

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Luka Matković**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Luka Matković

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru profesoru dr.sc. Smiljku Rudanu na pruženoj pomoći i savjetima.

Zahvaljujem se obitelji, djevojci i prijateljima na pruženoj podršci.

Luka Matković



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Matković** JMBAG: **0035217441**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza otpornosti na sudar malih autonomnih površinskih plovila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Crashworthiness Analysis of Small Autonomous Surface Vessels**

Opis zadatka:

U razvoj autonomnih plovila različitih vrsta, dimenzija i namjene ulaže se znatan istraživački napor. Autonomnost plovila može biti manja, npr. tako da se odnosi na veći broj autonomnih podsustava broda, ili veća, kada govorimo o plovilima nadziranima s udaljenosti i o plovilima bez ljudske posade. U ovome radu predmet interesa su mala plovila visoke autonomije, ukupne dužine manje od deset metara, a koja mogu obavljati raznovrsne zadatke: jednostavne operacije u zatvorenim vodama (lukama, jezerima i sl.), kao i brze ili dugotrajne aktivnosti na otvorenom moru, poput dostave ili nadzora. Kao i sva druga plovila, i autonomna plovila moraju imati zadovoljene kriterije sigurnosti konstrukcije. Istodobno, konstrukcija autonomnih plovila može se značajno razlikovati od tradicionalne konstrukcije malih brodova. U radu je potrebno napraviti pregled postojećih konstrukcijskih rješenja malih autonomnih površinskih plovila, kako za izvedena, tako i za konceptualna rješenja. Zatim valja sagledati hipotetske situacije koje mogu ugroziti brodsku konstrukciju, s naglaskom na sudar i nasukavanje broda. Za odabrano plovilo potrebno je zatim provesti analizu mogućnosti zaštite njegove konstrukcije s obzirom na specifičnosti koje proizlaze iz namjene, svojstava i specifičnosti malog autonomnog broda. Metodom konačnih elemenata utvrditi mogućnost zaštite broda posebnim konstrukcijskim detaljima, poput jakih bokoštutnika.

U završnom radu je potrebno:

1. Proučiti specifičnosti malih autonomnih brodova u kontekstu integriteta njihove konstrukcije.
2. Analizirati tipične situacije i scenarije koji mogu ugroziti integritet konstrukcije broda.
3. Odabrati plovilo jednostavne konstrukcije i analizirati mogućnost njegove zaštite bokoštutnicima ili sličnim rješenjima.
4. Generirati mrežu konačnih elemenata za model broda, uključujući zaštitne elemente te provesti strukturnu analizu konstrukcije za odabrana opterećenja.
5. Analizirati rezultate analize s aspekta čvrstoće, ali uz osvrt na tehnološke i ekonomske prednosti i nedostatke primijenjenog i drugih razmatranih rješenja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
ABSTRACT .....	VII
1. UVOD.....	1
2. AUTONOMNI BRODOVI .....	2
2.1. Pojava sudara kod autonomnih brodova .....	2
2.2. Konstrukcija autonomnih brodova.....	3
2.3. Primjeri iz industrije.....	4
2.3.1. L3HARRIS C-WORKER 4 .....	4
2.3.2. AquaticDrones Pheonix 5 EP.....	5
2.3.3. ULAQ ASUV.....	5
3. MODEL BRODICE.....	7
3.1. Pristup izradi modela .....	7
4. IZRADA GEOMETRIJE MODELA .....	13
5. MREŽA KONAČNIH ELEMENATA.....	16
5.1. Metoda konačnih elemenata.....	16
5.2. Generiranje mreže konačnih elemenata .....	16
5.3. Izrada bokobrana.....	20
6. ANALIZA MODELA .....	23
6.1. LS Dyna .....	23
6.2. Frontalni okomiti sudar.....	27
6.3. Frontalni sudar pod kutem od 30° .....	38
7. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

## POPIS SLIKA

Slika 1	Nepropusna sudarna pregrada [1]	4
Slika 2	L3HARRIS C-WORKER 4 [2]	4
Slika 3	AquaticDrones Pheonix 5 EP [3]	5
Slika 4	ULAQ ASUV [4]	6
Slika 5	Brodica za traganje i spašavanje [5]	7
Slika 6	ULAQ ASUV – ravna paluba bez nadgrađa [4]	8
Slika 7	Nacrt strukture brodice – uzdužni presjek [6]	8
Slika 8	Nacrt strukture brodice – glavna paluba [6]	9
Slika 9	Nacrt strukture brodice –rebro 7 [6]	9
Slika 10	Nacrt strukture brodice – rebro 8 [6]	10
Slika 11	Nacrt strukture brodice – rebro 10 [6]	10
Slika 12	Nacrt strukture brodice – rebro 20 [6]	11
Slika 13	Krivulja stvarnih naprezanja i deformacija za AL5083 H111 [7]	12
Slika 14	Korisničko sučelje CATIA-e	13
Slika 15	Oplata broda modelirana površinama	14
Slika 16	Brodsko oplata sa rebrima, pregradama i krmenim zrcalom	14
Slika 17	Geometrijski model „izrezan“ na najmanje dijelove ( bez palube)	15
Slika 18	FEMAP korisničko sučelje	17
Slika 19	STEP model uvezen u FEMAP-svaka boja je jedna površina	17
Slika 20	2D elementi a) trokutni , b) pravokutni	18
Slika 21	Generirana mreža konačnih elemenata	18
Slika 22	Presjek modela broda sa pregradama	19
Slika 23	Mreža konačnih elemenata broda sa palubom	20
Slika 24	Krivulja tlačnog naprezanja u ovisnosti o deformaciji za PE pjenu [10]	21
Slika 25	Prikaz modela broda sa bokoštitnicima širine 300 mm	22
Slika 26	Generiranje analize modela za LS Dynu u FEMAP-u	24
Slika 27	LS Dyna Keyword datoteka	24
Slika 28	korisničko sučelje LS PrePost programskog paketa LS Dyna	25
Slika 29	Zadavanje svojstava PE pjene u LS Dyna Keyowd datoteci	26
Slika 30	Korisničko sučelje LS-Run	27
Slika 31	Frontalni sudar u krutu barijeru	27
Slika 32	Prikaz plastičnih deformacija na pramcu broda pri frontalnom sudaru sa PE bokoštitnikom, brzina 4,5 čv (slučaj A)	29
Slika 33	Prikaz Von Mises naprezanja na pramcu broda pri frontalnom sudaru sa PE bokoštitnikom, brzina 4,5 čv (slučaj A)	29
Slika 34	Prikaz Von Mises naprezanja na pramcu broda pri frontalnom sudaru bez PE bokoštitnika, brzina 4,5 čv (slučaj B)	30
Slika 35	Najveće naprezanje konstrukcije u sudaru brzine 4,5 čv na krivulji deformacije-naprezanja za AL5083 H111	31
Slika 36	Prikaz deformacije PE pjene na pramcu broda, brzina 4,5 čv	31
Slika 37	Prikaz pada kinetičke energije u vremenu prilikom frontalnog sudara brzinom 4,5 čv	32
Slika 38	Prikaz ubrzanja prilikom sudara brzinom 4,5 čv, A i B slučajevi	33
Slika 39	Naprezanja u trupu broda sa PE bokoštitnicima prilikom frontalnog sudara, brzina 22 čv	34

---

Slika 40	Prikaz presjeka broda (sa PE bokoštitnicima) na uzdužnici i naprezanja u frontalnom sudaru, brzina 22 čv	34
Slika 41	Određeni elementi su dosegli granicu loma, što LS Dyna prikazuje uklanjanjem elementa u deformiranom prikazu	35
Slika 42	Ubrzanja pri frontalnom sudaru brzinom 22 čv	36
Slika 43	Prikaz frontalnog sudara brzinom od 39 čvorova	36
Slika 44	Prikaz Von Mises naprezanja u sudaru brzinom 39 čv (presjek po uzdužnici broda)	37
Slika 45	Prikaz broda za slučaj frontalnog sudara pod kutem 30° odozgo	38
Slika 46	Prikaz Von Mises naprezanja pri frontalnom sudaru pod kutem 30°, brod sa PE bokoštitnicima, brzina 10 čv	39
Slika 47	Prikaz plastičnih deformacija pri frontalnom sudaru pod kutem 30°, brod sa PE bokoštitnicima, brzina 10 čv	39
Slika 48	Prikaz točaka promjena polumjera na pramcu broda	40
Slika 49	Prikaz plastičnih deformacija pri frontalnom sudaru pod kutem od 30°, brod sa PE bokoštitnicima, brzina 5,5 čv	41
Slika 50	Prikaz Von Mises naprezanja pri frontalnom sudaru pod kutem 30°, brod sa PE bokoštitnicima, brzina 5,5 čv	41
Slika 51	Naprezanje pri sudaru pod kutem 30°, brzina 5,5 čv na krivulji deformacija-naprezanja za AL5083 H111	42

## POPIS TABLICA

Tablica 1	Parametri brodice za traganje i spašavanje.....	7
Tablica 2	Debljine profila aluminijske legure [6] .....	11
Tablica 3	Svojstva AL5083 H111 [7] .....	11
Tablica 4	Analize sudara promatrane u ovom radu.....	23



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$E$	Pa	Youngov modul elastičnosti
$B_C$	m	širina na zgibu, rebro 10
$B_H$	m	širina trupa
$L_H$	m	duljina trupa
$T_{max}$	m	najveći gaz
$m_{LDC}$	kg	istisnina
$\varepsilon$	mm/mm	relativna deformacija
$\nu$		Poissonov omjer
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\sigma$	MPa	naprezanje

## SAŽETAK

S razvojem računalne tehnologije i automatizacije, sve je više autonomnih brodova na moru. Zbog svojih specifičnosti uslijed nedostatka posade, ti brodovi mogu biti u opasnosti od izazivanja sudara. Iako nije moguće zaštititi ih od svih vrsta sudara, potrebno je promotriti najizglednije sudare, a to su frontalni pri manjim brzinama.

Model broda izrađen je u CATIA V5 programskom paketu po nacrtima brodice za traganje i spašavanje. Za zaštitu odabran je integrirani bokoštitnik od polietilenske pjene.

Mreža konačnih elemenata izrađena je FEMAP/NX Nastran programskom paketu.

Promatrana su dva tipa sudara: frontalni okomiti i frontalni pod kutem od 30°. Za oba slučaja nelinearnom analizom metodom konačnih elemenata u programskom paketu LS Dyna ispitana je maksimalna brzina sudara koju brodska konstrukcija može pretrpjeti bez trajnih oštećenja. Također je ispitana analiza sudara maksimalnom brzinom i sudara nezaštićenog broda. Za sve analize dan je slikovni prikaz naprezanja i deformacija i dijagrami pada kinetičke energije.

**Ključne riječi:** Sudar brodova, bokoštitnici, nelinearna FEM analiza,

**ABSTRACT**

With the development of computer technology and automation, there is an increasing number of autonomous ships in operation. Due to the lack of human involvement, these ships may be at risk of causing collisions. Although it is not possible to protect the ship from all types of collisions, there are several most likely collision situations in which the ship could be found and those include frontal collisions at lower speeds.

The ship model was created in the CATIA V5 software package based on search and rescue boat design. An integrated polyethylene foam fender was selected for protection.

Finite element mesh was generated in FEMAP/NX Nastran software package.

Two types of collisions were observed: vertical head-on and head-on at a 30-degree angle. For both cases, a nonlinear finite element analysis was conducted using the LS Dyna software package to determine the maximum collision speed that the ship structure can withstand without permanent damage. An analysis of a collision at maximum speed and a collision of an unprotected ship was also conducted. For all analyses, a graphical representation of stress and deformation along with kinetic energy decline diagrams were provided.

Key words: Ship collision, boat fender, nonlinear FEM analysis

## 1. UVOD

Velikim napretkom računalne moći, razvojem kompleksnih algoritama i tzv „umjetne inteligencije“ polako ali sigurno dolazi do revolucije u brodogradnji, posebice kod malih brodova. Izradom autonomnih brodova koji upravljaju sami koristeći razne sustave, bez posade otvaraju se razne mogućnosti za njihovu eksploataciju. Posebno su zanimljivi manji brodovi, veličine do desetak metara koji na sebi nose samo svrsihodnu aparaturu. Korištenje umjetne inteligencije za samostalnu eksploataciju brodova sa sobom nosi problem izbjegavanja sudara, kako sa obalom tako i sa drugim brodovima i ostalim plutajućim objektima.

Mnogo se ulaže u sustave za izbjegavanje sudara, međutim ovakva tehnologija, posebice u začetima, sklona je pogreškama; manjak ljudske intuicije, zbog recimo nepredvidivosti ili nepoštivanja COLREG pravila nadolazećeg broda može doći do sudara.

Također u slučaju kvara pogona, poriva ili sustava upravljanja, posebice na velikim udaljenostima od luke, bez ljudske posade koja bi sličan kvar lako otklonila, brod se nađe u situaciji u kojoj je sudar moguć čak i ako je sustav za izbjegavanje sam po sebi ispravan, ali nije u mogućnosti izvesti izbjegavajuće manevre.

Iako na brodu nema posade koja bi bila ugrožena sudarom, elektronika upravljanja pa tako i ona potrebna za izvršavanje zadatka često je jako skupa posebice s obzirom na svoju veličinu.

U začetnim fazama (prototipi) ispitivanja sustava upravljanja sudari su još vjerojatniji. Ukoliko takvi sudari budu fatalni za brodske sustave trošak daljnjeg ispitivanja i razvoja uvelike raste stoga je u interesu razvoj sudarne zaštite koja bi štitila sustave u što većoj mjeri čime se daje mogućnost jeftinijeg razvoja uz ponovno korištenje dijelova koji su preživjeli sudar.

## 2. AUTONOMNI BRODOVI

### 2.1. Pojava sudara kod autonomnih brodova

Autonomija u brodogradnji podrazumijeva korištenje tehnologije za autonomno upravljanje brodovima bez posade. Razvoj autonomnih plovila je nastavak trenda automatizacije i digitalizacije u brodogradnji. Autonomni brodovi su brodovi koji su opremljeni sustavima za autonomno upravljanje, što uključuje upotrebu tehnologije za prepoznavanje okoline, kao što su LIDAR, radar, kamera i GPS. Ova tehnologija omogućava brodu da samostalno krene, zaustavi se i manevrira, bez ili s minimalnom potrebom za ljudskom intervencijom. Razvoj autonomnih plovila nastoji povećati efikasnost i smanjiti potrebu za posadom, što može dovesti do smanjenja ukupnih troškova i povećanja profitabilnosti.

Međutim, razvoj autonomnih plovila također se suočava s brojnim izazovima, uključujući potrebu za sigurnosnim mjerama, zakonskim okvirom i infrastrukturom, te tehničkim ograničenjima. Unatoč ovim izazovima, autonomna tehnologija u brodogradnji se nastavlja razvijati i implementirati, a očekuje se da će u budućnosti postati sve važniji dio broderske industrije.

Iako sudar kao pojava može nastati zbog raznih faktora kod posadom upravljanih brodova, kod autonomnih brodova nailazimo na dodatne potencijalne probleme:

1. Tehnološke pogreške: Autonomni brodovi su oslonjeni na tehnologiju za pravilno funkcioniranje, pa čak i mali problemi u softveru ili hardveru mogu dovesti do pogreške u kontroli.
2. Problemi sa sensorima: Senzori autonomnog broda moraju funkcionirati pravilno da bi brod bio siguran. Ako dođe do problema sa sensorima, brod može donijeti pogrešne odluke ili zanemariti opasnosti.
3. Nedostatak reakcije na neuobičajene situacije: Autonomni brodovi su programirani da reagiraju na tipične situacije u pomorskom prometu, ali neuobičajene situacije, kao što su neplanirani manevri drugih brodova, koji bi zahtjevali ljudsku intuiciju za pravilno izbjegavanje, mogu izazvati probleme.

4. Nedostatak ljudske intervencije u slučaju nekog manjeg kvara pogonskog stroja, stroja za upravljanje ili drugo. Ovakva situacija može dovest do sudara čak i ako upravljački dio za izbjegavanje sudara radi propisno, neće moći izvršiti evazivne manevre.

Zaštita od sudara je jedan od ključnih izazova s kojima se suočava razvoj autonomnih brodova. Autonomni brodovi moraju biti opremljeni sigurnosnim mjerama koje će osigurati njihovu sigurnost u slučaju sudara s drugim brodovima ili preprekama na putu.

Neki od sigurnosnih mjera koje se koriste u autonomnim brodovima uključuju:

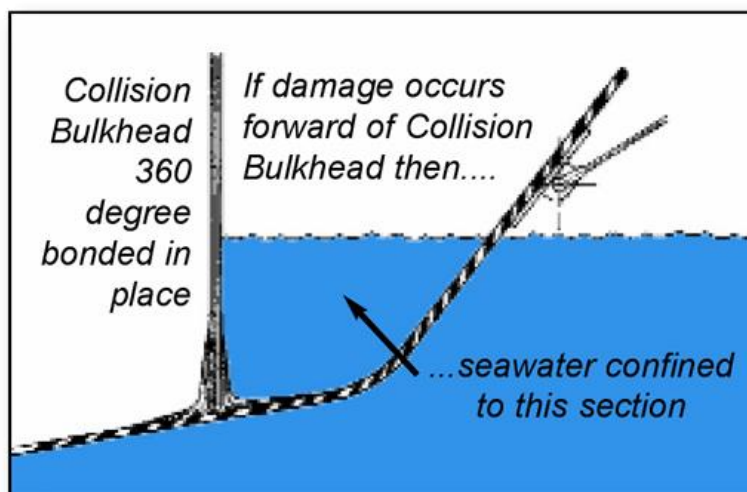
1. Automatsko upozorenje: Brodovi su opremljeni sustavima za detekciju i upozorenje u slučaju opasnosti od sudara.
2. Kontrola brzine: Autonomni brodovi moraju imati mehanizme kontrole brzine kako bi se smanjila brzina u slučaju opasnosti od sudara.
3. Navigacijski sustavi: Autonomni brodovi moraju biti opremljeni preciznim navigacijskim sustavima kako bi se osigurala točnost njihove pozicije i kretanja.
4. Algoritmi za izbjegavanje sudara: Autonomni brodovi moraju imati algoritme za izbjegavanje sudara poštujući COLREG pravila kako bi se osiguralo da se izbjegne sudar s drugim brodovima ili preprekama.

Ovi sigurnosni sustavi i mjere zaštite od sudara pomažu u smanjivanju rizika od sudara kod autonomnih brodova i osiguravaju njihovu sigurnost u plovidbi.

## **2.2. Konstrukcija autonomnih brodova**

Konstrukcija trupa autonomnog broda ovisi o namjeni broda i njegovim zahtjevima za plovidbom. No, u usporedbi s tradicionalnim brodovima, autonomni brodovi su često manjih dimenzija u usporedbi s tradicionalnim brodovima većinom zbog nedostatka posade, njihove akomodacije i općenitim uvjetima za život. To stvara povoljne uvjete za manji brod što utječe na upravljivost, potrošnju goriva i maksimalnu brzinu koju brod može razvit.

Sa stajališta sudara manji brod imati će manju masu zbog čega će kinetička energija broda u sudaru biti manja, što može značiti i manja oštećenja konstrukcije. Klasični brodovi obično imaju sudarnu pregradu koja štiti brod od prodora vode u slučaju frontalnog sudara. Ovakva izvedba mora postojati i kod autonomnog broda ali neka dodatna zaštita bi trebala biti implementirana s obzirom na povećanu opasnost od sudara.



Slika 1 Nepropusna sudarna pregrada [1]

### 2.3. Primjeri iz industrije

Navedeni su neki od stvarnih autonomnih brodova, sa njihovim specifikacijama i načinom zaštite u slučaju sudara.

#### 2.3.1. L3HARRIS C-WORKER 4

Kompaktan i robustan autonomni brod za obalni i priobalni nadzor. Duljine 4.2 m, istisnine 1030kg (bez tereta) i maksimalne brzine 6 čvorova



Slika 2 L3HARRIS C-WORKER 4 [2]

Ovaj brod predstavlja klasični autonomni brod svojim dizajnom i veličinom. Sa svojom brzinom i istisninom neće razviti veliku kinetičku energiju: Brod je opremljen tankim gumenim bokobranima koji pružaju zaštitu pri malim brzinama, recimo kod pristajanja broda u luku. Njegovi bokobrani služe više za zaštitu trupa od ogrebotina i eventualno udubljenja nego od pravog sudara.

### 2.3.2. *AquaticDrones Pheonix 5 EP*

Autonomni brod za nadzor u obalnim, priobalnim i riječnim područjima. Razvijen kao modularna platforma za raznolike zadatke, sa mogućnosti jednostavnog porinuća sa svoje prikolice. Duljine 5 m, istisnine 1500 kg i maksimalne brzine od 8 čvorova



**Slika 3** AquaticDrones Pheonix 5 EP [3]

Ovaj brod je po svojstvima sudara sličan prethodnom i također ima samo tvrdi gumeni štitnik za zaštitu kod pristajanja. Podaci o njegovoj unutarnjoj konstrukciji nisu dostupni.

### 2.3.3. *ULAQ ASUV*

Turski vojni autonomni brod duljine 11 metara, istisnine od 6 tona i maksimalne brzine 35 čvorova opremljen 12.7 milimetarskim topom i lanserom raketa. Slovi kao jedan od najnaprednijih besposadnih brodova na svijetu. U planu je izrada brodova za obalni nadzor,



graničnu patrolu, brodovi sa sutavom obrane od mina, traganje i spašavanje i još mnogo namjena na istoj platformi



**Slika 4 ULAQ ASUV [4]**

Brod također ima samo bokoštitnike od tvrde gume za zaštitu trupa prilikom pristajanja.

Ovaj brod razvija ozbiljnu kinetičku energiju prilikom sudara zahvaljujući svojoj velikoj brzini i masi. Naravno, razviti zaštitu od sudara pri brzini od 30 čv bilo bi jako nepraktično, no svejedno neka vrsta zaštite morala bi biti potrebna, makar za manje brzine plovidbe.

Za potrebe ovog rada odnosno analiziranja zaštite autonomnog broda korišten je programski paket CATIA V5R21 za izradu geometrijskog modela broda, nakon čega je generirana mreža konačnih elemenata u programskom paketu FEMAP/ NX Nastran da bi se kasnije odradila simulacija i analiza podataka u programskom paketu LS Dyna.

### 3. MODEL BRODICE

#### 3.1. Pristup izradi modela

Nacrti -> geometrijski model (CATIA) -> mreža K.E. (FEMAP) -> analiza (LS Dyna)

Za promatrani model odabran je brod gabarita sličnijih većim autonomnim brodovima koji plove razmjerno visokim brzinama (npr *ULAQ*).S obzirom na dostupnost nacрта i slične gabarite, odabrana je brodice za traganje i spašavanje čiji će model, uz neke preinake, poslužiti za kasniju analizu.



Slika 5 Brodica za traganje i spašavanje [5]

Tablica 1 Parametri brodice za traganje i spašavanje

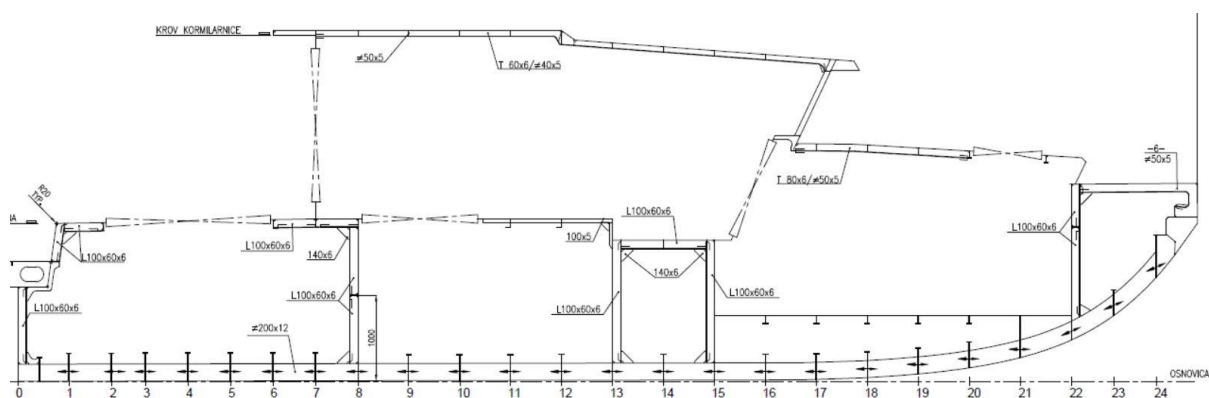
$L_H=14.56$ m	duljina trupa broda
$B_H=4,7$ m	širina trupa
$B_C=4$ m	širina na zgibu, rebro 10
$\beta=17^\circ$	kut nagiba dna na rebro 10
$T_{max}=1,4$ m	maksimalni gaz
$m_{LDC}=25150$ kg	istisnina
$V=15$ čv	putna brzina plovila
$V_{max}=39$ čv	maksimalna brzina

Nacrti strukture brodice dobiveni su od profesora Alberta Zamarina sa Sveučilišta u Rijeci, korištenu u diplomskom radu [6]. Navedeni nacrti prikazuju rebra 7, 8, 10, 20, nacrt glavne palube te presjek na uzdužnici broda.

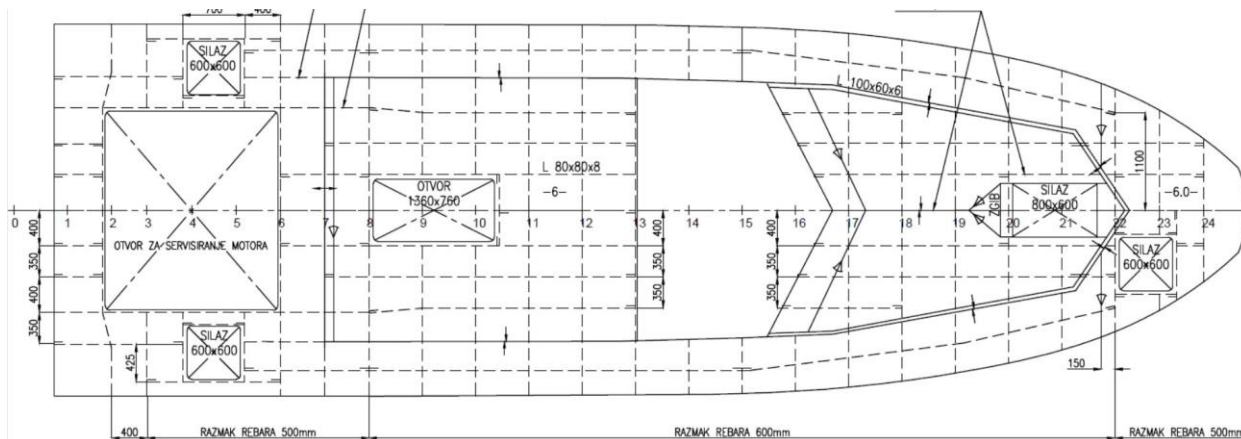
S obzirom da se analizira brod koji je u teoriji autonoman, potrebna je prenamjena zadanih nacrtu u svrhu približenja konstrukciji autonomnog broda. Besposadne brodove karakterizira manjak nadgrađa i relativno jednostavan oblik trupa izvan vode. Tako je nadgrađe potpuno uklonjeno sa modela, svi otvori na palubi zatvoreni, skok palube zanemaren a krmeno zrcalo pojednostavljeno.



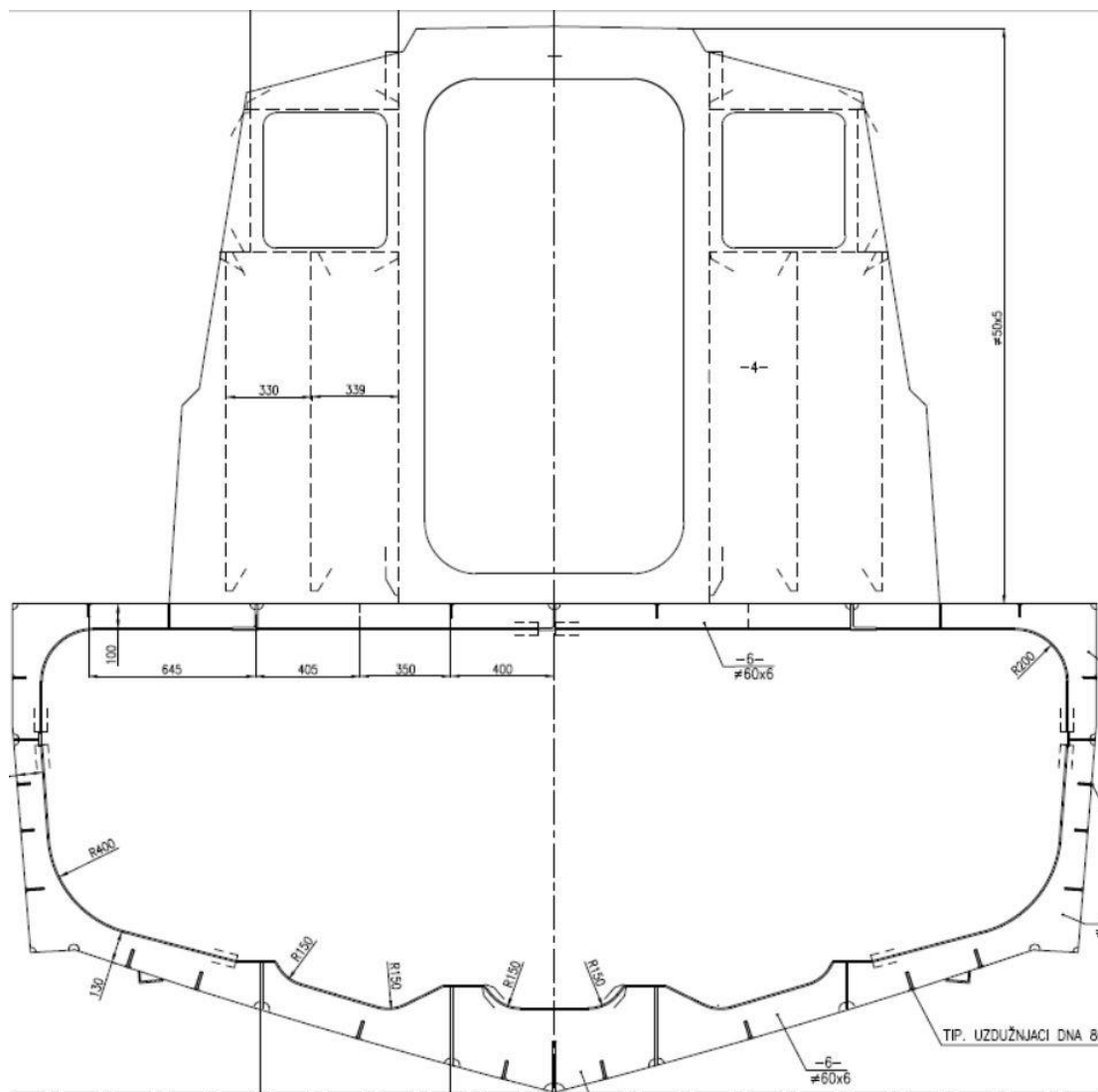
Slika 6 ULAQ ASUV – ravna paluba bez nadgrađa [4]



Slika 7 Nacrt strukture brodice – uzdužni presjek [6]

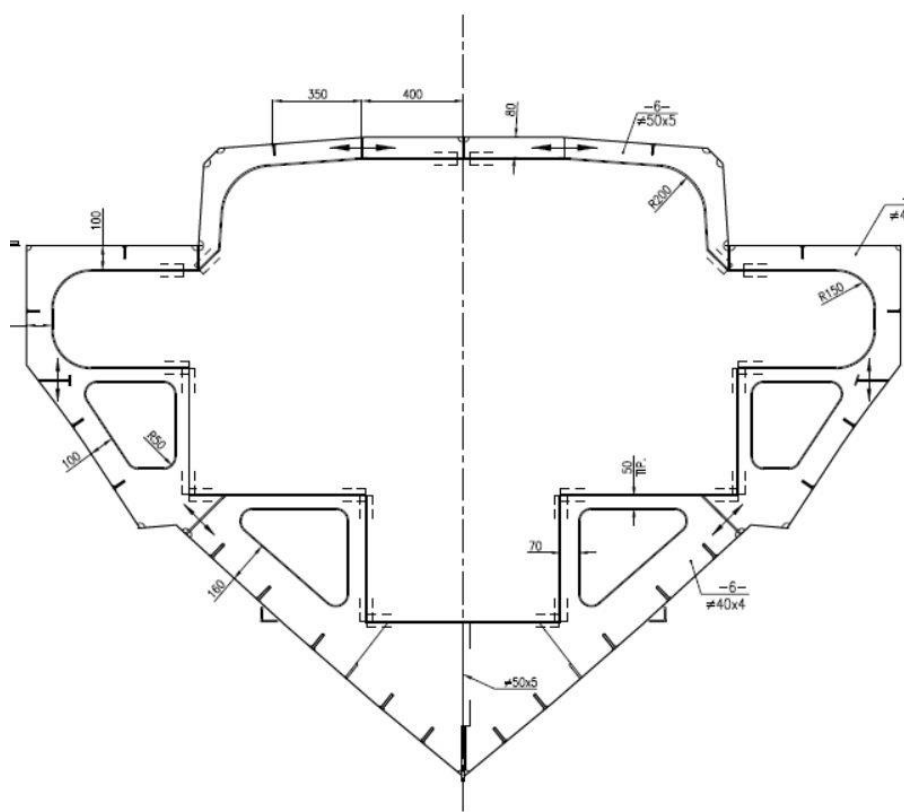


Slika 8 Nacrt strukture brodice – glavna paluba [6]



Slika 9 Nacrt strukture brodice –rebro 7 [6]





**Slika 12** Nacrt strukture brodice – rebro 20 [6]

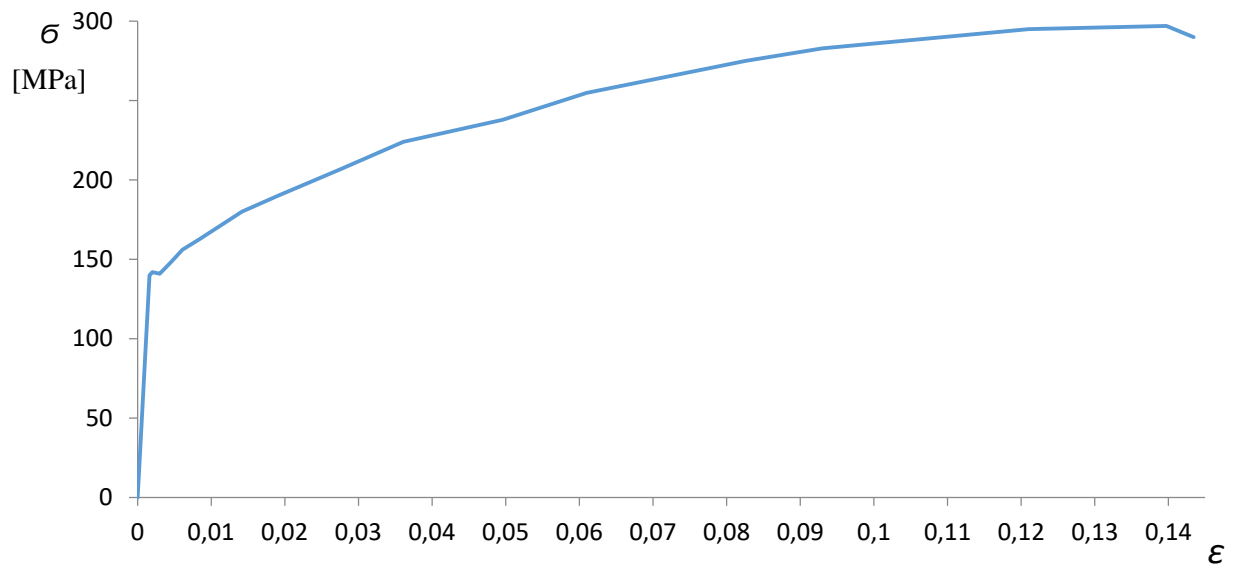
Brod je izrađen od Aluminija AL5083 H111 sa debljinama 5 i 8 mm.

**Tablica 2** Debljine profila aluminijske legure [6]

oplata	8 mm
paluba	8 mm
rebra	8 mm
nepropusne pregrade	8 mm
uzdužnjaci dna	8 mm
uzdužnjaci boka	5 mm
uzdužnjaci palube	8 mm

**Tablica 3** Svojstva AL5083 H111 [7]

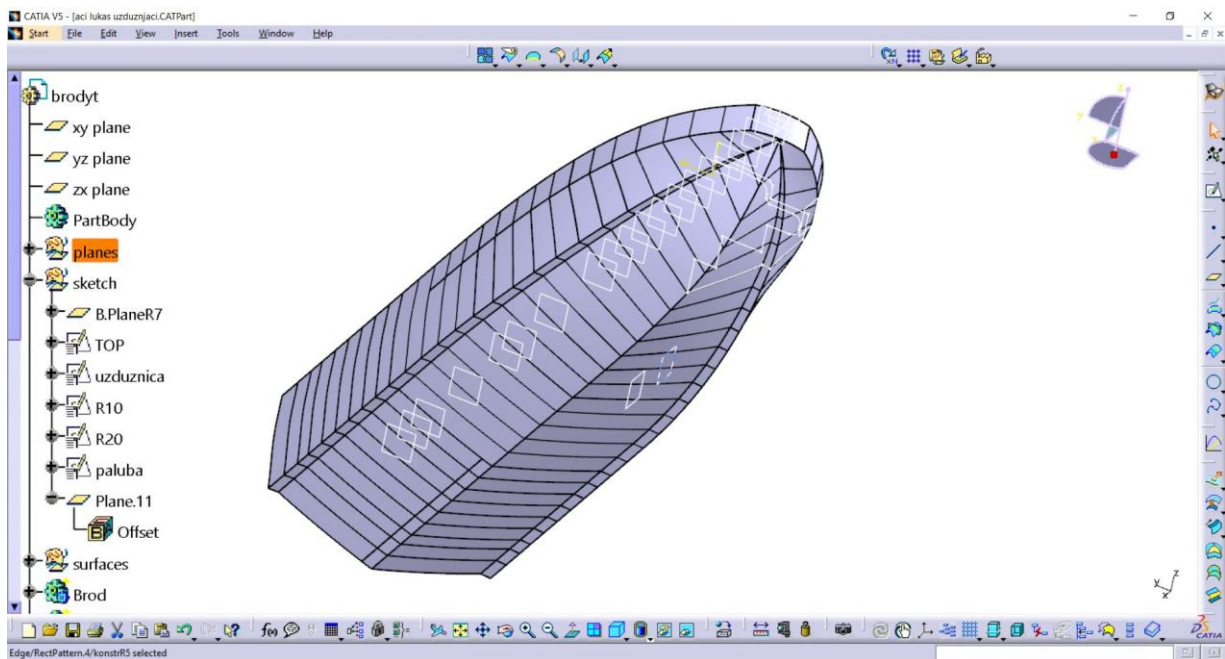
$E=$	86 GPa
$\sigma_y=$	140 MPa
$\nu=$	0.33
$\rho=$	2700 kg/m <sup>3</sup>



**Slika 13** Krivulja stvarnih napreznja i deformacija za AL5083 H111 [7]

## 4. IZRADA GEOMETRIJE MODELA

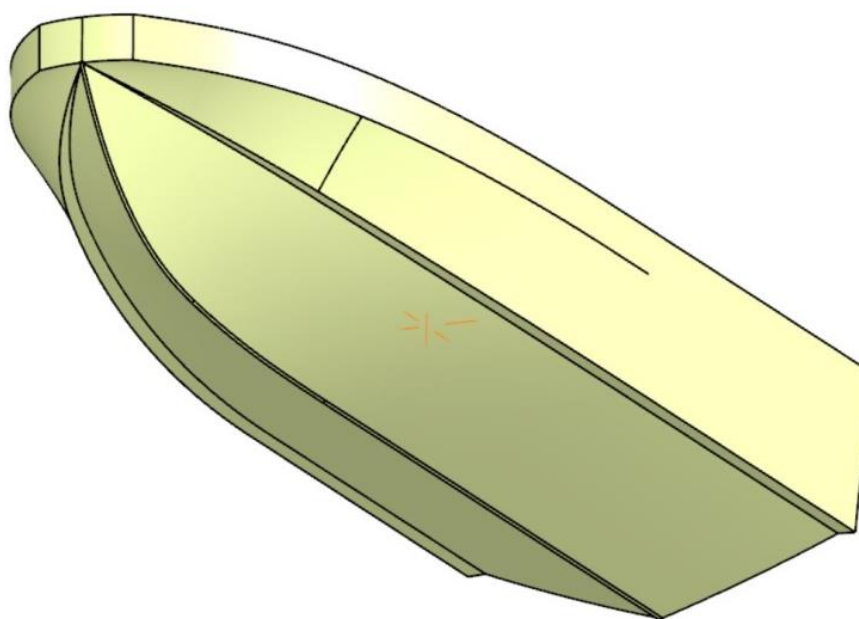
Za izradu geometrije odabran je programski paket Dassault Systems CATIA V5R21[8]. Model iz CATIA programskog paketa kasnije će se analizirati u FEMAP/NX Nastranu i LS Dyni. Izrada geometrije se vrši u Generative Shape Design (GSD) workbench-u koristeći modeliranje površinama s obzirom da će debljine materijala biti zadane kao *property* u FEMAP-u. Nacrta su praćeni uz određene, prethodno spomenute preinake.



Slika 14 Korisničko sučelje CATIA-e

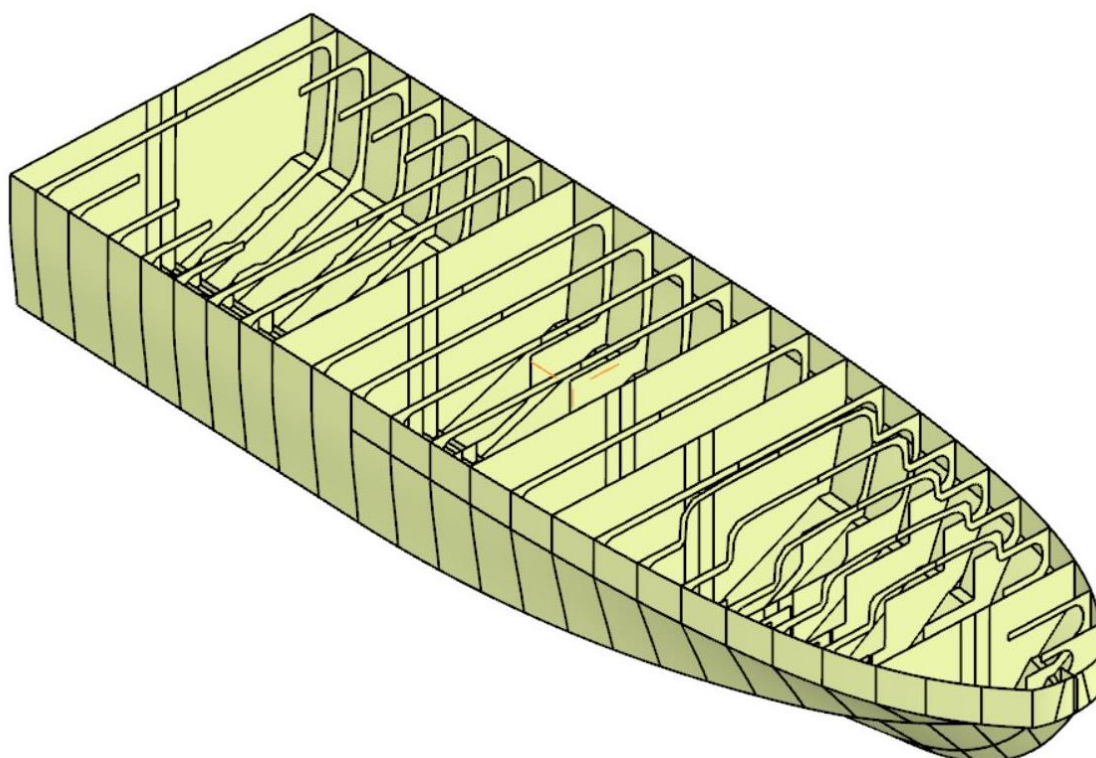
U završnom radu prikazan je cijeli brod iako je u tijeku modeliranja rađena samo jedna polovica zbog postojanja opcije zrcaljenja u svim korištenim programskim paketima. Prvi korak je izrada tzv. *shell*-a odnosno same brodske oplate od površina bez debljina.





**Slika 15 Oplata broda modelirana površinama**

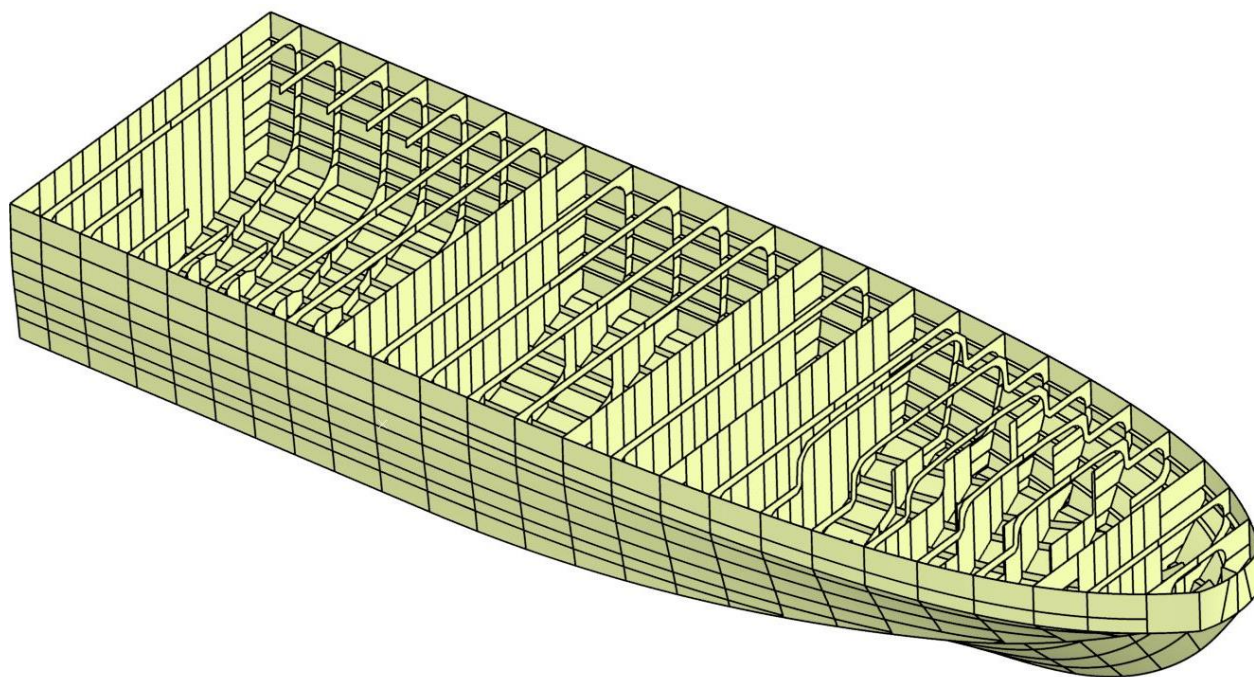
Nakon toga izrađuju se konstrukcijska rebra, nepropusne pregrade i krmeno zrcalo.



**Slika 16 Brodska oplata sa rebrima, pregradama i krmenim zrcalom**

Nakon rebara, modeliraju se uzdužnjaci boka i dna. Paluba i uzdužnjaci palube izradit će se kasnije u FEMAP-u. Tijekom izrade geometrije modela sa površinama, u više navrata se model učitavao u FEMAP-u da se provjeri kako FEMAP interpretira model, odnosno na koji način bi se najlakše mogla generirati mreža konačnih elemenata.

Nakon više pokušaja zaključeno je da FEMAP može pouzdano stvoriti mrežu konačnih elemenata samo ako na jednom komadu površine nema presjeka sa drugim površinama. Stoga je potrebno odraditi pripremu geometrije u CATIA-i . Priprema uključuje rastavljanje modela na najmanje moguće djelove oplata, rebara i uzdušnjaka koji su omeđeni svojim presjecištima.. To se najlakše ostvaruje naredbom *Split* u CATIA programskom paketu koji rastavlja element na dva dijela odabirom elementa koji se presijeca i elementa koji siječe. Unatoč dugotrajnosti i repetitivnosti, priprema geometrije uvelike olakšava generiranje mreže konačnih elemenata u FEMAP-u.



**Slika 17** Geometrijski model „izrezan“ na najmanje dijelove ( bez palube)

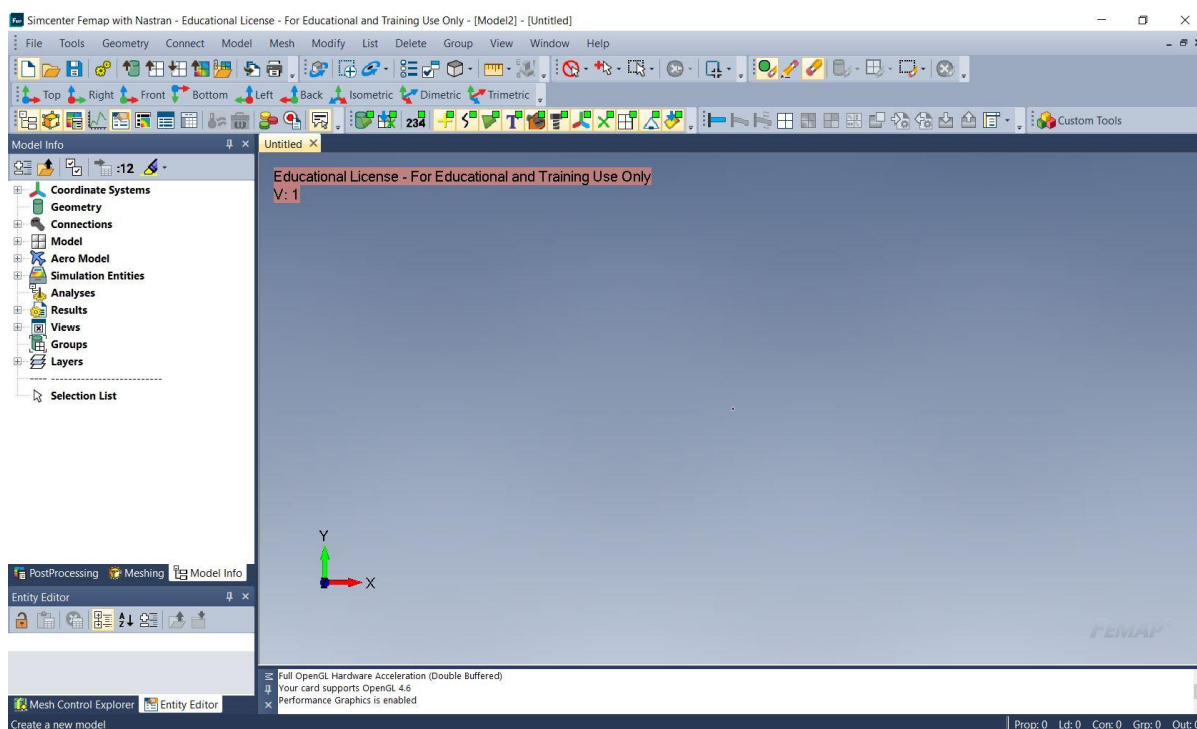
## 5. MREŽA KONAČNIH ELEMENATA

### 5.1. Metoda konačnih elemenata

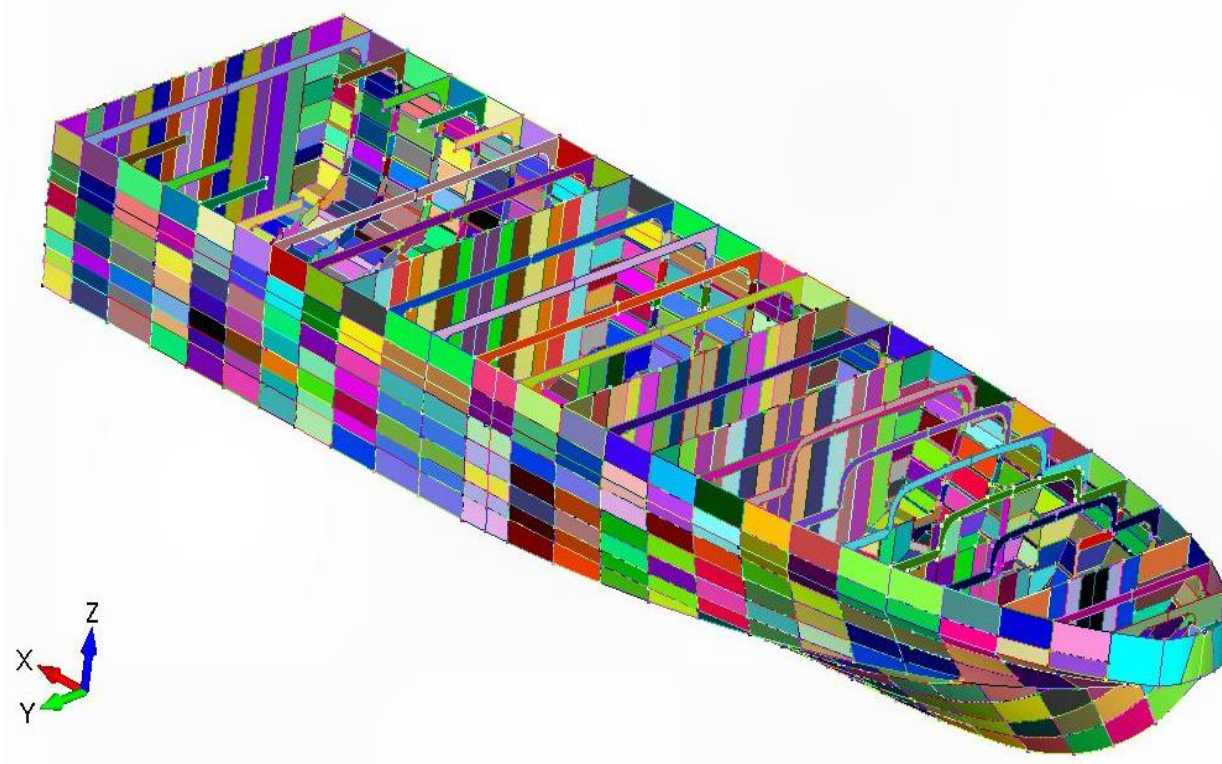
U cilju optimiziranja konstrukcija kako zbog manjeg utroška materijala zbog cijene, tako i zbog boljeg performansa proizvoda (uslijed smanjenja mase), potrebno je provesti strukturnu analizu konstrukcije da bi se provjerila maksimalna naprežanja odnosno deformacije i time adekvatno dimenzionirala konstrukcija. Metoda konačnih elemenata (FEM) je matematička metoda koja se koristi za rješavanje složenih inženjerskih problema. Ova metoda temelji se na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma; složena struktura podijeli se na mnogo manjih elemenata, također poznatih kao konačni elementi. Svaki tip konačnog elementa ima točno određene stupnjeve slobode. Zatim se za svaki od tih elemenata izračunavaju njihovo naprežanje i deformacije. Na kraju se svi ti rezultati kombiniraju kako bi se dobilo ukupno stanje naprežanja i deformacije za cijelu konstrukciju. Konstrukcije su najčešće složenog geometrijskog oblika i složenog opterećenja što uzrokuje prevelikim brojem diferencijalnih i parcijalnih diferencijalnih jednadžbi za analitičko rješavanje, stoga su razvijeni razni alati za ubrzano rješavanje. Razvojem računalne moći računala, osobito osobnih računala a i programskih paketa ova metoda postaje široko dostupan inženjerski alat za razne simulacije problema.

### 5.2. Generiranje mreže konačnih elemenata

Za izradu mreže konačnih elemenata odabran je FEMAP/NX Nastran [9]. Unos geometrijskog modela iz CATIA-e u FEMAP vrši se spremanjem modela kao STEP (.stp) datoteke, koji se pokazao kao najbolji izbor za održavanje svih parametara, dimenzija i naziva dijelova. Vrši se vizualna kontrola geometrije zbog provjere rubova ili diskontinuiteta u odnosu na model u CATIA-i.

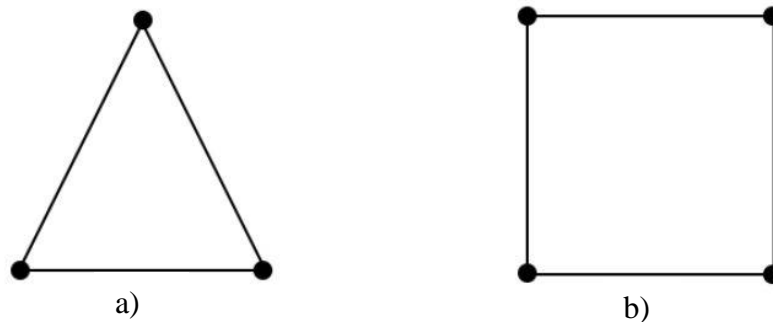


Slika 18 FEMAP korisničko sučelje



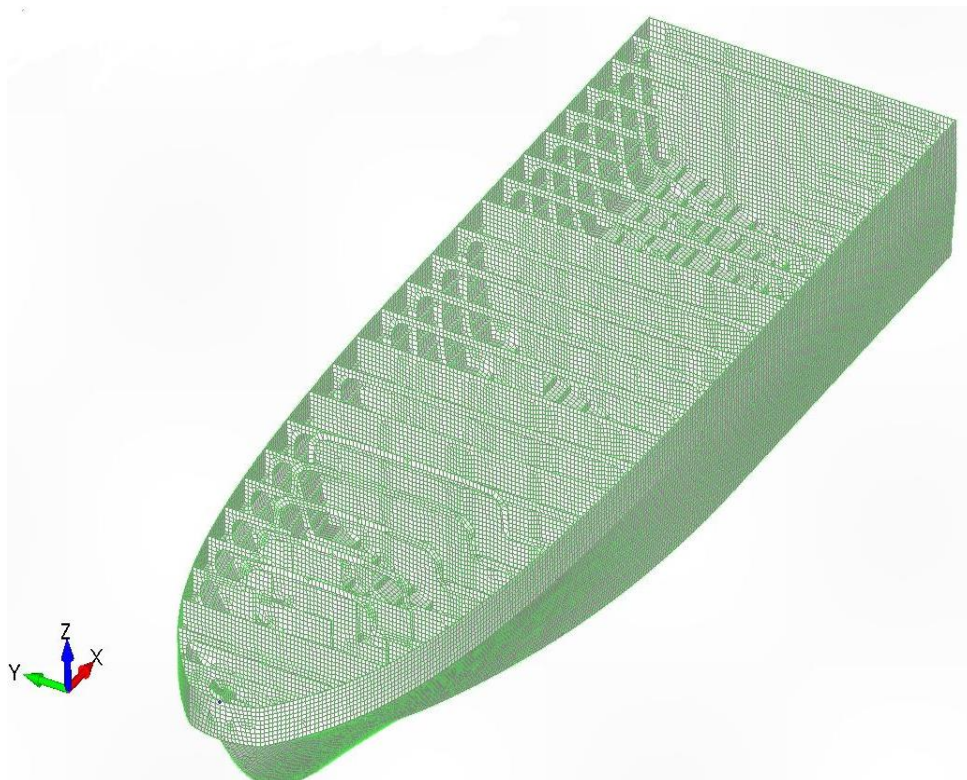
Slika 19 STEP model uvezen u FEMAP-svaka boja je jedna površina

Za mrežu korišteni su većinom četverostrani (tzv. *quad*) ljskasti elementi ali na nekim mjestima su pogodniji bili trokutni (*triangle*) elementi

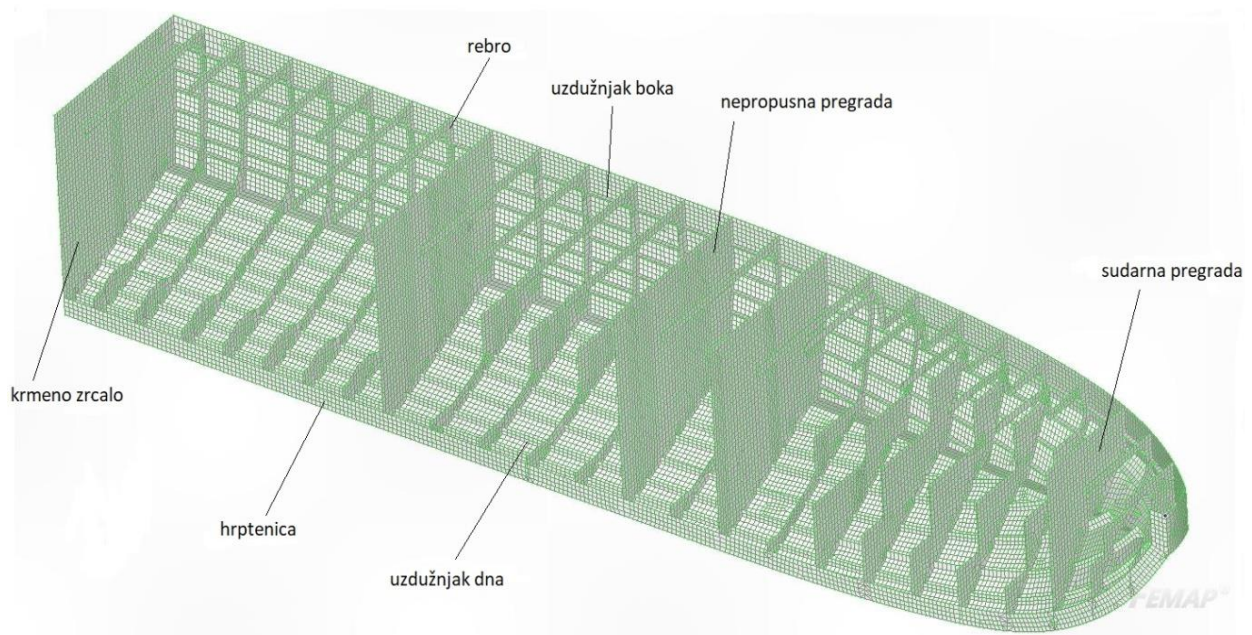


Slika 20 2D elementi a) trokutni , b) pravokutni

Mreža konačnih elemenata u FEMAP-u generira se naredbom *Mesh Surface* s veličinom stranice elementa 50mm. Naravno svi elementi ne mogu biti točno tih dimenzija pa se na određenim mjestima mijenja veličina elementa. Također, poželjno je usitnjavanje mreže na mjestima koja trpe veća naprezanja odnosno deformacije (kritična mjesta). Prije generiranja mreže geometrija je pripremljena koristeći *Size along curve* naredbu kojom se definira broj elemenata na određenoj površini. Na taj način dobijemo ujednačenu mrežu sa većom šansom za spajanje svih čvorova.

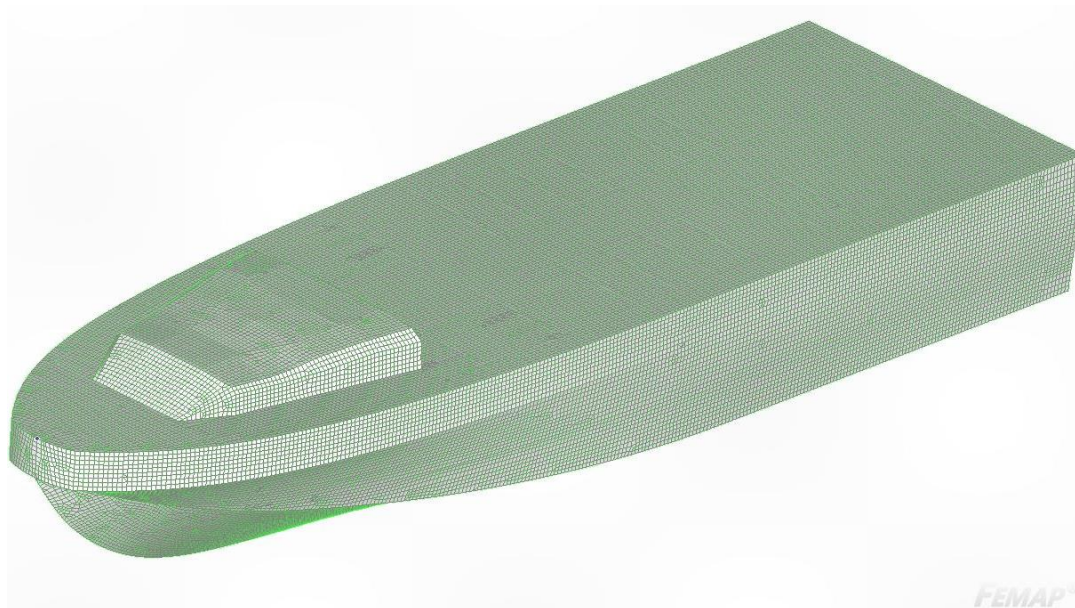


Slika 21 Generirana mreža konačnih elemenata



**Slika 22 Presjek modela broda sa pregradama**

Koristeći naredbu *Create Surface from Points* u sekciji *Geometry* kreirana je paluba i uzdužnjaci palube po kojima se zatim koristeći *Mesh Surface* stvara mreža konačnih elemenata. Stvorena mreža konačnih elemenata je popravljena naredbama *Check Coincident Nodes* i *Move node to Location* dok svi čvorovi nisu adekvatno spojeni. Ove operacije su korištene u minimalnoj mjeri zbog prethodno dobro pripremljene geometrije. Mreža se dovršava zrcaljenjem polovice broda duž x osi naredbom *Reflect Element* te zatim spajanjem čvorova na središnjici naredbom *Check Coincident Nodes*. Model broda (obe polovice) broji 117 620 elemenata i 97 520 čvorova (bez bokobrana).



**Slika 23** Mreža konačnih elemenata broda sa palubom

### 5.3. Izrada bokobrana

Bokobrani odnosno bokoštinitnici ugrađuju se na brodove u raznim oblicima i debljinama. Najčešće korišteni bokobrani izrađuju se od EPDM gume, prirodne gume, neoprena, poliuretana, silikona, TPE polimera i PVC-a. Uglavnom se ugrađuju duž oplata broda na najširem dijelu odnosno mjestu na kojem je kontakt sa okolinom najizgledniji. Debljine ugradbenih bokobrana variraju od par centimetara do par desetaka centimetara no ipak su najzastupljeniji bokobrani debljine oko 100 mm koji, kako je već prije navedeno, štite od manjih udara, npr. prilikom pristajanja broda u luci.

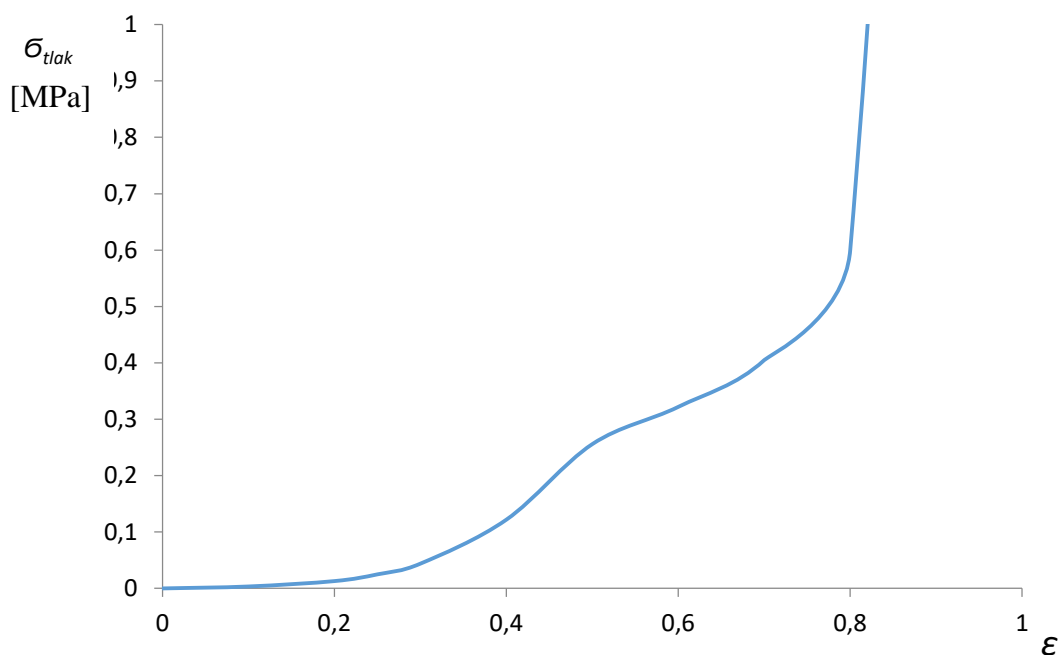
Za značajniju zaštitu povoljni su materijali koji prilikom sudara kinetičku energiju sudara troše na svoje defomiranje. Na taj način „žrtvujemo“ uništavanje materijala bokobrana da zaštitimo brod.

U brodograđevnoj industriji ovakva rješenja nisu učestala praksa no mnogi materijali sa velikom sposobnošću upijanje energije razvijeni su za druge primjene, pa tako postoje razne pjene za ovu primjenu:

1. Etilen vinil acetat (EVA) pjena - ova vrsta pjene je izdržljiva, elastična i nudi dobru apsorpciju udara. Često se koristi u sportskim cipelama, sportskim podlogama, jastucima, kao i u proizvodima za zaštitu od padova.
2. Poliuretanska (PU) pjena - ova pjena također pruža dobru apsorpciju udara i često se koristi u sportskoj opremi, zaštiti od padova, kao i u automobilskoj industriji.

3. Polietilenska (PE) pjena - ova vrsta pjene ima dobru apsorpciju udara, nisku gustoću, te je često korištena u zaštiti proizvoda od oštećenja tijekom transporta i skladištenja.
4. Pjena od gume - ova vrsta pjene ima izvrsnu apsorpciju udara i često se koristi u proizvodima kao što su podloge za vježbanje, zaštita od padova i zaštita automobila.

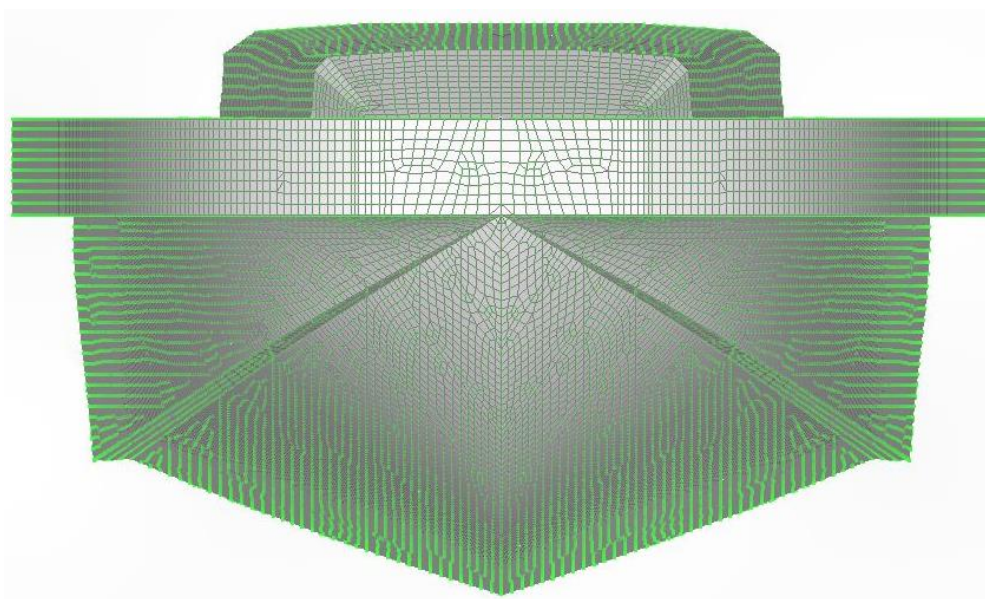
Za ovo ispitivanje odabrana je poluetilenska (PE) pjena zatvorenih ćelija gustoće  $100 \text{ kg/m}^3$  jer pruža relativno veliko upijanje energije za svoju malu gustoću, a materijalni model, krivulje naprezanja i deformacije te svi ostali podaci su dostupni.



**Slika 24** Krivulja tlačnog naprezanja u ovisnosti o deformaciji za PE pjenu [10]



Bokobrani izrađeni su u FEMAP-u koristeću naredbu *Extrude element* na odgovarajućim djelovima brodske oplate. Bokoštitnici su definirani koristeći *Solid* konačne elemente duljine ekstrudirane stranice 33mm. Dodavanje bokobrana cijelom duljinom povećava se ukupan broj konačnih elemenata na 163 592 a čvorova na 14 8555. Odabrana širina bokoštitnika od 300 mm predstavlja povećanje u odnosu na najčešće korištene gumene bokoštitnike širine nekoliko centimetara koji se koriste samo za blagu zaštitu pri malim dodirima s okolinom.



**Slika 25** Prikaz modela broda sa bokoštitnicima širine 300 mm

## 6. ANALIZA MODELA

Analiza sudara spada u nelinearnu analizu koja podrazumjeva analizu deformacija, naprezanja i ponašanja materijala i struktura koje su podvrgnute velikim deformacijama ili velikim opterećenjima. U usporedbi s linearnom analizom konačnih elemenata, koja pretpostavlja linearno elastično ponašanje materijala, nelinearna analiza konačnih elemenata ulazi i u nelinearno područje krivulje naprezanja i deformacija.

**Tablica 4** Analize sudara promatrane u ovom radu

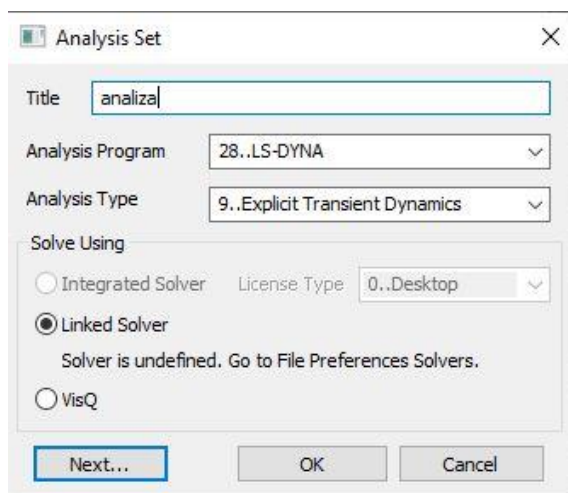
Tip sudara	Brzina broda [m/s]
Frontalni okomiti sa PE bokoštitnikom (A)	2,315
Frontalni okomiti bez bokoštitnika (B)	2,315
Frontalni okomiti sa PE bokoštitnikom	11,317
Frontalni okomiti sa PE bokoštitnikom	20,062
Frontalni pod kutem 30° sa bokoštitnikom	5,144
Frontalni pod kutem 30° sa bokoštitnikom	2,829

Programski paket FEMAP zbog svoje jednostavnosti korisničkog sučelja korišten je za izradu mreže konačnih elemenata, međutim studentska licenca programskog paketa ne podržava nelinearnu analizu odnosno opciju *Multistep Nonlinear Analysis* koja bi bila pogodna za ovakav tip analize.

### 6.1. LS Dyna

LS-DYNA [11] je komercijalni programski paket za numeričku simulaciju dinamičkih problema metodom konačnih elemenata, koji se često koristi za analizu strukture, dinamiku sudara, eksplozije i drugih složenih problema u mehanici čvrstih tijela. Razvijen je od strane Livermore Software Technology Corporation (LSTC) i koristi se u širokom spektru industrija za analizu složenih problema poput sudara vozila, eksplozija, proizvodnje, deformacije materijala, te drugih primjena u mehanici kontinuuma. Velika prednost ovog programskog paketa je ogromna baza materijalnih modela koji mogu biti pogodni za analizu pjenastih materijala koji upijaju energiju.

Unos modela iz FEMAP-a u LS-Dynu vrši se generiranjem analize za LS Dynu u FEMAP-u opcijom *Analyse* te zatim izvozom datoteke opcijom *Export Analysis Model*.



Slika 26 Generiranje analize modela za LS Dynu u FEMAP-u

Na ovaj način dobije se datoteka nastavka *.dyn* koja se kasnije uključi u *Keyword* datoteku naredbom *\*INCLUDE*.

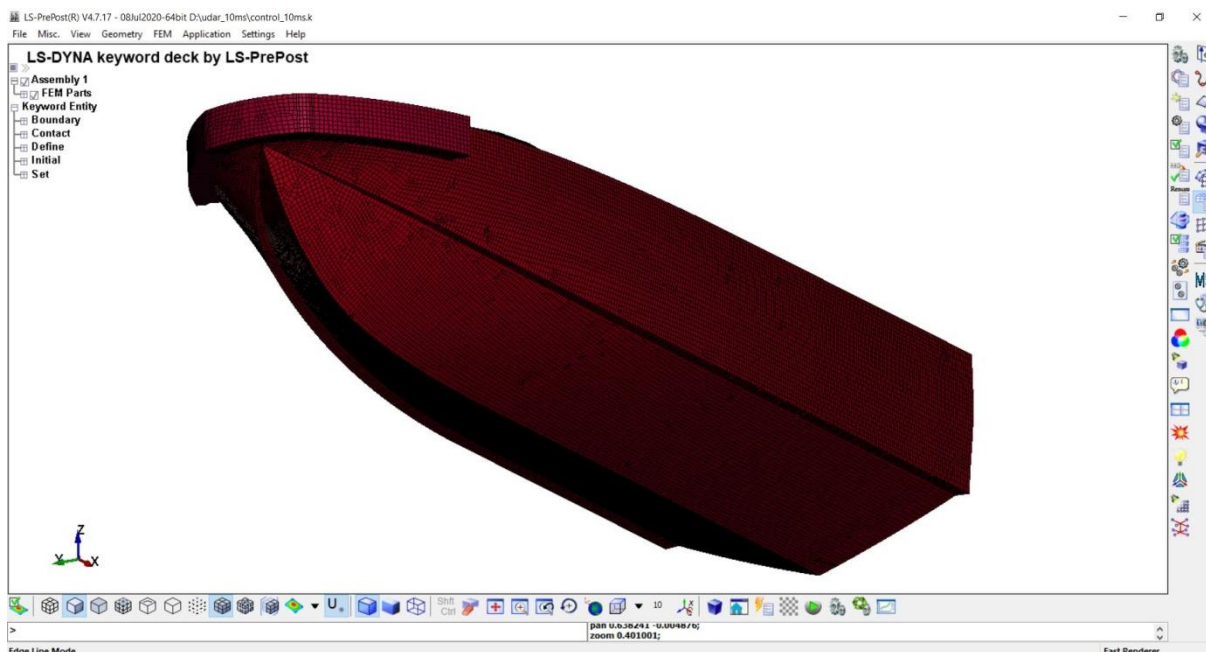
Upravljanje simulacije vrši se mijenjanjem *Keyword* parametara (direktno kroz tekstualnu datoteku ili kroz *PrePost* sučelje) koji kontroliraju sve naredbe u programu npr vremenski korak, položaj i broj čvorova i elemenata, tipovi elemenata, materijalni model, brzina napredovanja, rubni uvjeti itd. Za ovu simulaciju vremenski korak (timestep) zadan je kao  $dtint=0$  što znači da LS Dyna program sam odabire vremenski korak i mijenja ga u toku simulacije za optimalnu točnost i trajanje simulacije.

```

1  |$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost(R) V4.6.15 - 16Aug2019
2  |$# Created on Feb-06-2023 (15:47:43)
3  |$ *****
4  |$ Written by : Femap
5  |$ Version : 2021.2.1
6  |$ From Model : C:\Users\Simun\Downloads\matkovic_model.modfem
7  |$ Date : Mon Feb 6 12:48:58 2023
8  |$ *****
9  |*KEYWORD
10 |*TITLE
11 |$#
12 |LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
13 |*CONTROL_CONTACT
14 |$ slsfac rwpnal islchk shlthk penopt thkchg orien
15 |$# slsfac rwpnal islchk shlthk penopt thkchg orien enmass
16 |$ 0.0 0.0 2 0 0 0 2 0
17 |$ usrstr usrfrc nsbcs interm xpene ssthk ecdt tiedprj
18 |$# usrstr usrfrc nsbcs interm xpene ssthk ecdt tiedprj
19 |$ 0 0 0 0 4.0 0 0 0
20 |$# sfric dfrc edc vfc th sf pen_sf
21 |$ 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
22 |$# ignore frcheng skiprwg outseg spotstp spotdel spothin
23 |$ 0 0 0 0 0 0 0 0
24 |$# isym nserod rwgaps rwgdtl rwksf icov swradf ithhoff
25 |$ 0 0 1 0.0 1.0 0 0.0
26 |$# shledg pstiff ithcnt tdcnof ftall unused shlrw
27 |$ 0 0 0 0 0 0 0.0
28 |*CONTROL_ENERGY
29 |$ i i i
30 |$# hgen rwen slnten rylen
31 |$# hgen rwen slnten rylen
32 |$ 2 1 2 1
33 |*CONTROL_HOURLASS
34 |$ i f
35 |$# ihq qh
36 |$# ihq qh
37 |$ 1 0.15
38 |*CONTROL_TERMINATION
39 |$# endtim endcyc dtmin endeng endmas nosol
40 |$ 0.4 0 0.0 0.01.000000E8 0
41 |*CONTROL_TIMESTEP
42 |$# dtinit tssfacs isdo tslimit dt2ms lctm erode mslst
43 |$ 0 0.8 0 0.0-7.0000E-6 0 1 0
44 |$# dt2msf dt2mslc imsc1 unused unused rmsc1

```

Slika 27 LS Dyna Keyword datoteka



Slika 28 korisničko sučelje LS PrePost programskog paketa LS Dyna

Za modeliranje aluminijske strukture broda odabran je MAT\_024 punog *Keyword* naziva \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY. On funkcioniра zadavanjem linearnog elastičnog područja granicom elastičnosti  $\bar{\sigma}$ , i modulom elastičnosti  $E$  izvan kojeg se referira na krivulju plastičnog područja koja se definira točkama. Također se definira *epsilon failiure* odnosno granica loma, koja za ovaj aluminij iznosi 0,1434. Pogodan je za metale i plastične materijale.

Za materijalni model PE pjene odabran je materijalni model MAT\_CRUSHABLE\_FOAM (MAT63) koji se koristi za simulaciju ponašanja pjena pod kompresijom. Ovaj model je posebno dizajniran za modeliranje materijala poput polistirena (PS), poliuretanske pjene (PU) i drugih sličnih materijala koji se često koriste u različitim industrijama poput automobilske industrije, zrakoplovstva, medicinske opreme i drugih. Model MAT\_CRUSHABLE\_FOAM opisuje ponašanje materijala tijekom kompresije, kao što su postupno zbijanje, stlačljivost, stlačljiva čvrstoća i nestabilnost i stoga je dobar izbor za modeliranje odabrane PE pjene.

```

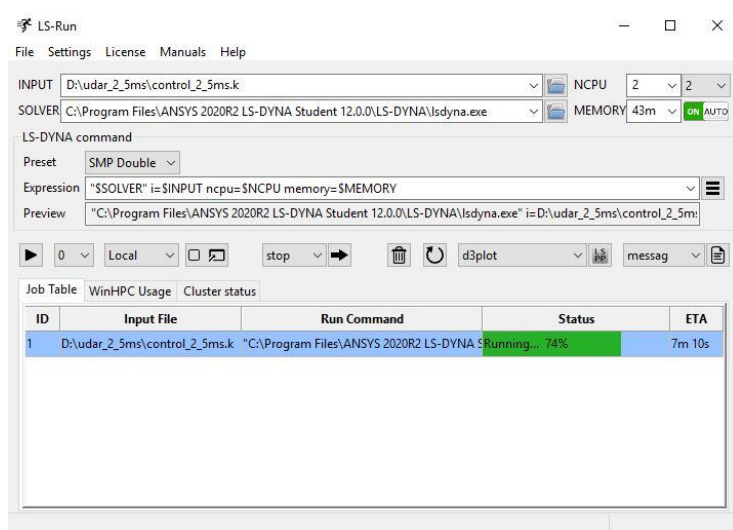
*MAT_CRUSHABLE_FOAM_TITLE
Crushable foam MAT 063
$#      mid      ro      e      pr      lcid      tsc      damp
      1      100.0      1000  0.319999      1      1.500E7      0.0
*DEFINE_CURVE_TITLE
FOAM Force strain for MAT 63
$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp      lcint
      1          0          1.0      1.0      0.0      0.0          0          0
$#          al          ol
          0.000          0.000
          0.10000000          3440.000
          0.20000000          13000.000
          0.25000000          25000.000
          0.30000001          44000.000
          0.40000001          122000.000
          0.50000000          256000.000
          0.60000002          322000.000
          0.69999999          405000.000
          0.80000001          600000.000
          0.89999998          4000000.000
          0.92000002          20000000.000
          0.95000000          100000000.000

```

**Slika 29** Zadavanje svojstava PE pjene u LS Dyna Keyword datoteci

Kontakt broda i barijere definiran je naredbom `*CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL` koja je jedna od mnogih za definiranje kontakta. Koristi implicitni pristup što znači da se kontakti određuju unaprijed, prije nego što se simulacija pokrene. Kontakti se generiraju automatski, bez potrebe za ručnim definiranjem, na temelju njihovih geometrija i pozicija, ovaj pristup je koristan kad se oblik dijelova u kontaktu mijenja tijekom simulacije.

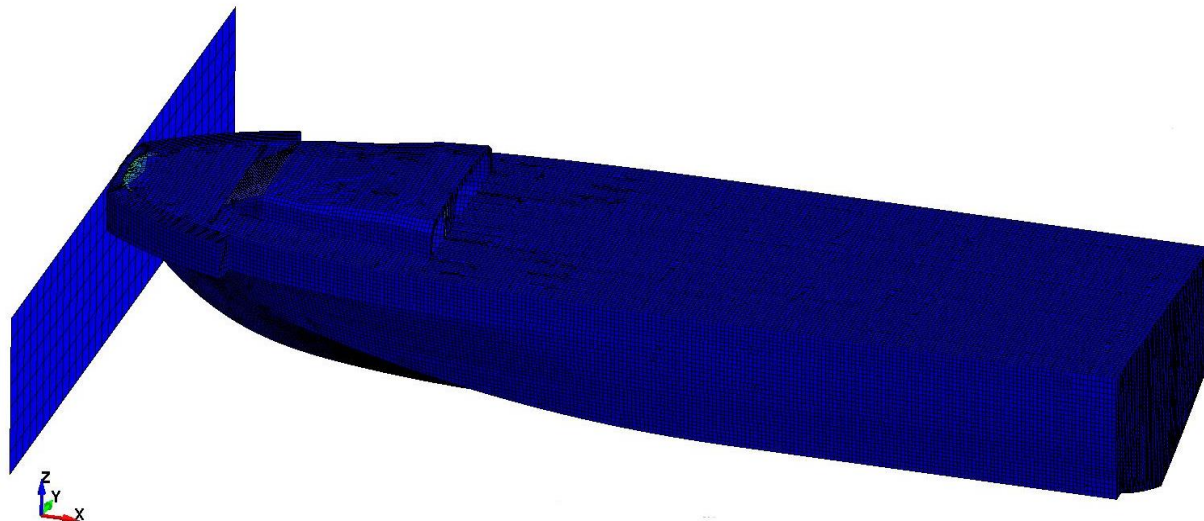
Simulacija se pokreće kroz program LS-Run koji se odabire Keyword datoteku, solver, broj jezgri i radne memorije za rješavanje simulacije. Također su dostupni podaci o predviđenom trajanju simulacije. Prednost je mogućnost otvaranja simulacije u LS PrePostu za vrijeme trajanja analize što omogućuje direktan uvid u eventualne probleme promatrajući deformacije naprezanja, kinetičku energiju i slično.



Slika 30 Korisničko sučelje LS-Run

## 6.2. Frontalni okomiti sudar

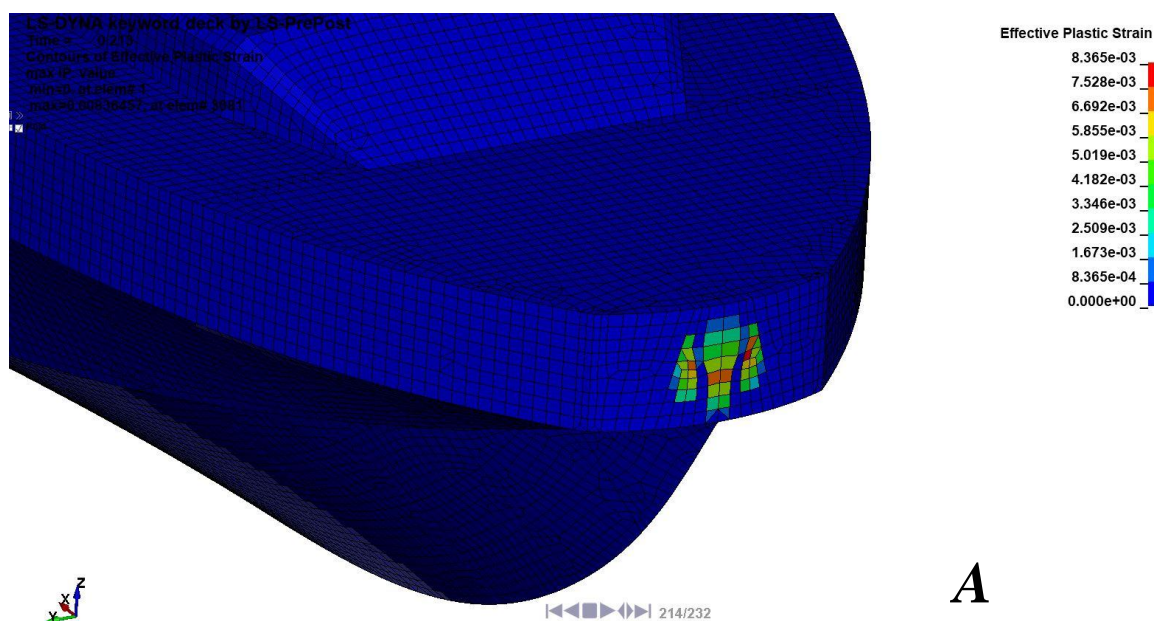
Pri projektiranju brzih brodova za traganje i spašavanje, poput broda po čijim nacrtima je ovaj brod modeliran često je zadan uvjet izdržljivosti sudara u pramac brzinom 3 čv i u pramac pod kutem pri brzini od 10 čvorova [10]. Brodska konstrukcija mora izdržati zadani sudar bez nastanka znatnih plastičnih deformacija, odnosno konstrukcija ne smije biti nepovratno oštećena.



Slika 31 Frontalni sudar u krutu barijeru

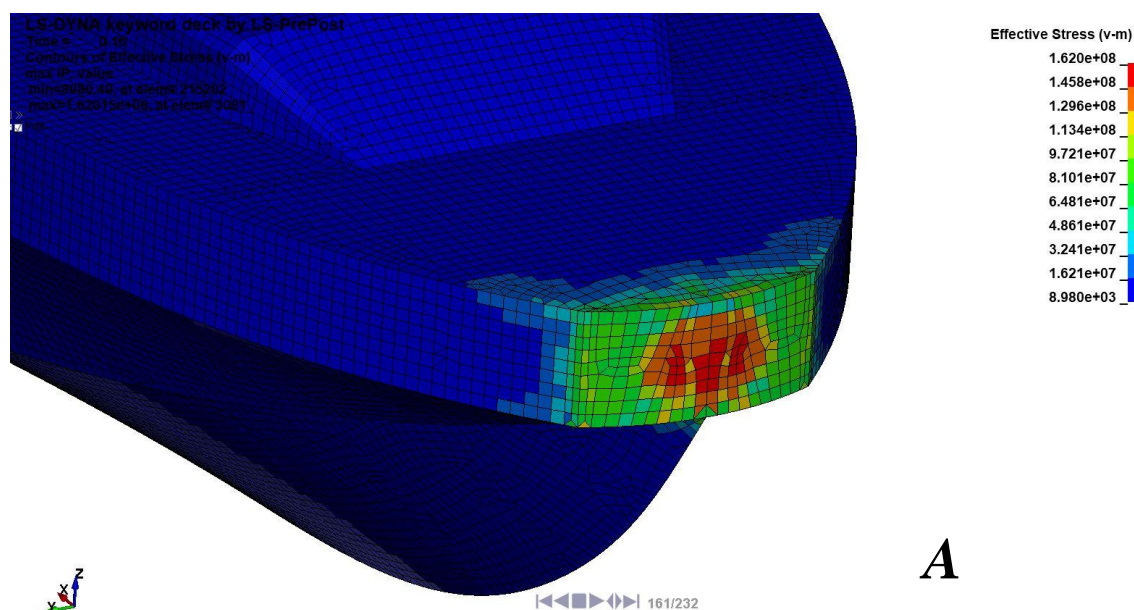
Prvo promatramo frontalni sudar okomito u ravnu krutu (nedeformabilnu) nepomičnu barijeru. Obzirom da je autonoman brod zbog svojih prethodno spomenutih specifičnosti smatran kao onaj koji će „skriviti“ sudar, smatra se da je neka vrsta frontalnog sudara najvjerojatnija pa se stoga i ispituju. Brod će se smatrati adekvatno zaštićenim ako pri nekoj

brzini sudara neće nastati trajne deformacije brodske konstrukcije koje ugrožavaju funkciju broda na ikakav način. Prikaz naprezanja i plastičnih deformacija obrađuje se u LS PrePostu koristeći *d3plot* datoteku koja je rezultat provedene analize u LS Run i sadrži model broda sa svim informacijama o provedenoj simulaciji. Da bi se zornije prikazale deformacije odnosno naprezanja na aluminiju brodske oplata, skriven je prikaz bokobrana kao i krute barijere koji zaklanjaju pogled na ključne djelove broda. Studentska verzija LS Dyne ograničava broj elemenata u simulaciji na 128 tisuća. S obzirom da model broda sa bokoštikom po cijeloj duljini ima 155 tisuća elemenata, veliki dio bokobrana je obrisan, tako da ostaje samo pramčani dio koji sudjeluje u sudaru.



**Slika 32 Prikaz plastičnih deformacija na pramcu broda pri frontalnom sudaru sa PE bokoštutnikom, brzina 4,5 čv (slučaj A)**

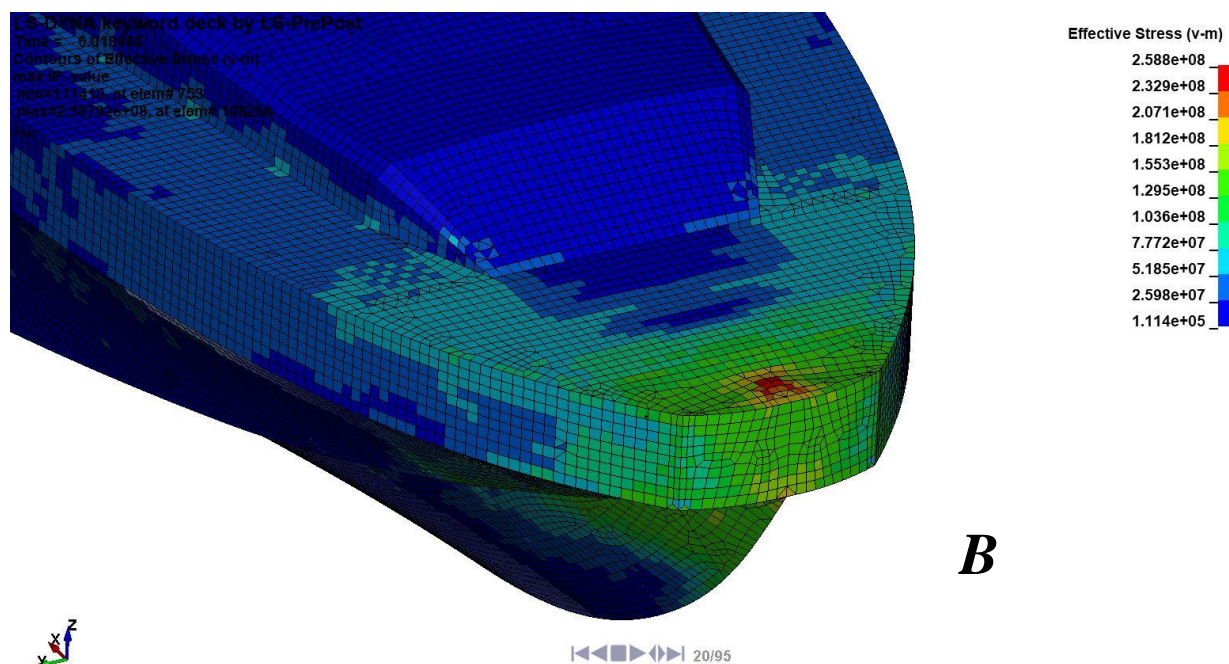
Na slici 32. i 33. vidljivi su rezultati analize frontalnog sudara pri brzini od 2,315 m/s odnosno 4,5 čvorova sa PE bokoštutnikom širine 300 mm (slučaj A). Vidljivo je da na palubi nije došlo do plastične deformacije i da su sve plastične deformacije skoncentrirane na samom vrhu pramčane oplata, što ne predstavlja naročito kritično mjesto za brodsku konstrukciju. Plastične deformacije su iznosom dosta male, većinom u području od 0,004-0,005 sa maksimalnim iznosom od 0,0084.



**Slika 33 Prikaz Von Mises naprezanja na pramcu broda pri frontalnom sudaru sa PE bokoštutnikom, brzina 4,5 čv (slučaj A)**

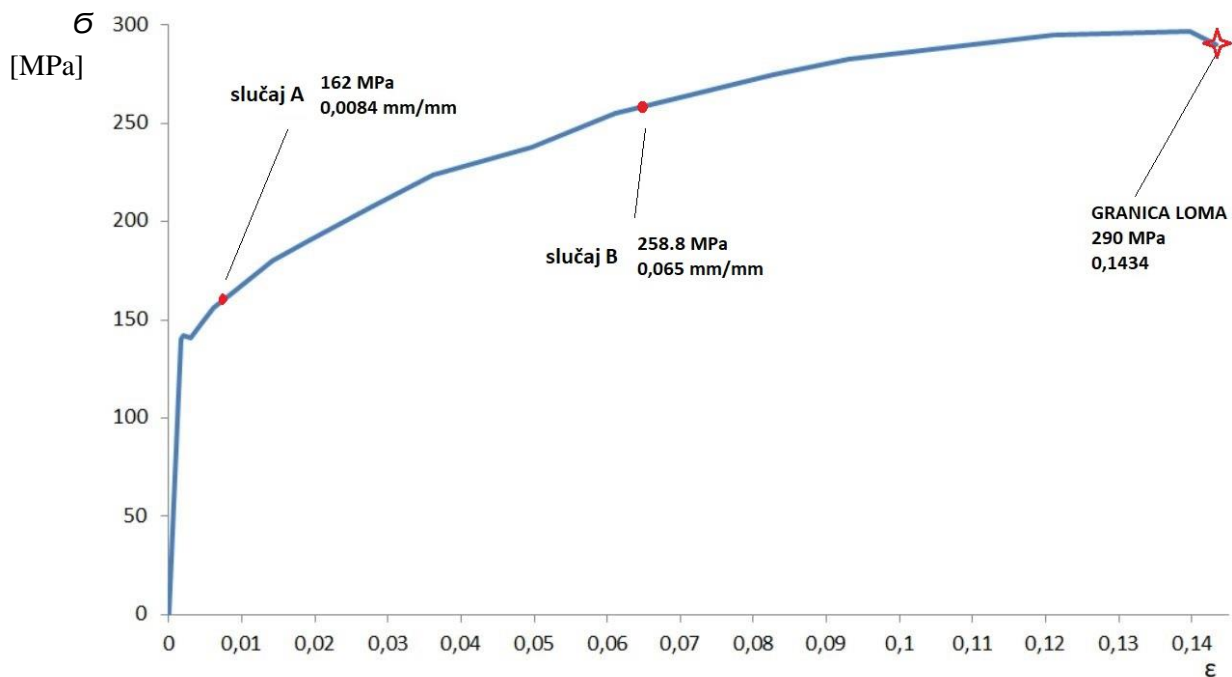


Usporedimo sad prethodno navedene rezultate sa slučajem sudara broda istom brzinom (4,5 čvorova) koji nije zaštićen nikakvom PE pjenom, odnosno udarac golog trupa o barijeru (slučaj B).



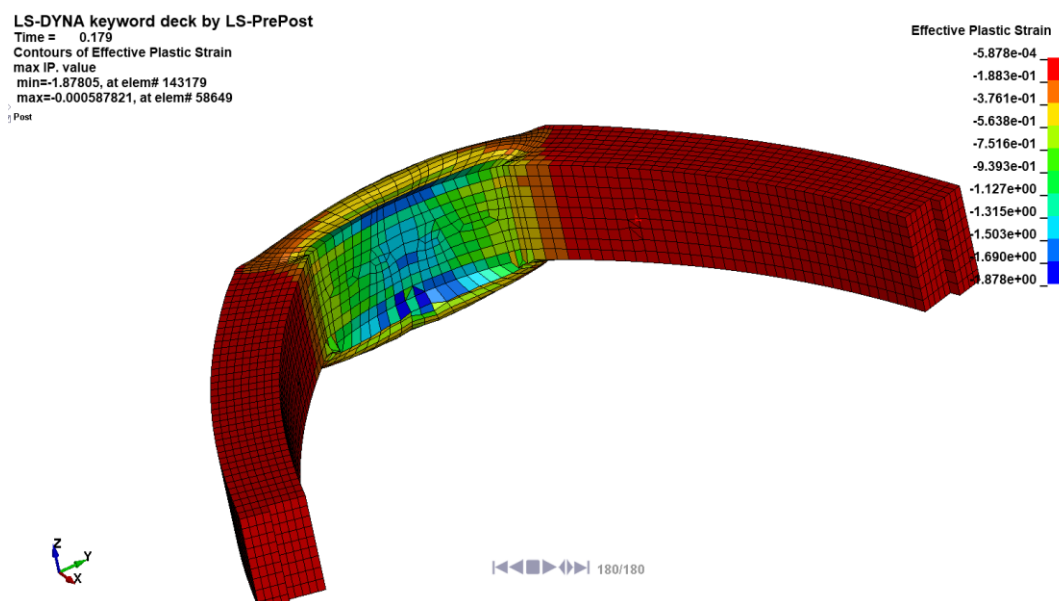
**Slika 34 Prikaz Von Mises naprezanja na pramcu broda pri frontalnom sudaru bez PE bokoštutnika, brzina 4,5 čv (slučaj B)**

Na slici 32 (slučaj A) prikazana su Von Mises naprezanja na pramcu koja su najviše skoncentrirana na samom pramcu broda sa manjim naprezanjima po palubi dok je maksimalni iznos naprezanja 162 MPa dosegnut na vrhu pramca. Na slici 34 (slučaj B) vidimo da je u slučaju sudara bez zaštitnih bokoštutnika iznos najvećih naprezanja znatno veći, 258.8 MPa u odnosu na 162 MPa u slučaju A, također veći dio konstrukcije slučaja B je ušao u plastično područje. Usporedbom nastalih naprezanja i plastičnih deformacija sa krivuljom naprezanja i deformacija odabranog aluminija (slika 35) vidimo da su plastične deformacije nastale u slučaju A (slika 33) u početnom stadiju.

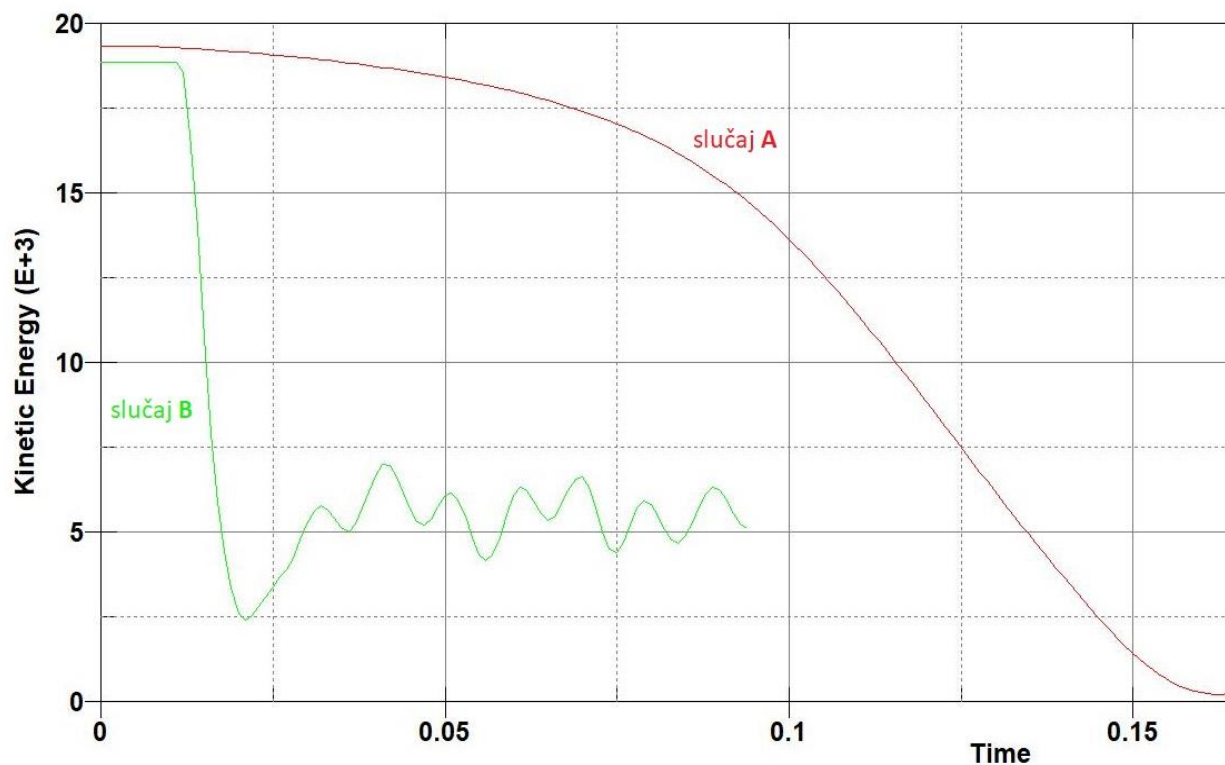


**Slika 35** Najveće naprezanje konstrukcije u sudaru brzine 4,5 čv na krivulji deformacije-naprezanja za AL5083 H111. Slučaj A – brod sa PE bokoštiticima, slučaj B brod bez ikakvih bokoštitnika

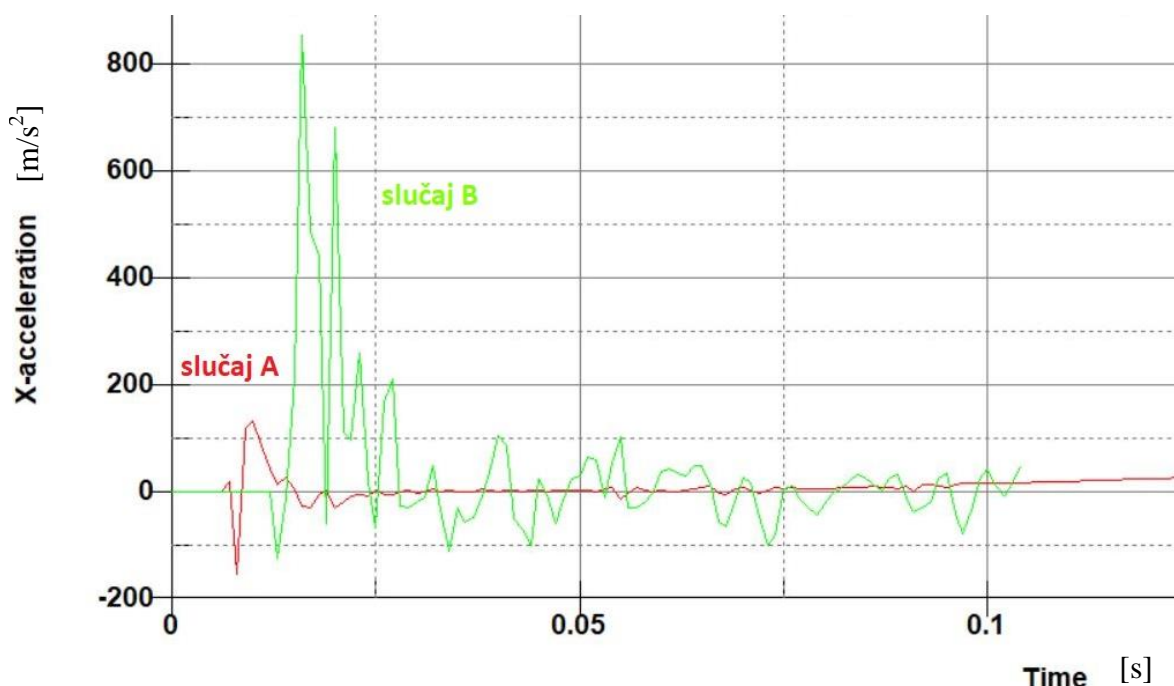
S obzirom na lokaciju, i iznos plastičnih deformacija, a i činjenicu da je mreža konačnih elemenata relativno gruba zbog ograničenja broja elemenata (128 000) u studentskoj verziji LS Dyne, možemo zaključiti da bi brod izdržao ovakav sudar bez ugrožavajućih posljedica, odnosno PE pjena je upila dovoljno kinetičke energije svojom deformacijom da zaštiti brod pri brzini od 4,5 čvorova.



**Slika 36** Prikaz deformacije PE pjene na pramcu broda, brzina 4,5 čv



**Slika 37** Prikaz pada kinetičke energije u vremenu prilikom frontalnog sudara brzinom 4,5 čv. Na dijagramu na slici 37 vidi se usporedba pada kinetičke energije slučaja A i slučaja B. Kod slučaja A kinetička energija pada postepeno, kroz duži vremenski period dok je kod slučaja B pad skokovit i nagao, u jako malom vremenskom periodu. To će uzrokovat veće udarno opterećenje kod slučaja B. Udarno opterećenje (slika 38) općenito je nepoželjno za brodsku konstrukciju no u slučaju autonomnog broda posebno može biti pogubno za razne upravljačke elemente odnosno računala, kamere RADAR, LIDAR sustave itd. S obzirom da za ovu simulaciju nije modeliran fluid koji bi djelovao prigušujuće, kinetička energija odbijanja je prisutna na grafu i veća je nego što bi bila da je fluid uzet u obzir.

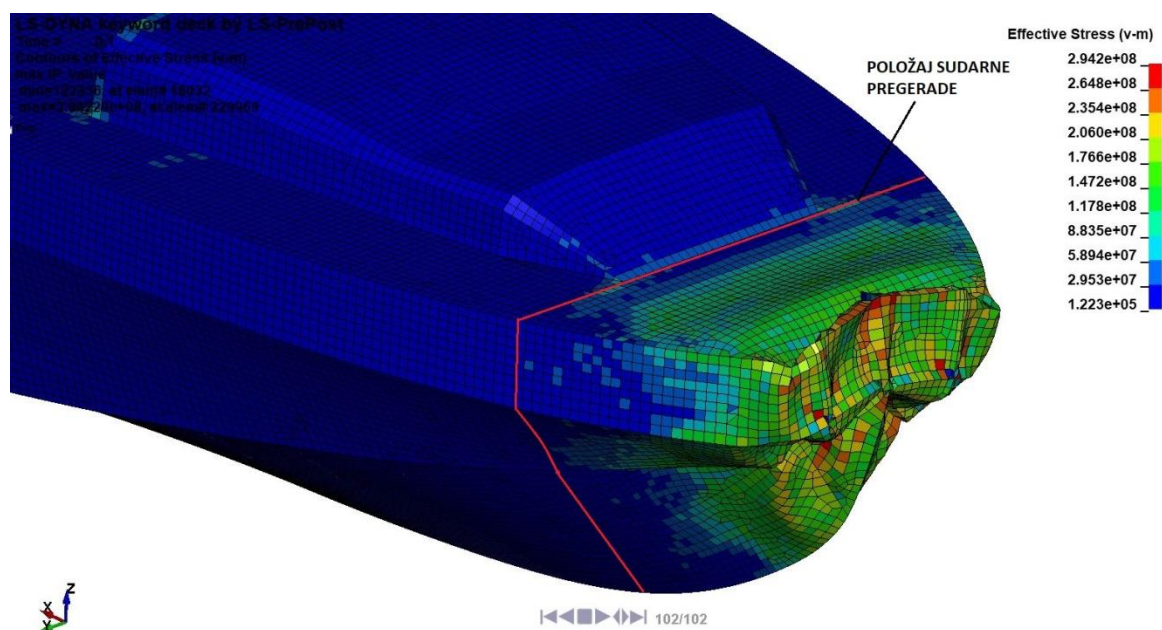


**Slika 38** Prikaz ubrzanja prilikom sudara brzinom 4,5 čv, A i B slučajevi

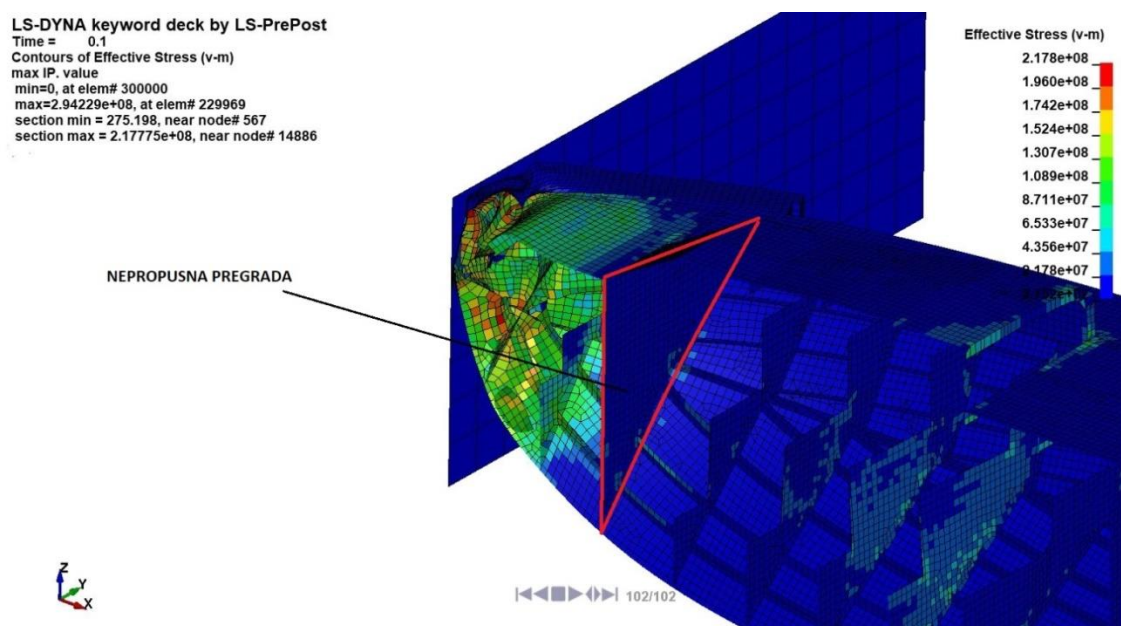
Na slici 38 prikazana su ubrzanja prilikom sudara brzinom 4,5 čvorova na brodu sa PE bokoštiticima (slučaj A) i na brodu bez ikakvog bokoštitnika (slučaj B). S obzirom da nemamo točnih informacija o prigušenju, iznosi i oscilacije ne moraju biti potpuno točni, no bitna stvar je primjetiti kvalitativnu razliku u maksimalnom iznosu ubrzanja u slučaju A i B. Da bi se dobili točni iznosi daljnja ispitivanja su potrebna.

Zaštitni element koji se ugrađuje u gotovo sve brodove danas je nepropusna pregrada ugrađena na pramcu broda. Ona se naziva sudarna pregrada i služi da zaštiti brod od plavljenja u slučaju sudara broda i propuštanja elemenata ispred sudarne pregrade ( Slika 1). Za ovaj model uzdužnjaci palube nisu postavljeni nakon sudarne pregrade s namjerom da će dio broda do sudarne pregrade služiti kao neka vrsta udarne zone koja će upiti energiju sudara i ne prenositi naprezanja a time i oštećenja na daljnji dio broda.

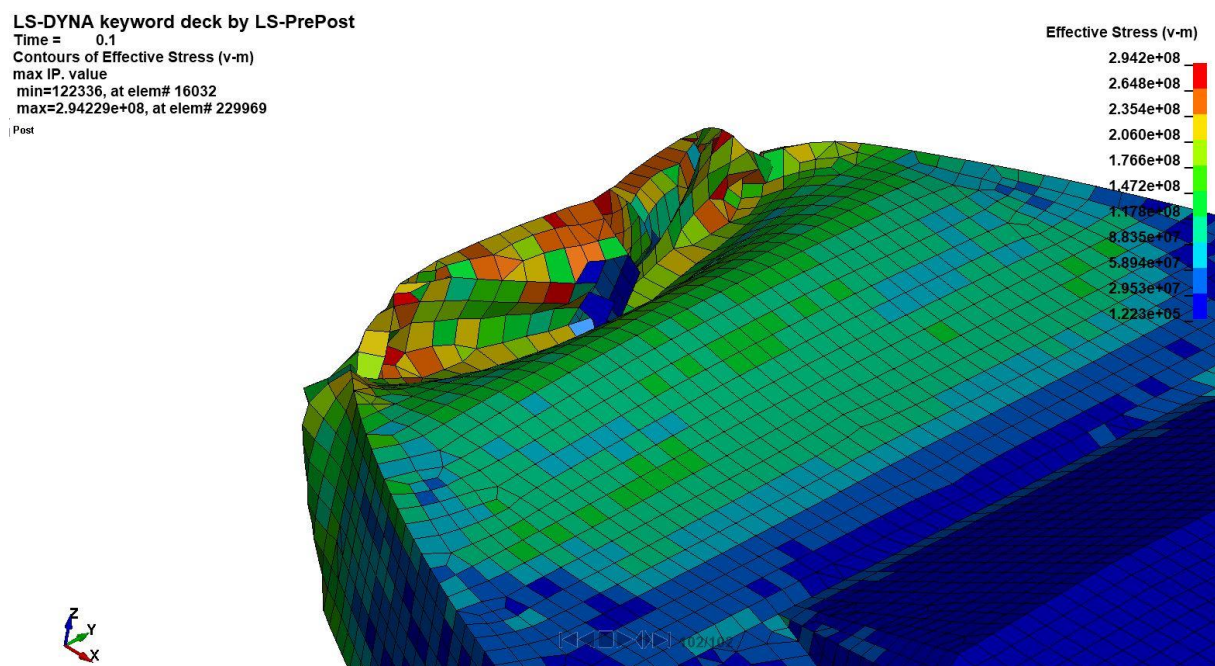
Simulacija se vrši pri brzini od 22 čvora, što otprilike predstavlja gornju granicu brzine pri kojoj će sudarna pregrada i elementi tik ispred nje biti van plastičnog područja.



Slika 39 Naprezanja u trupu broda sa PE bokoštiticima prilikom frontalnog sudara, brzina 22 čv

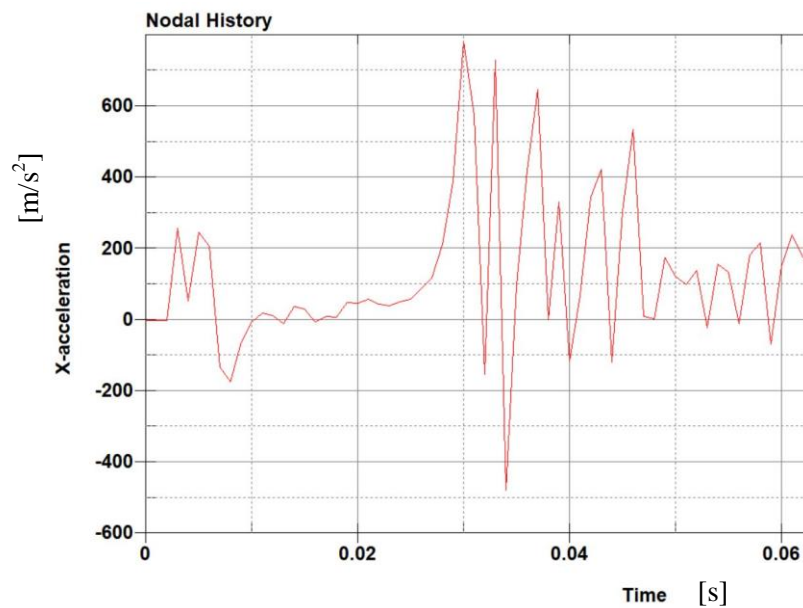


Slika 40 Prikaz presjeka broda (sa PE bokoštiticima) na uzdužnici i naprezanja u frontalnom sudaru, brzina 22 čv



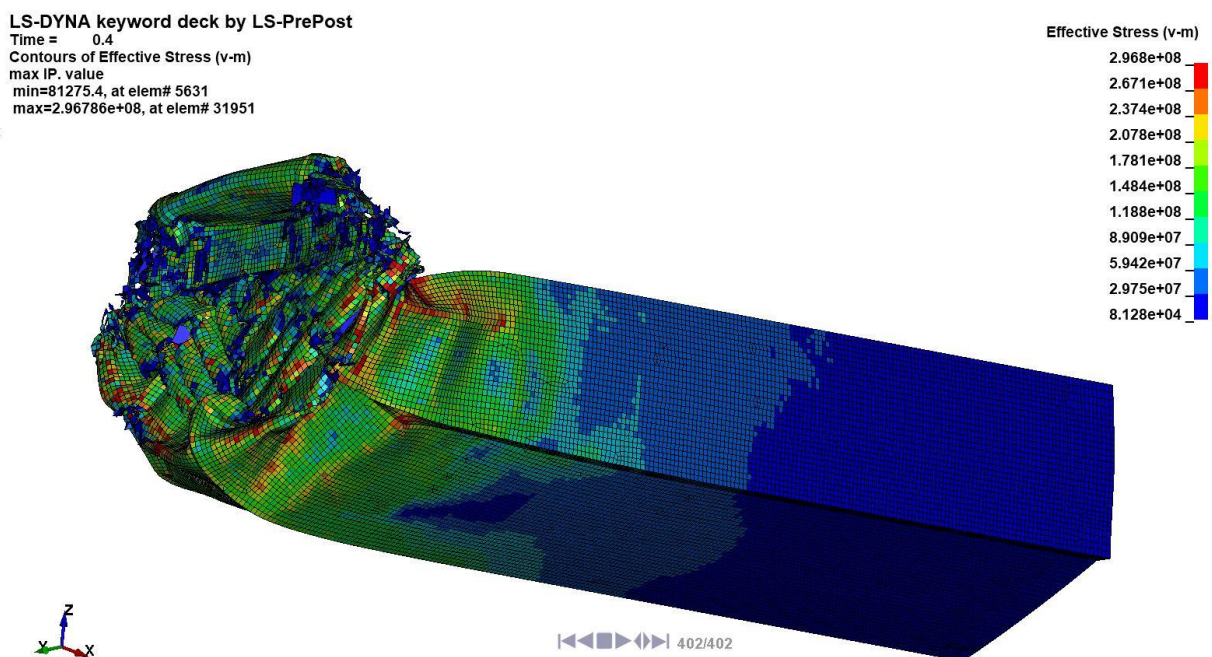
**Slika 41** Određeni elementi su dosegli granicu loma, što LS Dyna prikazuje uklanjanjem elementa u deformiranom prikazu

Naravno, da bi ovakav udar autonoman brod preživio, potrebno je projektirati i ostale komponente, posebice osjetljivu elektroničku i računalnu opremu, da budu spremni na takav udarac, kao i njihove nosače. Ovakav udarac na brodu sa posadom bi bio opasan za ljude, no uz određene projektne kriterije, besposadni brod bi mogao biti u mogućnosti da se vrati u luku za popravke.

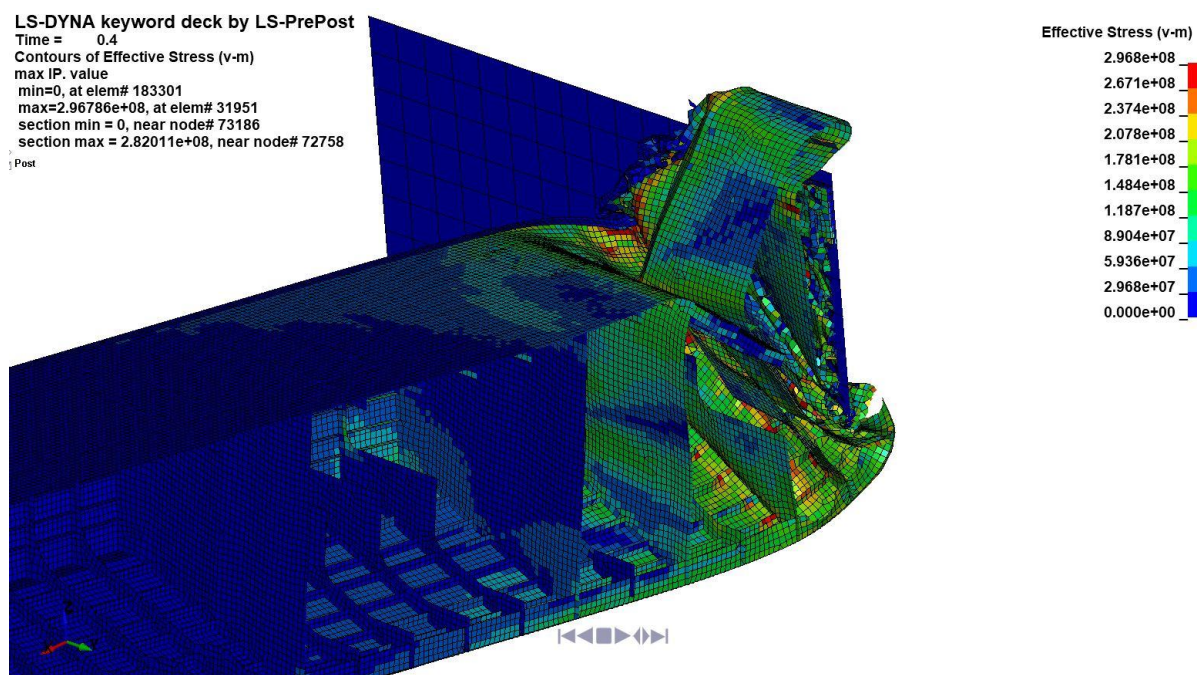


**Slika 42** Ubrzanja pri frontalnom sudaru brzinom 22 čv, ponovo, bitno je napomenuti da iznosi ubrzanja nisu nužno točni zbog nedostatka podataka o prigušenju

Također, zanimljivo je promotriti strahovite posljedice frontalnog sudara punom brzinom od 39 čvorova. U ovakvoj situaciji nikakve sudarne pregrade ni upijajuće pjene neće moći spriječiti gubitak broda. Gotovo cijela četvrtina pramčanog dijela brodske konstrukcije doživjela je potpuni kolaps, dok je konstrukcija unutar prve trećine duljine broda dosegla plastične deformacije uz veliki broj elemenata koji su dosegli granicu loma.



**Slika 43** Prikaz frontalnog sudara brzinom od 39 čvorova



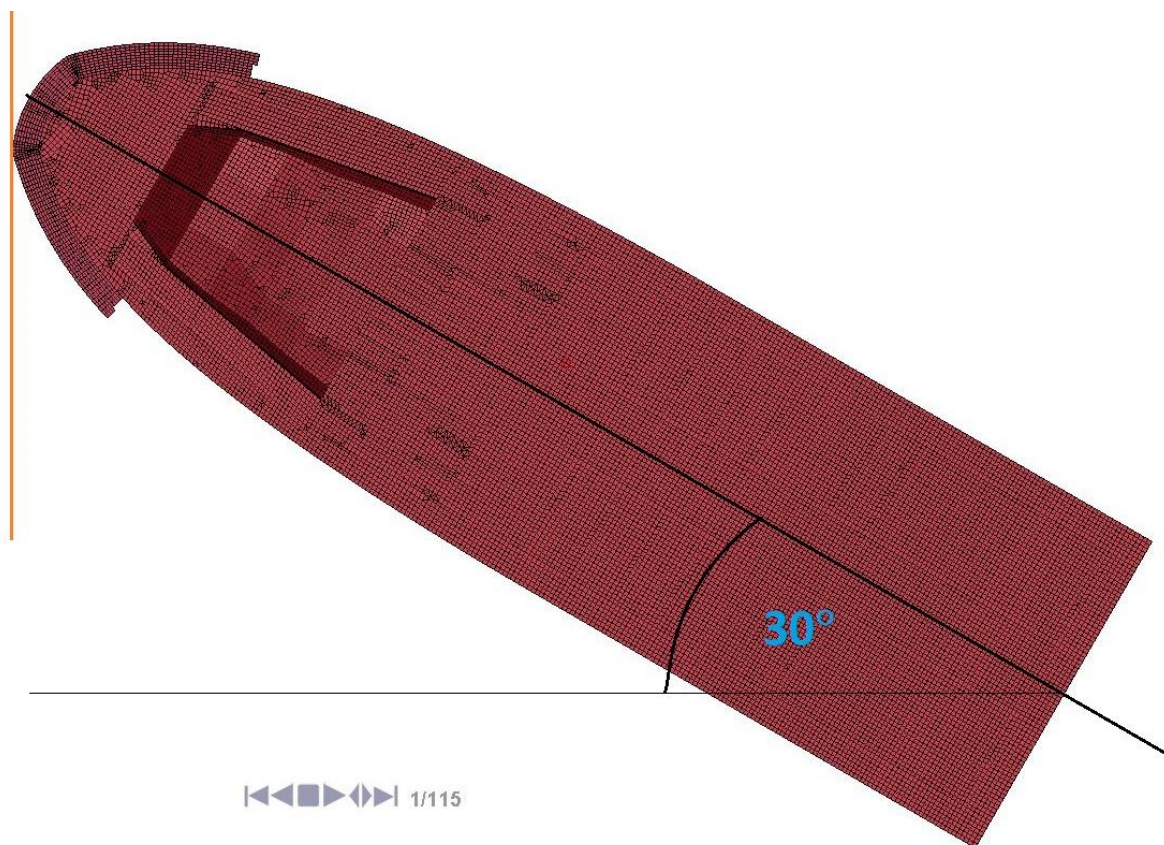
**Slika 44** Prikaz Von Mises naprezanja u sudaru brzinom 39 čv (presjek po uzdužnici broda)

Da bi se izbjegli ovakvi scenariji potrebno je što više unaprijediti brodske sustave za nadzor i upravljanje te protokole izbjegavanja sudara, kao i uvesti određenu marginu sigurnosti u pogonskom stroju i kormilarskom uređaju i pripadajućim kontrolnim sustavima.

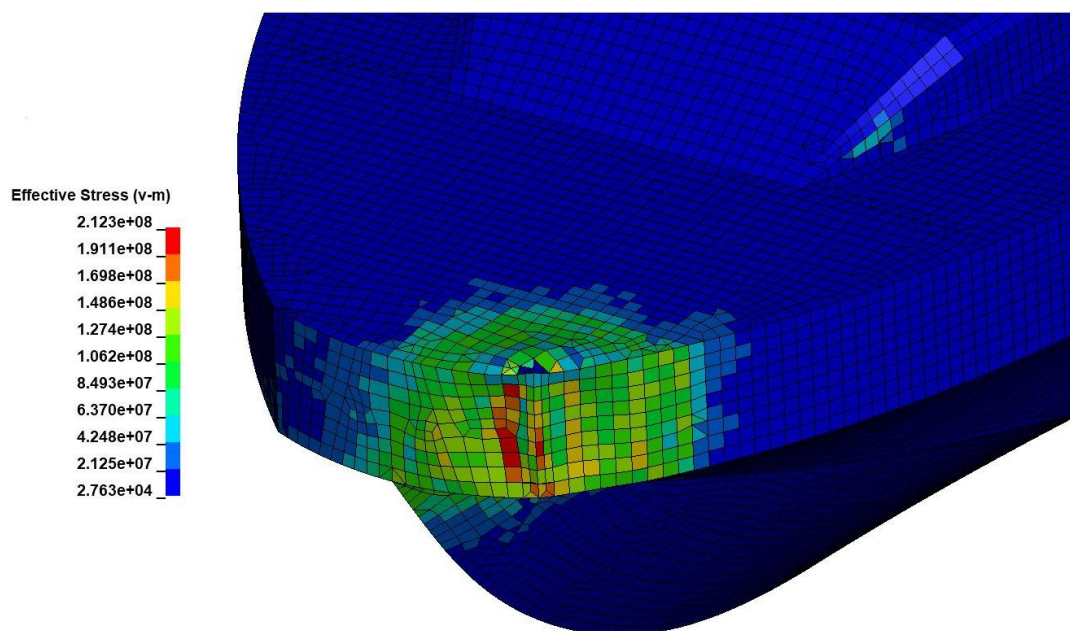


### 6.3. Frontalni sudar pod kutem od 30°

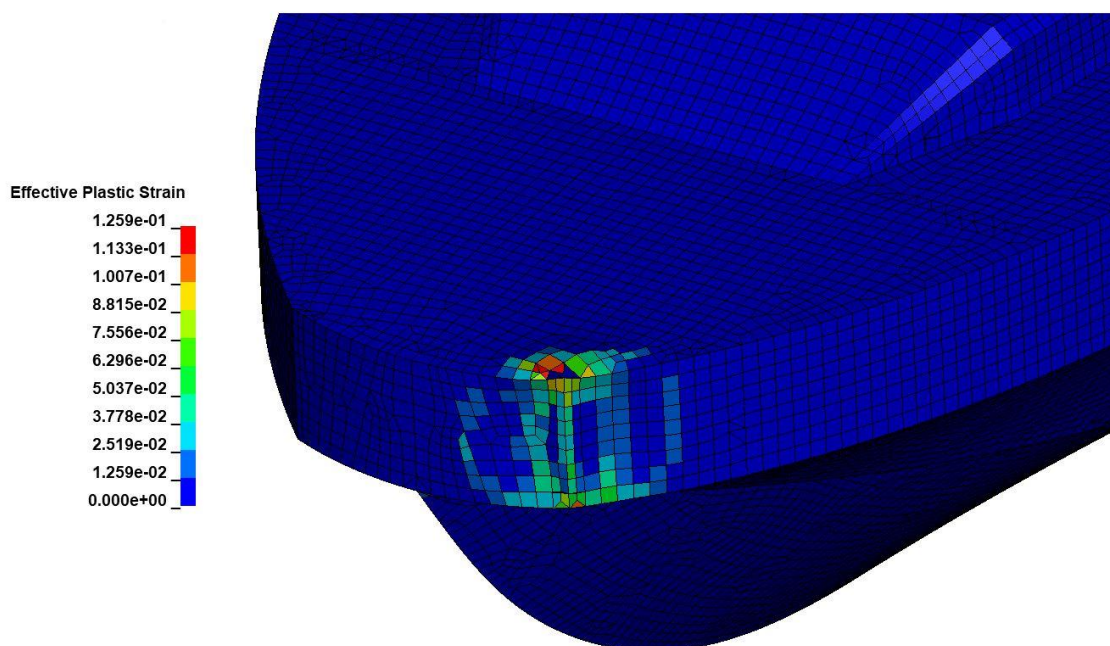
Drugi scenarij koji se često razmatra kod konstrukcije patrolnih brodova je frontalni sudar pod kutem 30 stupnjeva brzinom 10 čvorova. Kriteriji je ispunjen ako ne dođe do značajnih plastičnih deformacija. Ovaj kriterij bilo bi korisno ispitati i za konstrukciju autonomnog broda.



Slika 45 Prikaz broda za slučaj frontalnog sudara pod kutem 30° odozgo



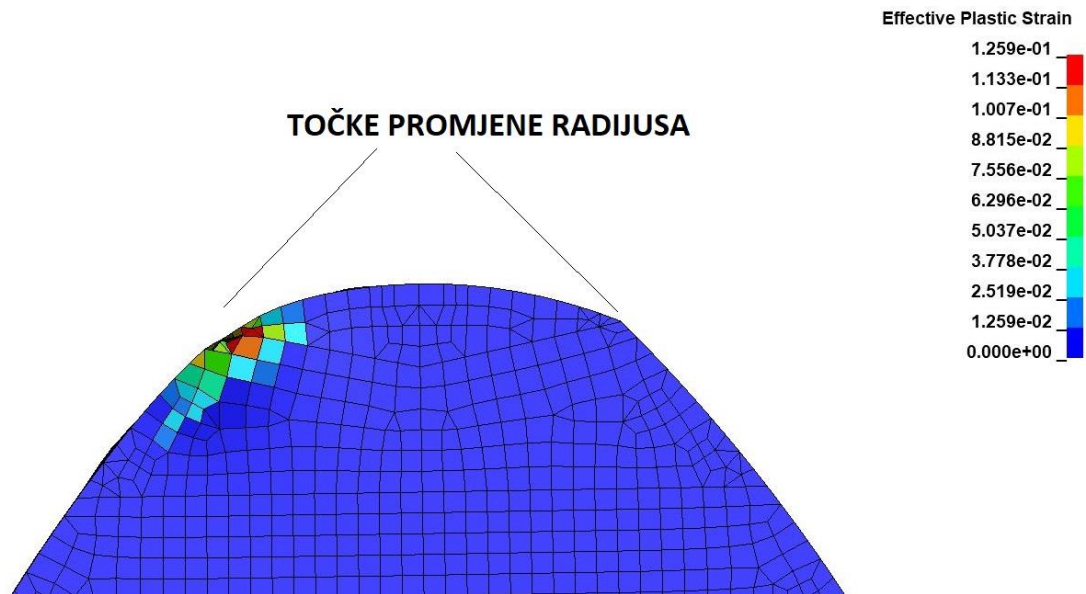
**Slika 46** Prikaz Von Mises naprežanja pri frontalnom sudaru pod kutem 30°, brod sa PE bokoštitnicima, brzina 10 čv



**Slika 47** Prikaz plastičnih deformacija pri frontalnom sudaru pod kutem 30°, brod sa PE bokoštitnicima, brzina 10 čv

Na slikama 44 i 45 vidljivo je da je najveća koncentracija naprežanja a time i plastičnih deformacija u području promjene radijusa zakrivljenosti razme što je također u blizini mjesta

prvog kontakta broda sa barijerom. Na tom dijelu nastaje koncentracija naprezanja. Maksimalna plastična deformacija iznosi 0,1259 što je blizu granici loma na 0,143 ( slika 13)



**Slika 48** Prikaz točaka promjene polumjera zakrivljenosti pramca broda

Brod sa ovakvom izvedbom konstrukcije i ovom debljinom PE gume ne može izdržati sudar sa krutom barijerom pod kutom od 30 stupnjeva pri brzini od 10 čvorova.

Drugačije oblikovanje pramca, povećanje debljine bokoštitnika ili promjena materijala potrebna je da bi brod zadovoljio ovaj konstrukcijski kriterij.

Potrebno je ispitati zadanu konstrukciju u trenutnoj konfiguraciji za sudar pod kutem od 30 stupnjeva u kojem brod ne trpi trajna oštećenja konstrukcije. Za takve rezultate potrebno je smanjenje brzine do 5,5 čvorova.

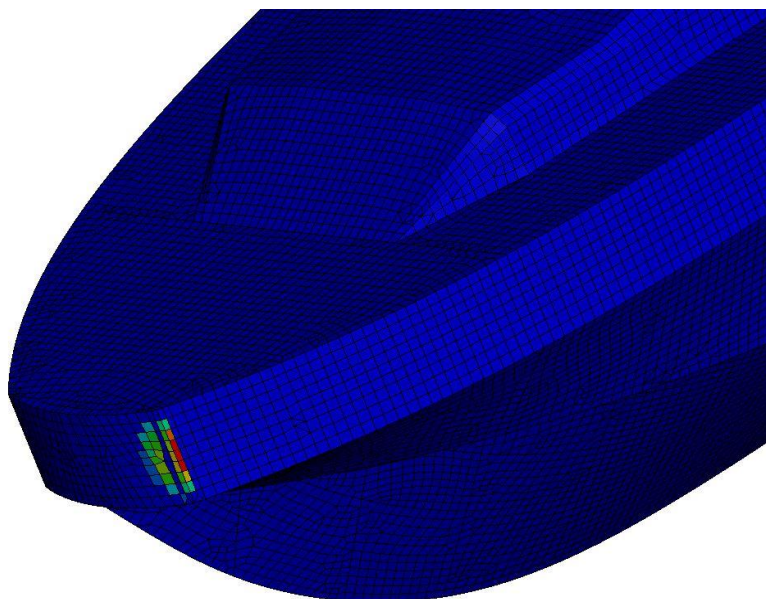
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 0.183  
Contours of Effective Plastic Strain  
max IP. value  
min=0, at elem# 1  
max=0.0172453, at elem# 1835

Post

Effective Plastic Strain

1.725e-02  
1.552e-02  
1.380e-02  
1.207e-02  
1.035e-02  
8.623e-03  
6.898e-03  
5.174e-03  
3.449e-03  
1.725e-03  
0.000e+00



**Slika 49** Prikaz plastičnih deformacija pri frontalnom sudaru pod kutem od 30°, brod sa PE bokoštiticima, brzina 5,5 čv

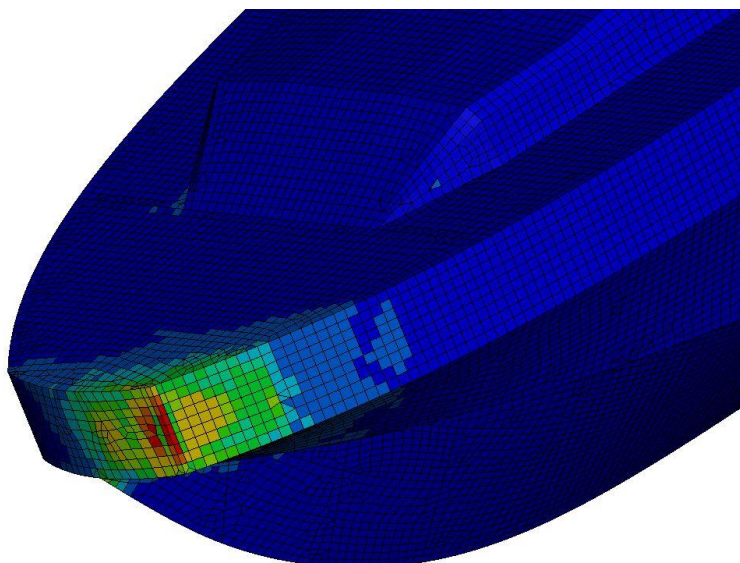
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 0.168  
Contours of Effective Stress (v-m)  
max IP. value  
min=4360.4, at elem# 123683  
max=1.86099e+08, at elem# 1825

Post

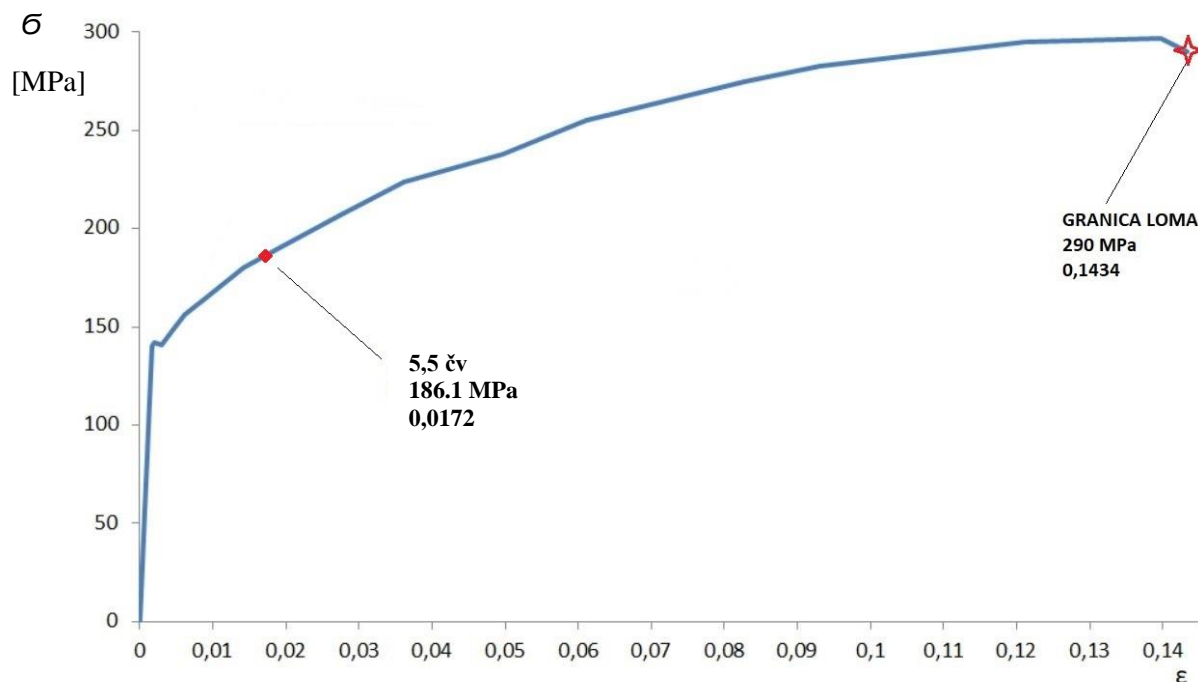
Effective Stress (v-m)

1.861e+08  
1.675e+08  
1.489e+08  
1.303e+08  
1.117e+08  
9.305e+07  
7.444e+07  
5.583e+07  
3.722e+07  
1.861e+07  
4.360e+03



**Slika 50** Prikaz Von Mises naprezanja pri frontalnom sudaru pod kutem 30°, brod sa PE bokoštiticima, brzina 5,5 čv

Vidimo da je ponovo na mjestu nagle promjene zakrivljenosti iznos naprezanja najveći a time i plastičnih deformacija koje iznosom od 186 MPa umjereno ulaze u područje plastičnosti kako je vidljivo na dijagramu 4.3.1.



**Slika 51** Naprezanje pri sudaru pod kutem  $30^\circ$ , brzina 5,5 čv na krivulji deformacija-naprezanja za AL5083 H111

Iako su prisutne plastične deformacije, maksimalni iznosi prisutni su na svega nekoliko elemenata, a zbog grubosti mreže i lokacije naprezanja možemo reći da ova naprezanja nisu direktno ugrožavajuća za brod odnosno brzina od 5,5 čvorova predstavlja gornju granicu najveće brzine s kojom bi brod pretrpio ovakav tip sudara.

## 7. ZAKLJUČAK

Iako je mogućnost zaštite protiv svih vrsta sudara gotovo nemoguć zadatak, prilikom projektiranja potrebno je razmotriti najizglednije sudare u kojima se brod može zateći a oni zasigurno uključuju neki tip frontalnog sudara. Pravilnom implementacijom materijala koji upijaju energiju brod može biti adekvatno zaštićen do određene brzine.

U ovom radu promatrana je zaštita aluminijskog broda bokoštitnikom od PE pjena širine 300 mm. Rezultati pokazuju da bokoštitnik može zaštititi brod od značajnijeg oštećenja broda pri brzinama do 5,5 čvorova za sudar pod kutem 30 stupnjeva i do brzine 4,5 čvorova za frontalni sudar. Bitno je napomenuti da bi rezultati analize bili točniji kada bi se modelirao utjecaj okolne vode.

Prostora za napredak naravno ima, koristeći veću debljinu bokoštitnika ili različit materijal te imajući na umu mogućnost sudara prilikom projektiranja same aluminijske konstrukcije, moguće je razviti brod koji je otporniji na još više tipova sudara pri većim brzinama. Također za detaljnije analize bilo bi potrebno razviti model za prigušenje pri sudaru.

## LITERATURA

- [1] “Watertight Collision Bulkhead.” [http://www.caliberyacht.com/Models\\_Common\\_Content\\_Collision\\_Bkhd.htm](http://www.caliberyacht.com/Models_Common_Content_Collision_Bkhd.htm) (accessed Feb. 09, 2023).
- [2] “C-Worker 4 ASV | L3Harris® Fast. Forward.” <https://www.l3harris.com/all-capabilities/c-worker-4-asv> (accessed Feb. 20, 2023).
- [3] “Autonomous Surface Vessel | Aquatic Drones,” Nov. 11, 2021. <https://aquaticdrones.eu/autonomous-surface-vessel/> (accessed Feb. 09, 2023).
- [4] “ULAQ Armed Unmanned Surface Vessel,” *Naval Technology*. <https://www.naval-technology.com/projects/ulaq-armed-unmanned-surface-vessel/> (accessed Feb. 09, 2023).
- [5] “Lučkoj kapetaniji Zadar stigao novi brod za traganje i spašavanje.” <https://zadarskazupanija.hr/novosti/item/598-luckoj-kapetaniji-zadar-stigao-novi-brod-za-traganje-i-spasavanje> (accessed Feb. 20, 2023).
- [6] A. Goda, “PROJEKT STRUKTURE ALUMINIJSKE BRODICE ZA TRAGANJE I SPAŠAVANJE,” info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Rijeka. Faculty of Engineering. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering. Section of Ship Construction, 2021. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:944252>
- [7] W. Abuzaid, R. Hawileh, and J. Abdalla, “Mechanical Properties of Strengthening 5083-H111 Aluminum Alloy Plates at Elevated Temperatures,” *Infrastructures*, vol. 6, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/infrastructures6060087.
- [8] “CATIA V5 Student Edition | 3DEXPERIENCE Edu.” <https://edu.3ds.com/en/software/catia-v5-student-edition> (accessed Feb. 21, 2023).
- [9] “Siemens Digital Industries Software Online Store,” *Siemens Digital Industries Software*. <https://www.plm.automation.siemens.com/store/en-us/index.html> (accessed Feb. 21, 2023).
- [10] A. Zamarin, S. Rudan, and S. Plenča, “Collision Simulation of Composite Patrol High-speed Craft Simulacija sudara kompozitnog patrolnog brzog broda,” 2018.
- [11] “Ansys LS-DYNA Student Version | Ansys.” <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-ls-dyna-student> (accessed Feb. 21, 2023).