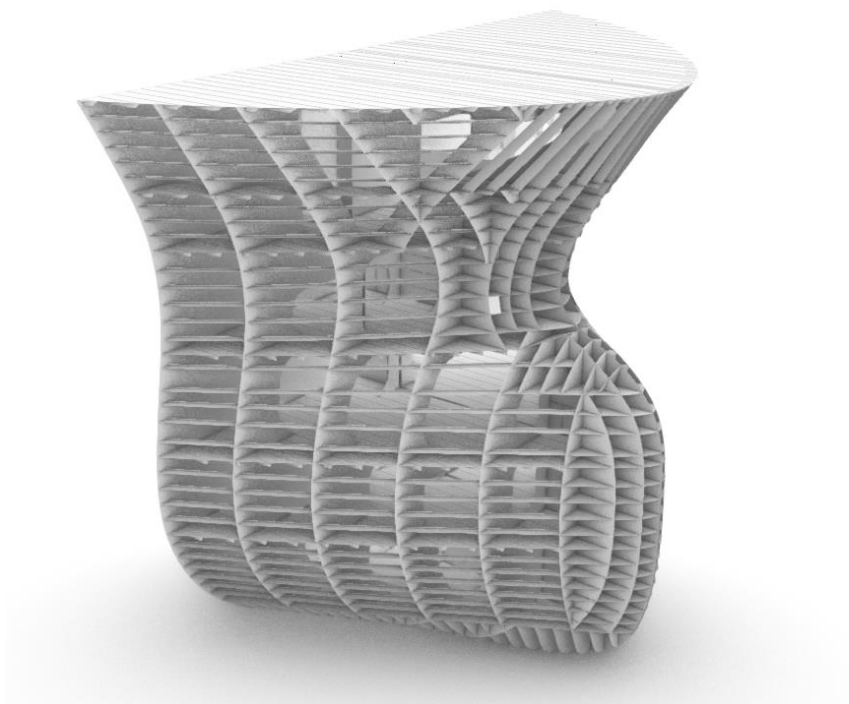
Length, oa	approx 335.00m
Length, bp	320.00m
Breadth, moulded	58.00m
Depth, moulded	3.00m
to main deck	31.00m
to sunken deck aft	28.40m
Width of double skin	
side	3.52m
bottom	3.00m
Gross	157,976gt
Deadweight	
design	281,600dwt
scantling	311,100dwt
Draught	
design	20.95m
scantling	22.70m
Speed, service 92% MCR	15.74knots
Cargo capacity	
liquid volume	350,060m ³
Bunkers	
heavy oil	7990m ³
diesel oil	390m ³
Water ballast	
Fuel consumption	
main engine only	52.7 tonnes/day
Classification	Lloyd's Register of Shipping +100A1, Double Hull Oil Tanker, ESP ShipRight (SDA, FDA, CM, PC, WBT), +LMC, UMS, IGS, IWS, SPM, NAV 1, SCM, L1
Percentage of high-tensile steel used in construction	approx 35%
Main engine	
Design	MAN B&W 7S80MC(VI)
Manufacturer	Hyundai Heavy Industries
Number	1
Output, MCR	34,650bhp/79rev/min
Propeller	
Material	Nickel-aluminium-bronze
Manufacturer	Hyundai Heavy Industries
Number	1
Pitch	Fixed
Diameter	9700mm
Speed	79rev/min
Diesel-driven alternators	
Number	3
Engine make/type	Wärtsilä/-
Alternator make/type	Hyundai/HFC5-632-14E
Output	3 x 980kW/720rev/min
Boilers	
Number	2
Type	Automatic oil burning

Make	Mitsubishi MAC-50B
Output	2 x 50,000kg/h
Cranes	
Number	2 x hose handling
Make	Dong-Nam Enterprises
Capacity/speed	2 x 20tonnes/10m/min
Mooring equipment	
Number	2 x mooring winch/windlass
	8 x mooring winch
Make	Hyundai-Pusnes
Type	Hydraulic
Cargo tanks	
Number	15 + 2 slop tanks
Grades	3
Cargo pumps	
Number	3
Type	Steam turbine vertical centrifugal
Make	Shinko
Capacity	3 x 5000m ³ /h
Cargo/ballast control system	
Make	Samgong-Danfoss
Type	Hydraulic
Pumproom	
Number	1
Position	Aft of cargo tanks
Complement	
Officers	11
Crew	21
Single/double rooms	29/3
Bridge control system	
Make	Norcontrol
Type	AC-4
One man operation	No
Fire detection system	
Make	Consilium
Type	C-300
Fire extinguishing systems	
Cargo tank deck	Low-expansion foam
Make	NK Fire Protection
Engine room and pumproom	High-pressure CO ₂
Make	NK Fire Protection
Radars	
Number	2
Make	Consilium
Models	MM950
Satellite navigation systems	
Make	Furuno
Model	GP-80 GPS
Computers on ship	
Number	1
Make	Kockumation
Task	Loading calculation
Waste disposal plant	
Incinerator	
Make	Kang-Rim Industries
Model	OSV-50SA
Contract date	26 February 1997
Launch/floatout date	22 May 1998
Delivery date	23 July 1998

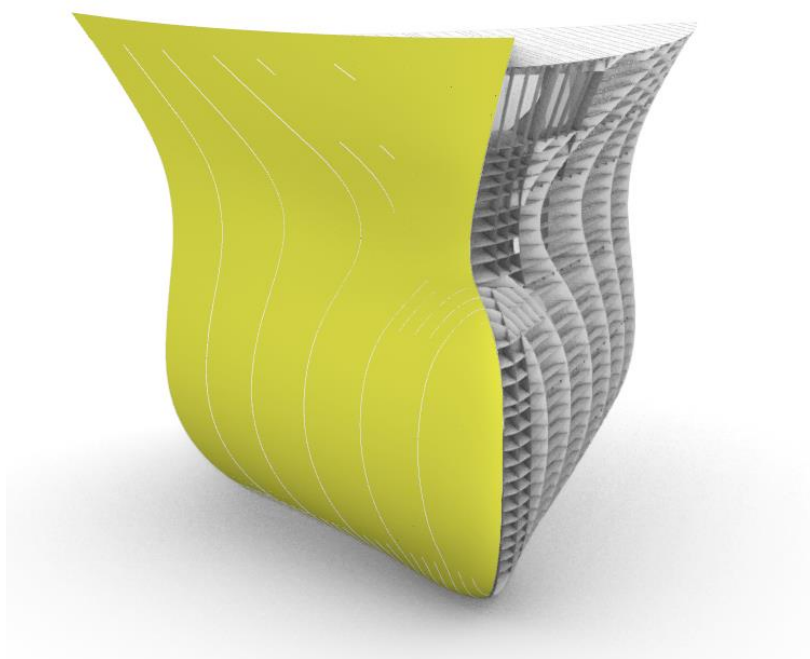
Slika 4.3 Brod „Front Century“ [26]

4.1.3. Model pramca

Za izradu geometrijskog modela pramca izabran je programski paket Rhinoceros 7. Slika 4.4 prikazuje 3D model konstrukcije pramca bez oplata a Slika 4.5 prikazuje 3D model konstrukcije pramca sa oplatom.



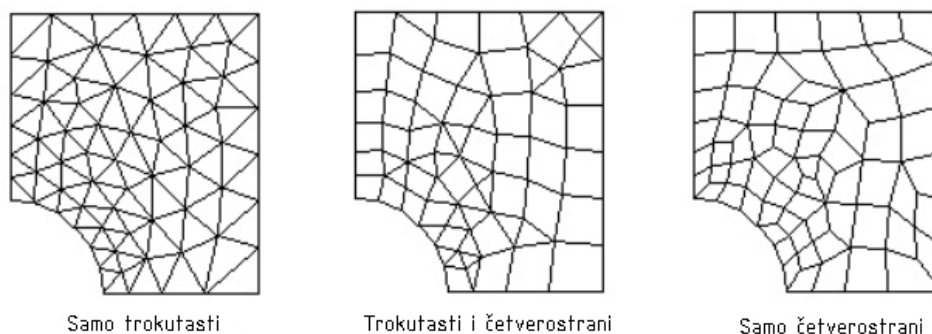
Slika 4.4 3D model konstrukcije pramca



Slika 4.5 3D model konstrukcije pramca sa oplatom

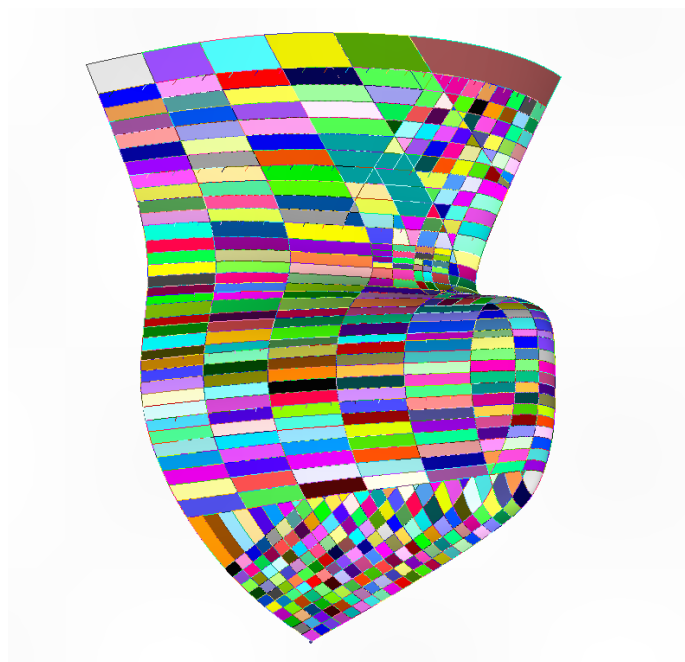
4.2. Izrada mreže konačnih elemenata

Za izradu mreže konačnih elemenata korišteni su četverostrani (tzv. Quadrilateral) ljuskasti konačni elementi ali zbog kompleksne geometrije pramca broda na nekim mjestima su morali biti korišteni trokutni (triangle) elementi.



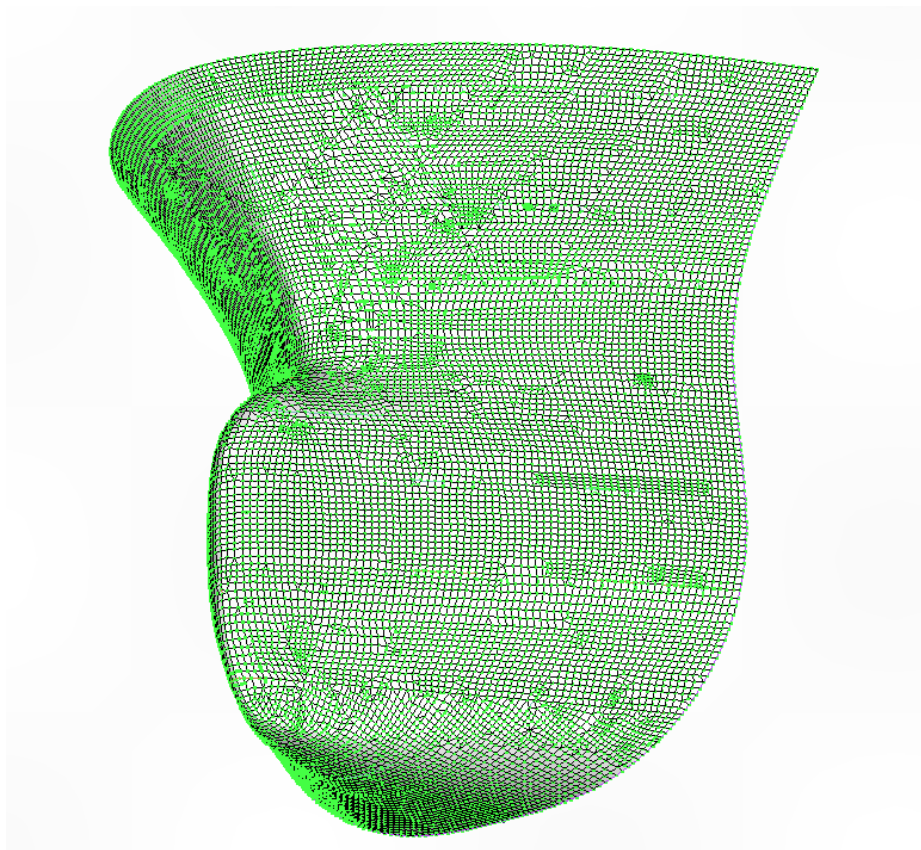
Slika 4.6 Primjer mreže konačnih elemenata sa različitim tipovima elemenata [27]

Za generiranje mreže konačnih elemenata odabran je programski paket „Femap“ jer ima besplatnu studentsku licencu. Kako bi se generirala kvalitetna mreža u kojoj su svi strukturni elementi međusobno spojeni bilo je potrebno prethodno u programskom paketu „Rhinceros 7“ sve površine narezati na mjestima na kojima se strukturni elementi spajaju. Također, bilo je potrebno narezati i površine koje su zakrivljene u više smjerova kako bi mreža ispala što pravilnija. Slika 4.7 prikazuje model sa izdvojenim površinama gdje svaka boja predstavlja jednu površinu.



Slika 4.7 Geometrijski model sa raskrojenim površinama prikazan u Femap-u

Prikazan geometrijski model se sastoji 5642 površine. Za generiranje srednje grube mreže odabrani su elementni većine 350x350mm. Slika 4.8 prikazuje generiranu mrežu konačnih elemenata.

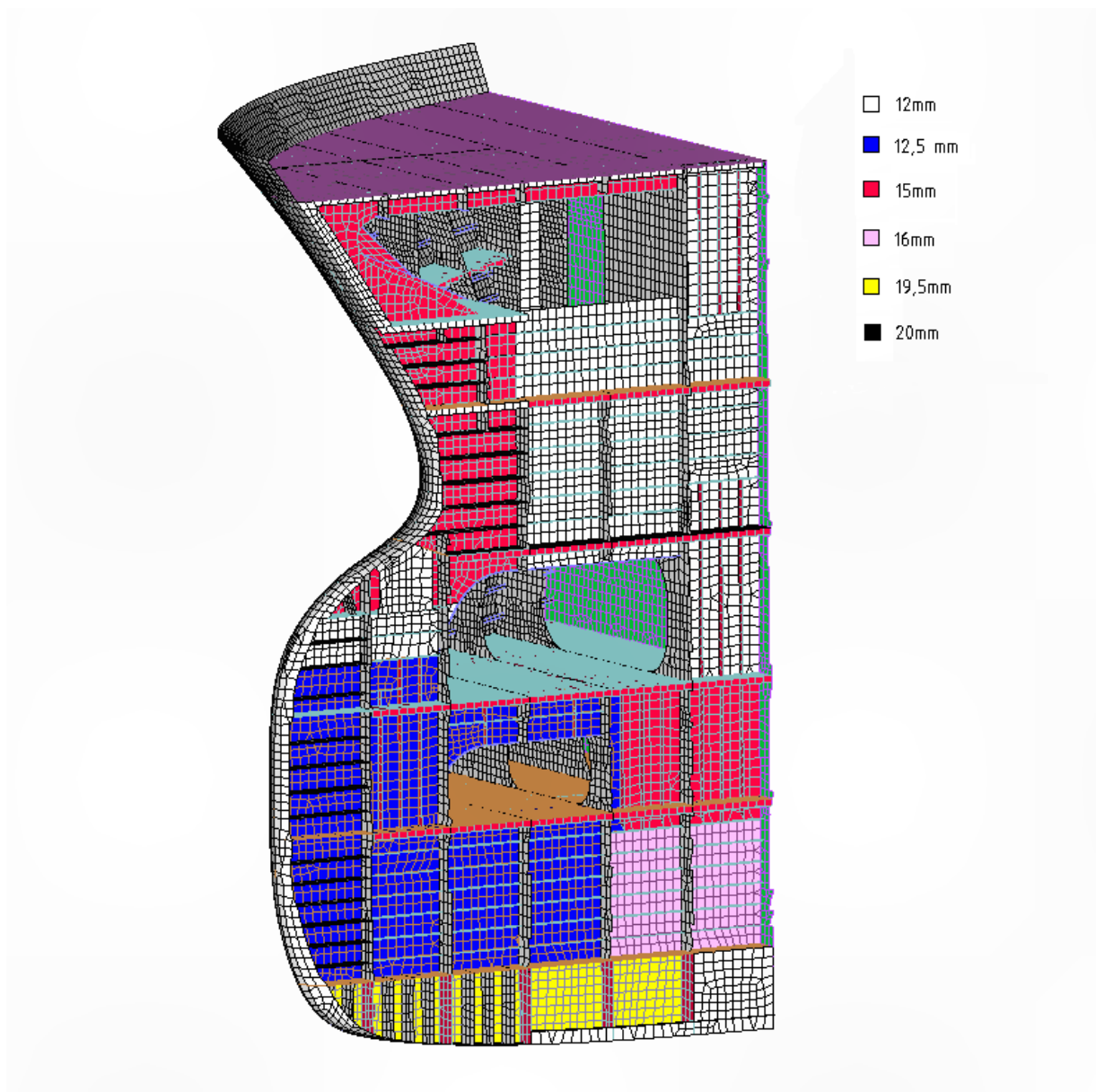


Slika 4.8 Generirani model srednje grube mreže konačnih elemenata

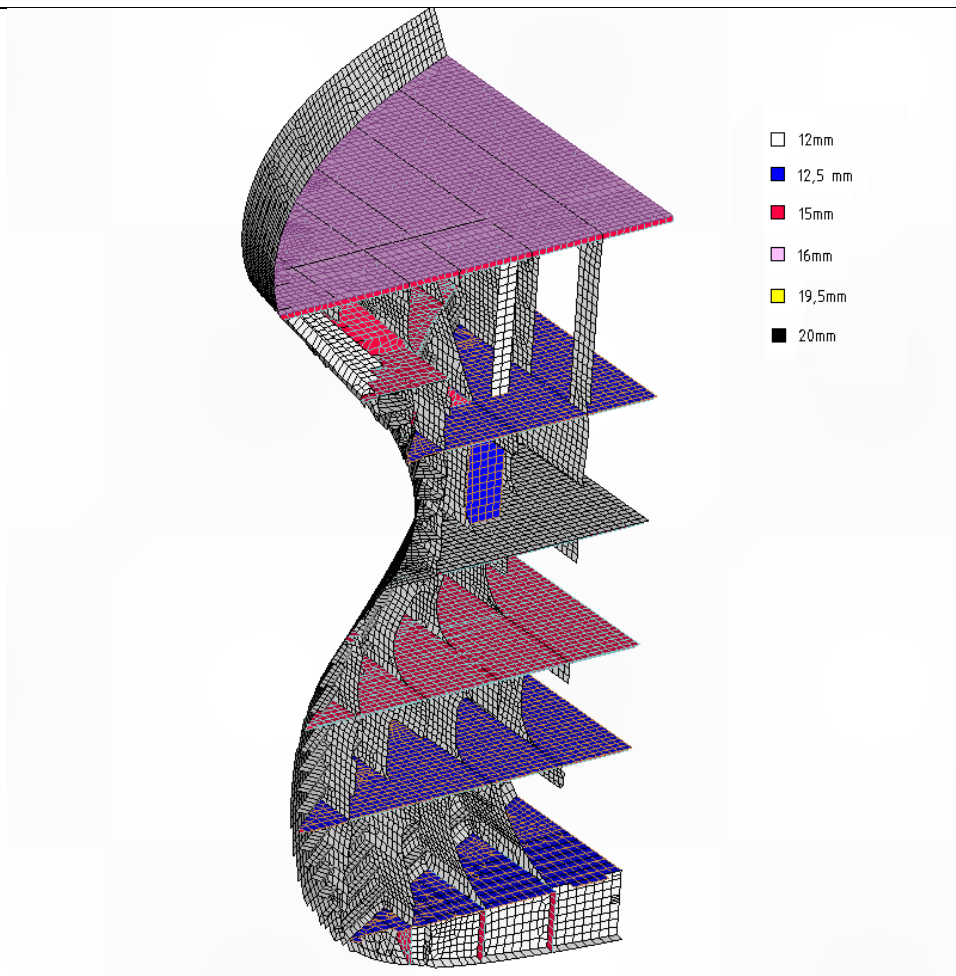
Generirani model srednje grube mreže sastoji se od 104511 čvorova i 111683 elemenata. U sklopu ovog rada generirano je više modela, te će preostali biti prikazani kasnije. U sljedećem poglavlju bit će prikazane debljine strukturnih elemenata.

4.3. Debljine strukturnih elemenata

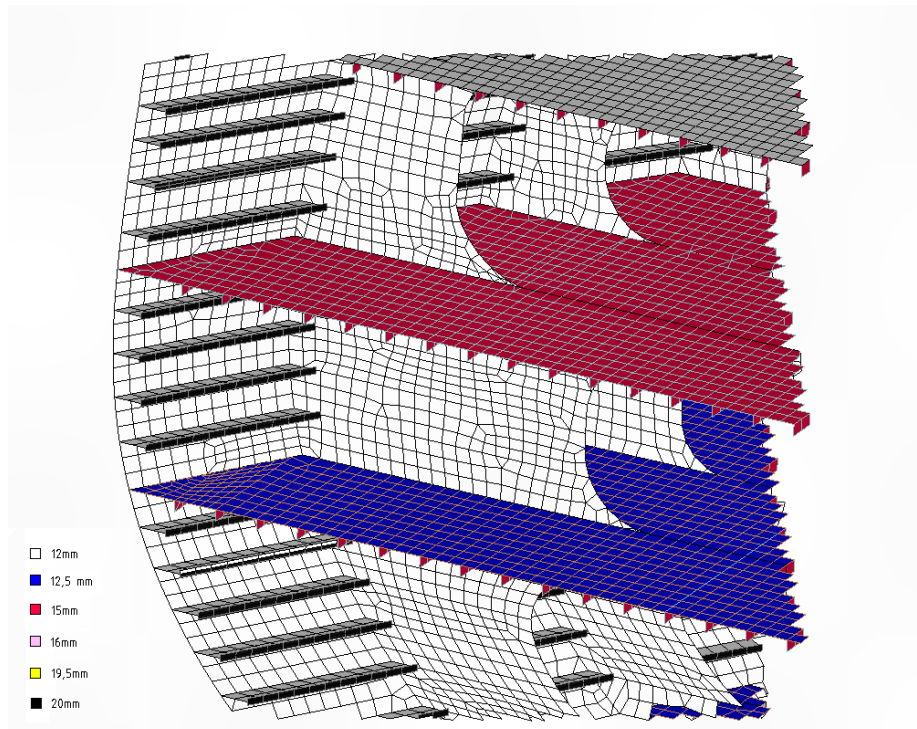
Pramac je cijeli izgrađen od brodograđevnog čelika. Čelik povišene čvrstoće korišten je za koljena, neke ukrepe i sitne detalje, većinom u svrhu ojačanja sudarne pregrade koja je modelirana kao kruti zid. Svi detalji izrađeni od čelika povišene čvrstoće u ovom modelu su zanemareni. Na sljedećim slikama mogu se vidjeti različiti strukturni elementi sa različitim debljinama.



Slika 4.9 Debljine strukturnih elemenata (presjek na CL-u)



Slika 4.10 Debljine strukturnih elemenata (presjek na 3000mm od CL-a)



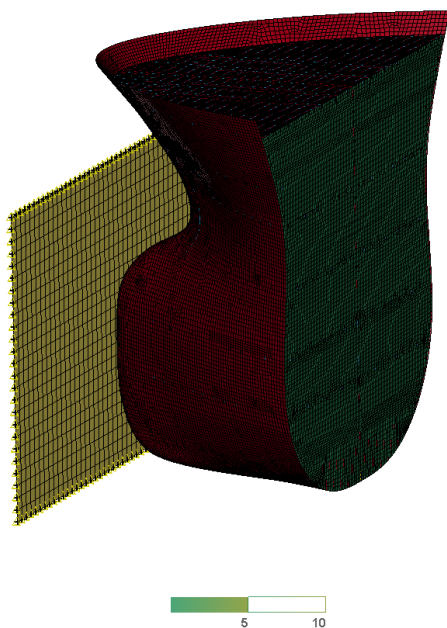
Slika 4.11 Detalj konstrukcije (pogled s krme)

4.4. Priprema scenarija sudara

U ovom poglavlju bit će prikazani svi odabrani parametri potrebni za proračun sudara pramca sa krutim zidom. Također, biti će opisani svi rubni uvjeti i način na koji je opisana unutarnja mehanika sudara. Za sve scenarije korišten je eksplicitni rješavač programskog paketa LS-DYNA. Proračuni su izvršeni uz pomoć fakultetske licence.

4.4.1. Rubni uvjeti

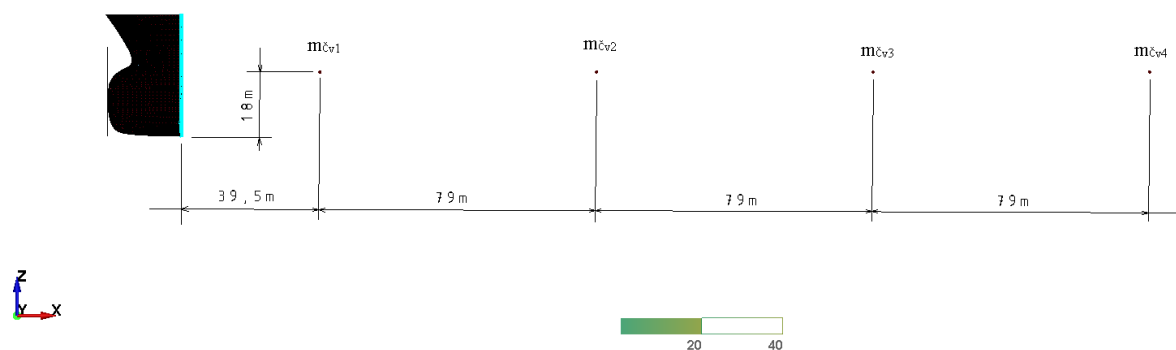
Za potrebe simulacije ovih scenarija definirano je više rubnih uvjeta. Pramca broda udarat će u kruti zid koji je bilo potrebno dodatno modelirati u programskom paketu LS-DYNA. Osim što je zidu pridružena materijalni model MAT_020 (RIGID) koji se ne deformira, te predstavlja savršeno kruti materijal, potrebno je ograničiti mu pomake u smjeru svih šest stupnjeva slobode. Ograničene pomake omogućava ključna riječ *BOUNDARY i to na način da se prethodno stvori grupa čvorova pomoću ključne riječi *NODE_SET, te se stoga rubni uvjet odnosi samo na određene čvorove. Slika 4.12 prikazuje kruti zid i njegove rubne uvjete.



Slika 4.12 Rubni uvjet krutog zida

Također, Slika 4.12 prikazuje i sudarnu pregradu broda koja je također definirana kao kruta te se ne deformira ali za razliku od zida, sudarnoj pregradi su dopušteni svi pomaci u svih šest stupnjeva slobode.

Kako je za potrebe ovog rada modeliran samo pramac broda bilo je potrebno dodati 4 dodatna čvora po dužini broda, te u svaki čvor postaviti četvrtinu preostale mase broda ovisno o stanju krcanja. Slika 4.13 prikazuje položaj koncentriranih masa a pripadni čvorovi su zajedno pridruženi sudarnoj pregradi. Kako bi svakom od 4 prikazana čvora pridružili masu potrebno je koristiti ključnu riječ `*ELEMENT_MASS_NODE`. Čvorovi se pridružuju sudarnoj pregradi pomoću ključne riječi `*CONSTRAIN`. Kao skup oni određuju ostatak mase broda. Ovako definirana masa utječe na zakretni moment tijekom sudara broda sa zidom. Taj zakretni moment doći će do izražaja u slučaju kada brod udara u zid pod nekim kutom.



Slika 4.13 Položaj masenih čvorova po dužini broda

Još jedan od potrebnih rubnih uvjeta je brzina broda koja se definira ključnom riječi `*INITIAL_VELOCITY`. Tim rubnim uvjetom brod dobiva početnu brzinu koju tijekom sudara gubi te usporava. Vrijednosti brzina bit će drugačije za pojedine scenarije pa će iz tog razloga biti prikazane za svaki scenarij posebno.

4.4.2. Materijal

Materijalni model koji je korišten u svim scenarijima naziva se *PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Opis mehaničkih svojstva materijala osigurava MAT_024 koji je opisan u prethodnom poglavlju. Kako je cijeli pramac izrađen od istog materijala bilo je potrebno samo jednom definirati njegove značajke. Značajke su prikazane u sljedećoj Tablica 4.1.

Tablica 4.1 Značajke korištenog materijala

E [N/m ²]	$2,1 \cdot 10^{11}$
Poissonov koeficijent, ν	0,3
ρ [kg/m ³]	7850
σ_{yield} [MPa]	235
C , [s ⁻¹]	3200
P	5

Sve vrijednosti prikazane u Tablici 4.1 uzete su prema preporukama iz [10], [20]. Ostali korišteni parametri biti će navedeni prije same analize rezultata zbog toga što za određene scenarije imaju različite vrijednosti.

4.4.3. Definiranje kontakta

Kako bi u proračunu definirali interakciju dva ili više tijela, u ovom slučaju broda i zida potrebno je definirati parametre kontaktnog algoritma. U ovom radu korišten je *AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE koji sam prepoznaje kontakt između dva tijela. Uz to potrebno je odrediti faktore statičkog i dinamičkog trenja. Scenarij koji se simulira u ovom radu može se opisati kao brod koji udara u betonski zid u razini vodne linije, pa su tako faktori trenja odabrani prema [24]. U svakom scenariju korištene vrijednosti ovih faktora su sljedeći $F_{sb\check{c}}=0,374$ i $F_{db\check{c}}=0,39$.

4.4.4. Izlazne datoteke

4.4.4.1. Standardna LS-DYNA izlazna datoteka (d3plot datoteka)

Izlazna datoteka d3plot je napredni paket za trodimenzionalnu vizualizaciju rezultata dobivenih proračunom programskog paketa LS-DYNA. Paket je razvila tvrtka Oasys a omogućuje animaciju, ekstrakciju i prikazivanje preko 100 komponenata podataka. [28]

Tablica 4.2 prikazuje komponente podataka koji su bitni za slučaj promatranog scenarija dok su ostale komponente podataka izostavljene, te se mogu pronaći u [28].

Tablica 4.2 Vrste rezultata koji su sadržani u datoteci d3plot [28]

	Vrsta entiteta	Generirani podatci
Lokalno	Čvorovi	Koordinate
		Brzine
		Ubrzanja
		Temperature
	Tanke stijenske	Matrica krutosti
		Matrica deformacija
		Sile i momenti
		Plastična deformacija
		Debljine
		Gustoća energije deformacije
		Energija trenja
	Površine u kontaktu	Kontaktno naprezanje
		Kontaktne sile
Globalno	Cijeli model	Prosječna brzina i ubrzanje
		Kinetička energija
		Apsorbirana energija
		Masa
		Deformirani model
	Površine u kontaktu	Ukupne sile
	Pojedini materijal	Prosječna brzina i ubrzanje
		Kinetička energija
		Unutarnja energija
		Masa

Izlazne datoteke odabiru se prema potrebi u *DATABASE_ASCII_option. Za sve scenarije odabrane su sljedeće izlazne datoteke:

- *GLSTAT datoteka koja sadrži opće vrijednosti za cijeli sustav (kinetička energija, unutarnja (apsorbirana) energija, ukupna energija, energija trenja, Hourglass energija itd.)
- *MATSUM datoteka koja sadrži informacije o energijama materijala
- *RCFORCE datoteka koja sadrži kontaktne sile
- *DEFGEO

Pri tome je zadan vremenski korak čija vrijednost iznosi 0,01 što znači da će svaku 0,01 sekundu u simulaciji program zapisati vrijednosti koje se naknadno mogu iscrtati na dijagramu.

Također, korištena je ključna riječ *EXTENT_BINARY koja omogućuje zapise informacija o naprezanjima u cijeloj konstrukciji.

4.4.5. Način prikaza rezultata

Rezultati proračuna scenarija nelinearnom metodom konačnih elemenata bit će prikazani, za svaki scenarij zasebno, u obliku:

- Dijagrama kinetičke, unutarnje, ukupne i energije, energije trenja i hourglass energije
- Slikovni prikaz deformirane konstrukcije pramca
- Slikovni prikaz Von mises naprezanja u kritičnim trenutcima
- Slikovni prikaz elastične i plastične deformacije
- Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu

Na kraju će biti uspoređeni određeni scenariji u zajedničkom dijagramu uz komentare i zapažanja.

5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Odabrane brzine sudara su manje od projektirane brzine broda koja iznosi 15,8čv. Manje brzine odabrane su iz razloga što je ovaj brod za prijevoz sirove nafte u punom stanju krcanja ima istisninu koja je jednaka iznosu od 376 tisuća tona. U takvom stanju krcanja u sudaru sa krutim zidom pri projektiranoj brzini došlo bi do totalnog uništenja pramca te bi se brod zaustavio tek kasnije. To nije cilj ove analize pa su izabrane prikladne brzine koje su prikazane za svaki scenarij zasebno.

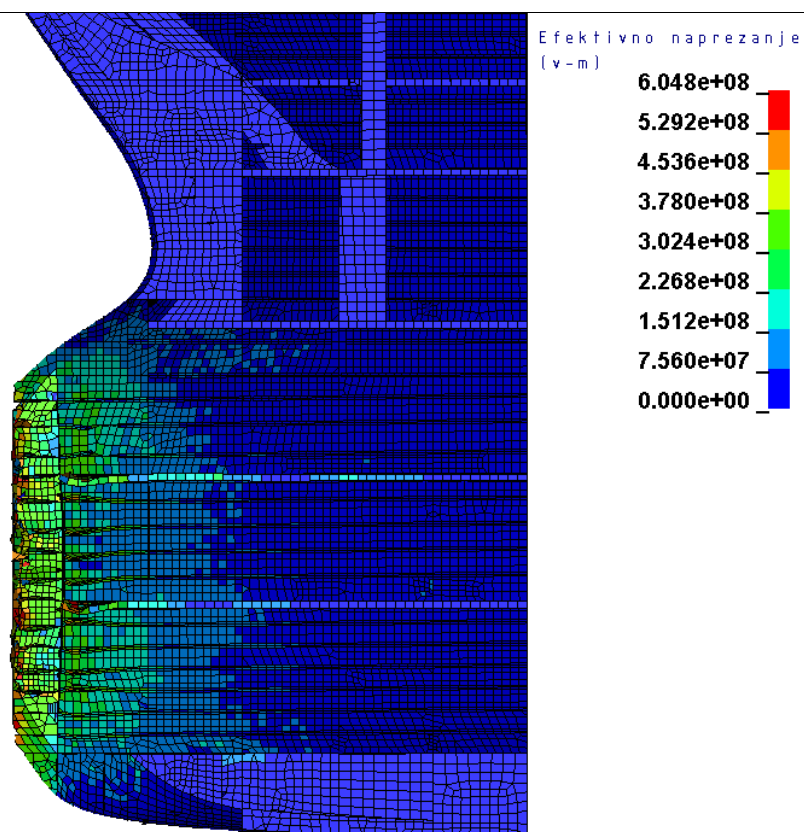
5.1. Scenarij 1 – odabir preciznosti rješavača

U svrhu odabira preciznosti rješavača proveden je proračun sa generiranom srednje grubom mrežom i debljinama limova kao što je prikazano slikom 4.9. Jedina razlika u proračunu je vrsta rješavača. Jedan proračun koristi jednostruku preciznost dok drugi koristi dvostruku preciznost. Parametri korišteni u ovom scenariju prikazani su u Tablici 5.1.

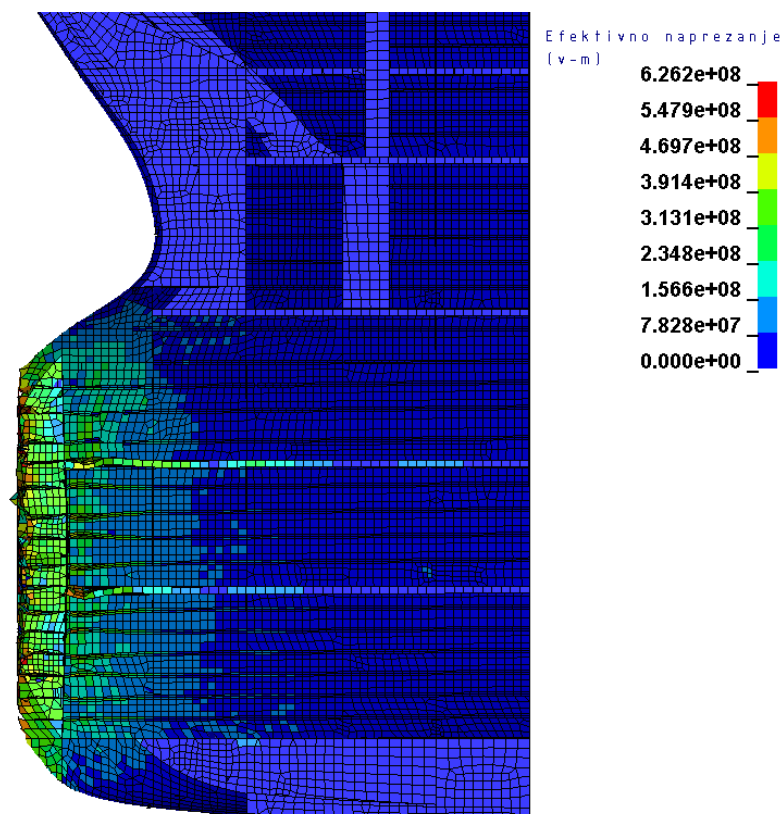
Tablica 5.1 Parametri korišteni za scenarij 1

v , [m/s]	1
m_{uk} [kg]	3.76E+08
$m_{čv}$ [kg]	9.40E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	90

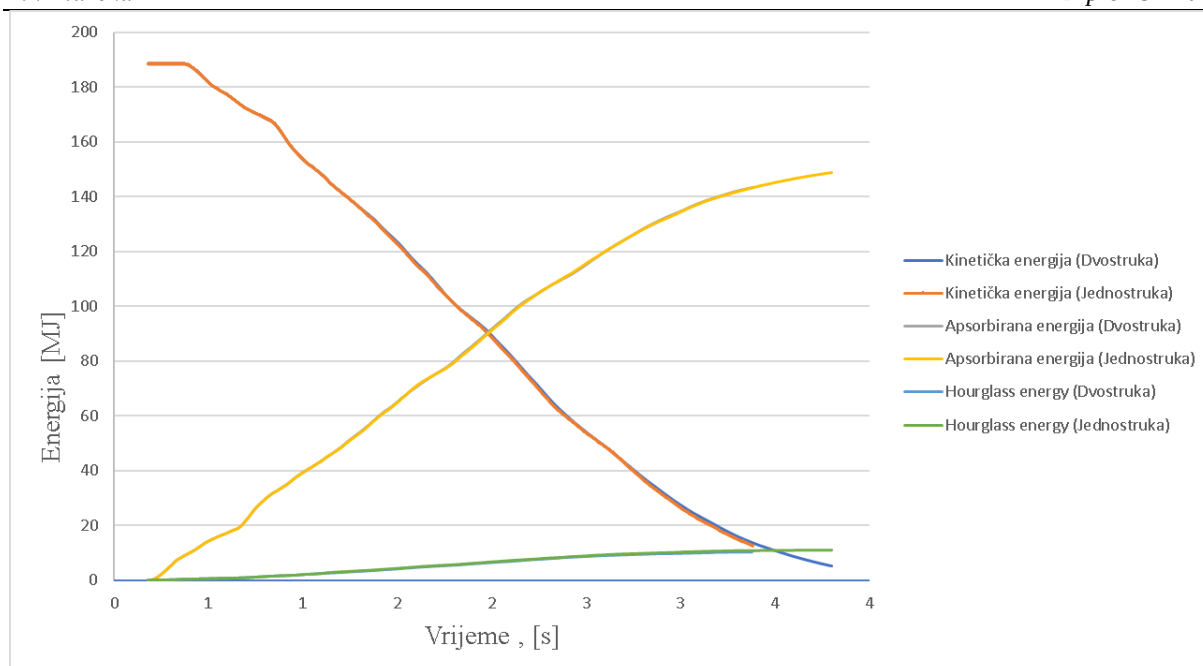
Gdje v predstavlja brzinu broda, m_{uk} predstavlja ukupnu masu broda a $m_{čv}$ predstavlja iznos koncentrirane mase pridodane svakom od dodatnih čvorova. Koeficijent korekcije kriterija popuštanja ϵ_f izračunat je prema „Germanischer Lloyd“ korekciji, jednadžba (3.3). Kut sudara α_s definiran je položajem krutog zida, te iznosi 90 stupnjeva. Ostali parametri, geometrija i generirana mreža opisani su u prethodnom poglavlju. Slika 5.1 i slika 5.2 prikazuju deformirani model sa prikazom efektivnog Von Mises naprezanja. Prikaz je iz bočnog pogleda na presjeku 2000mm od ravnine simetrije modela, u trenutku zaustavljanja. Na slikama vidimo razliku u vrijednostima proračuna efektivnog naprezanja a sa sigurnošću se može zaključiti da je proračun sa dvostrukom preciznošću točniji. Kako bi se donijela odluka koju preciznost ćemo nadalje koristiti analizirani su izračunati podatci o energijama i vrijeme trajanja proračuna. Ti podatci prikazani su na slici 5.3 i 5.4.



Slika 5.1 Von Mises naprezanje deformiranog modela sa jednostrukom preciznošću



Slika 5.2 Von Mises naprezanje deformiranog modela sa dvostrukom preciznošću



Slika 5.3 Kinetička i apsorbirana energija u ovisnosti o vremenu za scenarij 1

Slika 5.3 prikazuje kinetičku, apsorbiranu i hourglass energiju proračunatu za isti scenarij jednostrukom i dvostrukom preciznošću. U dijagramu se može vidjeti da su izračunate vrijednosti praktički podjednake. Zbog toga što su ove vrijednosti podjednake, ostali podatci nisu prikazivani.

Vrijeme potrebno za proračun ovog scenarija za jednostruku preciznost iznosi 7 sati i 50 minuta i 3475000 iteracija dok za dvostruku preciznost iznosi 26 sati i 40 minuta i 5675000 iteracija. Kako se u ovom radu koriste male brzine broda i cijeli scenarij sudara se odvija relativno brzo u daljnjim proračunima odabran je rješavač sa jednostrukom preciznošću.

Ovim odabirom skraćeno je potrebno vrijeme za ostale proračune čime je omogućeno provesti više proračuna uz manju potrošnju električne energije dok je greška u proračunu 3,4%.

5.2. Scenarij 2 – Fina, srednje gruba i gruba mreža

Kako bi provjerili točnost izračunatih rezultata generirane su četiri mreže različitih veličina konačnih elemenata te su u istim uvjetima scenarija izračunate vrijednosti za svaku od mreža zasebno. Generirana je fina, srednja, srednje gruba i gruba mreža. Svi modeli, zbog jednostavnosti generiranja mreže, imaju iste debljine limova koja iznosi 12mm. Faktor korekcije kriterija popuštanja za svaki model izračunat je posebno prema jednadžbi (3.3). Izračunate vrijednosti bit će prikazane usporedno u istom dijagramu na kraju poglavlja.

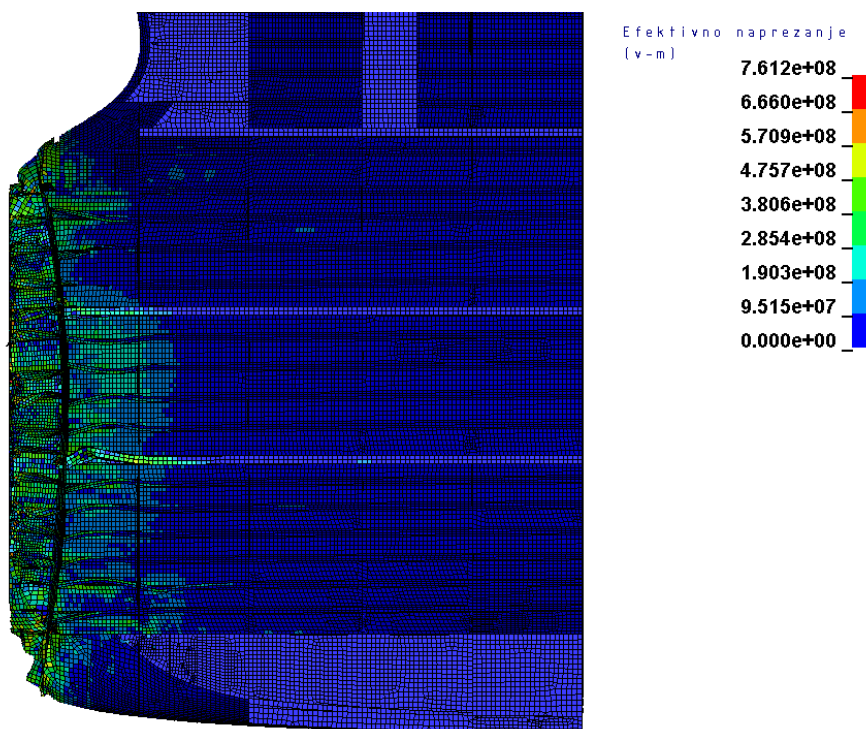
5.2.1. Fina mreža

Fina mreža generirana je s elementima veličine 200x200mm a broj elemenata u modelu iznosi 515407 elemenata. Parametri korišteni u ovom scenariju prikazani su Tablicom 5.2.

Tablica 5.2 Parametri korišteni u scenariju 2 za finu mrežu

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	3.76E+08
$m_{čv}$ [kg]	9.40E+07
ϵ_f	0.0884
α_s [°]	90

Korištene vrijednosti predstavljaju puno stanje krcanja i brzinu broda od 4čv. Kut između simetrane broda i zida iznosi 90 stupnjeva. Slika 5.4 prikazuje deformirani model sa prikazom Von Mises naprezanja u trenutku $t=1,4s$



Slika 5.4 Deformirani model fine mreže s prikazom Von Mises naprezanja

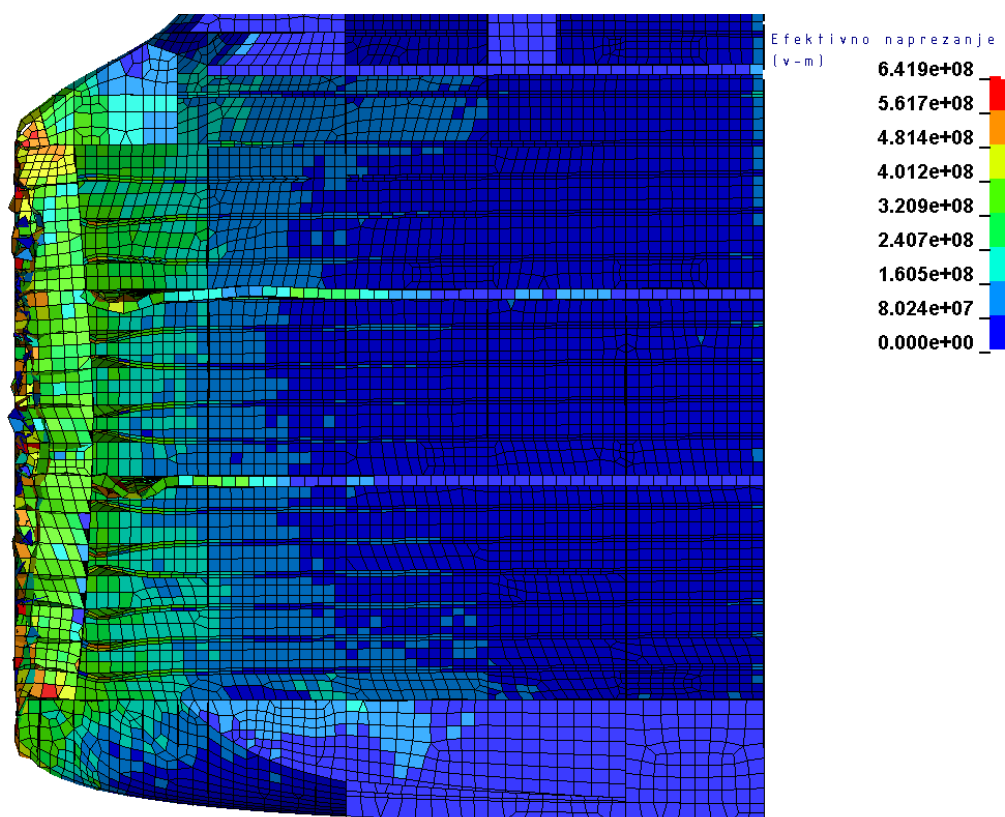
5.2.2. Srednja mreža

Srednja mreža generirana je s elementima veličine 350x350mm a broj elemenata u modelu iznosi 107629 elemenata. Parametri korišteni za ovaj scenarij prikazani su Tablicom 5.3.

Tablica 5.3 Parametri korišteni u scenariju 2 za srednju mrežu

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	3.76E+08
$m_{čv}$ [kg]	9.40E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	90

Slika 5.5 prikazuje deformirani model sa prikazom Von Mises naprezanja u trenutku $t=1,4s$.



Slika 5.5 Deformirani model srednje mreže s prikazom Von Mises naprezanja

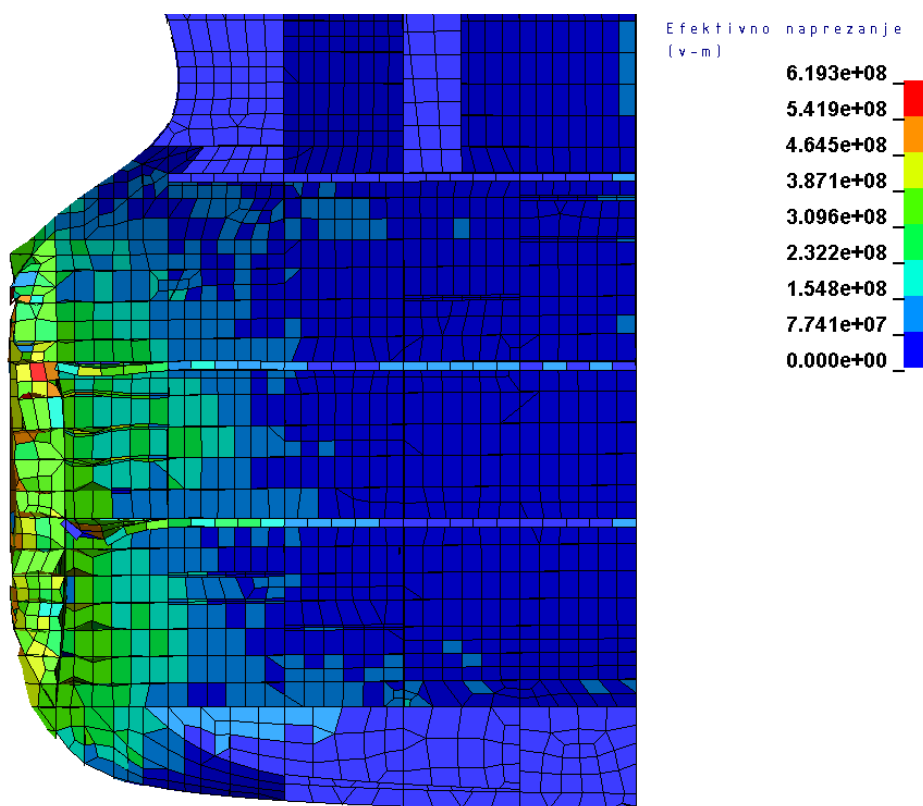
5.2.3. Srednje gruba mreža

Srednje gruba mreža generirana je s elementima veličine 500x500mm a broj elemenata u modelu iznosi 43589 elemenata. Parametri korišteni za ovaj scenarij prikazani su Tablicom 5.4.

Tablica 5.4 Parametri korišteni u scenariju 2 za srednje grubu mrežu

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	3.76E+08
$m_{čv}$ [kg]	9.40E+07
ε_f	0.069
α_s [°]	90

Slika 5.6 prikazuje deformirani model sa prikazom Von Mises naprezanja u trenutku $t=1,4s$.



Slika 5.6 Deformirani model srednje grube mreže s prikazom Von Mises naprezanja

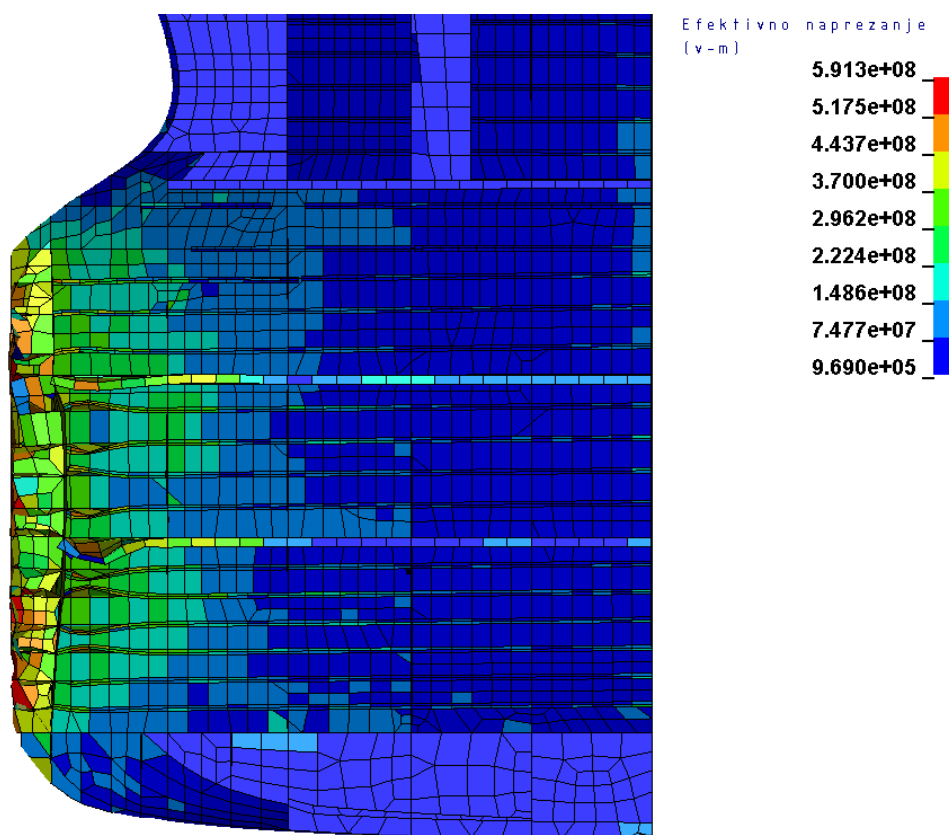
5.2.4. Gruba mreža

Gruba mreža generirana je s elementima veličine 650x 650 a broj elemenata u modelu iznosi 29003 elemenata. Parametri korišteni za ovaj scenarij prikazani su Tablicom 5.5.

Tablica 5.5 Parametri korišteni u scenariju 2 za grubu mrežu

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	3.76E+08
$m_{čv}$ [kg]	9.40E+07
ϵ_f	0.06
α_s [°]	90

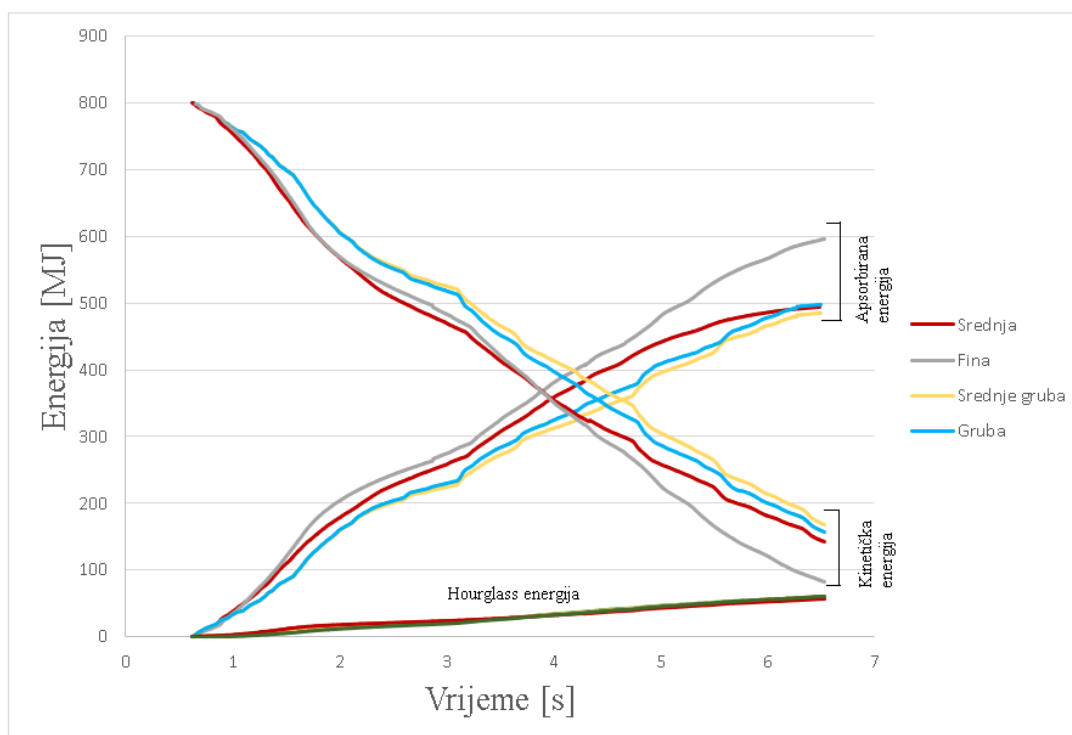
Slika 5.6 prikazuje deformirani model sa prikazom Von Mises naprezanja u trenutku $t=1,4s$.



Slika 5.7 Deformirani model grube mreže s prikazom Von Mises naprezanja

5.2.5. Analiza rezultata za scenarij 2

Prema prikazanim slikama u prijašnjim podnaslovima može se uočiti kako se maksimalno efektivno Von Mises naprezanje smanjuje sa povećanjem veličine elemenata. Također, može se uočiti kako se u prikazu naprezanja za finu mrežu vidi najveća razlika u odnosu na sva četiri proračuna. Slika 5.8 prikazuje dijagram sa usporednim prikazom apsorbirane, kinetičke i hourglass energije za sve četiri generirane mreže.



Slika 5.8 Dijagram usporedbe energija za sve generirane mreže

Iz prikazanog dijagrama lako se može uočiti kako veličina elemenata generirane mreže utječe na dobivene rezultate. Zanimljivo je uočiti da hourglass energija ostaje praktički nepromijenjena za sve veličine mreža. Također, prema prikazanom dijagramu može se uočiti kako se apsorbirana energija srednje mreže podudara sa rezultatima apsorbirane grube i srednje grube mreže u trenutku prije zaustavljanja broda. Krivulja apsorbirane energije srednje mreže, naime, pokazuje najmanje grba što nas dovodi do zaključka da gruba i srednje gruba mreža ipak imaju prevelike elemente za primjenu na ovom modelu. Ipak, zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata teško je donositi zaključke. Također, zbog nedostatka rezultata eksperimentalnih mjerenja, koji bi pružili validaciju u ovom proračunu, primorani smo ovim načinom odabrati najpogodniju veličinu elemenata u generiranoj mreži. Promatrajući prikazane rezultate dolazimo do zaključka da mreža sa elementima veličine 350x350mm najbolje odgovara proračunu sa ovim modelom. Stoga, u daljnjim proračunima koristit će se srednja mreža.

5.3. Scenarij 3 – Sudar pramca pod kutem od 90°

U ovom scenariju bit će proračunata dva slučaja. Prvi, kada je brod u stanju punog krcanja i drugi kada je brod u balastnom stanju krcanja. Kut α_s iznosi 90 stupnjeva. Bitno je napomenuti kako je ova mreža generirana kako je opisano u potpoglavlju 4.2.

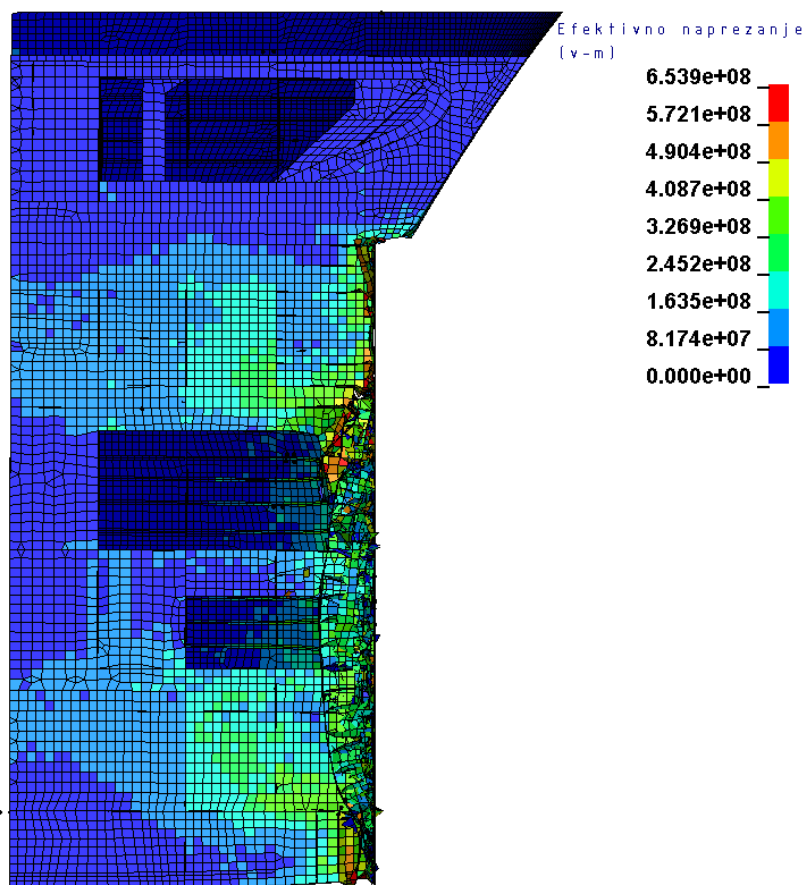
5.3.1. Puno stanje krcanja

Parametri korišteni za ovaj slučaj navedeni su u tablici 5.6

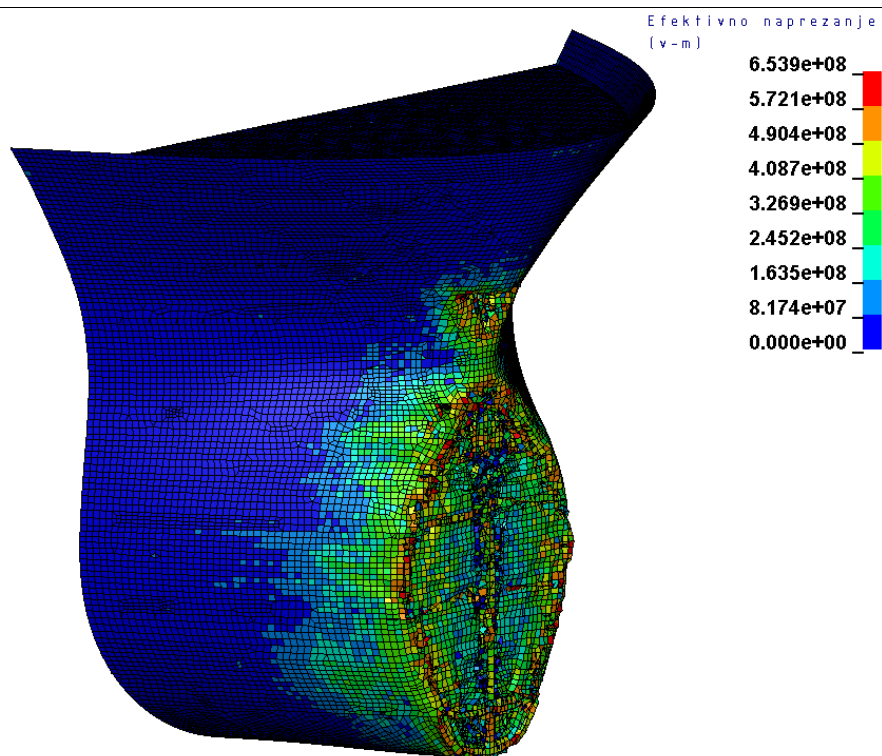
Tablica 5.6 Parametri korišteni u scenariju 3 za puno stanje krcanja

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	3.76E+08
m_{cv} [kg]	9.40E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	90

Slika 5.9 prikazuje deformirani model pramčanog pika za puno stanje krcanja, iz bočnog pogleda, uz prikaz efektivnog Von Mises naprezanja dok Slika 5.10 prikazuje pogled iz izometrije.

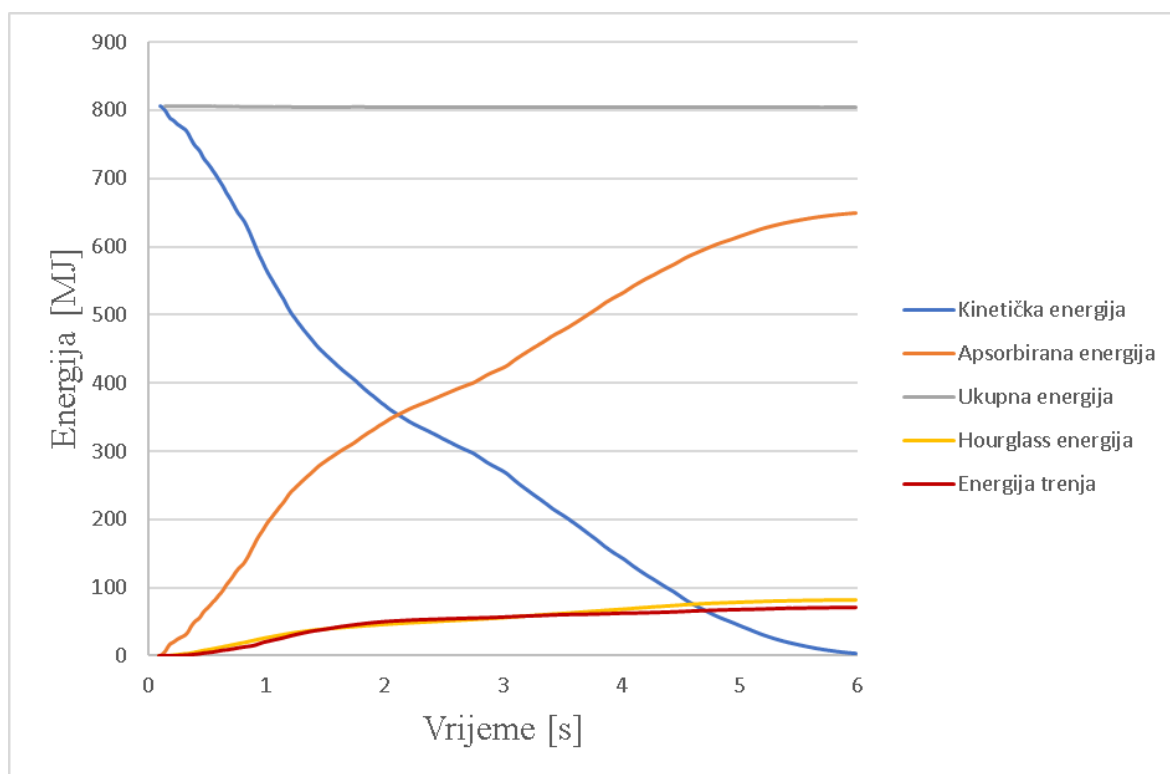


Slika 5.9 Deformirani model 3. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka na presjeku CL



Slika 5.10 Deformirani model 3. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije

Slika 5.11 prikazuje dijagram energija u ovisnosti o vremenu za sudar modela pramčanog pika s zidom pod kutem od 90 stupnjeva u punom stanju krcanja.



Slika 5.11 Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 3. scenarij i puno stanje krcanja

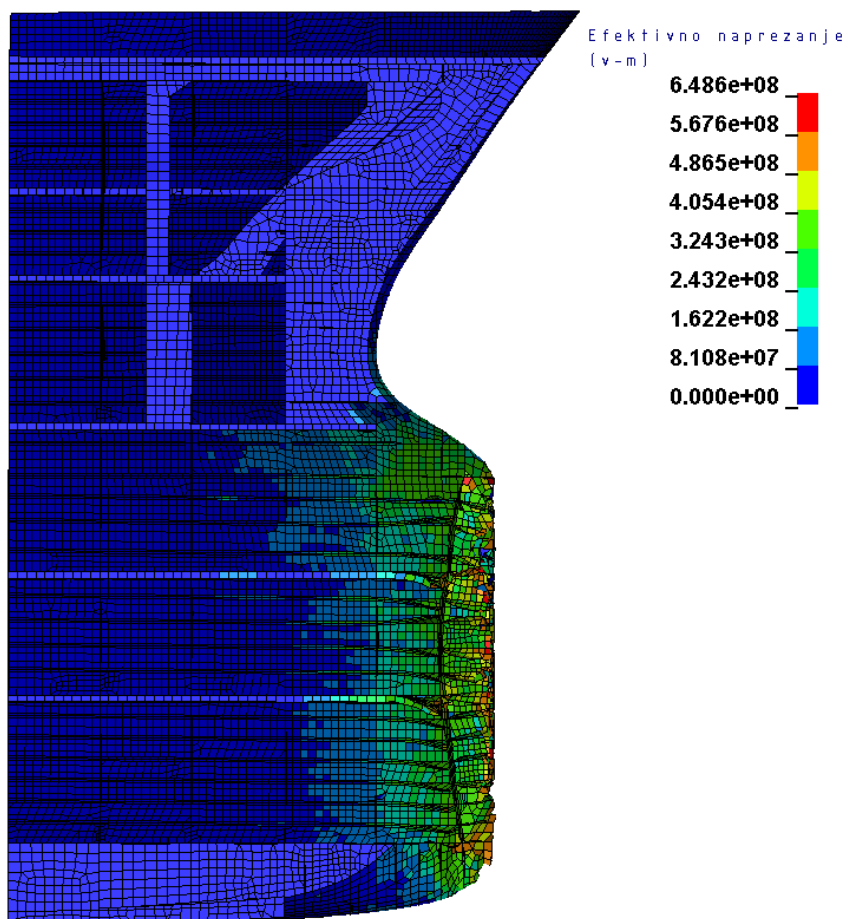
5.3.2. Balastno stanje krcanja

Parametri korišteni za ovaj slučaj navedeni su u Tablici 5.7.

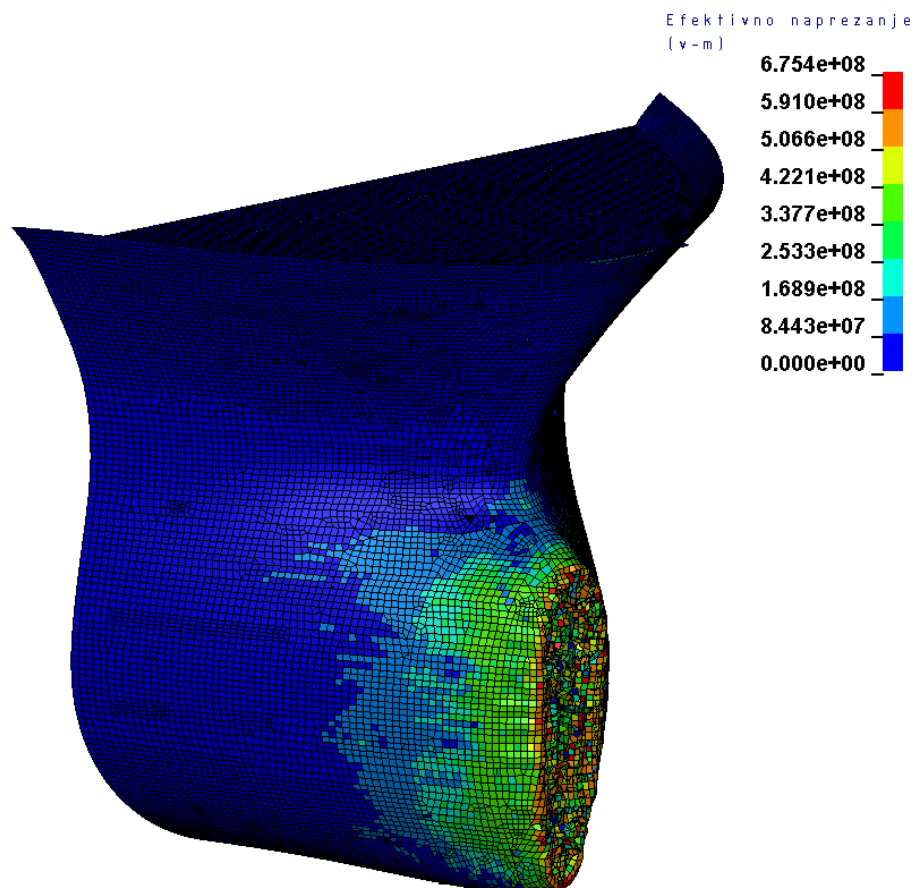
Tablica 5.7 Parametri korišteni u scenariju 3 za balastno stanje krcanja

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	1.50E+08
$m_{\dot{v}}$ [kg]	3.76E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	90

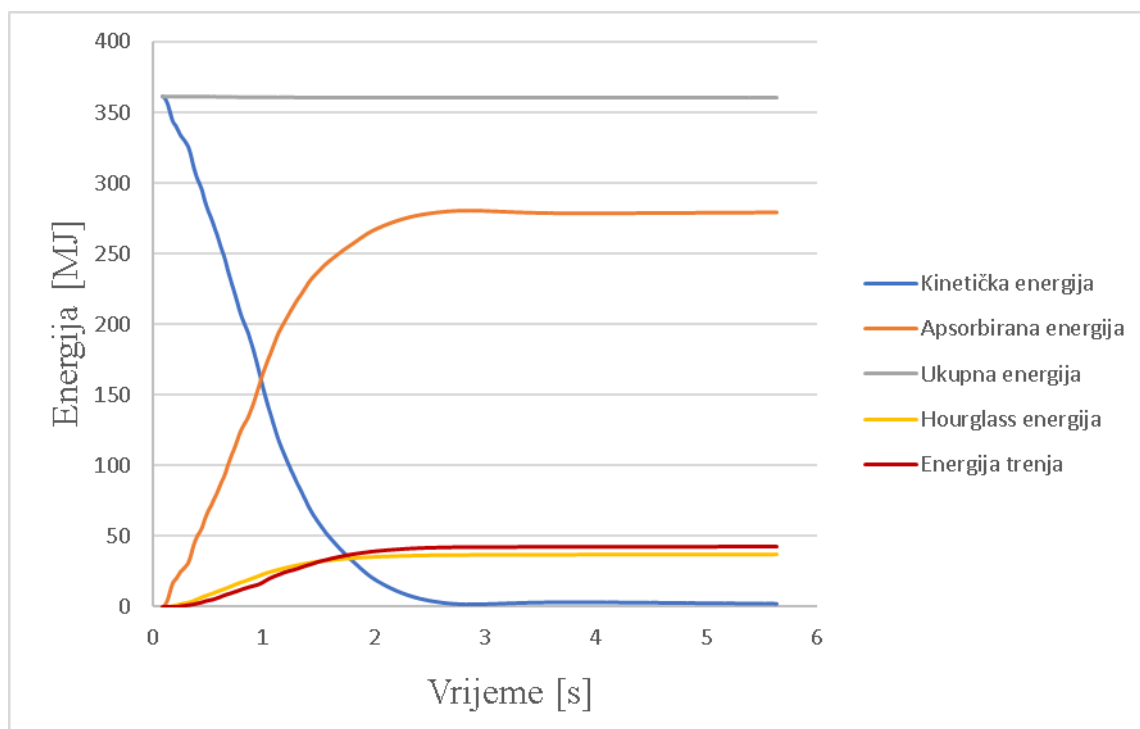
Slika 5.12 prikazuje deformirani model pramčanog pika za balastno stanje krcanja, iz bočnog pogleda, uz prikaz efektivnog Von Mises naprezanja dok Slika 5.10 prikazuje pogled iz izometrije.



Slika 5.12 Deformirani model 3. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka na presjeku CL



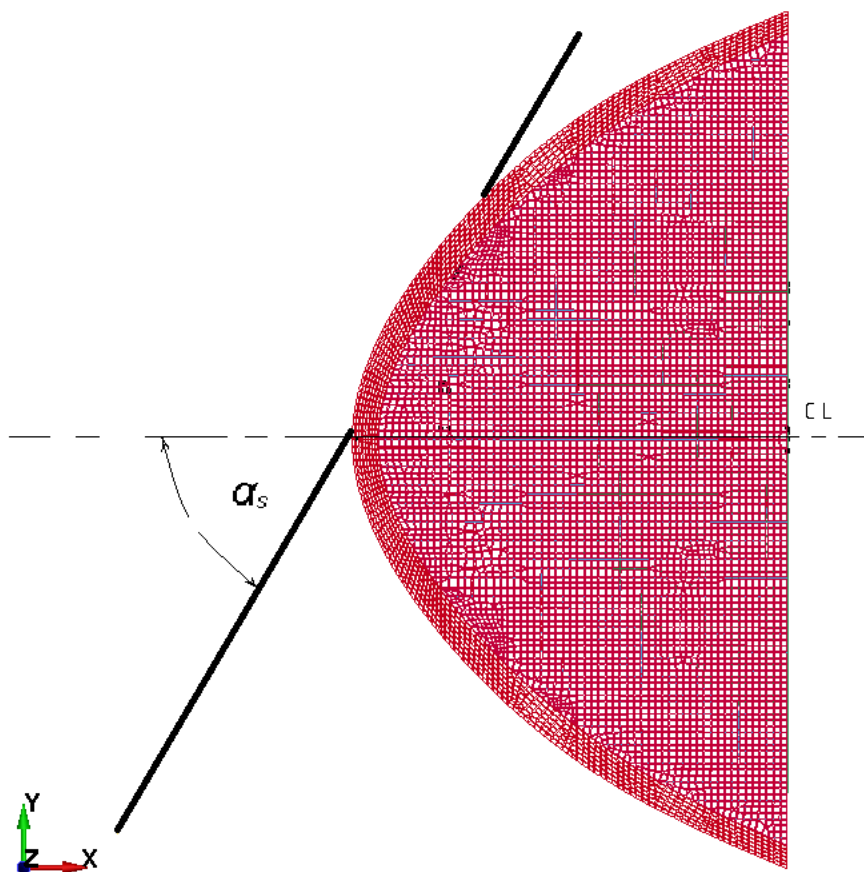
Slika 5.13 Deformirani model 3. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije



Slika 5.14 Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 3. scenarij i balastno stanje krcanja

5.4. Scenarij 4 – Sudar pramca pod kutem od 60°

U ovom scenariju bit će proračunata dva slučaja. Prvi, kada je brod u stanju punog krcanja i drugi kada je brod u balastnom stanju krcanja. Kao što se može vidjeti na Slici 5.15 kut α_s , između simetrale broda i zida, iznosi 60 stupnjeva. Rezultati će biti prikazani u potpunosti za svaki slučaj posebno.



Slika 5.15 Kut sudara za scenarij 4.

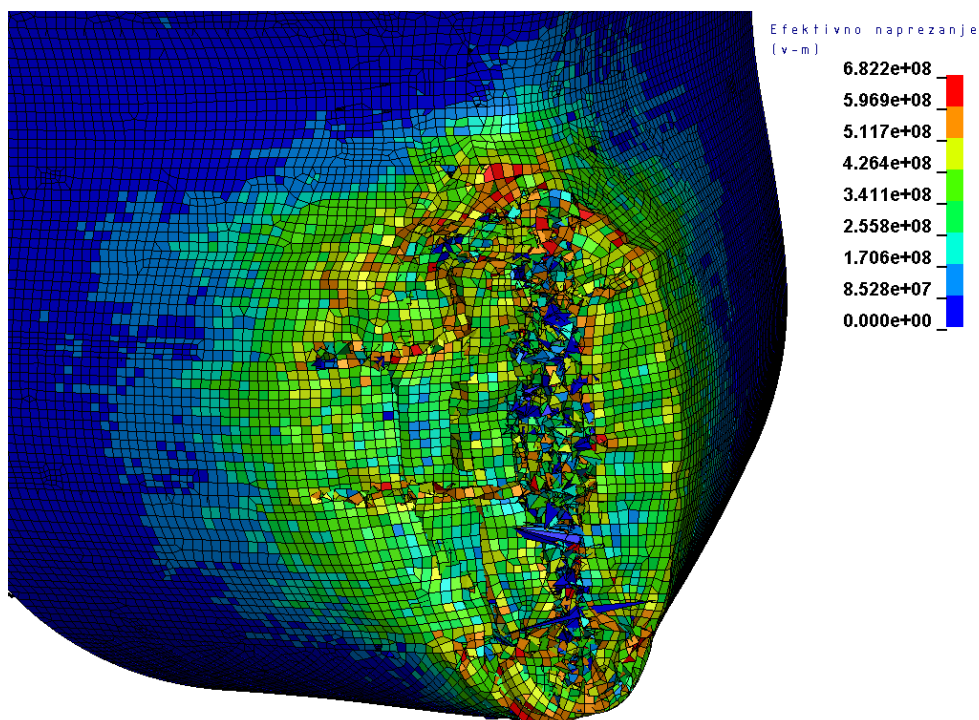
5.4.1. Stanje punog krcanja

Parametri korišteni za ovaj slučaj navedeni su u Tablici 5.8.

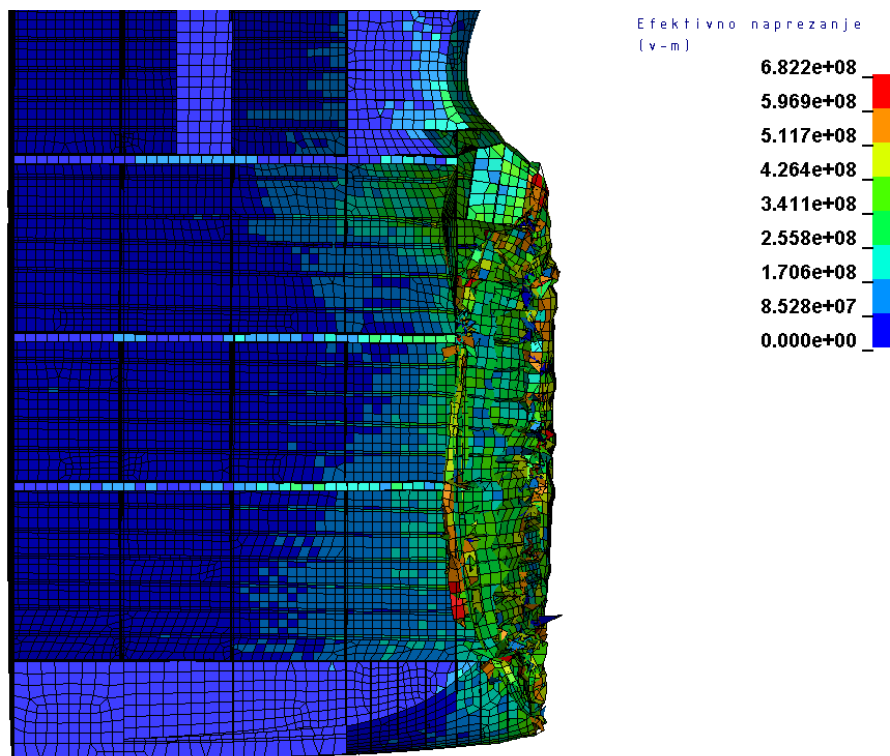
Tablica 5.8 Parametri korišteni u scenariju 4 za puno stanje krcanja

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	3.76E+08
m_{cv} [kg]	9.40E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	60

Na Slici 5.16 i 5.17 prikazani su deformirani modeli sa prikazom efektivnog Von Mises naprezanja.

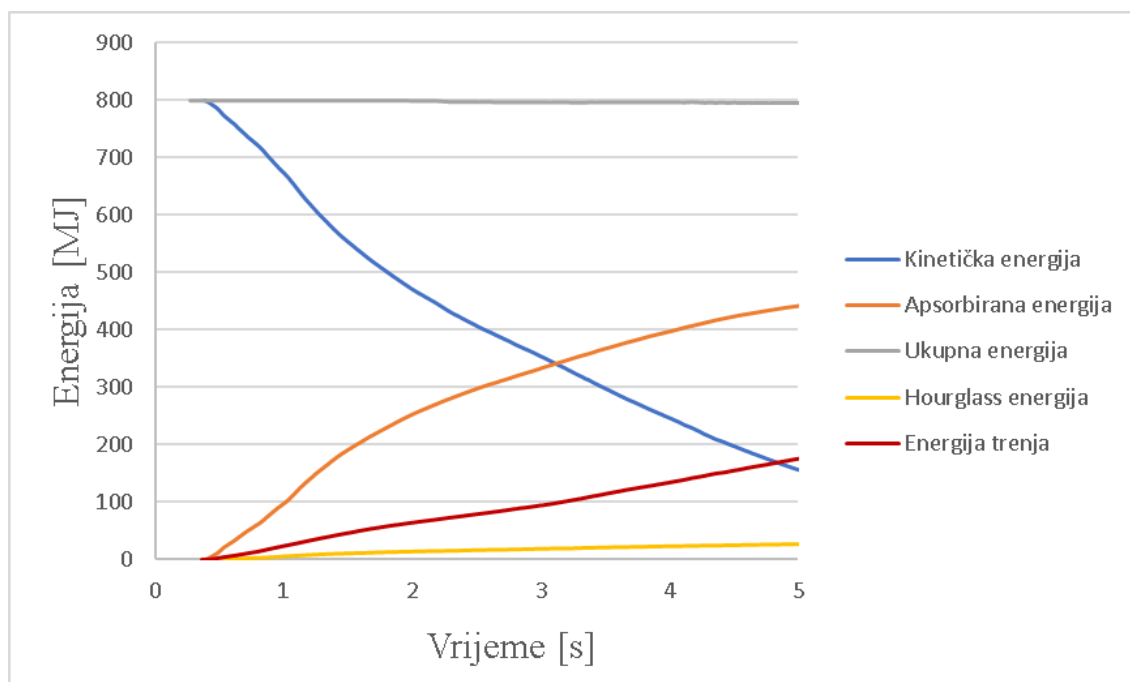


Slika 5.16 Deformirani model 4. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije



Slika 5.17 Deformirani model 4. scenarija (puno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka

Slika 5.18 prikazuje dijagram energija u ovisnosti o vremenu za sudar modela pramčanog pika s zidom pod kutem od 60 stupnjeva u punom stanju krcanja.



Slika 5.18 Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 4. scenarij i puno stanje krcanja

Zanimljivo je primijetiti kako se u sudaru broda sa krutim zidom pod nekim kutom veliki dio kinetičke energije pretvara u energiju trenja zbog klizanja broda po površini krutog zida. Također, može se primijetiti kako pred kraj sudara nagib krivulje energije trenja raste te je preostala kinetička energija preusmjerena u smjeru ravnine zida. U ovakvom scenariju oštećenje konstrukcije pramca znatno je manje u usporedbi sa prijašnjim scenarijem frontalnog sudara.

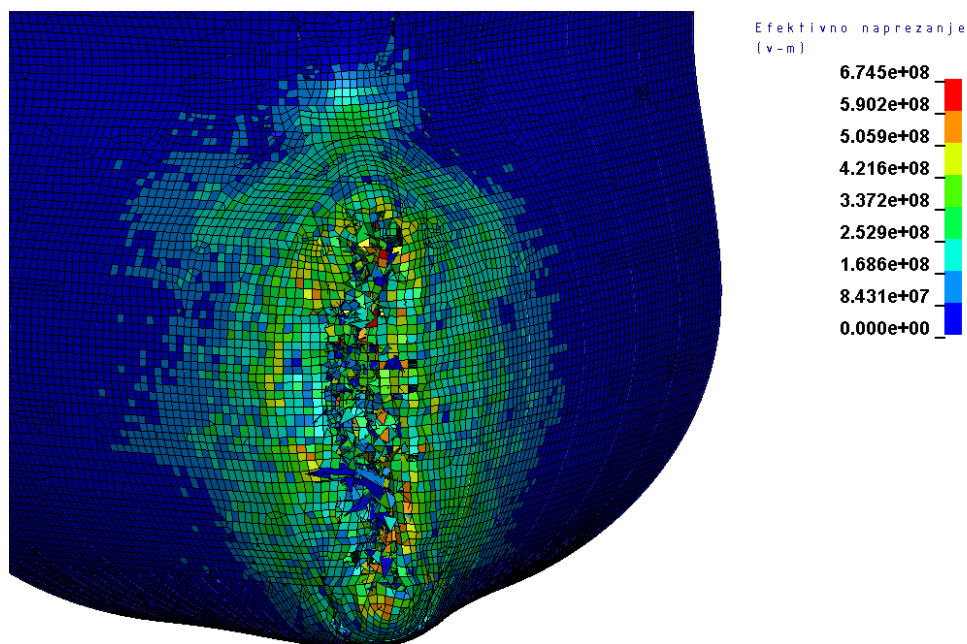
5.4.2. Balastno stanje krcanja

Težina broda u balastnom stanju procijenjena je na 40% ukupne mase u punom stanju krcanja, Parametri korišteni za ovaj slučaj navedeni su u Tablici 5.9

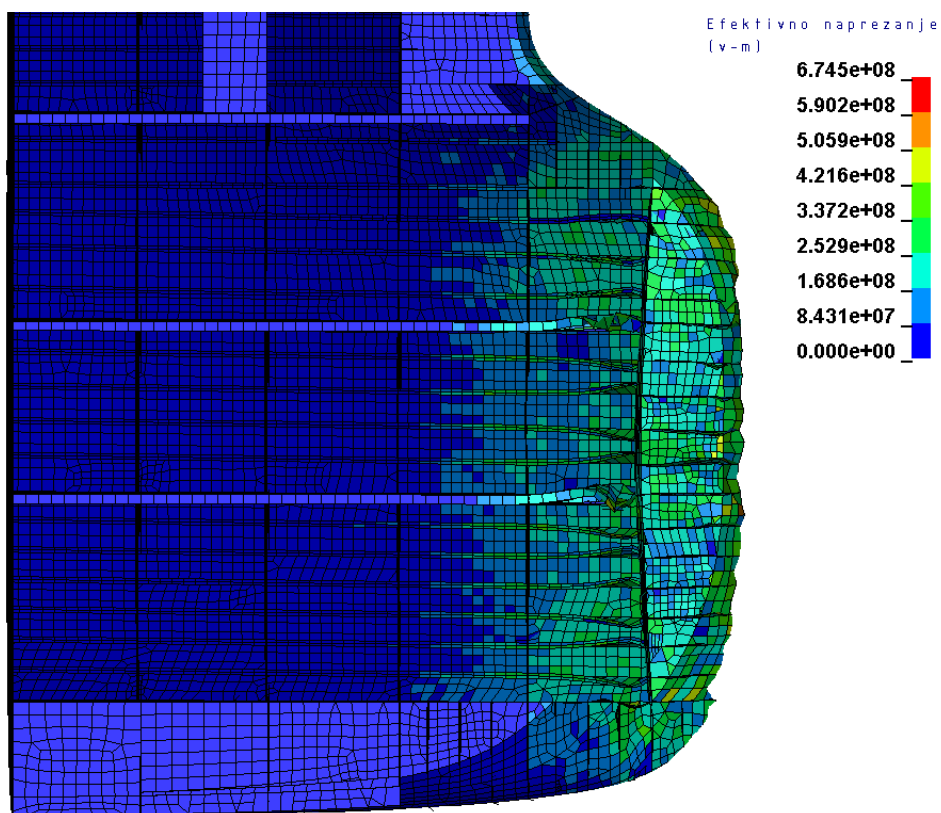
Tablica 5.9 Parametri korišteni u scenariju 4 za balastno stanje krcanja

v , [m/s]	2,06
m_{uk} [kg]	1.50E+08
$m_{čv}$ [kg]	3.76E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	60

Na Slici 5.19 i 5.20 prikazani su deformirani modeli sa prikazom efektivnog Von Mises naprezanja.

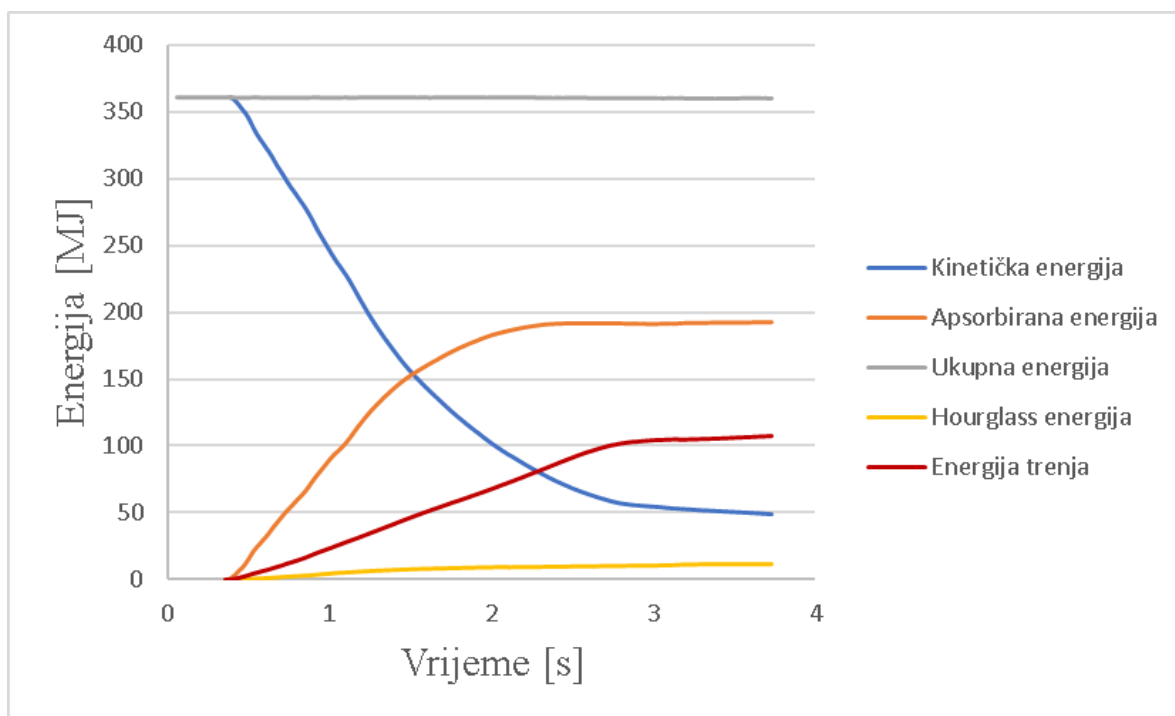


Slika 5.19 Deformirani model 4. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu iz izometrije



Slika 5.20 Deformirani model 4. scenarija (balastno stanje krcanja) s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka

Slika 5.21 prikazuje dijagram energija u ovisnosti o vremenu za sudar modela pramčanog pika s zidom pod kutem od 60 stupnjeva u balastnom stanju krcanja.



Slika 5.21 Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 4. scenarij i balastno stanje krcanja

Za slučaj balastnog krcanja oštećenje pramčane konstrukcije znatno je manje nego u slučaju punog stanja krcanja. Odnos ukupne energije i energije trenja je veći. Na kraju ovog slučaja preostala kinetička energija je također preusmjerena u smjeru ravnine krutog zida a brod nastavlja lagano strugati uz zid te se polako odmiče od njega.

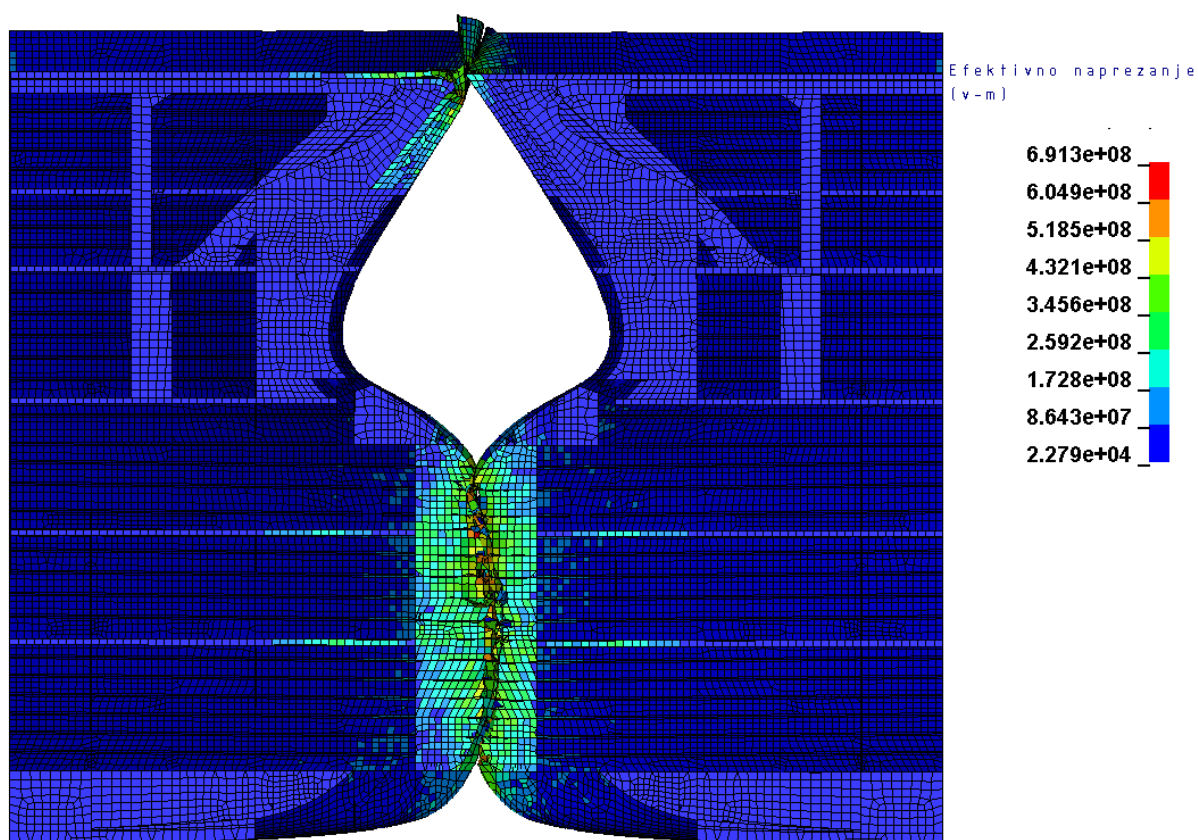
5.5. Scenarij 5 – Frontalni sudar dva pramca

U ovom scenariju frontalno su sudarena dva potpuno identična modela sa podjednakim brzinama u balastnom stanju krcanja pri brzini od 2čv. Parametri korišteni u ovom scenariju prikazani su Tablicom 5.10.

Tablica 5.10 Parametri korišteni u scenariju 5

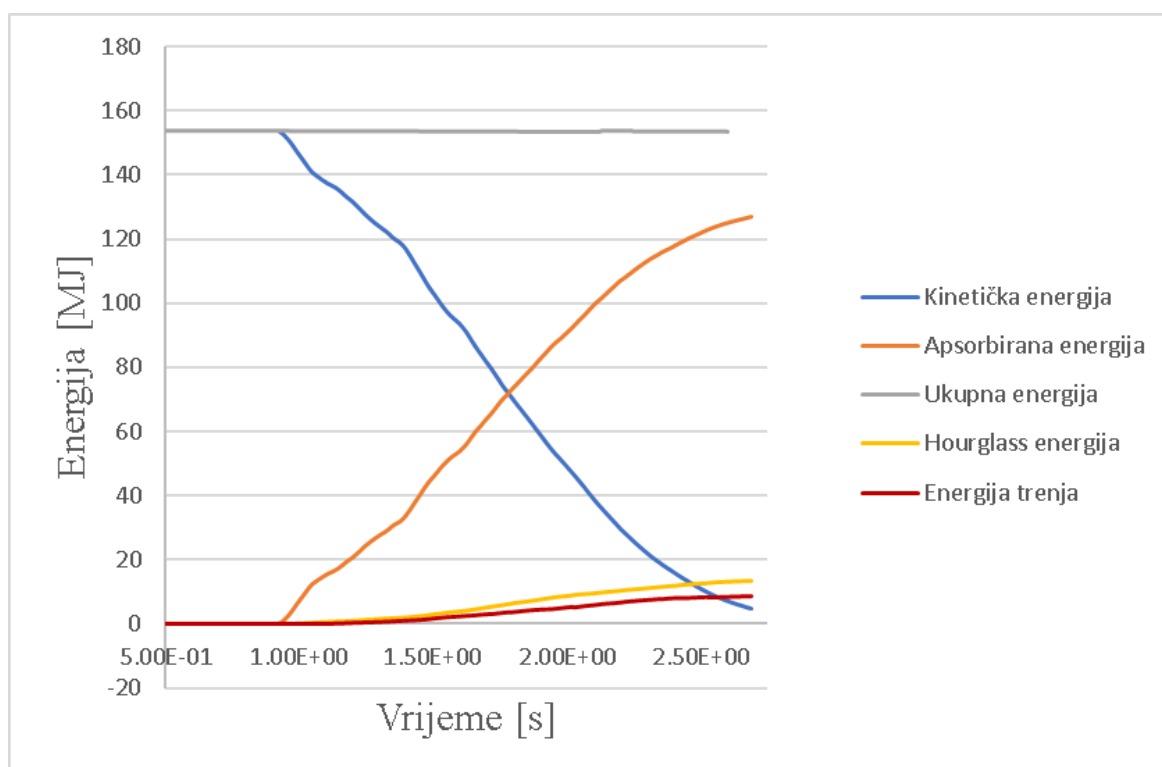
v_1 , [m/s]	1,03
v_2 , [m/s]	1,03
m_{uk} [kg]	1.50E+08
$m_{čv}$ [kg]	3.76E+07
ϵ_f	0.075
α_s [°]	180

Masa je jednaka za oba broda. Slika 5.22 prikazuje efektivno Von Mises naprezanje u trenutku zaustavljanja oba broda.



Slika 5.22 Deformirani model 5. scenarija s prikazom Von Mises naprezanja u pogledu s boka
Na slici se može primijetiti kako je desni model poprimio značajnu deformaciju bulba dok mu je paluba ostala neoštećena.

Slika 5.23 prikazuje dijagram energija u ovisnosti o vremenu za scenarij 5.



Slika 5.23 Dijagram energija u ovisnosti o vremenu za 5. scenarij

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je upoznati se sa unutarnjom mehanikom i vanjskom dinamikom sudara brodova, te usvojiti proces pripreme proračuna nelinearnom metodom konačnih elemenata. To je zahtijevalo rad u više programskih paketa. Također, kako bi odabrani parametri najbolje odgovarali scenariju koji se simulira potrebno je upoznati se sa velikim brojem modelskih ispitivanja i proračuna nelinearnom metodom konačnih elemenata koji su provedeni od strane stručnjaka diljem svijeta. Pramac, baš kao i brod u cjelini zahtjevan je i skup proizvod, te se logički može zaključiti da su modelska ispitivanja također zahtjevana i skupa. Kao što je objašnjeno u ovom radu, rezultati modelskih ispitivanja sa malim modelima nisu primjenjivi na brodove u punoj veličini jer ne opisuju stvarnu unutarnju mehaniku tijekom sudara broda. Nedostatkom rezultata modelskih ispitivanja nemoguće je provesti validaciju proračuna nelinearnom metodom konačnih elemenata. Ipak, usporedbom rezultata vlastitog proračuna s onima kod kojih je validacija dostupna, provjerom samog modela, te drugim provjerama oslanjajući se na analitičke i empirijske metode nelinearna metoda konačnih elemenata i dalje pruža koristan alat u procjeni oštećenja brodske konstrukcije. Zaključci doneseni provedenim proračunima u ovom radu su sljedeći:

- Korištenje jednostruke preciznosti je opravdano za ovakve scenarije sudara u kojem je vrijeme samog scenarija kratko
- Koeficijent trenja bitan je faktor kod sudara broda sa krutim zidom pod nekim kutom, što je veći kut sudara to će energija trenja biti veća
- Različite veličine elemenata u generiranoj mreži daju odstupanja rezultata od 16,3%

Proces prikazan u ovom radu, iako oduzima puno vremena i dalje je jeftiniji nego modelska ispitivanja. Prema tome, u skorijoj budućnosti očekuje se regulativa od strane klasifikacijskih društva koja će zahtijevati proračun nelinearnom metodom konačnih elemenata i evaluaciju sigurnosti konstrukcije nakon sudara za svaki novi brod. Također, iako modeliranje i generiranje mreže konačnih elemenata oduzima puno vremena, jednom kada je model gotov vrlo je lako provesti razna ispitivanja sa istim modelom. Dok se programski paketi kao što je LS-DYNA koriste u svrhe proračuna raznih fizičkih scenarija sa velikom točnošću također pružaju dobar alat za studente gdje studenti imaju priliku na brz i jednostavan način vizualizirati ponašanje nekog kompleksnog sustava kakav je npr. brodska konstrukcija. Bilo bi korisno u budućnosti stvoriti otvorenu bazu pripremljenih scenarija i modela koji bi služili u svrhu učenja i brze analize različitih problema koji se mogu pojaviti u konstruiranju raznih proizvoda.

LITERATURA

- [1] Hrvatska tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2018
<https://tehnika.lzmk.hr/pomorski-promet/>
- [2] Ko, Y. G., Kim, S. J., Sohn, J. M., & Paik, J. K. (2017). A practical method to determine the dynamic fracture strain for the nonlinear finite element analysis of structural crashworthiness in ship–ship collisions. *Ships and Offshore Structures*, 13(4), 412–422. doi:10.1080/17445302.2017.1405584
- [3] Ship collision: A brief survey, Miguel Angel Gonzales Calle; Marcilio Alves, Group of Solid Mechanics and Structural Impact, Polytechnic School of the University of Sao Paulo, 2011
- [4] A PROPOSED METHOD OF PREDICTING SHIP COLLISION DAMAGE, Koichi Hagiwara, Hisato Takanabe and Hajime Kawano , Pergamon Press Ltd., 1983
- [5] Joonmo Choung, Ji-Myung Nam, Tae-Bum Ha, Assessment of residual ultimate strength of an asymmetrically damaged tanker considering rotational and translational shifts of neutral axis plane, *Marine Structures*, Volume 25, Issue 1, 2012, Pages 71-84, ISSN 0951-8339, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.12.004>.
- [6] Nonlinear Finite Element Analysis of Marine and Offshore Structures, ABS, 2021
- [7] <https://www.mentalfloss.com/posts/how-titanic-changed-maritime-safety>
- [8] <https://www.history.com/topics/1980s/exxon-valdez-oil-spill>
- [9] <https://intimesgoneby.wordpress.com/2015/07/25/on-this-day-the-ss-andrea-doria-collided-with-the-ms-stockholm-in-1956/>
- [10] The mechanics of ship collision, Shengming Zhang, Department of naval architecture and offshore engineering, Technical univesitz of Denmark, 1999
- [11] Review of experiments and calculation procedures for ship collision and grounding damage. Liu, B., Pedersen, P. T., Zhu, L., & Zhang, S., *Marine Structures*, 59, 105–121, (2018). doi:10.1016/j.marstruc.2018.01.008
- [12] Bin Liu, C. Guedes Soares, Recent developments in ship collision analysis and challenges to an accidental limit state design method, *Ocean Engineering*, Volume 270, 2023, 113636, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113636>
- [13] Simulation of the Behavior of a Ship Hull under Grounding: Effect of Applied Element Size on Structural Crashworthiness, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2019, 7(8), 270; <https://doi.org/10.3390/jmse7080270>

-
- [14] <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2007/performance-of-ls-dyna-with-double-precision-on.pdf>
- [15] <https://www.dynasupport.com/howtos/general/double-precision>
- [16] Hou, Yong & Min, Junying & Lin, Jianping & Liu, Zhimiao & Carsley, John & Stoughton, Thomas. (2017). Springback prediction of sheet metals using improved material models. *Procedia Engineering*. 207. 173-178. 10.1016/j.proeng.2017.10.757.
- [17] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_naprezanja
- [18] A comparative analysis of several material models in LS-DYNA at high velocity impact, Arina Bakulina and Aandrey Buzyurkin, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of Siberian Branch of RAS, 4/1 Instituskaya str., Novosibirsk, Russia, 2019 <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922101007>
- [19] https://www.testpaks.com/ls-dyna07/ls-dyna07_paper.htm#:~:text=The%20LS%2DDYNA%20MAT24%20is,elastic%2Dplastic%20curve%20as%20follows.
- [20] Prabowo, A.R., Sohn, J.M., Bae, D.M. i Cho, J.H. (2018). Estimating Structure Response and Progressive Failure of a Ship Hull under Side-Bow Collisions. *Tehnički vjesnik*, 25 (5), 1513-1522. <https://doi.org/10.17559/TV-20170215113629>
- [21] The Effect of medium strain rates on the mechanical properties of high performance steels, S.Y.Kong, & Remennikov, Alex & Uy, Brian. (2010).
- [22] Miguel A.G. Calle, Patricia Verleysen, Marcílio Alves, Benchmark study of failure criteria for ship collision modeling using purpose-designed tensile specimen geometries, *Marine Structures*, Volume 53, 2017, Pages 68-85, ISSN 0951-8339, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.01.001>.
- [23] Carvalho, Hermes & Ridwan, Ridwan & Sudarno, Sudarno & Prabowo, Aditya & Bae, Dong & Huda, Nurul. (2023). Failure criteria in crashworthiness analysis of ship collision and grounding using FEA: Milestone and development. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*. 22. 30. 10.20961/mechanika.v22i1.70959.
- [24] Hervé Le Sourné, Nicolas Besnard, Cedric Cheylan, and Natacha Buannic. "A Ship Collision Analysis Program Based on Upper Bound Solutions and Coupled with a Large Rotational Ship Movement Analysis Tool" *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2012, 2012. doi:10.1155/2012/375686
- [25] <http://www.zkwp.put.poznan.pl/sites/files/dydaktyka/MK/Pytania-ENG/Question%20no%2023.pdf>
- [26] Significant ships, The Royal Institution of Naval Architecture, 1999
-

- [27] <http://www.visualfea.com/manual-normal/html/4-1-1.htm>
- [28] <https://www.oasys-software.com/dyna/wp-content/uploads/2021/04/D3PLOT-manual-18.0.pdf>

PRILOZI

- I. CD-R disc