

# Analiza čvrstoće konstrukcije riječne barže u slučaju nasukavanja

---

**Marić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:938149>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Ivan Marić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Student:

Ivan Marić

Zagreb, 2023

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

Prije svega zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Smiljku Rudanu na pomoći, korisnim savjetima i brzim odgovorima tijekom izrade ovog rada.

Uz to, želim zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima na neizmjerne podršci koju su mi pružili.

Ivan Marić



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Marić** JMBAG: **0035218566**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza čvrstoće konstrukcije riječne barže u slučaju nasukavanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the structural strength of a river barge in case of grounding**

Opis zadatka:

Prijevoz robe rijekama odvija se uz ostalo baržama, plovilima jednostavnog oblika i bez pogona, koje, najčešće u konvoju, pokreće brod tegljač bilo potiskivanjem bilo povlačenjem. Klimatske promjene značajno utječu na postojeće plovidbene puteve, npr. smanjivanjem razine vode uslijed ekstremnih suša. To značajno uvećava mogućnost nasukavanja barži, ali i sudara plovila koja se mimoilaze na suženom prostoru. Pored toga, socioekonomske promjene utječu na dinamiku riječnog prijevoza: flota brodova i barži zastarjela je, riječni terminali imaju manju učinkovitost u odnosu na morske terminale, pomorski i kopneni prijevoz predstavljaju jaku konkurenciju itd. Može se zaključiti kako riječnoj plovidbi predstoji značajna nadogradnja u vidu novih tehnoloških rješenja, uključujući autonoman i modularan prijevoz robe. U radu je potrebno proučiti specifičnost riječnog prijevoza tereta baržama. Zatim, potrebno je pregledati dostupne izvore informacija i dati pregled mogućih budućih rješenja prijevoza tereta baržama, posebno u kontekstu inovativnih konstrukcijskih rješenja. Dodatno, potrebno je analizirati statističke podatke koji se odnose na akcidentne situacije, poput sudara, nasukavanja, preprječivanja plovnog puta i slično. Na osnovi dostupnih podataka, potrebno je definirati scenarij nasukavanja za odabranu konstrukciju barže te generirati mrežu konačnih elemenata modela i provesti strukturnu analizu barže za takav događaj te utvrditi naprezanja u konstrukciji.

U završnom radu je potrebno:

1. Analizirati literaturu i ostale dostupne podatke koji se odnose na prednosti i nedostatke te propise vezane uz prijevoz robe rijekama pomoću barži.
2. Proučiti i analizirati statističke podatke koji se odnose na kritične situacije, poput sudara, nasukavanja, plovidbu uz mostove, pojavu leda na rijekama i slično.
3. Definirati scenarij nasukavanja za baržu, uz mogućnost zadavanja dodatnih opterećenja na konstrukciju broda.
4. Generirati mrežu konačnih elemenata na osnovi dostupnih nacrti konstrukcije barže i provesti pojednostavljenu analizu nasukavanja.
5. Analizirati rezultate analize i predložiti moguća poboljšanja konstrukcijskih i funkcionalnih svojstava barže s ciljem povećanja učinkovitosti i sigurnosti barže.

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

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. RIJEČNA PLOVIDBA.....  | 2  |
| 2.1. Propisi i norme.....   | 2  |
| 2.2. Prednosti riječne plovidbe.....                                  | 3  |
| 2.3. Nedostaci riječne plovidbe.....                                  | 4  |
| 3. Analiza nesreća i kritičnih situacija u riječnoj plovidbi.....     | 5  |
| 3.1. Problem nasukavanja broda.....                                   | 6  |
| 4. RIJEČNA PLOVILA.....   | 8  |
| 4.1. Riječna barža.....   | 8  |
| 5. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE RIJEČNE BARŽE.....                         | 10 |
| 5.1. Glavne dimenzije.....  | 10 |
| 5.2. Konstrukcija barže.....  | 10 |
| 5.3. Dimenzije osnovnih građevnih elemenata.....                      | 11 |
| 6. STRUKTURNA ANALIZA BARŽE.....                                      | 13 |
| 6.1. Simicentar Femap/NX Nastran.....                                 | 13 |
| 6.2. Metoda konačnih elemenata.....                                   | 13 |
| 7. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE BARŽE.....                                | 15 |
| 7.1. Geometrija konstrukcije.....                                     | 15 |
| 7.2. Izrada MKE modela.....   | 16 |
| 8. PRORAČUN NASUKAVANJA RIJEČNE BARŽE.....                            | 20 |
| 8.1. Statička analiza modela.....                                     | 20 |
| 8.2. Analiza 1.....   | 21 |
| 8.2.1. Rubni uvjeti analize.....                                      | 21 |
| 8.2.2. Zadavanje opterećenja uslijed ubrzanja zemljine sile teže..... | 24 |
| 8.2.3. Prikaz dobivenih naprežanja analize 1.....                     | 25 |
| 8.3. Analiza 2.....   | 28 |
| 8.3.1. Rubni uvjeti analize.....                                      | 28 |
| 8.3.2. Zadavanje opterećenja.....                                     | 28 |
| 8.3.3. Prikaz dobivenih naprežanja analize 2.....                     | 31 |
| 8.4. Analiza dobivenih rezultata i poboljšanja.....                   | 33 |
| 9. ZAKLJUČAK.....   | 35 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Prikaz postotka različitih nesreća unutar riječnog prometa u Bangladešu [3].....    | 5  |
| Slika 2. Prikaz mjesečnog broja različitih nesreća unutar riječnog prometa u Bangladešu [3]. | 6  |
| Slika 3. Prikaz nasukanog kontejnerskog broda u Sueskom kanalu [6].....                      | 7  |
| Slika 4. Prikaz riječne barže.....   | 9  |
| Slika 5. Prikaz raspodjele barže na 40 građevnih rebara.....                                 | 10 |
| Slika 6. Prikaz građevnog rebra.....   | 12 |
| Slika 7. Prikaz poprečne nepropusne pregrade.....  | 12 |
| Slika 8. Prikaz korisničkog sučelja studentske verzije programa Femap.....                   | 13 |
| Slika 9. Dio geometrije barže s označenim dijelovima.....                                    | 15 |
| Slika 10. Konačna geometrija barže.....  | 16 |
| Slika 11. Definiranje veličine konačnog elementa.....  | 16 |
| Slika 12. Postupak definiranja materijala.....   | 17 |
| Slika 13. Postupak definiranja svojstava elemenata mreže.....                                | 18 |
| Slika 14. Prikaz izgleda konačnih elemenata cijele geometrije.....                           | 18 |
| Slika 15. Prikaz izgleda konačnih elemenata jednog dijela geometrije.....                    | 19 |
| Slika 16. Prikaz izbornika za odabir vrste analize.....                                      | 20 |
| Slika 17. Prikaz izbornika za stvaranje grednih rubnih uvjeta.....                           | 21 |
| Slika 18. Prikaz rubnih uvjeta na krmi.....  | 22 |
| Slika 19. Približeni prikaz rubnih uvjeta na krmi.....                                       | 22 |
| Slika 20. Prikaz rubnih uvjeta uslijed nasukavanja.....                                      | 23 |
| Slika 21. Približeni prikaz rubnih uvjeta uslijed nasukavanja.....                           | 24 |
| Slika 22. Prikaz izbornika za kreiranje <i>Body Loads</i> .....                              | 25 |
| Slika 23. Naprezanja mreže za opterećenja nakon Analize 1.....                               | 25 |
| Slika 24. Detalj A raspodjele naprezanja mreže.....  | 26 |
| Slika 25. Jače skalirana raspodjela naprezanja mreže za opterećenja nakon Analize 1.....     | 26 |
| Slika 26. Jače skaliran detalj A raspodjele naprezanja mreže.....                            | 27 |
| Slika 27. Prikaz grupe površina ispod razine vode.....                                       | 29 |
| Slika 28. Prikaz izbornika za odabir površina.....   | 29 |
| Slika 29. Prikaz izbornika za definiranje funkcije distribucije hidrostatskog tlaka.....     | 30 |
| Slika 30. Prikaz izbornika za bolju vidljivost distribucije hidrostatskog tlaka.....         | 30 |
| Slika 31. Prikaz raspodjele hidrostatskog tlaka po površini.....                             | 31 |
| Slika 32. Naprezanja mreže za opterećenja nakon Analize 2.....                               | 31 |
| Slika 33. Detalj B naprezanja mreže.....   | 32 |
| Slika 34. Jače skalirana raspodjela naprezanja mreže.....                                    | 32 |
| Slika 35. Jače skaliran detalj B raspodjele naprezanja mreže.....                            | 33 |
| Slika. 36. Prikaz distribucije naprezanja modela.....  | 34 |

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Popis glavnih dimenzija ..... 10  
Tablica 2. Popis glavnih debljina ..... 11  
Tablica 3. Popis ukrepa ili nosača ..... 11



---

**SAŽETAK**

Plovidba unutrašnjim vodama još uvijek je jedan od glavnih načina prijevoza tereta, prvenstveno zbog ekonomičnosti transporta tereta, ali i zbog količine tereta koja se može prevesti. U riječnom prometu, kao i u svakoj drugoj vrsti prometa, dolazi do nesreća i raznih kritičnih situacija koje otežavaju ili onemogućuju plovidbu. Neke od tih poteškoća su sudari, nasukavanje, vremenske nepogode, razina vode kojom se plovi, i tako dalje. Riječna plovila mogu se podijeliti prema sredstvu kojeg prevoze ili po načinu plovidbe. Tako dolazimo do barže, ili potiskivača, koja služi isključivo za prijevoz tereta, a najveća prednost joj je mogućnost plovidbe po vodama niskog vodostaja. U ovom radu provedena je strukturna analiza barže u slučajevima nasukavanja, što može puno utjecati na poboljšanje sigurnosnih standarda i smanjenje rizika od ozbiljnih nesreća. Provele su se dvije analize za različite načine nasukavanja koje, u ovisnosti o rubnim uvjetima i zadanim opterećenjima, pokazuju drugačije rezultate. Za modeliranje konstrukcije barže i proračun konstrukcije koristi se programski paket Femap/ NX Nastran. U prvoj analizi provedena je strukturna analiza kada se barža nakon nasukavanja u potpunosti nalazi iznad razine mora. Konstrukcija se nakon ove analize pokazala zadovoljavajuća te za nju nisu potrebna neka poboljšanja geometrije modela. U drugoj analizi provedena je strukturna analiza kada je krmni dio barže nakon nasukavanja djelomično ispod razine vode. Rezultati analize pokazali su prevelik iznos naprezanja u određenim dijelovima konstrukcije koji zahtijevaju poboljšavanje geometrije modela tako da se određeni elementi dodatno ojačaju.

**Ključne riječi:** Riječna plovidba, barža, nasukavanje, strukturna analiza, Femap

---

**SUMMARY**

Navigation on inland waters is still one of the primary means of cargo transportation, primarily due to the cost-effectiveness of cargo transport and the volume of cargo that can be transported. In river transportation, as in any other mode of transportation, accidents and various critical situations occur, which hinder or prevent navigation. Some of these difficulties include collisions, grounding, adverse weather conditions, water levels, and so on. River vessels can be classified based on the cargo they transport or the method of navigation. This leads to the classification of barges or pushboats, which are exclusively used for transporting cargo, with a significant advantage being their ability to navigate in low water conditions. This paper presents a structural analysis of a barge in cases of grounding, which can significantly impact the improvement of safety standards and the reduction of the risk of serious accidents. Two analyses were conducted for different grounding scenarios, showing varying results depending on boundary conditions and specified loads. The Femap/NX Nastran software package was used for modeling the barge's construction and structural calculations. In the first analysis, a structural analysis was conducted when the barge is fully above sea level after grounding. The construction was found to be satisfactory in this analysis, and no geometry model improvements were required. In the second analysis, a structural analysis was performed when the stern of the barge is partially submerged below the water level after grounding. The results of the analysis indicated excessive stress levels in certain parts of the structure, necessitating geometry model enhancements to reinforce specific elements.

**Key words:** River navigation, barge, grounding, structural analysis, Femap

## 1. UVOD

Prijevoz robe unutarnjim vodama ključan je logistički dio globalne transportne industrije. Ono obuhvaća prijevoz raznih dobara brodom rijekama, jezerima, kanalima te svim drugim tekućim i stajaćim vodama u unutrašnjosti određenog teritorija. U teritorijalnim prostorima svijeta ovo je najučinkovitiji, a često i jedini mogući transport tereta. Glavna prednost riječne plovidbe jest mogućnost transporta tereta većih gabarita nego što je moguće prevesti cestovnim i željezničkim transportom [1].

Ovaj tip prijevoza uglavnom je jeftiniji od cestovnog i željezničkog prometa te pomaže smanjivanju gužve na cestama i tračnicama. Osim toga, prijevoz unutarnjim vodama često je ekološki prihvatljiviji od drugih načina prijevoza, budući da stvara manje emisija i zahtijeva manje utrošene energije.

Plovila riječne plovidbe najčešće se dijele prema tome imaju li vlastiti porivni uređaj ili nemaju. Plovila s vlastitim porivnim uređajem su putnički, teretni (tegljači, potiskivači i mješoviti) i specijalni (ribarski, jahte, trajekti) brodovi. Plovila bez vlastita porivnog uređaja su teglenice i potisnice (barže) [1]. Uz ovu glavnu podjelu imamo i neka manja plovila i pomoćne konstrukcije, kao što su čamci, skele, plutajuća postrojenja, itd.

Međutim, postoje i određena ograničenja korištenja unutarnjih plovnih putova za prijevoz. Na plovne putove mogu utjecati vremenske i sezonske promjene, što može utjecati na pouzdanost rasporeda prijevoza. Neki primjeri vremenskih nepogoda su poplave i suše koje mogu dovesti do raznih oštećenja na brodskoj konstrukciji prilikom plovidbe. Osim toga, riječni transport općenito nije u tolikoj mjeri brz kao drugi načini prijevoza što ga čini neprikladnim za vremenski osjetljive pošiljke.

U ovom radu obradit će se pojedinosti riječne plovidbe, predstaviti će se karakteristike riječne barže te detaljno analizirati čvrstoća konstrukcije riječne barže u slučaju nasukavanja kao jednog od većih problema u riječnoj plovidbi.

## 2. RIJEČNA PLOVIDBA

Riječna plovdba predstavlja jedan od oblika prometa unutrašnjim vodama. Riječna plovdba ima bogatu povijest koja seže tisućama godinama unatrag te je ključna za razvoj brojnih drevnih civilizacija. Iako u Hrvatskoj riječni promet ima manji značaj u odnosu na druge oblike transporta, u brojnim europskim i svjetskim zemljama, poput Nizozemske, Njemačke, Francuske, Sjedinjenih Američkih Država i Kine, riječni promet predstavlja ključnu komponentu prometnog sustava.

### 2.1. Propisi i norme

Kako bi se osigurala sigurna i učinkovita plovdba uz obraćanje pažnje na zaštitu okoliša, tijekom godina doneseni su brojni propisi i norme, kako na razini Republike Hrvatske, tako i na razini Europske unije i Ujedinjenih Naroda. Kako bi se osigurala konzistentnost i učinkovitost propisa, donese se međunarodni ugovori i konvencije koji se primjenjuju diljem svijeta.

Tako na primjer postoji Međunarodna konvencija o ograničenju odgovornosti za štete nastale na rijekama (eng. *The Strasbourg Convention on the limitation of liability in inland navigation, CLNI*) koja predstavlja okvir za naknadu štete u slučaju sudara u rijekama [2].

U Republici Hrvatskoj najvažniji pravni dokument u kojem nalazi većina korištenih propisa nalazi se u Zakonu o plovidbi i lukama unutarnjih voda.

Propisi i norme s godinama su se mijenjali i prilagođavali potrebama i uvjetima u kojima se plovdba odvija. Propisi koji u centar stavljaju sigurnost putnika i robe uključuju pravila o navigaciji, označavanju plovnih putova te kako se zaštititi od sudara, odnosno kako postupiti u slučaju istih. Takvi propisi daju jasne upute o načinu zaštite obale i obalnih područja te kako upravljati invazivnim vrstama. Nadalje, propisi su važni za osiguranje učinkovite riječne plovidbe. Njima se propisuju pravila o utovaru i istovaru robe, ispravnom postupanju kod carinskih i administrativnih poslova te standardizaciji kontejnerskog prijevoza. S obzirom na sve veću svijest o važnosti održivosti, posljednjih se godina puno veći naglasak stavlja na propise koji govore o ekološkim aspektima riječne plovidbe. Propisi koji se tiču zaštite okoliša usmjereni su na smanjivanje negativnog utjecaja plovila na vodene ekosustave, očuvanje resursa i smanjenje onečišćenja. Tako se njima nastoji regulirati emisija štetnih plinova iz brodskih motora, odlaganje otpada i opasnog tereta s plovila.

## 2.2. Prednosti riječne plovidbe

Kako je već u uvodnom dijelu rada spomenuto, riječna plovidba ima brojne prednosti u usporedbi s drugim vrstama transporta. njezina ekološka održivost i ekonomska isplativost uz veliki kapacitet za teret, kao i sve brojne prednosti, čine ju atraktivnim rješenjem za prijevoz putnika i tereta.

Ekološka održivost, ako promatramo prednosti riječne plovidbe, svakako se ističe. Riječni prijevoz ostavlja znatno manji otisak u prirodi u odnosu na cestovni ili zračni prijevoz. Njime se osigurava smanjenje emisije ugljikovog dioksida i drugih stakleničkih plinova budući da plovila uglavnom koriste manje goriva po toni tereta u usporedbi s kamionima i avionima. Nadalje, kako bi se izgradila riječna prometnica i potrebna popratna infrastruktura, potrebno je zauzeti manje zemljišta nego što je to u slučaju cestovnog i željezničkog prometa. Na taj način pridonosi se očuvanju prirodnih ekosustava. S obzirom na sve veći porast cestovnog prometa posljednjih desetljeća, često se javljaju gužve koje utječu na točnost isporuke tereta. Preusmjeravanjem što je moguće veće količine prometa, naročito u slučaju prijevoza tereta, dovodi do ublažavanja gužvi, pouzdanije isporuke i smanjenja štetnog djelovanja na okoliš. Osim što se tako smanjuje broj teretnih vozila na cestama, osigurava se očuvanje cesta i smanjuje potreba za učestalim sanacijama što upućuje na sljedeću prednost riječne plovidbe, a to je njezina ekonomičnost.

Riječna plovidba ima značajno manje troškove prijevoza tereta na velike udaljenosti od drugih opcija što je prije svega omogućeno skalabilnošću. Drugim riječima, u jednom putovanju moguće je prevesti veće količine tereta što smanjuje potrebu za više vožnji po istoj ruti, a time i troškove. Ekonomičnost riječne plovidbe se, osim u vidu troškova, može promatrati i kroz količinu prevezenog tereta. Riječnim putovima moguće je prevesti ogromne količine tereta u jednom putovanju. Ta karakteristika riječnog prijevoza ključa je za kompanije koje se bave proizvodnjom i distribucijom budući da im se na taj način osigurava transport velikih količina sirovina i gotovih proizvoda. Manjom učestalošću vožnje istom rutom, što osigurava riječna plovidba i veći kapacitet riječnih plovila, smanjuju se troškovi transporta.

Riječna plovidba igra ključnu ulogu u razvoj teritorijalnih regija koje nemaju izlaz na more ili pristup morskim lukama. Time se potiče ekonomski razvoj i otvaraju nove mogućnosti za industrijske i poljoprivredne sektore. Također, omogućuje se učinkovit prijevoz tereta iz unutrašnjosti zemlje do najbližih luka i obrnuto. Integriranjem riječne plovidbe s drugim

načinima transporta tereta kreira se cjeloviti logistički sustav. Takvi sustavi poboljšavaju brzinu i efikasnost prijevoza tereta.

### **2.3. Nedostaci riječne plovidbe**

Unatoč brojnim prednostima koje riječna plovidba nudi, javljaju se i određeni nedostaci. Ti nedostaci utječu na efikasnost riječne plovidbe, njezinu konkurentnost u odnosu na druge oblike transporta te održivost.

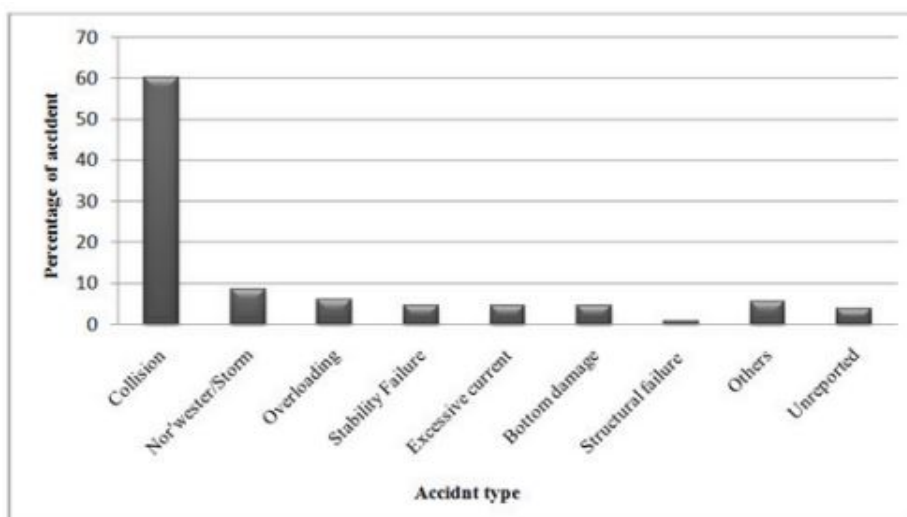
Glavni nedostatak riječne plovidbe jest ovisnost o vremensku uvjetima. Promjene razine vodostaja česte su u rijekama, a do njih dolazi zbog raznih utjecaja među kojima se ističu obilne i nedovoljne količine borana te otapanje snijega i leda. Visoki vodostaji mogu dovesti do poplava i time otežati navigaciju, dok s druge strane niski vodostaji mogu rezultirati ograničenjima broja brodova koji mogu prolaziti određenim dijelovima rijeke. Osim trenutnih utjecaja, vremenski uvjeti mogu prouzročiti i sezonske prekide plovidbe. Plovidba pojedinim rijekama, zbog smrzavanja vode, može biti obustavljena tijekom cijele zime. Takve situacije ograničavaju kontinuiranost transporta robe što dovodi do financijskih gubitaka.

Jednako kao što je slučaj s prometnicama i željeznicama, tako i riječne putove treba redovito održavati i u njih ulagati. Danas se sve češće može uočiti nedostatak ulaganja u riječnu infrastrukturu, naročito u Hrvatskoj. Manjak adekvatnih luka, pristupnih cesta i sidrišta može otežati ili čak onemogućiti učinkoviti prijevoz tereta riječnim putovima. Pritom je, uz izgradnju novih objekata, važno ulagati i modernizirati postojeće vodne putove i popratnu infrastrukturu.

### 3. Analiza nesreća i kritičnih situacija u riječnoj plovidbi

Analiza nesreća i kritičnih situacija u riječnoj plovidbi je ključna za poboljšanje sigurnosti na rijekama i zaštitu okoliša. Rasprostranjenost nesreća u riječnoj plovidbi, uključujući nasukavanje, može varirati ovisno o geografskoj lokaciji, gustoći prometa, uvjetima na rijeci, ljudskih grešaka i slično.

Identificirane su različite vrste nesreća unutar riječne plovidbe, kao što je sudar, nasukavanje, oluja, preopterećenje, nedostatak stabilnosti, prekomjerna struja, oštećenje dna, strukturni kvar i drugo. Na Slici 1. prikazan je postotak različitih nesreća unutar riječnog prometa u Bangladešu. Iz analize je sasvim vidljivo da je sudar (60,3%) dominantan uzrok nesreća. Nesreće povezane s Nor'westerom ili olujom (8,7%) događaju se kada je vrijeme loše prirode [3].



Slika 1. Prikaz postotka različitih nesreća unutar riječnog prometa u Bangladešu [3]

| Month     | Collision | Nor <sup>w</sup> -wester/ Storm | Overloading | Stability Failure | Excessive current | Bottom damage | Structural Failure | Others | Unreported | Total |
|-----------|-----------|---------------------------------|-------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------------|--------|------------|-------|
| January   | 19        | 0                               | 2           | 2                 | 0                 | 2             | 0                  | 3      | 0          | 28    |
| February  | 18        | 2                               | 2           | 3                 | 2                 | 0             | 0                  | 0      | 0          | 27    |
| March     | 13        | 2                               | 0           | 0                 | 0                 | 0             | 0                  | 1      | 0          | 16    |
| April     | 11        | 4                               | 0           | 2                 | 2                 | 0             | 0                  | 1      | 2          | 22    |
| May       | 5         | 6                               | 2           | 1                 | 3                 | 0             | 0                  | 0      | 1          | 18    |
| June      | 5         | 3                               | 1           | 1                 | 0                 | 0             | 1                  | 1      | 1          | 13    |
| July      | 9         | 2                               | 0           | 0                 | 1                 | 0             | 0                  | 0      | 0          | 12    |
| August    | 17        | 1                               | 3           | 1                 | 0                 | 2             | 0                  | 3      | 1          | 28    |
| September | 12        | 0                               | 3           | 0                 | 2                 | 2             | 0                  | 1      | 2          | 22    |
| October   | 11        | 0                               | 0           | 1                 | 0                 | 2             | 0                  | 2      | 0          | 16    |
| November  | 7         | 0                               | 1           | 0                 | 1                 | 2             | 1                  | 1      | 1          | 14    |
| December  | 11        | 0                               | 0           | 0                 | 0                 | 1             | 0                  | 0      | 1          | 13    |
| Total     | 138       | 20                              | 14          | 11                | 11                | 11            | 2                  | 13     | 9          | 229   |

**Slika 2.** Prikaz mjesečnog broja različitih nesreća unutar riječnog prometa u Bangladešu [3]

Slika 2. prikazuje distribuciju različitih vrsta nesreća po mjesecima. Iz slike je sasvim jasno da se nesreće tipa sudara događaju tijekom cijele godine. Ali tijekom mjeseca siječnja, veljače i kolovoza najviše je nesreća zbog sudara. Većina nesreća zbog oluje dogodila se u sezoni monsuna (ožujak-srpanj). Nesreće zbog preopterećenja i prekomjerne struje događaju se manje-više tijekom cijele godine. Nesreće povezane s štetom dna dogodile su se kada je dubina vode manja. Dakle, tijekom sezone monsuna zbog prisutnosti odgovarajuće dubine vode, obično se ne događaju nezgode povezane s oštećenjem dna [3].

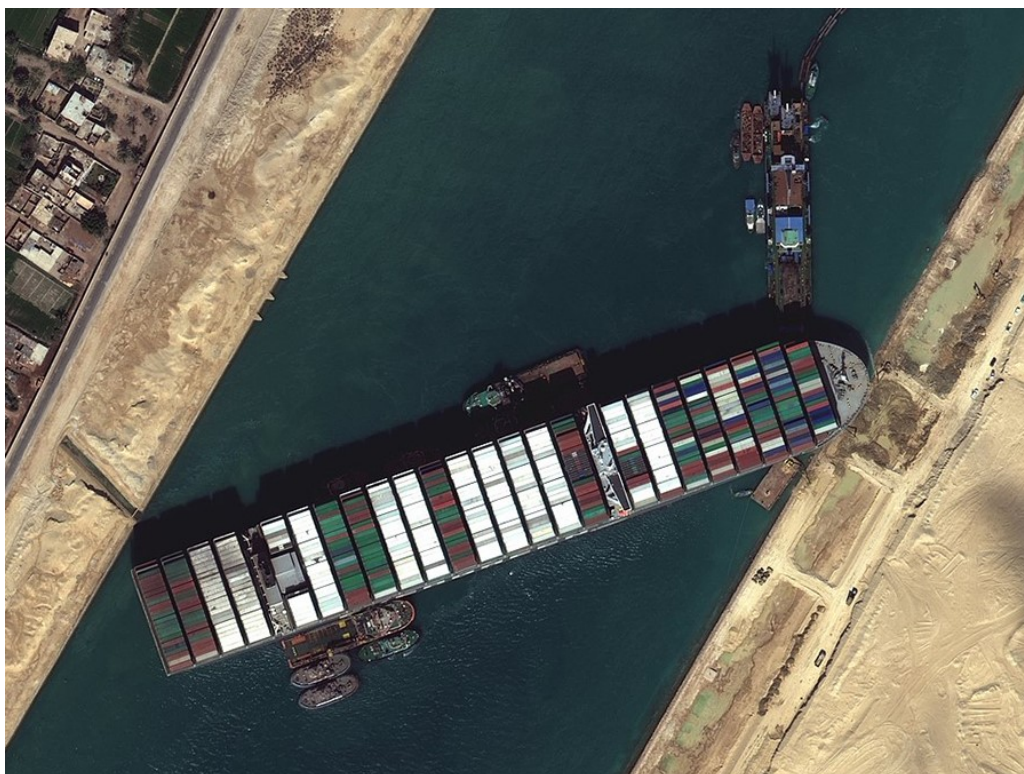
### 3.1. Problem nasukavanja broda

Nasukavanje u riječnoj plovidbi predstavlja ozbiljan problem kada brod završi na obali rijeke. Proces nasukavanja broda uključuje velike kontaktne sile, urušavanje konstrukcije trupa, te probij vanjske oplate, dok se istovremeno javlja međudjelovanje s globalnim pomacima i cjelokupnom čvrstoćom trupa, što može uzrokovati slom brodskog trupa kao grednog nosača. Osobine morskog dna, topologija dna, kao i scenariji nasukavanja su odlučujući faktori koji utječu na proces oštećivanja [4].

Jedan od glavnih i aktualnih uzroka nasukavanja broda u riječnom prometu je presušivanje rijeka, to jest jako smanjenje razine vode. Velike europske rijeke važne su gospodarske rute, ekosustavi i sastavni dijelovi gradova kroz koje teku. No zbog visokih temperatura i dugotrajne suše koja je zadesila zemlje širom kontinenta, rijeke imaju premalo vode i njihove temperature su iznimno visoke. Jedna od njih je Rajna. Obično je prosječna dubina ove rijeke oko dva metra.



Na nekoliko je mjesta, međutim, sada vodostaj pao ispod metra. U jednom tjesnacu blizu njemačkog grada Koblenza početkom kolovoza razina vode iznosila je samo 56 centimetara. Što dugotrajno nizak vodostaj znači za industriju pokazalo se 2018. godine. Tada je brodski promet bio u prekidu 132 dana zbog niskog vodostaja. Većina pogona u kemijskoj industriji, proizvodnji čelika, papira, građevinskog materijala, kao i poljoprivreda bili su ozbiljno ili vrlo ozbiljno pogođeni niskim vodostajem [5].



**Slika 3.** Prikaz nasukanog kontejnerskog broda u Sueskom kanalu [6]

## 4. RIJEČNA PLOVILA

Riječnim plovilima moguć je transport putnika i različitog tereta što uključuje sirovine, gotove proizvode, energetske resurse i kontejnere. Sirovine uključuju raznovrsne resurse korištene u industrijskoj proizvodnji i za svakodnevnu upotrebu kao što su žitarice, rude i minerali, građevinski materijali ili drvena građa. Uz sirovine, riječnim putovima mogu se prevoziti i gotovi proizvodi poput automobila, industrijskih strojeva i opreme, papira i kartona. Energetski resursi, poput nafte i plina, ugljena i biogoriva, iznimno su važni za svakodnevno funkcioniranje suvremenog društva, a do brojnih dijelova svijeta dolaze upravo rijekama.

U riječnom prometu postoje dvije vrste tehnoloških procesa prijevoza i plovidbe, a međusobno se razlikuju s obzirom na to kojim se prijevoznim sredstvima određeni proces ostvaruje. Prva vrsta odnosi se na prijevoz tereta i putnika brodovima, odnosno na plovidbu broda. Druga vrsta odnosi se na prijevoz tereta plovnim sastavima, odnosno na plovidbu konvoja [7]. Potonju tehnologiju moguće je dodatno podijeliti na tegljenu i potiskivanu, iako se danas tegljena tehnologija prijevoza primjenjuje vrlo ograničeno. Iako je prethodno navedeno kako je u velikom broju europskih zemalja riječni promet vrlo razvijen, one se međusobno razlikuju s obzirom na zastupljenost korištene tehnologije. Tako se na primjer u Francuskoj 90% riječnog prijevoza odvija brodovima, dok se na dunavskom koridoru isto toliko transporta ostvaruje plovnim sastavima [8].

### 4.1. Riječna barža

Riječna barža, odnosno potiskivač, posebno je dizajnirano plovilo namijenjeno za poriv potiskivanog sastava što se odnosi na “čvrsto povezani sastav plovila, osim čamaca, od kojih je najmanje jedno plovilo postavljeno ispred potiskivača” [9], a takav sastav smatra se čvrstim sastavom. Ovom vrstom plovila moguće je vršiti jedino prijevoz tereta, a njihova prednost leži u boljoj mogućnosti prilagodbe u uvjetima niskog vodostaja budući da se spajanjem većeg broja jedinica u sastav kompenzira ograničenje dubine i povećava nosivost konvoja. Međutim, plovni sastavi imaju i određenih nedostataka. Tako se u slučaju prolaska kroz kanale i brodske prevodnice, često dogodi da sastave na ulasku treba rastaviti, a na izlasku ponovo sastaviti što značajno utječe na vrijeme potrebno za prijevoz robe.



**Slika 4.** Prikaz riječne barže

## 5. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE RIJEČNE BARŽE

Pomoću tehničkih karakteristika riječne barže i osnovnih nacрта možemo modelirati konstrukciju kojom onda analiziramo različite slučajeve nasukavanja.

### 5.1. Glavne dimenzije

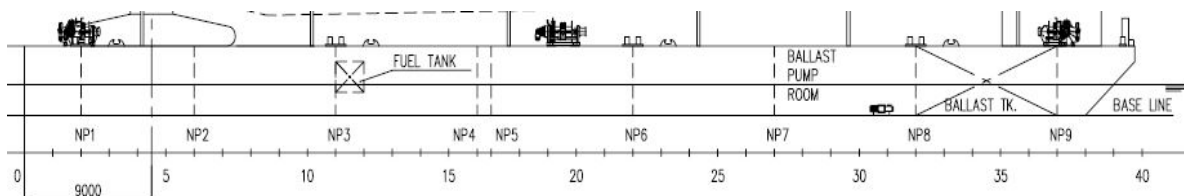
Polazeći od glavnih dimenzija sličnih objekata za prethodne analize odabrano je:

Tablica 1. Popis glavnih dimenzija

| Podatak | Mjera  |
|---------|--------|
| Duljina | 78,5 m |
| Širina  | 31,0 m |
| Visina  | 4,5 m  |
| Gaz     | 1.62 m |

### 5.2. Konstrukcija barže

Duž pontona raspoređeno je 40 građevnih rebara (GR) što vidimo na Slici 5. Razmak građevnih rebara je 2,0 m osim između GR16 i GR17 koji su razmaknuti 1,0 m. Ponton je s jednim uzdužnim i jednim poprečnim koferdamom, oba širine 1,0 m, podijeljen na četiri dijela. Uzdužni koferdam je smješten u simetralnoj ravnini pontona a poprečni leži između GR16 i GR17. Ovi koferdami predviđeni su za eventualnu podjelu pontona na četiri manja pontona.



Slika 5. Prikaz raspodjele barže na 40 građevnih rebara

Gledajući po dužini ponton je podijeljen s osam poprečnih nepropusnih pregrada, NP1 do NP8, na sljedeće dijelove koji se broje od krme prema pramcu: krmeni pik, prostori 1, prostori 2, prostori 3, poprečni koferdam, prostori 4, prostori 5, prostori 6, pramčani pik. Opločenja dna, boka, palube i uzdužnih pregrada ukrepljeni su uzdužnjacima. Ovi su uzdužnjaci poduprti

okvirnim nosačima, koji se sastoje od rebrenice, okvirnog rebra boka i okvirne sponje, postavljenim na svakom građevnom rebru osim na onima na kojima se nalaze poprečne pregrade. Poprečne pregrade i zrcalo ukrepljeni su vertikalnim ukrepama koje su poduprte s podvezama. Ove ukrepe vezuju se na dnu za uzdužnjake dna a uz palubu za uzdužnjake palube. Razmak svih ukrepa je 750 mm.

### 5.3. Dimenzije osnovnih građevnih elemenata

Pregled dimenzija dan je u Tablici 2 i Tablici 3.

**Tablica 2.** Popis glavnih debljina

| Popis                          | Debljina, mm |
|--------------------------------|--------------|
| Opločenje dna                  | 15,0         |
| Opločenje boka                 | 10,0         |
| Opločenje palube               | 15,0         |
| Opločenje nepropusnih pregrada | 10,0         |

**Tablica 3.** Popis ukrepa ili nosača

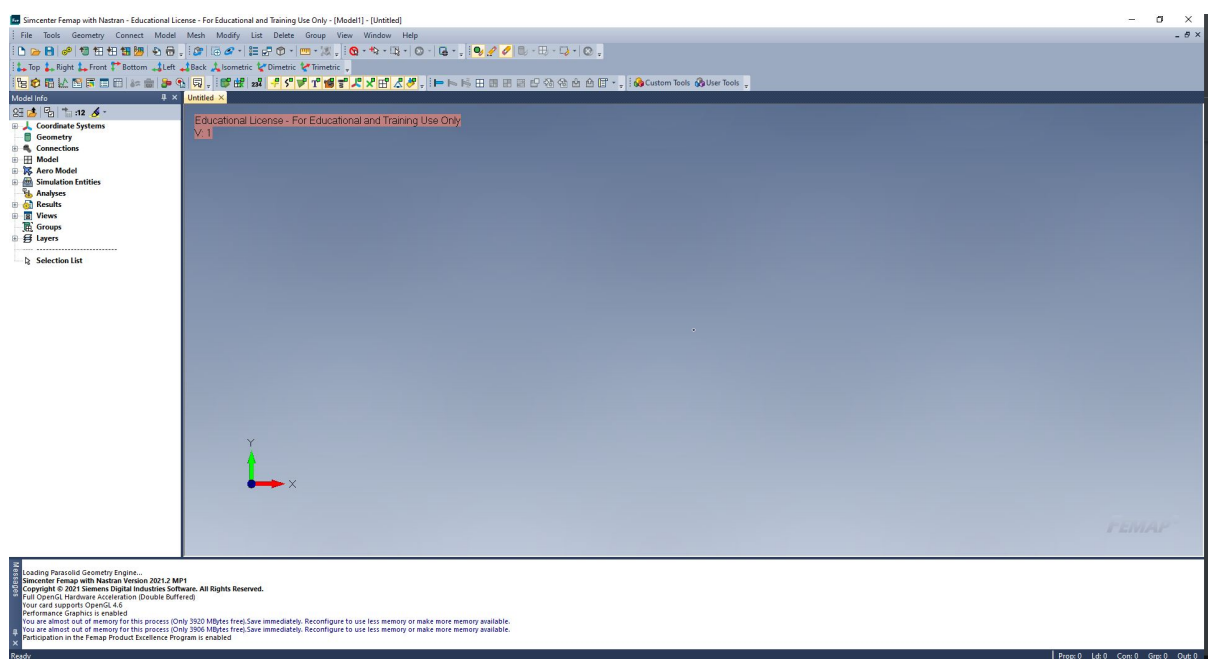
| Naziv ukrepe ili nosača               | Standardni profil ili nosači |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Uzdužnjaci dna                        | HP 120 x 8                   |
| Uzdužnjaci boka                       | HP 120 x 8                   |
| Uzdužnjaci palube                     | HP 120 x 9                   |
| Ukrepe uzd. pregrada, gornje          | HP 120 x 8                   |
| Ukrepe nepropusnih poprečnih pregrada | HP 160 x 9                   |
| Rebrenice                             | T 600x10 / 120x15            |
| Okvirna rebra boka                    | T 400x10 / 120x15            |
| Okvirne sponje                        | T 600x10 / 230x15            |
| Podveza vert. ukrepa nepr. pregrada   | T 600x10 / 230x15            |



## 6. STRUKTURNA ANALIZA BARŽE

### 6.1. Simicentar Femap / NX Nastran

Simcenter Femap je napredna aplikacija za simulaciju za kreiranje, uređivanje i provjeru modela konačnih elemenata složenih proizvoda ili sustava. Možete koristiti napredne tijekove rada u Simcenter Femap za modeliranje komponenti, sklopova ili sustava kako biste odredili reakciju ponašanja modela kada je podvrgnut uvjetima stvarnog svijeta. Osim toga, Simcenter Femap pruža snažnu vizualizaciju i procjenu rezultata vođenu podacima i grafičkim rezultatima [10]. Femap također pruža programske alate za uređivanje površina, linije, 3D modela i slično. Na Slici 8. može se vidjeti korisničko sučelje programskog paketa koje se koristi u ovom radu.



Slika 8. Prikaz korisničkog sučelja studentske verzije programa Femap

### 6.2. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj podpodručja koja se nazivaju konačni elementi, pa se razmatrani kontinuum prikazuje kao mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi elementa koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju



---

zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava.

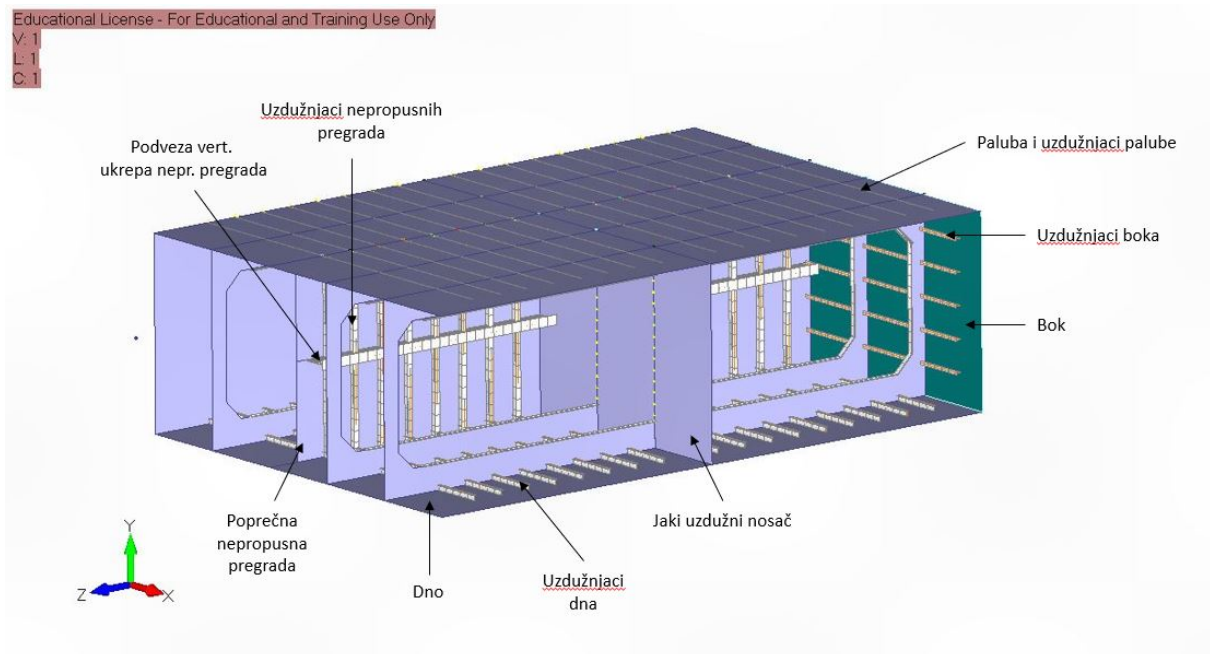
Razvoj računala omogućio je uvođenje metode konačnih elemenata u svakodnevnu inženjersku praksu te izbjegavanje mukotrpnoga ručnog računanja. Metoda konačnih elemenata ne bi se mogla primjenjivati bez današnjih računala koja omogućavaju rješavanje velikih sustava jednadžbi čije je rješavanje neophodno prilikom primjene metode konačnih elemenata. Osim skraćivanja vremena potrebnog za izradu proračuna, primjenom metode konačnih elemenata moguće je u vrlo kratkom roku napraviti i veliki broj eksperimenata, što omogućuje dodatnu uštedu vremena, ali i izradu bolje optimiranih konstrukcija [11].



## 7. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE BARŽE

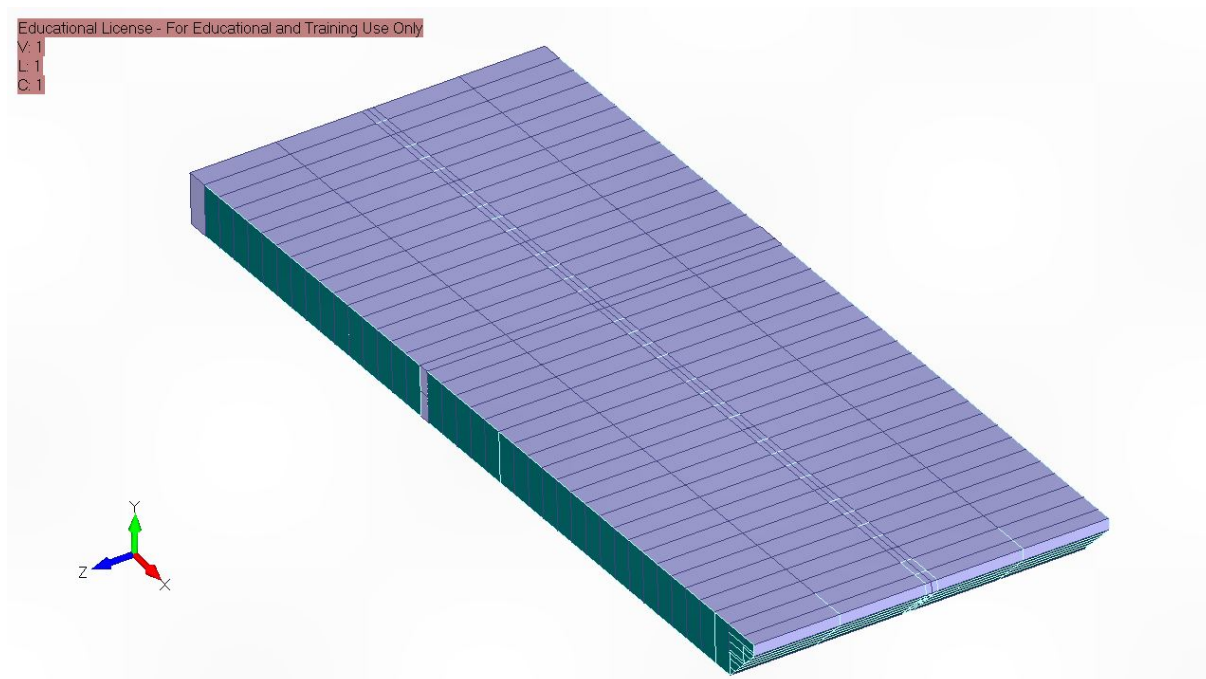
### 7.1. Geometrija konstrukcije

Geometrija je oblikovana na način da su prvo stvoreni čvorovi, koji su označeni žutom bojom. Nakon toga, ti čvorovi se kopiraju te se spajaju u površine pomoću opcije *Surface* u izborniku *Geometry*. Na Slici 9. prikazan je dio geometrije s označenim dijelovima konstrukcije.



Slika 9. Dio geometrije barže s označenim dijelovima

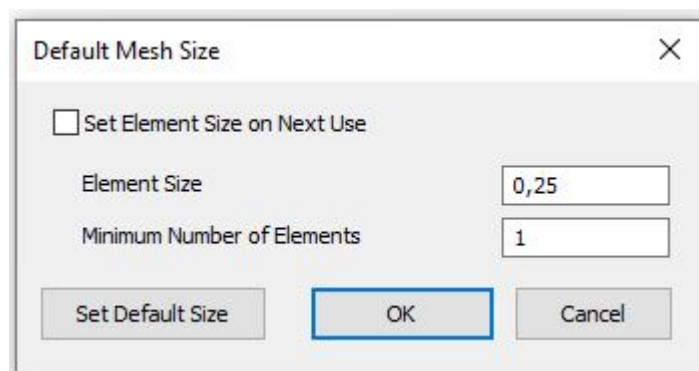
Konačna geometrija prikazana je na Slici 10.



Slika 10. Konačna geometrija barže

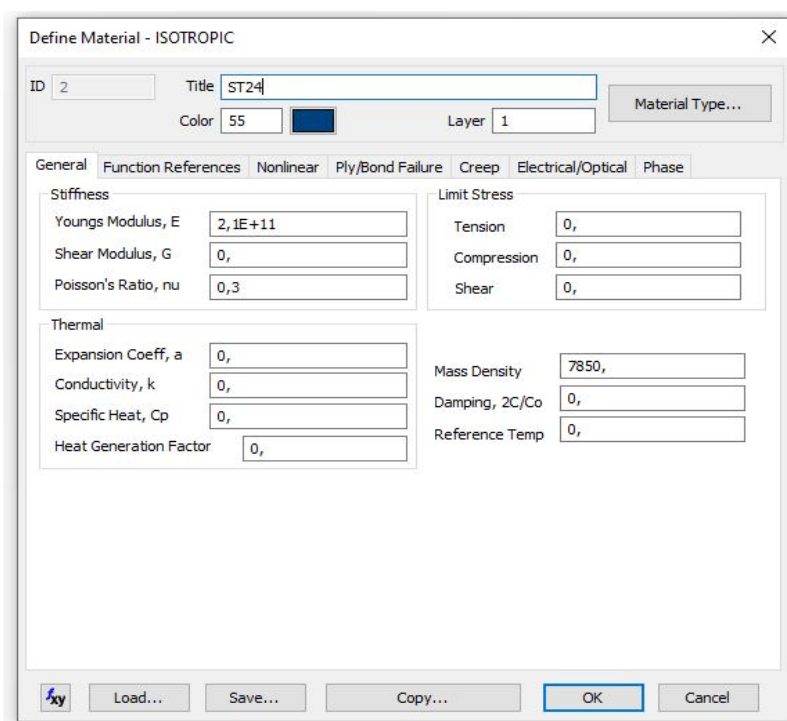
## 7.2. Izrada MKE modela

Nakon što je završena kompletna geometrija barže, potrebno je prvo definirati zadanu veličinu mreže jednog konačnog elementa. Na alatnoj traci odaberemo izbornik *Mesh* te unutar toga opciju *Mesh control, Default size*. Za potrebe ovog modela odabrala se veličina konačnog elementa 0,25 m. Postupak je prikazan na slici 11.



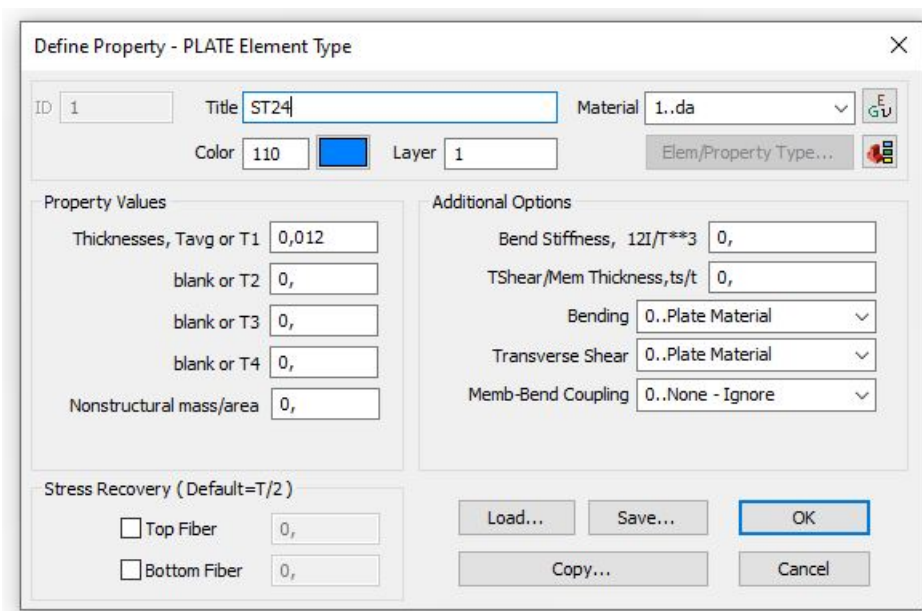
Slika 11. Definiranje veličine konačnog elementa

Sljedeći korak je definiranje svojstava konačnih elemenata, tj *Properties*. Prilikom ovog postupka također definiramo i materijal koji se koristi u ovom modelu. U našem slučaju to je čelik ST24 kojem je granica tečenja  $R_e = 235 \text{ N/mm}^2$ . Karakteristike ovog čelika prikazane su na slici 12.



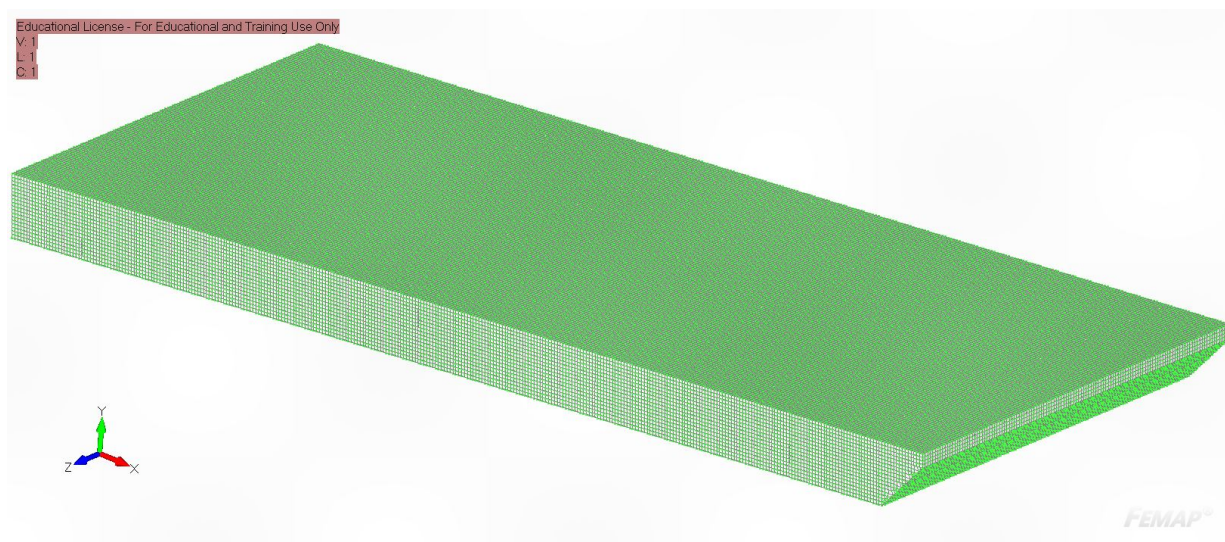
Slika 12. Postupak definiranja materijala

Definiranje *Properties*-a prikazuje se na slici 13.

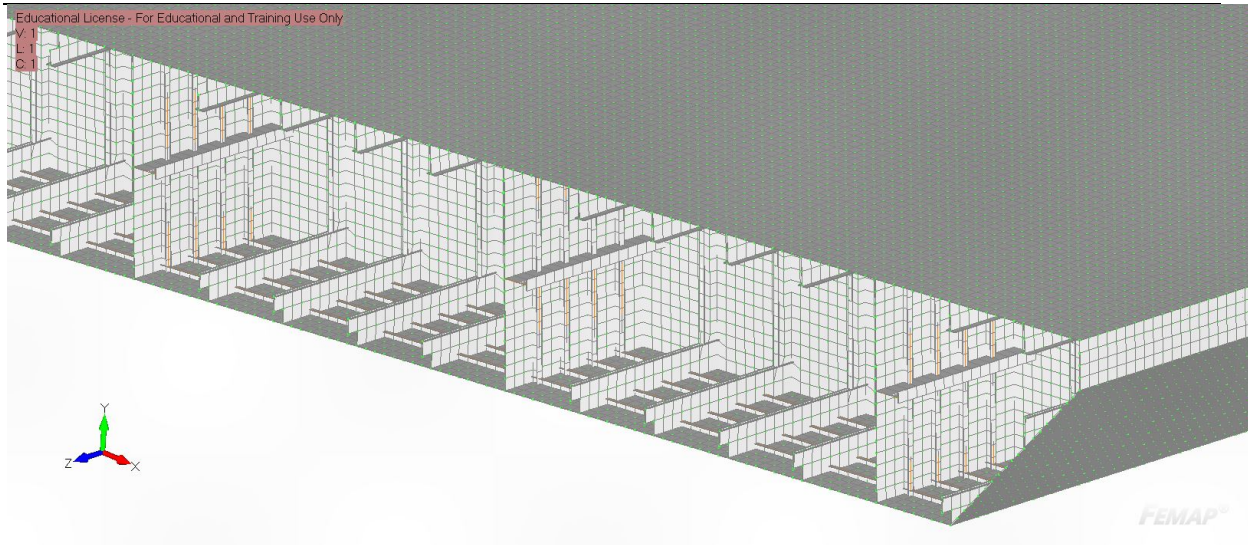


Slika 13. Postupak definiranja svojstava elemenata mreže

Izgled konačnih elemenata veličine 0,25 m prikazani su na slikama 14. i 15. Zelenom bojom bojom označeni su čvorovi konačnih elemenata. Ukupan broj elemenata u ovoj mreži iznosi 200566.



Slika 14. Prikaz izgleda konačnih elemenata cijele geometrije



**Slika 15.** Prikaz izgleda konačnih elemenata jednog dijela geometrije

Prema ovim slikama možemo vidjeti da je većina konačnih elemenata četveročvorna (engl. *Quad elements*), ali se pojavljuju i linijski konačni elementi te ponešto onih sa tri čvora. Gredni konačni elementi (engl. *Beam elements*) koriste se za određene uzdužnjake, ukrepe te podveze. Budući da se za svaki lim posebno kreirana mreža konačnih elemenata, potrebno je spojiti čvorove u istim točkama kako bi se elementi povezali u cjelinu. Za to koristimo naredbu *Check coincident nodes* koja se nalazi u izborniku *Tools* na alatnoj traci.

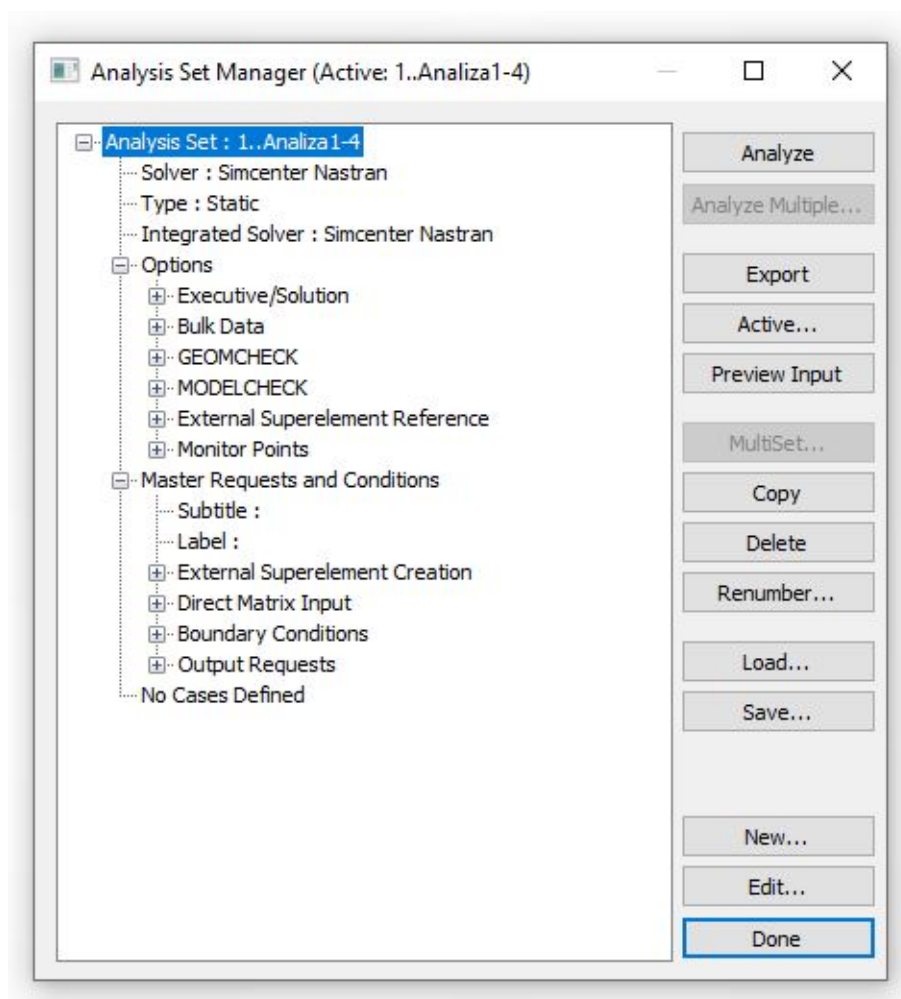


## 8. PRORAČUN NASUKAVANJA RIJEČNE BARŽE

### 8.1. Statička analiza modela

Kako bi se provela statička analiza modela, taj model mora biti u potpunosti definiran, što znači da za određenu analizu moramo imati dovršenu geometriju modela i mrežu konačnih elemenata, ali i određene rubne uvjete te pripadajuća opterećenja koje djeluju na taj model.

Postupak se provodi tako da se u izborniku *Model* na alatnoj traci odabere opcija *Analysis* te nakon toga kreiramo novu analizu (u našem slučaju to je statička analiza). Prilikom kreiranja nove analize možemo odabrati željenu vrstu analize (kao na primjer statička, nelinearna,...) Također možemo regulirati koja opterećenja i rubne uvjete želimo koristiti u analizi. Na kraju analizu pokrećemo klikom na karticu *Analyze* te nakon toga možemo vidjeti željene rezultate. Postupak kreiranja željene analize i odabira uvjeta vidimo na slici 16.



Slika 16. Prikaz izbornika za odabir vrste analize

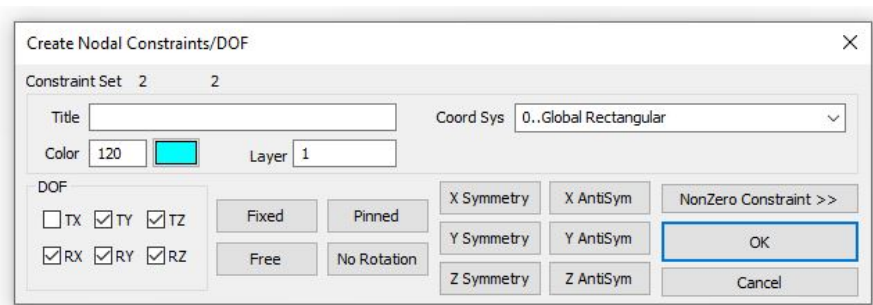
## 8.2. Analiza 1

Ovu statičku analizu modela provodimo u slučaju kada je barža nakon nasukavanja u potpunosti van površine rijeke, to jest u potpunosti nasukana. Nakon nasukavanja kut nagiba broda je 5 stupnjeva

### 8.2.1. Rubni uvjeti analize

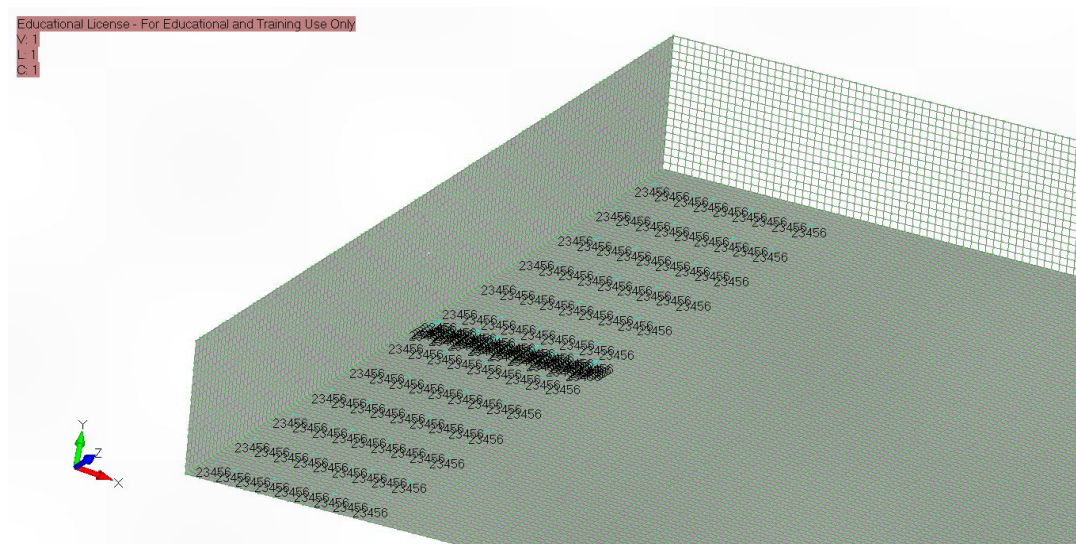
Rubni uvjet koji djeluje na krmeni dio dna barže:

Slika 17. pokazuje rubni uvjet kojeg smo postavili tako da smo fiksirali sva tri rotacijska stupnja slobode oko osi x, y i z (RX, RY, RZ) te smo fiksirali translaciju po y i z osima (TY i TZ), ali smo oslobodili translaciju po osi x (TX). Razlog tomu je što zbog uobičajenog muljevitog ili pješčanog riječnog dna su još uvijek mogući mali pomaci po uzdužnoj osi. Postupak se provodi tako da se na alatnoj traci izabere izbornik *Model* te onda *Constraint* te opciju *Nodal*. U prozoru koji se otvori odaberemo koje stupnjeve slobode želimo fiksirati.

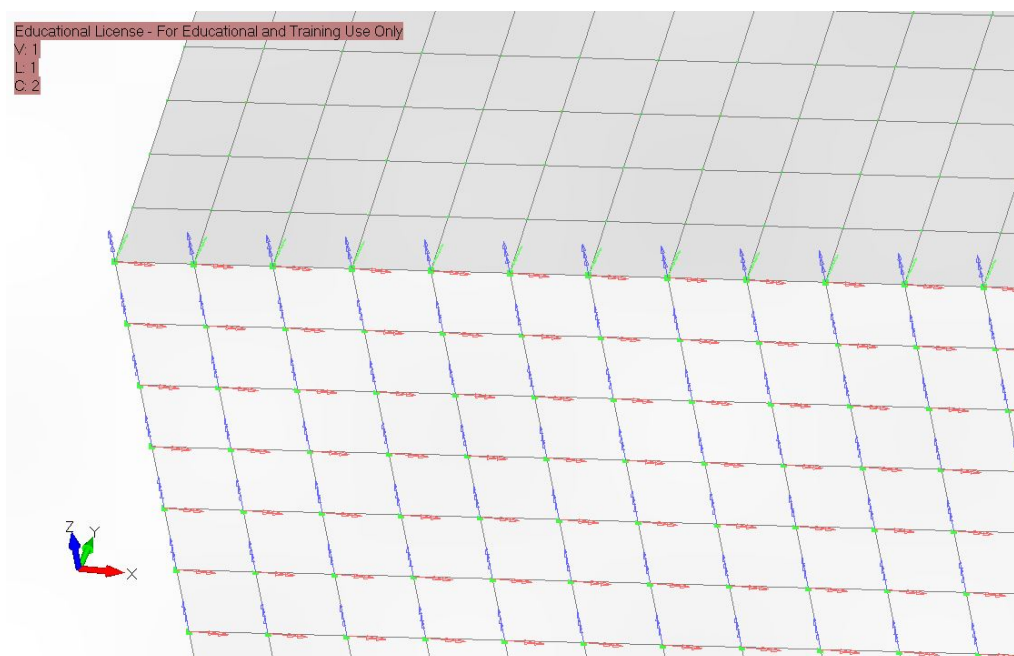


Slika 17. Prikaz izbornika za stvaranje grednih rubnih uvjeta

Slike 18. i 19. prikazuju rubni uvjet na krmenom dijelu dna barže.



Slika 18. Prikaz rubnih uvjeta na krmi



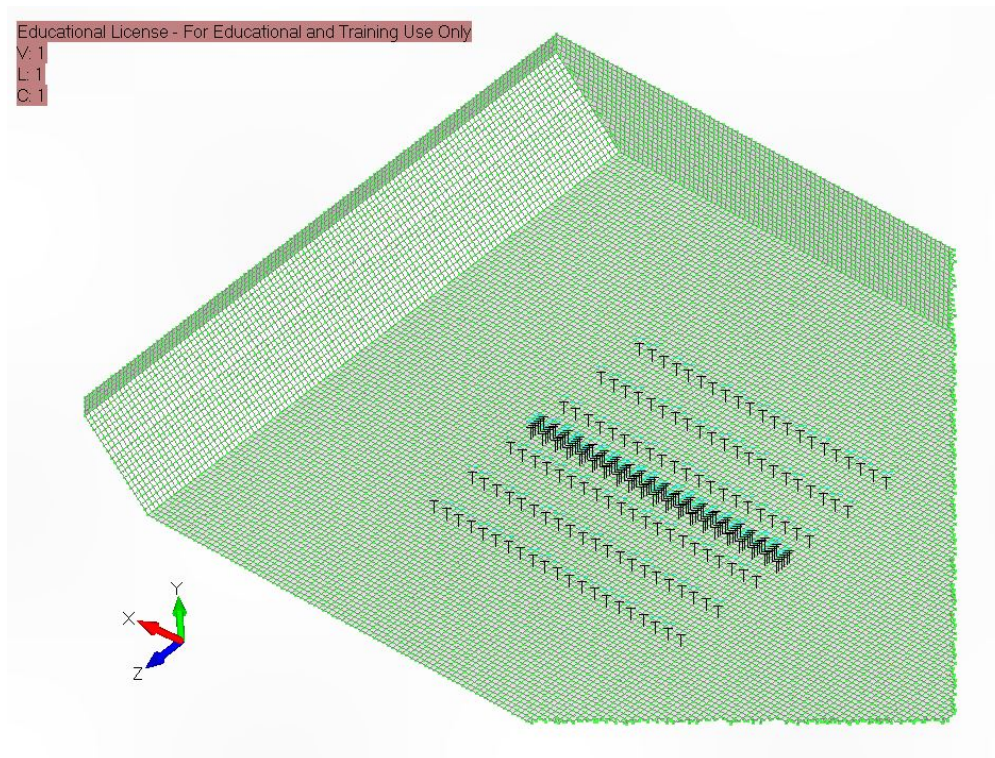
Slika 19. Približni prikaz rubnih uvjeta na krmi

### Rubni uvjet uslijed nasukavanja na pramčanoj strani barže:

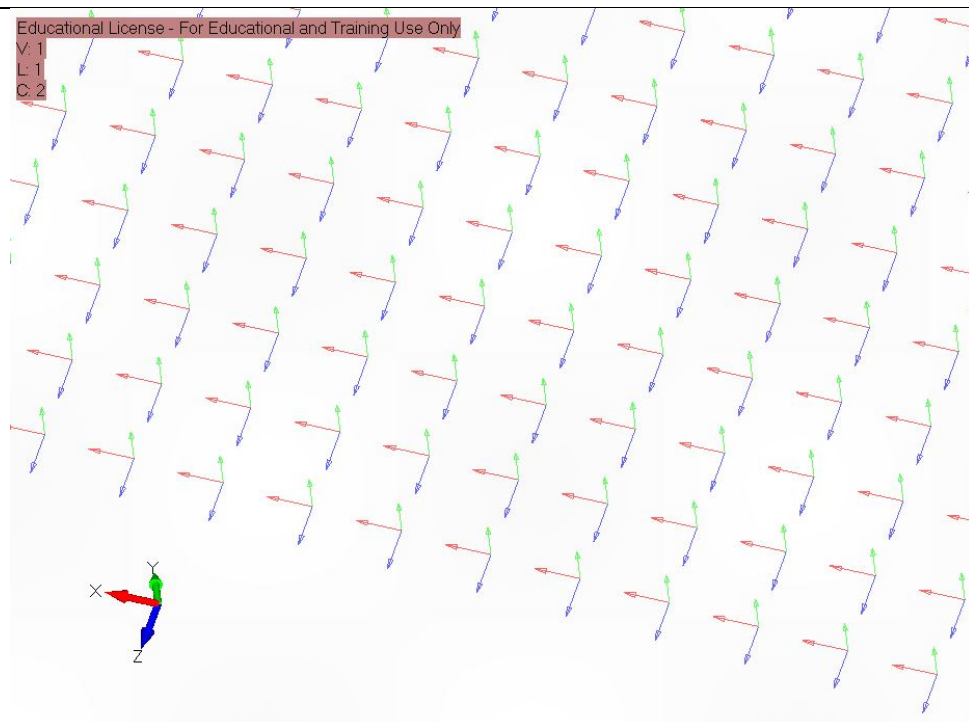
Ovaj rubni uvjet stavljamo na područje dna barže koji je u dodiru sa površinom na kojoj se barža nasukala. Tu smo fiksirali sva tri stupnja slobode prilikom translacije (TX, TY, TZ), a



rotacija je oslobođena za sve tri osi. Slike 20. i 21. pokazuju područje ovog rubnog uvjeta po dnu barže.



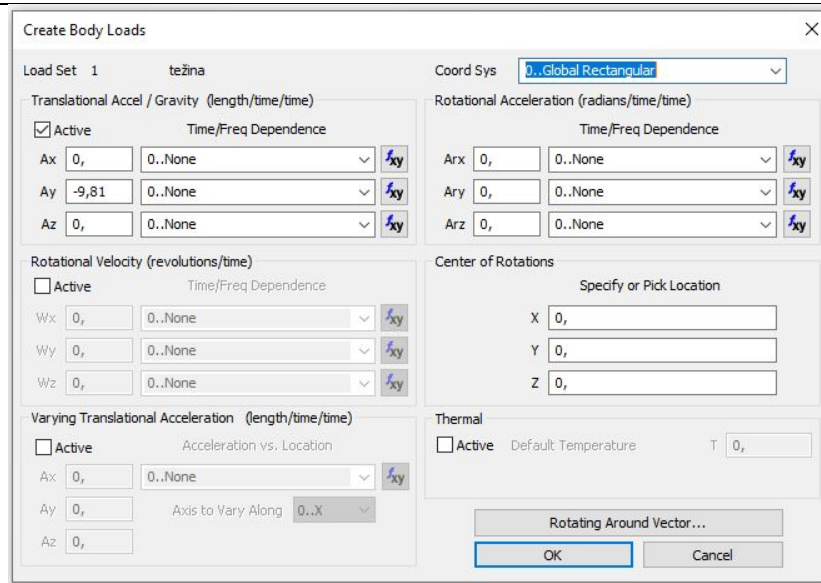
**Slika 20.** Prikaz rubnih uvjeta uslijed nasukavanja



**Slika 21.** Približni prikaz rubnih uvjeta uslijed nasukavanja

### 8.2.2. Zadavanje opterećenja uslijed ubrzanja zemljine sile teže

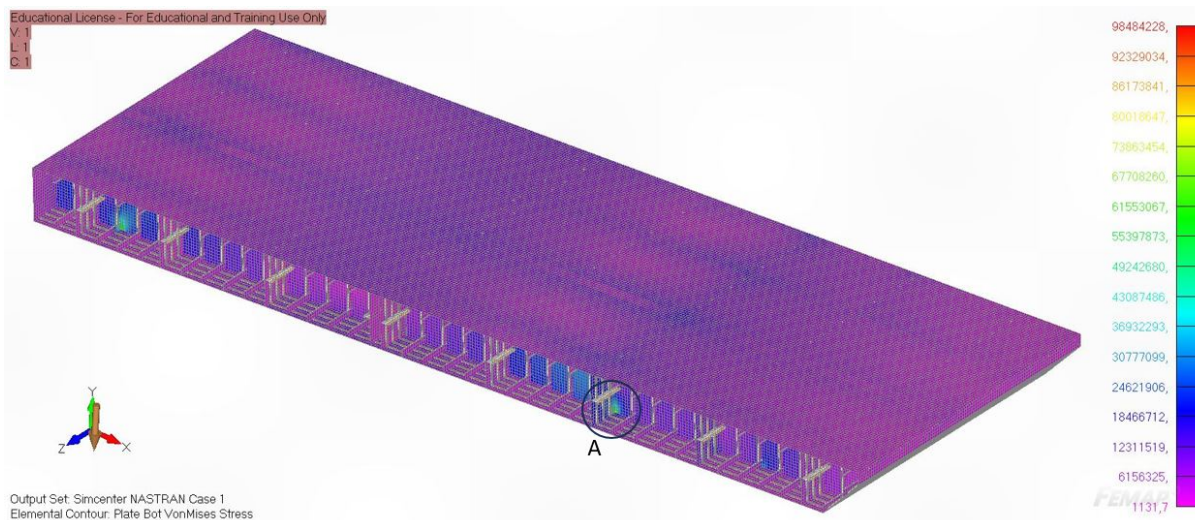
Za ovu analizu baržu opterećujemo silom koja nastaje uslijed ubrzanja zemljine sile teže u negativnom smjeru y osi. Postupak se provodi tako da se na alatnoj traci izabere izbornik *Model* te onda *Load* te opciju *Body* koja upućuje na djelovanje tog opterećenja na cijeli model. U prozoru koji se otvori odaberemo opciju *Translational Accel/Gravity* te upišemo  $A_y = -9,81$  kako bi smjer djelovanja bio u negativnom smjeru osi y, što se vidi na Slici 22.



Slika 22. Prikaz izbornika za kreiranje *Body Loads*

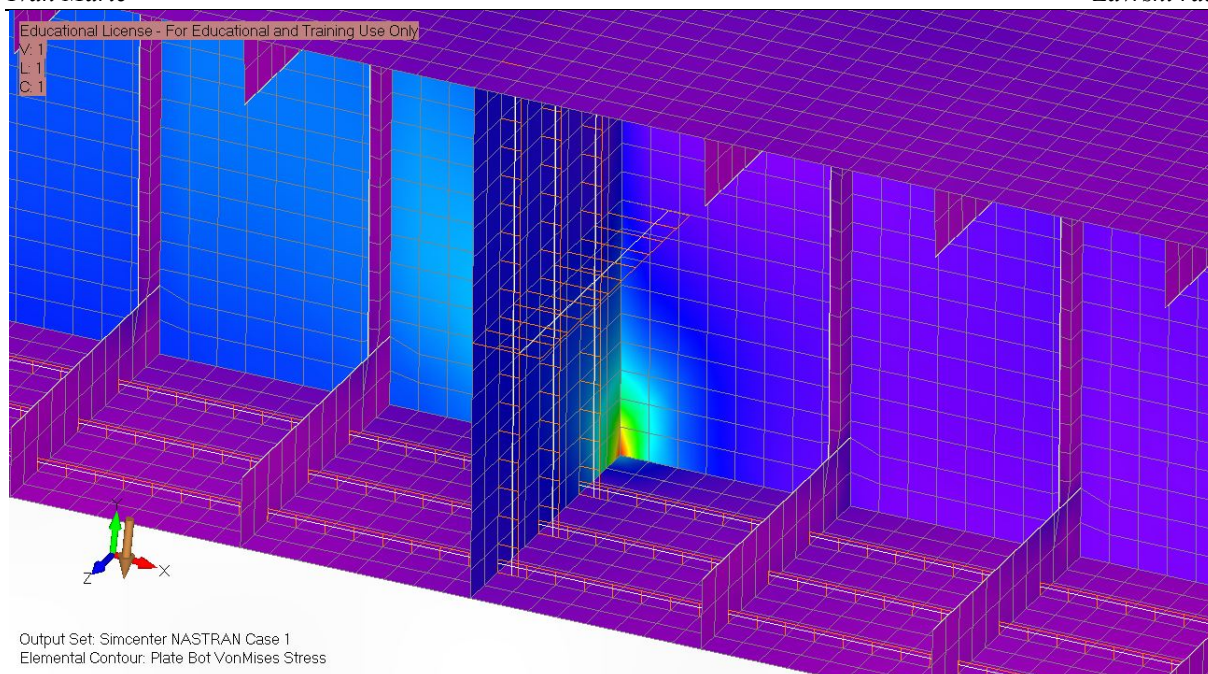
### 8.2.3. Prikaz dobivenih napreznja analize 1

U ovom poglavlju prikazujemo rezultate napreznja analize 1. Rezultati dobiveni analizom će se pokazati na zadanoj mreži konačnih elemenata. Slikama 23. - 26. prikazujemo raspored napreznja cijele konstrukcije modela te neke detalje kojima jasnije vidimo na kojim područjima su napreznja najveća.

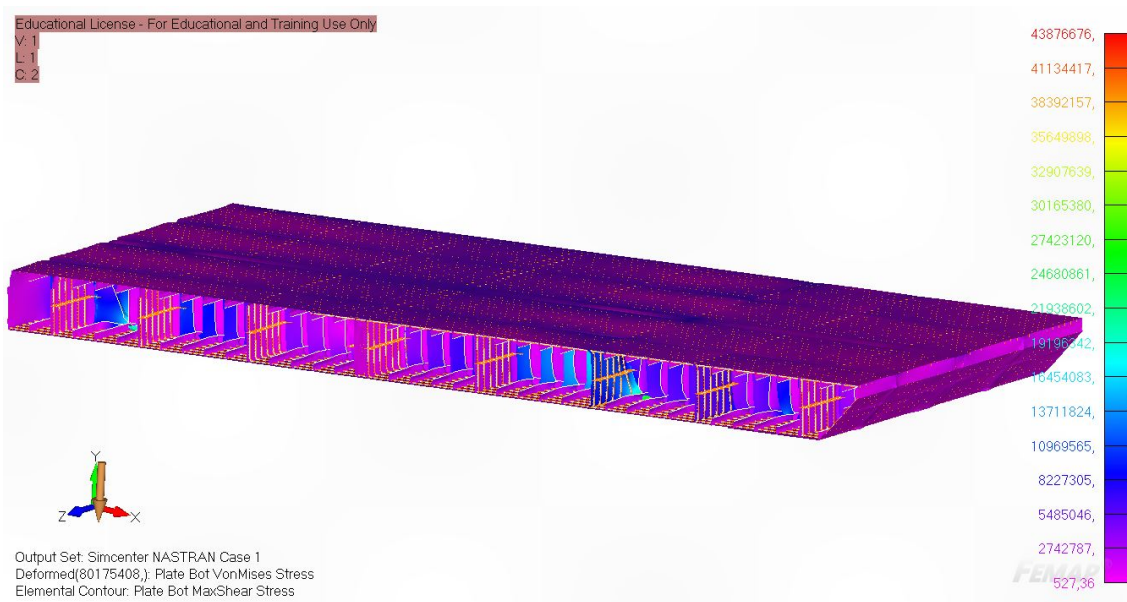


Slika 23. Napreznja mreže za opterećenja nakon Analize 1

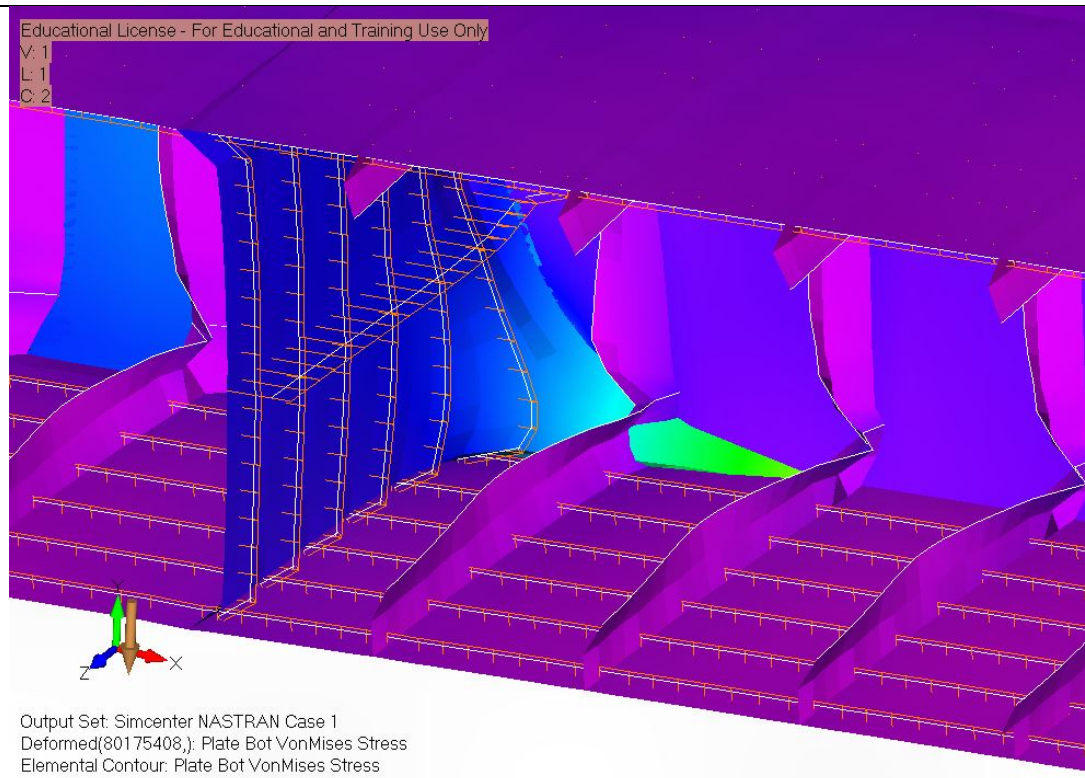




Slika 24. Detalj A raspodjele napreznja mreže



Slika 25. Jače skalirana raspodjela napreznja mreže za opterećenja nakon Analize 1



**Slika 26.** Jače skaliran detalj A raspodjele naprezanja mreže

Maksimalno naprezanje za ovaj slučaj iznosi 98,484 Mpa što nam govori da su sva naprezanja unutar granice razvlačenja za čelik ST24 koja iznosi 235 N/mm<sup>2</sup>.

### 8.3. Analiza 2

Ova analiza modela je također statička, ali razlika od *Analize 1* su opterećenja koja su zadana za slučaj kada je krma broda uronjena u vodu.

#### 8.3.1. Rubni uvjeti analize

U ovom slučaju nemamo rubni uvjet na krmi broda zbog toga što je krma dijelom uronjena u vodu. Za drugi rubni uvjet, to jest rubni uvjet uslijed nasukavanja na pramčanoj strani barže, fiksirani ostaju isti stupnjevi slobode kao i u *Analizi 1*.

#### 8.3.2. Zadavanje opterećenja

Baržu i u ovom slučaju opterećujemo silom koja nastaje uslijed ubrzanja zemljine sile teže koja djeluje na cijeli model.

Zadavanje opterećenja uslijed djelovanja sile uzgona:

Umjesto rubnog uvjeta koji je djelovao na krmu u *Analizi 1*, u ovom slučaju imamo djelovanje sile uzgona na uronjeni dio konstrukcije modela. Uzgon je sila kojom fluid djeluje na neko uronjeno tijelo koje djeluje suprotno od smjera gravitacije. U ovom slučaju ćemo uzgon prikazati preko hidrostatskog tlaka.

Jednadžba hidrostatskog tlaka (1) koji se koristi u ovom slučaju:

$$p = \rho * g * h = 9,79 * e^{-6} * !z \quad (1)$$

p – hidrostatski tlak,

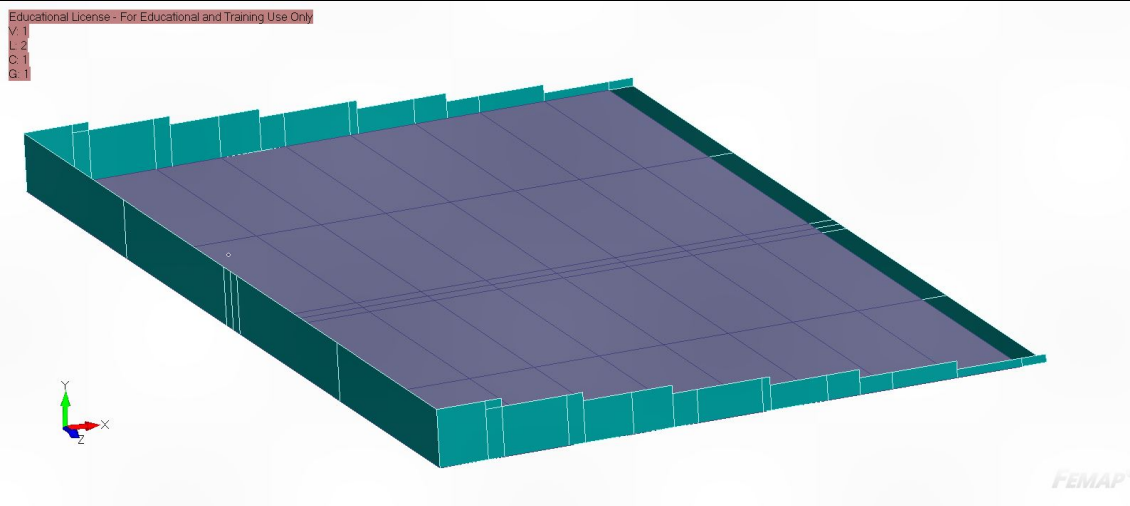
$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  – gustoća rijeke,

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  – ubrzanje sile teže,

h – visina stupca tekućine,

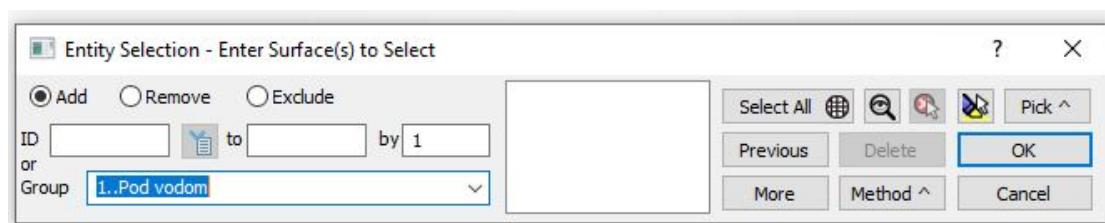
!z – varijabla z koordinate.

Postupak se provodi tako da se prvo napravi grupa koja će sadržavati sve površine na krmi koje su nakon nasukavanja i nagiba modela od 5 stupnjeva još uvijek ispod razine vode (prikazano na slici 27.).



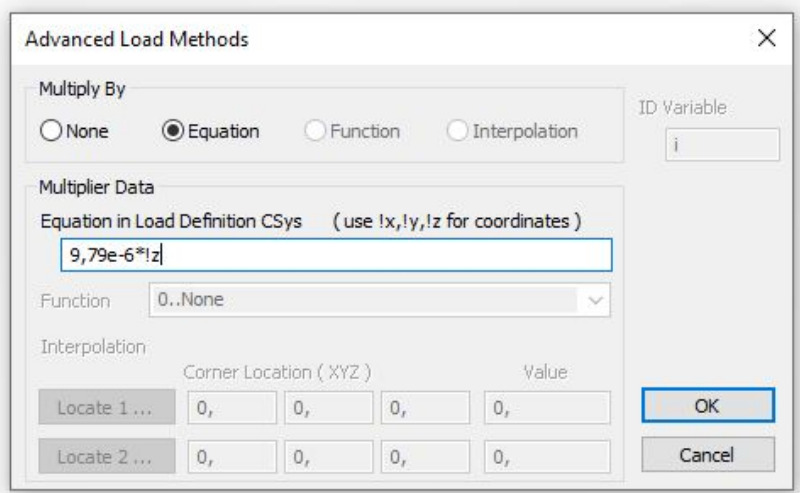
Slika 27. Prikaz grupe površina ispod razine vode

Zatim se na alatnoj traci izabere izbornik *Model* te onda *Load* te opciju *On surface* i unutar tog prozora dodati površine unutar grupe koja se napravila, što je prikazano na slici 28.



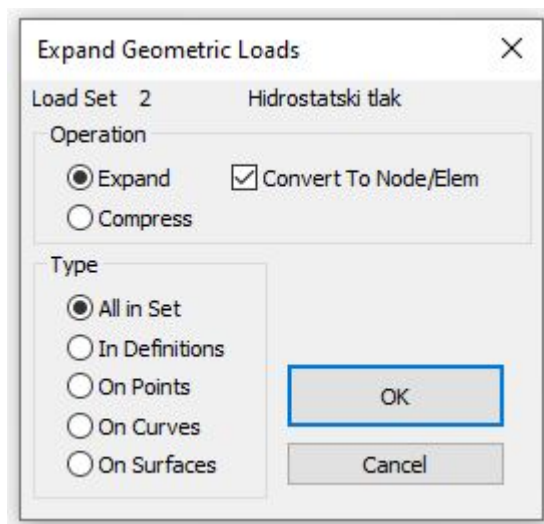
Slika 28. Prikaz izbornika za odabir površina

Zatim se u izborniku *Loads on surfaces* odabire način opterećenja preko *Pressure* te prvobitno stavlja nominalna veličina tlaka i odabire metoda *Advanced*, što je vidljivo na Slici 29. U izborniku *Advanced Load Methods*, koji je prikazan Slikom 29., upisuje se funkcija distribucije hidrostatskog tlaka po površini.



Slika 29. Prikaz izbornika za definiranje funkcije distribucije hidrostatskog tlaka

Posljednji korak je u izborniku *Model* odabrati opciju *Load* te *Expand* kako bi vidjeli raspodjelu hidrostatskog tlaka po elementu mreže konačnih elemenata (Slika 30.)

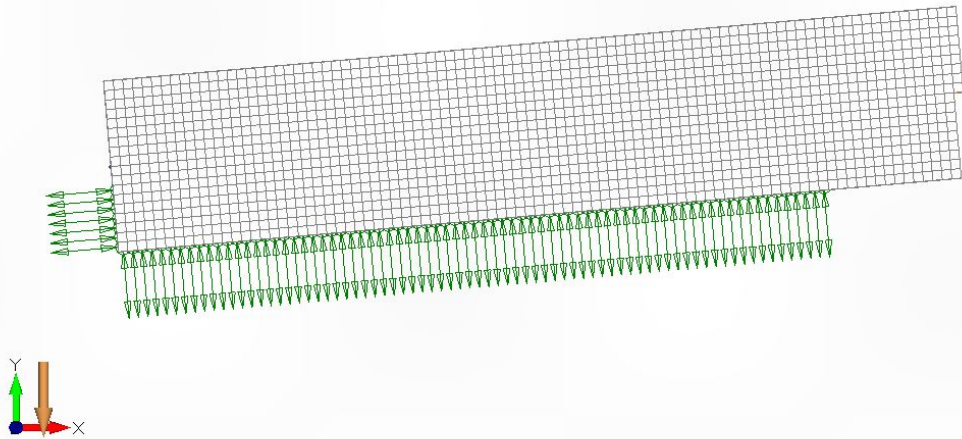


Slika 30. Prikaz izbornika za bolju vidljivost distribucije hidrostatskog tlaka

Slika 31. prikazuje raspodjelu hidrostatskog tlaka po dijelu površine krme broda po kojoj djeluje uzgon.



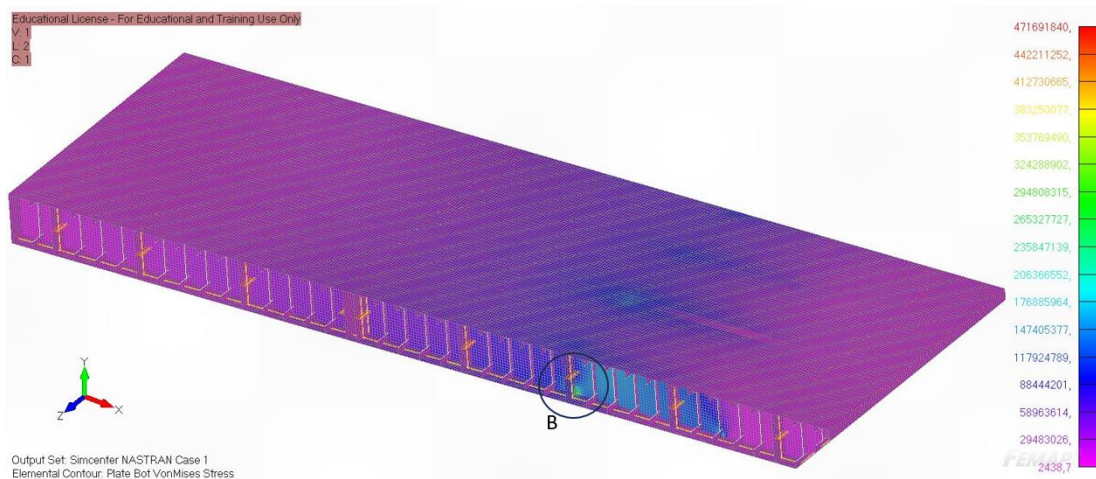
Educational License - For Educational and Training Use Only  
 V: 1  
 L: 2  
 C: 1



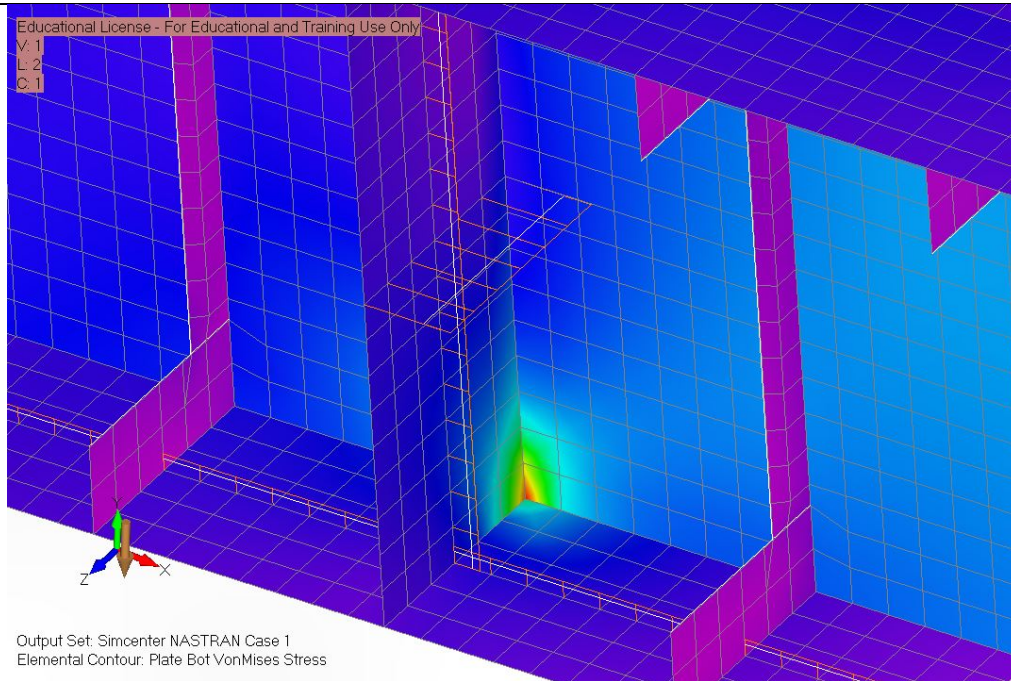
Slika 31. Prikaz raspodjele hidrostatskog tlaka po površini

### 8.3.3. Prikaz dobivenih napreznja analize 2

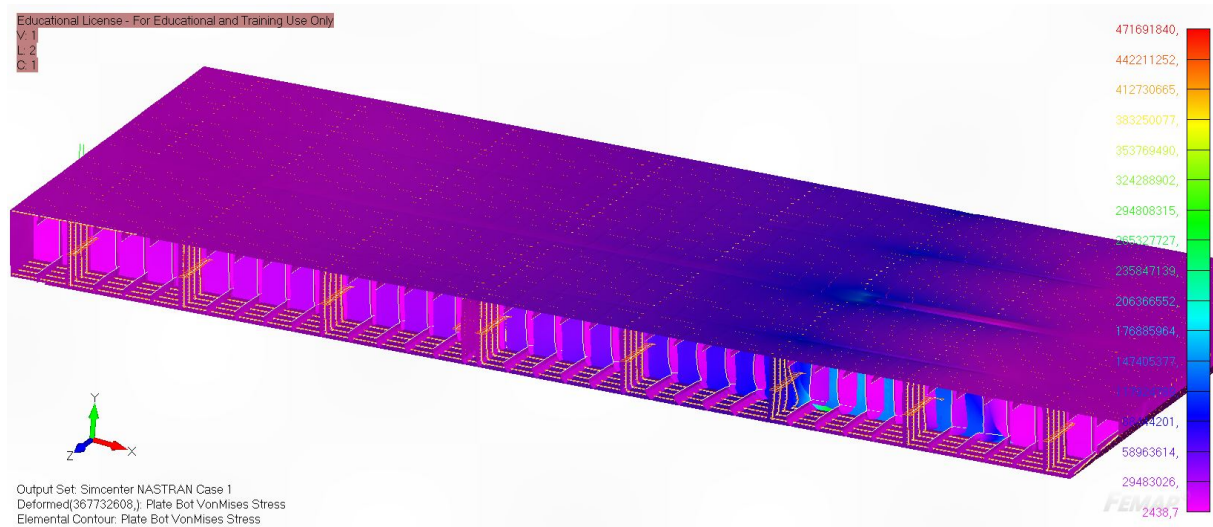
U ovom poglavlju prikazuju se rezultati napreznja analize 2. Rezultati dobiveni analizom pokazat će se na zadanoj mreži konačnih elemenata. Slikama 32. - 36. prikazan je raspored napreznja cijele konstrukcije modela te neki detalji kojima se jasnije vidi na kojim područjima su napreznja najveća.



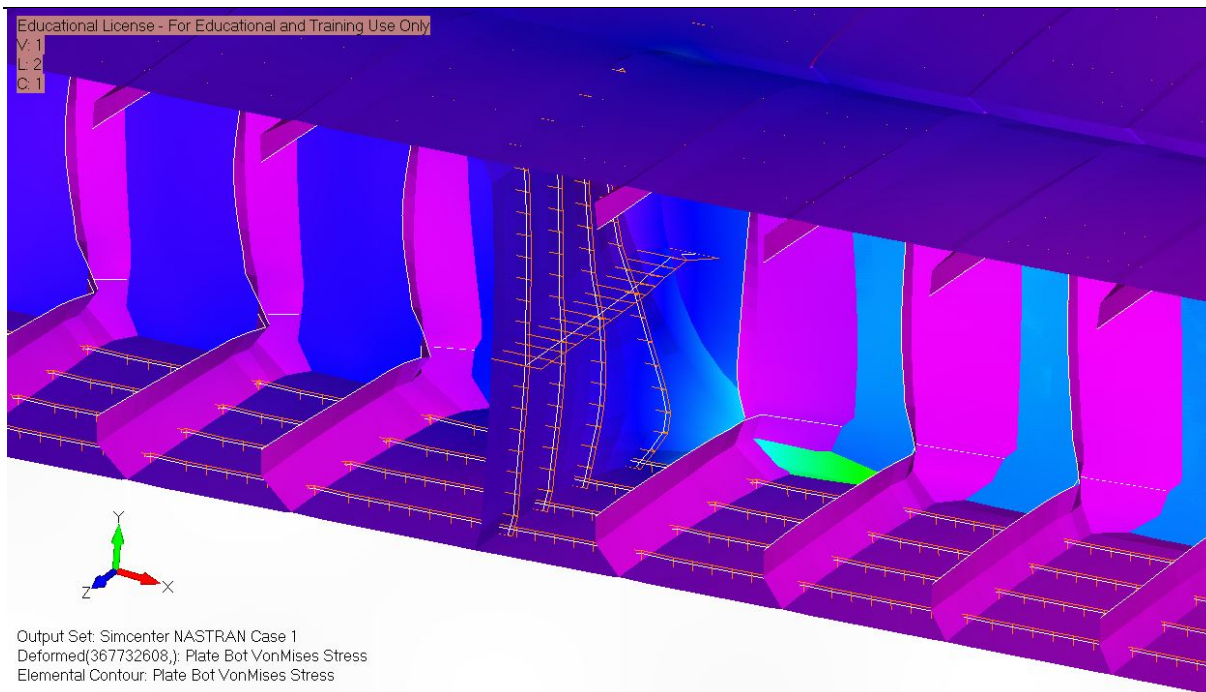
Slika 32. Napreznja mreže za opterećenja nakon Analize 2



Slika 33. Detalj B naprezanja mreže



Slika 34. Jače skalirana raspodjela naprezanja mreže



**Slika 35.** Jače skaliran detalj B raspodjele naprezanja mreže

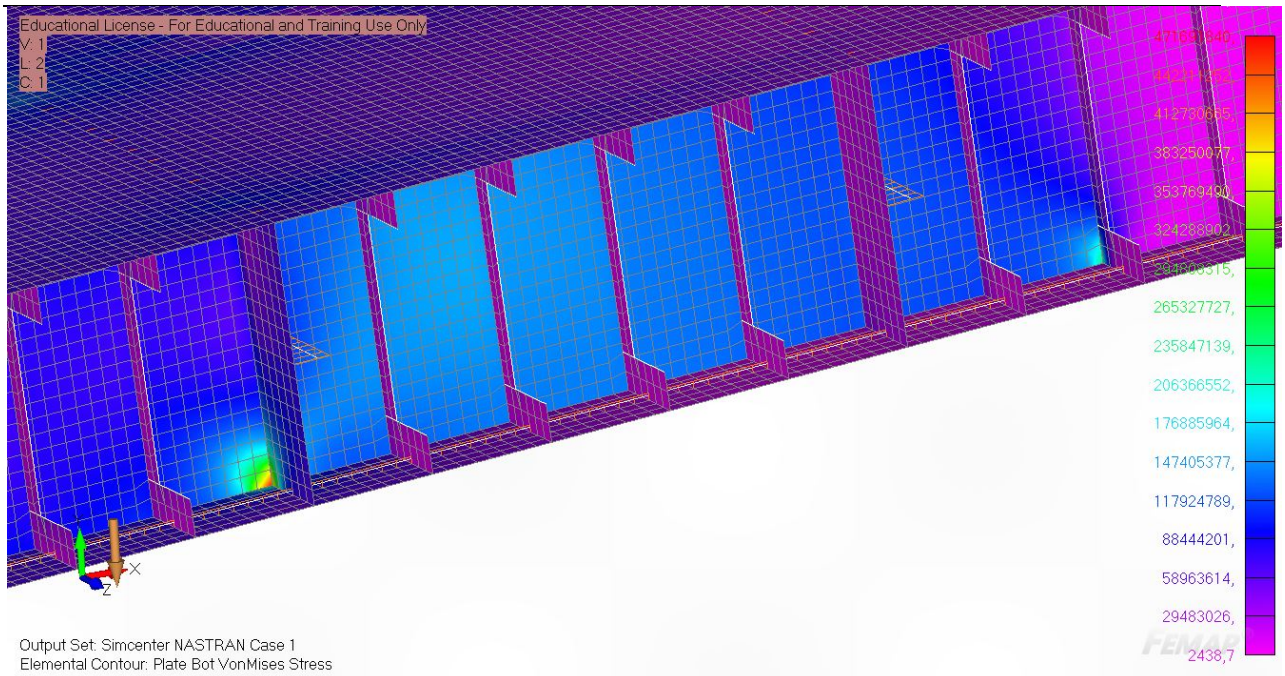
Maksimalno naprezanje za ovaj slučaj iznosi 471,69 Mpa što govori da nisu sva naprezanja unutar granice razvlačenja za čelik ST24 koja iznosi  $235 \text{ N/mm}^2$ . To znači da se konstrukcija treba poboljšati na tim kritičnim područjima gdje je najveća koncentracija naprezanja.

#### 8.4. Analiza dobivenih rezultata i poboljšanja

S obzirom na to da granica tečenja odabranog čelika iznosi  $315 \text{ N/mm}^2$ , možemo zaključiti da će u slučaju 2 doći do popuštanja uslijed plastične deformacije konstrukcije, a zatim i do njenog loma, jer su naprezanja koja se javljaju veća od dozvoljenih. Stoga je nužno unaprijediti postojeću konstrukciju, bilo kroz promjene u geometriji ili pojačavanje određenih limova.

Mi ćemo uzeti za primjer pojačavanje određenih limova, to jest povećanje debljine određenih površina. Masa mreže prije pojačavanja je iznosila 1170 tona, a nakon iznosi 1270 tona. Na slici 36.1 se prikazuje distribucija naprezanja modela koja ukazuje da se promjenom debljine oplate dna puno ne smanjuje maksimalno naprezanje dobiveno u Analizi 2.





**Slika. 36.** Prikaz distribucije naprezanja modela

Ovim primjerom vidi se da je promjena debljine nekih elemenata konstrukcije manje utjecala na mrežu tako da još uvijek ima prevelika maksimalna naprezanja.

Za razliku od povećanje debljina određenih dijelova modela broda, puno veći utjecaj na konstrukciju može imati promjena dimenzije nekih elemenata ili dodavanje novih, na primjer dodavanjem nepropusne pregrade blizu kritičnog područja naprezanja te također orebrenje tih dodatnih elemenata.

---

## **9. ZAKLJUČAK**

Riječna plovidba predstavlja vitalni segment transporta koji ima svoje specifične prednosti i nedostatke. Zbog ekološke učinkovitosti i količine prevodljivog tereta je jako značajan način transporta u svijetu.

Kritične situacije koje pogađaju riječnu plovidbu, kao što su vremenske nepogode, nasukavanje brodova, sudari i slični incidenti, predstavljaju ozbiljne izazove za sigurnost i održivost ovog oblika transporta, a nasukavanje je jedno od sve češćih nesreća koje treba analizirati.

Usprkos izazovima i složenosti, strukturna analiza nasukavanja broda igra ključnu ulogu u očuvanju sigurnosti na morima i rijekama, smanjenju rizika nesreća i poboljšanju konstrukcije brodova. Zbog toga smo analizirali nasukavanje barže u 2 slučaja kojim smo detaljnije identificirali slabosti u konstrukciji.

Poboljšanje konstrukcije barže može puno utjecati na osjetljivost broda na nasukavanje. Jedna od promjena na konstrukciji koja smanjuje naprezanja u kritičnim dijelovima trupa je povećanje debljine nekih limova, ali to ipak ne igra veliku ulogu. Drugi način je ojačanje konstrukcije dodatnim elementima, što igra znatno veću ulogu u smanjenju naprezanja te rizika od loma.

---

**LITERATURA**

- [1] Hrvatska tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/rijecno-ili-unutarnje-brodarstvo/>
- [2] CLNI 1998., <https://www.ccr-zkr.org/12060400-en.html>
- [3] Md. Imran Uddin, An Analysis of Accidents in the Inland Waterways of Bangladesh: Lessons from a Decade (2005-2015), 2016
- [4] Burić, M., Preostala sigurnost konstrukcije oštećenog naftnog tankera na Jadranskom moru, 2011.
- [5] Europske rijeke presušuju, <https://www.dw.com/hr/europske-rijeke-presu%C5%A1uju/a-62754236>
- [6] UNC, How Did One Stuck Ship Hamper Global Trade, <https://global.unc.edu/news-story/how-did-one-stuck-ship-hamper-global-trade/>
- [7] Grubišić, N., Specifičnosti tehnoloških procesa u riječnom prometu, 2010.
- [8] Peter Makoa, Andrea Galieriková, Inland navigation on the Danube and the Rhine waterways
- [9] Narodne novine, Pravilnik o plovidbi na unutarnjim vodama, 2021.
- [10] ITCR, Simcenter Femap, <https://itcr.hr/simcenter-femap/>
- [11] Blažević, M., Analiza naprezanja tankostjenog spremnika volumena  $750\text{m}^3$ , diplomski rad, 2010.