

# Analiza čvrstoće kolijevki i kliznih staza pri bočnom porinuću broda

---

Jozić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*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:235:094045>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-07**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

**Luka Jozić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Student:

Luka Jozić

Zagreb, 2022.

## IZJAVA

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Smiljku Rudanu na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada

Luka Jozić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Jozić** JMBAG: 0035214978

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza čvrstoće kolijevki i kliznih staza pri bočnom porinuću broda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Strength analysis of cradles and sliding pathways in the case of side ship launching**

Opis zadatka:

Porinuće broda važan je događaj u životnom vijeku broda. Jedan od načina da se brod porine u more jest bočno porinuće broda, pri čemu brod na kolijevkama klizi po kliznim stazama sve do ulaska u more i konačno odvajanje broda od obale. Kolijevke i klizne staze često su izvedene u obliku čeličnih konstrukcija, a prilikom porinuća trpe značajna opterećenja i moraju ih uspješno podnijeti.

U radu je potrebno proučiti problem porinuća broda, s naglaskom na bočna porinuća broda izvedena u Republici Hrvatskoj. Valja analizirati sve faze porinuća s ciljem određivanja opterećenja koja se pojavljuju u pojedinoj fazi porinuća. Zatim, na osnovi dostupne dokumentacije, treba izraditi numerički model bočnog porinuća broda namijenjen analizi čvrstoće kolijevki i kliznih staza te provesti analizu metodom konačnih elemenata te utvrditi naprezanja u konstrukciji prilikom bočnog porinuća.

U završnom radu je potrebno:

1. Proučiti propise i literaturu koji se odnose na problem bočnog porinuća.
2. Odrediti kritične faze bočnog porinuća i pripadajuća opterećenja.
3. Provesti strukturnu analizu konstrukcije kolijevki i kliznih staza na osnovi dostupne dokumentacije za odabrane faze bočnog porinuća.
4. Analizirati rezultate analize i predložiti konstrukcijska poboljšanja kolijevki i kliznih staza.

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

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. BOČNO PORINUĆE .....	2
2.1. Karakteristične faze broskog porinuća - bočno .....	2
2.2. Klizne masti .....	5
3. TEHNIČKI OPIS RAZMATRANE KONSTRUKCIJE .....	6
3.1. Osnovni podatci .....	6
3.1.1. Klizne staze .....	6
3.1.2. Kolijevka .....	8
3.1.3. Ostale veličine .....	8
4. STRUKTURNA ANALIZA KLIZNIH STAZA .....	9
4.1. Femap/NX Nastran .....	9
4.2. Metoda konačnih elemenata .....	10
5. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE .....	11
5.1. Korišteni konačni elementi .....	11
5.2. Geometrija konstrukcije .....	12
5.3. Izrada MKE modela .....	13
5.4. Postavljanje rubnih uvjeta .....	17
5.5. Zadavanje opterećenja .....	18
5.5.1. Određivanje ukupne sile koja djeluje na konstrukciju .....	18
5.5.2. Određivanje sile po čvoru za određenu poziciju .....	18
5.6. Raspored sila .....	19
6. PRORAČUN POJEDINIH FAZA BRODSKOG PORINUĆA .....	23
6.1. Analiza modela .....	23
6.2. Statička analiza .....	24
6.2.1. Prikaz dobivenih naprezanja .....	24
6.2.2. Prikaz ukupnih deformacija .....	28
6.3. Analiza rezultata statičke analize .....	30
7. STRUKTURNA ANALIZA PRODUŽENOG DIJELA KLIZNIH STAZA .....	32
7.1. Geometrija produženih kliznih staza .....	33
7.2. Izrada geometrije modela .....	34
7.3. Izrada MKE modela .....	35
7.4. Postavljanje rubnih uvjeta .....	36

7.5. Zadavanje opterećenja .....	37
7.6. Rezultati statičke analize .....	39
7.7. Analiza dobivenih rezultata i poboljšanja .....	42
8. ZAKLJUČAK .....	45
9. LITERATURA.....	46

## POPIS SLIKA

SLIKA 1. SKICA PRVE FAZE PORINUĆA. ....	2
SLIKA 2. SKICA DRUGE FAZE PORINUĆA. ....	3
SLIKA 3. SKICA TREĆE FAZE PORINUĆA. ....	3
SLIKA 4. SKICA ČETVIRTE FAZE PORINUĆA. ....	4
SLIKA 5. PRIKAZ SLOJEVA BAZNE MASTI. ....	5
SLIKA 6. SKICA KLIZNE STAZE, POGLED U PROSTORU. ....	7
SLIKA 7. BOČNI LIM. ....	7
SLIKA 8. SLIKA KOLIJEVKE, POGLED U PROSTORU. ....	8
SLIKA 9. PRIKAZ KORISNIČKOG SUČELJA STUDENTSKE VERZIJE PROGRAMSKOG PAKETA. ....	9
SLIKA 10. PRIKAZ PLOČASTIH KONAČNIH ELEMENATA, POD A) TROKUTASTI, B) ČETVEROKUTNI I C) VIŠEČVORNI DVODIMENZIJSKI ELEMENTI. [7] ....	11
SLIKA 11. GEOMETRIJA KONSTRUKCIJE S ČVOROVIMA. ....	12
SLIKA 12. KONAČNA GEOMETRIJA SA PRIPADAJUĆIM ELEMENTIMA. ....	12
SLIKA 13. POSTUPAK DEFINIRANJA VELIČINE KONAČNOG ELEMENTA. ....	13
SLIKA 14. POSTUPAK ODABIRA GEOMETRIJE I SVOJSTAVA KONAČNIH ELEMENATA. ....	13
SLIKA 15. POSTUPAK DEFINIRANJA MATERIJALA – ČELIK. ....	14
SLIKA 16. PRIKAZ IZGLEDA KONAČNIH ELEMENATA. ....	15
SLIKA 17. PRIKAZ TIPA ELEMENATA. ....	15
SLIKA 18. PRIKAZ FINIJE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA. ....	16
SLIKA 19. PRIKAZ BROJA KONAČNIH ELEMENATA. ....	16
SLIKA 20. PRIKAZ IZBORNICA ZA RUBNE UVJETE. ....	17
SLIKA 21. PRIKAZ RUBNIH UVJETA NA GRUBOJ MREŽI KONAČNIH ELEMENATA. ..	17
SLIKA 22. GRAFIČKI PRIKAZ RASPOREDA SILA ZA PRVI SLUČAJ OPTEREĆENJA. ..	19
SLIKA 23. GRAFIČKI PRIKAZ RASPOREDA SILA ZA DRUGI SLUČAJ OPTEREĆENJA. .....	20
SLIKA 24. GRAFIČKI PRIKAZ RASPOREDA SILA ZA TREĆI SLUČAJ OPTEREĆENJA. ..	21
SLIKA 25. GRAFIČKI PRIKAZ RASPOREDA SILA ZA ČETVRTI SLUČAJ OPTEREĆENJA. ....	22



SLIKA 26. PRIKAZ IZBORNIKA ZA ODABIR VRSTE ANALIZE. ....	23
SLIKA 27. NAPREZANJA POČETNE MREŽE ZA PRVI SLUČAJ OPETEREĆENJA.....	24
SLIKA 28. NAPREZANJA FINIJE MREŽE ZA PRVI SLUČAJ OPTEREĆENJA. ....	25
SLIKA 29. NAPREZANJA POČETNE MREŽE ZA DRUGI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	25
SLIKA 30. NAPREZANJA FINIJE MREŽE ZA DRUGI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	26
SLIKA 31. NAPREZANJA POČETNE MREŽE ZA TREĆI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	26
SLIKA 32. NAPREZANJA FINIJE MREŽE ZA TREĆI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	27
SLIKA 33. NAPREZANJA POČETNE MREŽE ZA ČETVRTI SLUČAJ OPTEREĆENJA. ....	27
SLIKA 34. NAPREZANJA FINIJE MREŽE ZA ČETVRTI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	28
SLIKA 35. PRIKAZ OŠTEĆENJA DRVENE PODLOGE. ....	30
SLIKA 36. PRIKAZ OŠTEĆENJA DRVENE PODLOGE. ....	31
SLIKA 37. TABLICA ČVRSTOĆE ZA NEKOLIKO VRSTA DRVETA. [8].....	31
SLIKA 38. PRIKAZ STABILIZIRAJUĆIH MOMENATA PRILIKOM LJULJANJA BRODA. [9] .....	32
SLIKA 39. PRIKAZ SKICE GEOMETRIJE PRODUŽENIH KLIZNIH STAZA.....	33
SLIKA 40. IZOMETRIJSKI PRIKAZ PRODULJENIH KLIZNIH STAZA .....	34
SLIKA 41. BOČNI PRIKAZ PRODULJENIH KLIZNIH STAZA .....	34
SLIKA 42. IZOMETRIJSKI PRIKAZ MKE MODELA.....	35
SLIKA 43. PRIKAZ BROJA I VRSTE KONAČNIH ELEMENATA .....	35
SLIKA 44. PRIKAZ ZADANIH RUBNIH UVJETA .....	36
SLIKA 45. PRVI SLUČAJ OPTEREĆENJA NADVODNOG DIJELA .....	37
SLIKA 46. DRUGI SLUČAJ OPTEREĆENJA NADVODNOG DIJELA.....	38
SLIKA 47. TREĆI SLUČAJ OPTEREĆENJA NADVODNOG DIJELA.....	38
SLIKA 48. PRIKAZ NAPREZANJA ZA PRVI SLUČAJ OPTEREĆENJA .....	39
SLIKA 49. PRIKAZ NAPREZANJA ZA DRUGI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	40
SLIKA 50. PRIKAZ NAPREZANJA ZA TREĆI SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	40
SLIKA 51. UVEĆANI PRIKAZ A DIJELA KONSTRUKCIJE .....	41
SLIKA 52. PRIKAZ DEFORMIRANE I NEDEFORMIRANE KONSTRUKCIJE .....	41
SLIKA 53. PRIKAZ NAPREZANJA NAKON DODANOG LIMA .....	43
SLIKA 54. PRIKAZ PODEBLJANIH LIMOVA.....	43
SLIKA 55. PRIKAZ NAPREZANJA NAKON DODANOG LIMA I PODEBLJANA .....	44

## POPIS TABLICA

TABLICA 1. PRIKAZ PODATAKA ZA JEDNU KLIZNU STAZU. ....	6
TABLICA 2. PRIKAZ PODATAKA ZA KOLIJEVKU S NAJVEĆOM MASOM. ....	8
TABLICA 3. PRIKAZ OSTALIH VELIČINA ZA PRORAČUN. ....	8
TABLICA 4. PODATCI KORIŠTENI ZA IZRAČUN SILE.....	18
TABLICA 5. SILE PO POJEDINOM ČVORU ZA GRUBU MREŽU. ....	18
TABLICA 6. SILE PO POJEDINOM ČVORU ZA FINIJU MREŽU.....	18
TABLICA 7. PRIKAZ NAJVEĆIH NAPREZANJA.....	28
TABLICA 8. PRIKAZ DEFORMACIJA POJEDINIH SLUČAJEVA.....	29
TABLICA 9. PRIKAZ DEBLJINE LIMOVA. ....	33
TABLICA 10. TABLIČNI PRIKAZ DOBIVENIH NAPREZANJA. ....	42
TABLICA 11. TABLIČNI PRIKAZ DOBIVENIH NAPREZANJA .....	44

## **SAŽETAK**

U današnje je vrijeme bočno porinuće sve više prisutno u raznim brodogradilištima zbog niza pogodnosti koje vuče sa sobom. U prvom dijelu ovog rada izvršena je statička analiza klizne staze potrebne za bočno porinuće i dan je slikovni pregled mjesta pojave najvećih naprezanja i najvećih deformacija koji su se pojavili tijekom procesa porinuća.

Drugi dio rada ispituje oblik produženih kliznih staza koji se koristi zbog nedovoljne dubine morskog dna i rizika da bi konstrukcija koja se porinuje mogla udariti od dno. Kao i u prethodnom dijelu, dan je slikovni pregled naprezanja i deformacija koji se pojavljuju uslijed statičkog opterećenja.

Proračun obadviju konstrukcija je proveden metodom konačnih elemenata uporabom programskog paketa Femap/NX Nastran

**Ključne riječi:** Bočno porinuće, klizna staza, FEM analiza

## **ABSTRACT**

Nowadays, side ship launching is more and more present in various shipyards due to several benefits that it brings with it. In the first part of this paper a static analysis of the slideway required for transversal ship launching was performed and an image overview of the location of the biggest stresses and biggest deformation that occurred during the launching process was given.

The second part of the paper examines the shape of the extended slideway which is used due to the insufficient depth of the seabed and the risk that the structure could hit the bottom. As in the previous section, a image overview of the stresses and deformations that occur due to static loading is given.

The calculation of both constructions was performed by the finite element method using the Femap/NX Nastran software package

**Keywords:** Transversal ship launching, slipway, FEM analysis

## 1. UVOD

Porinuće broda je jedan od značajnih trenutaka u životu svakog broda, a isto tako svakog brodograditelja. Kada brod ulazi u vodu bočno, odnosno okomito na ravninu simetrije govori se o bočnom porinuću.

Bočno porinuće karakteristično je za riječna brodogradilišta, no nije rijedak slučaj da se taj način porinuća koristi i u morskim brodogradilištima budući da uz takav način porinuća dolaze i određene prednosti. Prva od tih je što se u slučaju bočnog porinuća brod gradi na horizontalnoj podlozi, a ne na kosoj, kao što je to najčešće slučaj kod uzdužnog porinuća, što omogućava brže izvođenje radova. Prednosti su još i te što nije potrebno graditi podvodni dio navoza i što se uvelike smanjuje duljina otplova broda. Također ova vrsta porinuća može biti i nezgodna ukoliko brodogradilište ima ograničenu duljinu obale. U tom se slučaju pribjegava korištenju navoza za uzdužno porinuće broda. [1]

Bilo da se radi o poprečnom ili uzdužnom porinuću, od vitalnog je značaja poznavati sile i momente koji se u svakom trenutku pojavljuju, kako bi se osiguralo sigurno porinuće jer kada brod u jednom trenutku krene kliziti zajedno sa saonicama više se ne može zaustaviti do ulaska u vodu. [2]

Metoda konačnih elemenata predstavlja numerički postupak rješavanja inženjerskih problema analizom strukture i pogodna je za sve vrste inženjera. Analiza metodom konačnih elemenata dati će nam zorni prikaz naprezanja koja se pojavljuju na navozu, a koja su uzrokovana pritiskom broda, no moramo naglasiti kako su dobivena rješenja približna i sve točnija kako se povećava broj konačnih elemenata. [3] Jedan od najpogodnijih softvera koji se danas koriste za proračun konstrukcije jest i Femap/NX Nastran koji je korišten u ovom radu.

## 2. BOČNO PORINUĆE

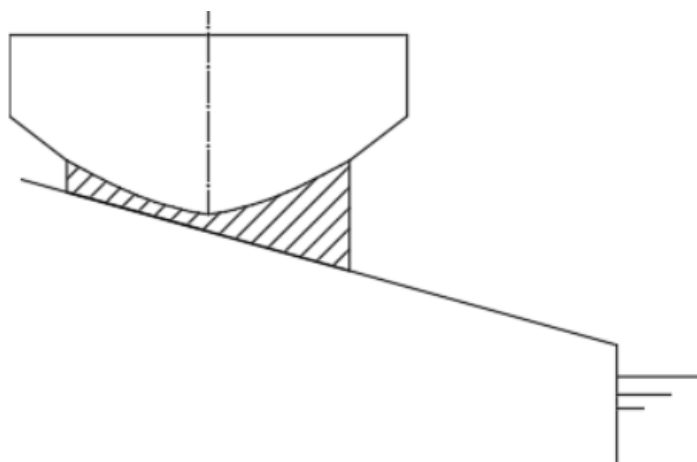
Bočno porinuće zajedno sa uzdužnim načinom porinuća broda spada u skupinu porinuća koja su uzrokovana djelovanjem isključivo sile gravitacije. Kod obje vrste porinuća, koristi se mast koja se nanosi na površinu kliznih staza kako bi se smanjio koeficijent trenja između podloge odnosno klizne staze i kolijevke koja naliježe na njih. Navoz kod bočnog porinuća može biti izveden u dva načina od kojih je prvi taj da je navoz dijelom ispod površine vode pa brod ulazi u vodu klizajući po podvodnom dijelu. U drugom slučaju navoz nema podvodnog dijela pa nam se prilikom ulaska broda zajedno sa pripadajućom konstrukcijom kliznih staza pojavljuju momenti statičke ravnoteže koji brod vraćaju u ravnotežni položaj koji se izgubio tijekom "slijetanja" sa navoza. Bitno je naglasiti da je podvodni dio navoza rjeđe korišten budući da je njegova izgradnja skuplja i složenija od nadvodnog dijela. [4]

### 2.1. Karakteristične faze broskog porinuća - bočno

Bočno porinuće moguće je podijeliti u četiri karakteristične faze u kojima se javljaju određene sile kojima brod zajedno sa svojom konstrukcijom, to jest kolijevkom, djeluje na podlogu, i momenti koji se javljaju kada dolazi do okretanja klizeće konstrukcije prilikom ulaska u vodu.

#### a) Prva faza porinuća

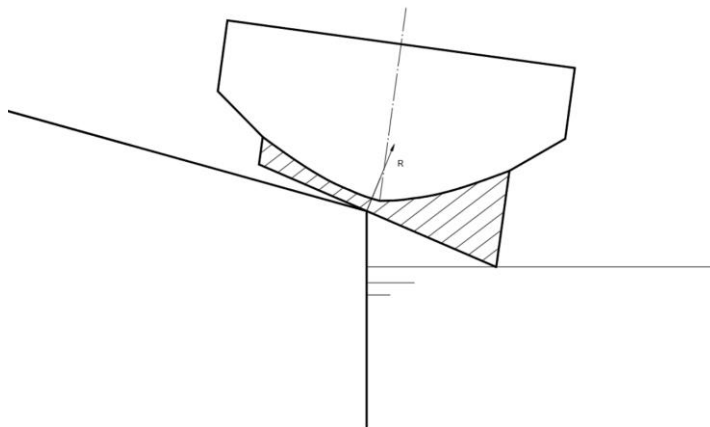
U prvoj fazi porinuća, prikazano na slici 1, brod klizi cijelom dužinom saonika po navozu. Kod ove faze je bitno da se istom brzinom kreću krmeni i pramčani dio kako ne bi došlo do zanošenja broda koje bi pritom rezultiralo padom sa saonika i lomom određenih dijelova konstrukcije.



**Slika 1.** Skica prve faze porinuća.

### b) Druga faza porinuća

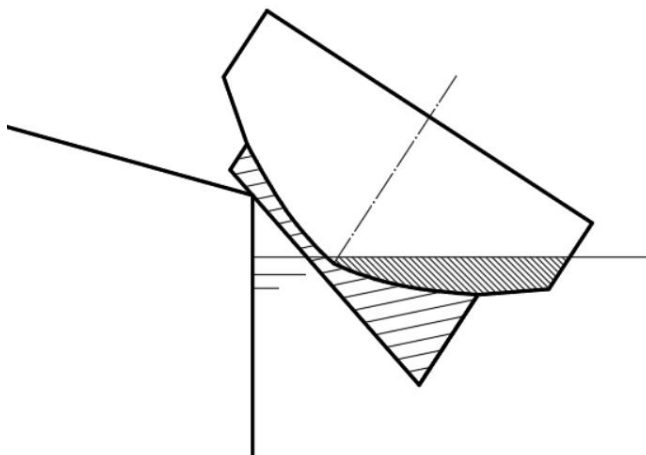
Karakteristično za drugu fazu je početak okretanja konstrukcije oko brida na kraju navoza, a počinje u trenutku kada resultantna sila prijeđe rub navoza, što je prikazano na slici 2. U ovom je slučaju sila otpora podloge 'R' najveća budući da je površina kojom konstrukcija djeluje na površinu jako mala.



**Slika 2.** Skica druge faze porinuća.

### c) Treća faza porinuća

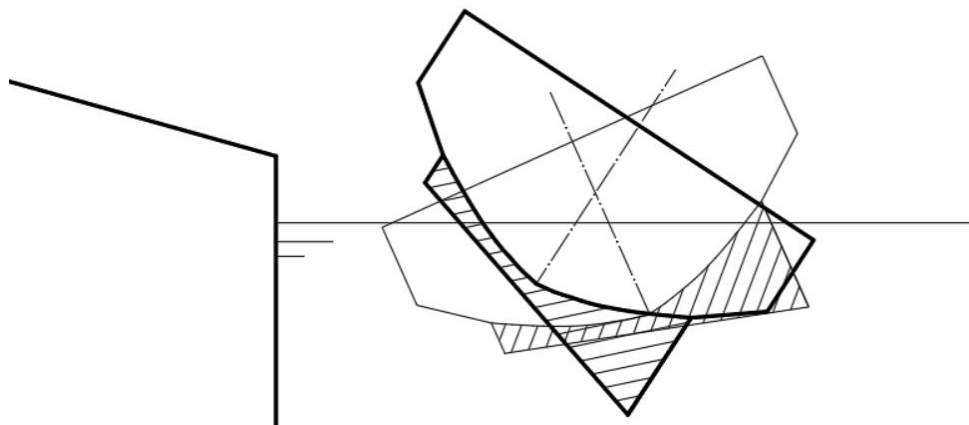
Treću fazu karakterizira uron jednog dijela broda u vodu i pojava sile uzgona zbog istisnine na dijelu koji se nalazi pod vodom, prikazano na slici 3. U ovoj fazi konstrukcija je gotovo cijela "sišla" s navoza, ali se i dalje pojavljuje sila reakcije podloge koja je u ovom slučaju znatno manja. U ovoj fazi postoji mogućnost od udara konstrukcije u morsko dno zbog nedovoljne dubine dna.



**Slika 3.** Skica treće faze porinuća.

d) Četvrta faza porinuća

Četvrta, a ujedno i posljednja faza nastupa kada je brod zajedno sa svojom konstrukcijom potpuno u vodi, prikazano na slici 4. U ovoj fazi nastupa stabilizacija ljuľjanja brod pomoću momenata statičke stabilnosti broda. U ovoj fazi, bitno je pripaziti da brod prilikom ljuľjanja ne udari u obalu i tako ošteti dio konstrukcije.



**Slika 4.** Skica četvrte faze porinuća.



## 2.2. Klizne masti

Da bi se brod uspješno porinuo potrebno je provesti adekvatnu pripremu navoza odnosno potrebno je na klizne staze nanijeti odgovarajuće masti po kojima će potom saonice kliziti. S tim na umu, prva mast koja se nanosi na podlogu kliznih staza je bazna klizna mast. Uloga bazne klizne masti je da izravna površine saonika i saonica i davanje svojstava elastičnosti nosivim površinama, a neka od glavnih svojstava koje mora imati bazna mast da bi se omogućila kvalitetna primjena su: dobro prijanjanje uz drvo, otpornost na vodu, postojanost pri višim pritiscima itd. Nakon nanošenja bazne klizne masti, sada je potrebno na tu mast nanijeti novi sloj masti odnosno kliznu mast čija je uloga smanjiti trenje i omogućiti uspješno klizanje saonica po saoniku do kontakta s vodenom površinom. Pravilan odabir masti i postupci nanošenja masti bitni su faktori u pripremi pred porinuće broda i stoga se pred svako porinuće izrađuje plan s točnim uputama i postupcima o primjeni masti. [5,6] Na slici 5 može se vidjeti odnos debljina slojeva bazne masti i prikaz lošeg vezanja masti na podlogu.



**Slika 5.** Prikaz slojeva bazne masti. [6]

### 3. TEHNIČKI OPIS RAZMATRANE KONSTRUKCIJE

Ovim se proračunom želi ispitati podobnost odnosno čvrstoća kliznih staza za bočno porinuće broda. Iz pretpostavke kako je masa broda jednoliko raspoređena na sve 3 kolijevke koje ga podupiru može se zaključiti da će brod jednako opterećivati svaku od tri klizne staze. Sukladno tome u ovom će se radu modelirati i ispitati samo jedna klizna staza na kojoj se nalazi kolijevka najveće mase budući i da ostale kolijevke imaju jednaku površinu kojom naliježu na navoz.

Na osnovi dostupne tehničke dokumentacije za klizne staze, kolijevku i brod moguće je bilo modelirati konstrukciju u programskom alatu i postaviti zadana opterećenja. Sile su dobivene pomoću poznatih masa kolijevki broda i samog broda.

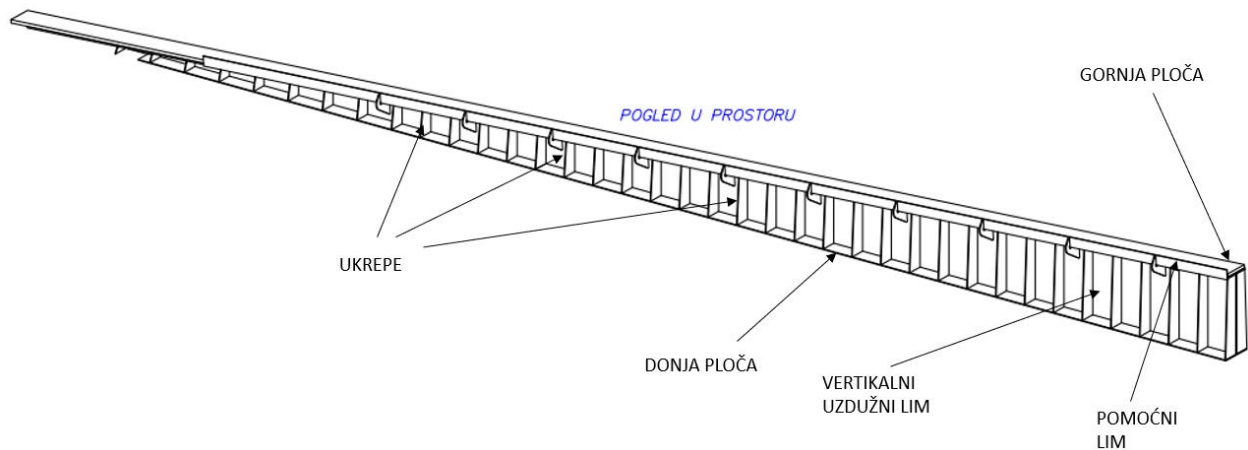
#### 3.1. Osnovni podatci

##### 3.1.1. Klizne staze

Za ovo porinuće korištene su ukupno tri klizne staze koje imaju geometrijski isti oblik, stoga je u ovom slučaju na razmatranje uzeta samo jedna. U tablici 1 prikazani su podaci za kliznu stazu koja se modelira koji utječu na dobivene vrijednosti konačnih rezultata analize. Pomoćni lim koji se može vidjeti na slici 6 služi isključivo da bi usmjeravao kolijevke ukoliko bi se brzine gibanja krmenog i pramčanog dijela broda odnosno kolijevke na pramčanom i krmenom dijelu broda razlikovala. U tom slučaju, bočni lim može u manjoj mjeri spriječiti da ne dođe do zakretanja konstrukcije tijekom poniranja uslijed nejednolike brzine gibanja, a u slučaju većeg zanošenja lim ne bi bio u mogućnosti zadržati brod na navozu.

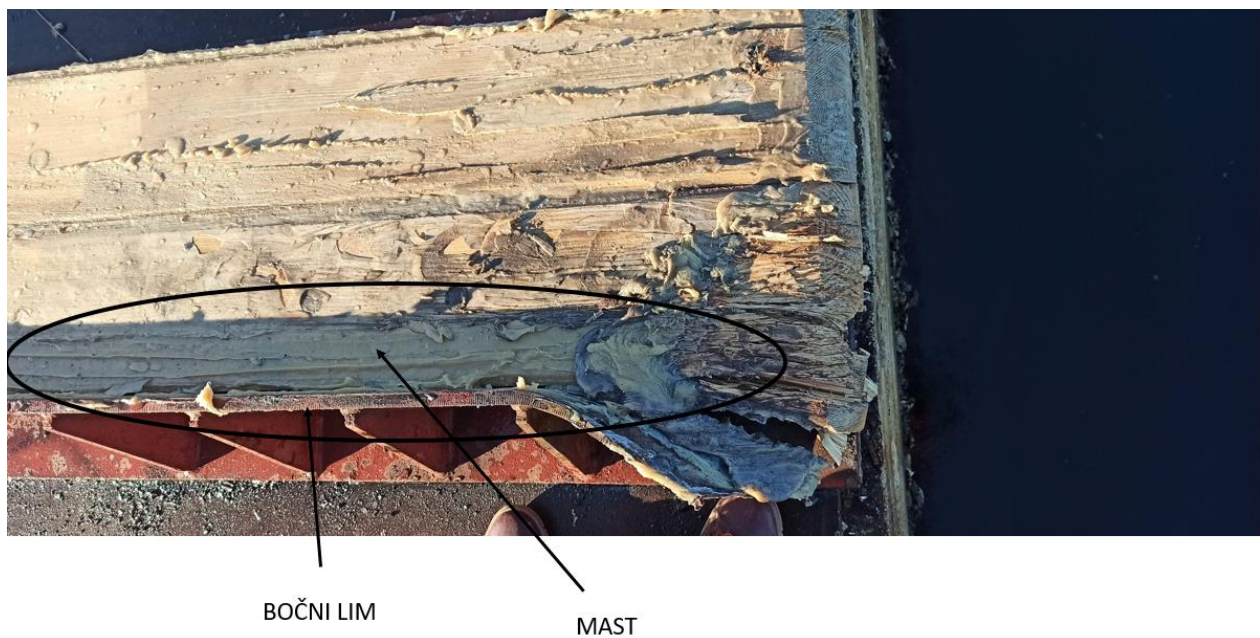
**Tablica 1.** Prikaz podataka za jednu kliznu stazu.

PODATAK	MJERA
DULJINA	21,143 m
DULJINA GORNJE PLOČE	21,179 m
VISINA	1,24 m
NAGIB	6 %
ŠIRINA GORNJE PLOČE	0,42 m
DEBLJINA GORNJE PLOČE	20 mm
DEBLJINA UKREPA	12 mm
DEBLJINA VERTIKALNOG UZDUŽNOG LIMA	15 mm



**Slika 6.** Skica klizne staze, pogled u prostoru.

Da bočni lim uistinu ne preuzima na sebe nikakvo opterećenje tijekom procesa porinuća vidljivo je i sa slike 7 na kojoj možemo primijetiti da je uz lim ostalo otprilike 5 cm netaknute masti po kojoj kolijevka klizi u more. Ukoliko dođe do zanošenja konstrukcije bočni lim se može deformirati na način kako je prikazano na slici 7.



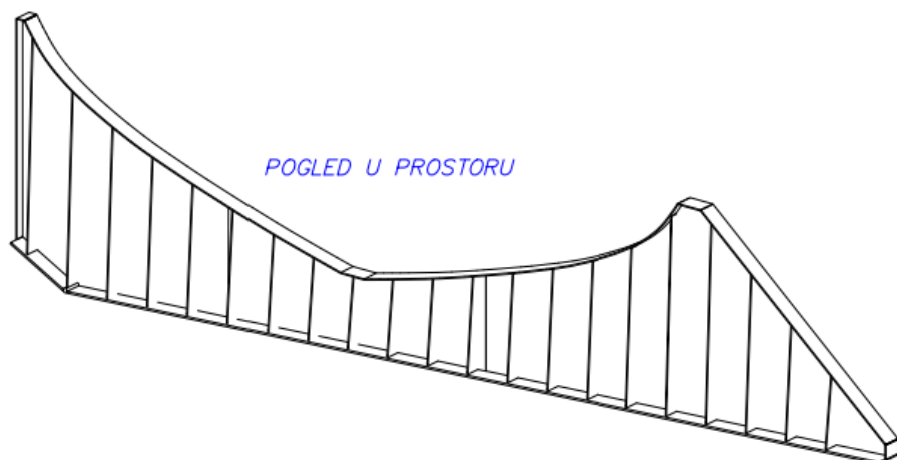
**Slika 7.** Bočni lim.

### 3.1.2. Kolijevka

Od tri kolijevke koje se koriste pri porinuću ovog broda, na razmatranje je uzeta ona kolijevka s najvećom masom budući da se kolijevke međusobno razlikuju po dimenzijama i po masi. Kolijevka uzeta u obzir prikazana je na slici 8 koja je postavljena na krmni dio broda. U tablici 2 prikazane su glavne dimenzije potrebne za provedbu proračuna.

**Tablica 2.** Prikaz podataka za kolijevku s najvećom masom.

PODATAK	MJERA
DULJINA KOJOM KOLIJEVKA NALIJEŽE NA KLIZNE STAZE	10,17 m
MASA	4,36 t



**Slika 8.**Slika kolijevke, pogled u prostoru.

### 3.1.3. Ostale veličine

Ostale veličine koje su bitne za proračun broda su masa broda i gravitacijska konstanta a navedeno su u tablici 3.

**Tablica 3.** Prikaz ostalih veličina za proračun.

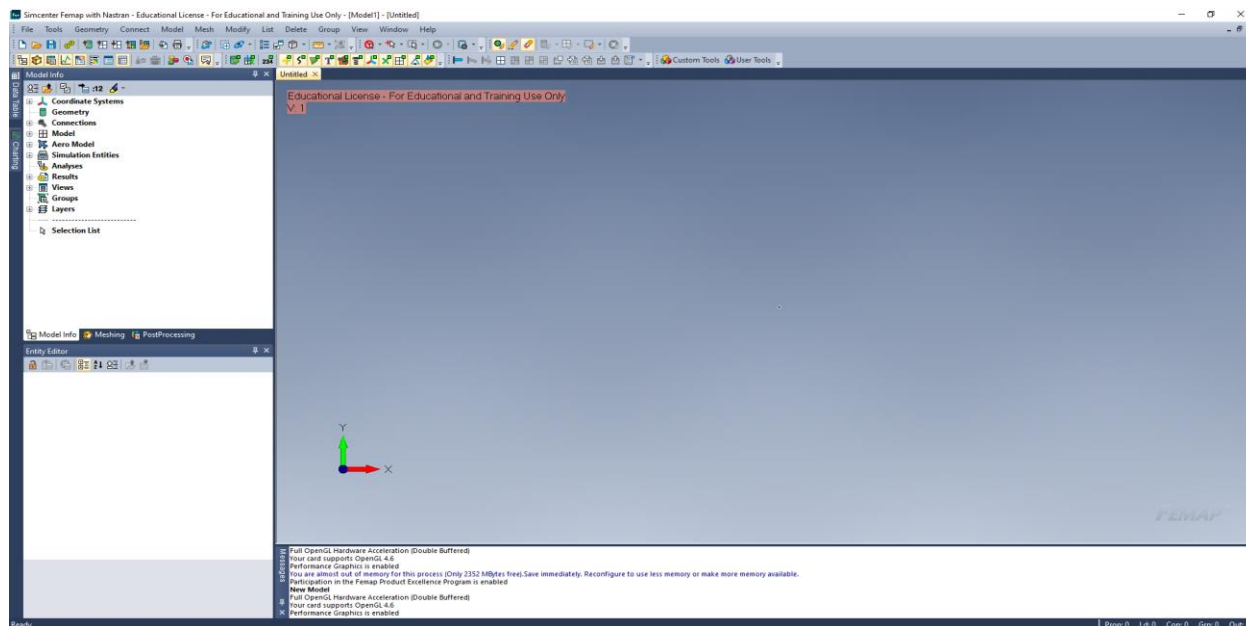
PODATAK	MJERA
MASA 1/3 PROMATRANOG BRODA	140 t
SILA GRAVITACIJE	9,81 m/s <sup>2</sup>

## 4. STRUKTURNA ANALIZA KLIZNIH STAZA

### 4.1. Femap/NX Nastran

Za proces strukturne analize korišten je softverski paket Femap/NX Nastran (Finite Element Modeling And Postprocessing) koji se koristi za izgradnju modela konačnih elemenata (MKE) složenih inženjerskih problema i pregled rezultata analiza.

Femap/NX Nastran je napredni inženjerski simulacijski paket koji stvara modele analize metodom konačnih elemenata složenih tehničkih proizvoda i sustava. Rezultate analize prikazuje grafički. Kao vodeći pred/postprocesor za analizu metodom konačnih elemenata koji u Windows okruženju ima daleko najviše korisnika, Femap/NX Nastran za potrebe proračuna uključuje vodeće NX Nastran algoritme koje je Siemens dodatno nadopunio, najviše u području kontaktnih i nelinearnih problema. Femap/NX Nastran ima ugrađene translatore za preuzimanje geometrije iz svih vodećih CAD programa, kao što su Solid Edge, NX, Pro/E, Catia, Solid Works, Inventor, AutoCAD i slično. Također, na raspolaganju su svi potrebni programski alati za editiranje krivulja, površina i solid modela. Priprema geometrije za različite vrste analiza je zato brza i jednostavna. [7] Na slici 9 može se vidjeti korisničko sučelje studentske verzije programskog paketa koje se koristilo u ovom radu.



Slika 9. Prikaz korisničkog sučelja studentske verzije programskog paketa.

## 4.2. Metoda konačnih elemenata

Budući da se u današnje vrijeme smanjuje količina prirodnih resursa koji ujedno postaju i sve dragocjeniji, od velike je važnosti optimiranje količine materijala koji će se koristiti za izradu konstrukcije. [8]

U velikom broju slučajeva kada konstrukcija koju se analizira ima složen geometrijski oblik i složeno opterećenje nije moguće naći rješenje u analitičkom obliku jer analitičko rješenje zahtjeva rješavanje velikog broda diferencijalnih ili parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Iz tog se razloga pribjegava korištenju numeričkih metoda od kojih je najviše korištena metoda konačnih elemenata (MKE) koja se svodi na rješavanje niza algebarskih jednačbi. [3]

Metoda konačnih elemenata jedna je od najkorištenijih i najpopularnijih metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi, a temelji se na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Prvi i osnovni korak u proračunu metodom konačnih elemenata je diskretizacija konstrukcije podjelom na mrežu konačnih elemenata. Konačni element nije diferencijalno malih dimenzija nego ima konačne dimenzije i od tud dolazi naziv konačni element. Povećanje broja elemenata dovodi do približavanja točnom rješenju što je i sami cilj proračuna. Fizikalno bi to značilo da usitnjavanjem mreže konačnih elemenata energija deformiranja konvergira točnom iznosu energije deformiranja proračunskog modela. Mreža s većim brojem elemenata, takozvana finija mreža, se dobiva na način da se elementi postojeće mreže dijele na dva ili više dijelova. Računala imaju značajnu ulogu u rješavanju velikih sustava algebarskih jednačbi koji se dobiju kreiranjem većeg broja konačnih elemenata budući da je ručno rješavanje jako mukotrpan i maltene neizvediv proces. [9]

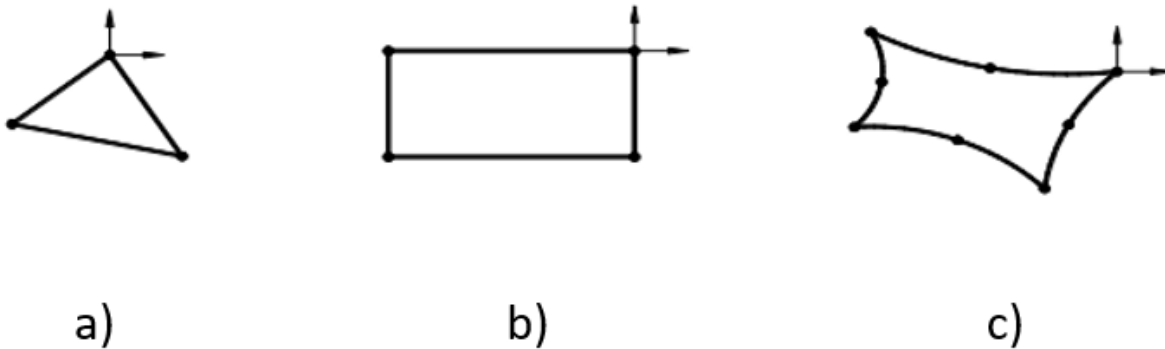
Na rubovima elemenata nalaze se čvorovi pomoću kojih su konačni elementi međusobno povezani po graničnim linijama kada je riječ o ravenskim elementima ili graničnim površinama kod prostornih elemenata.

## 5. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE

### 5.1. Korišteni konačni elementi

Izbor najprikladnijeg konačnog elementa ovisi o inženjerskoj praksi, intuiciji i poznavanju suštine razmatranog problema. Elementi s kojima se diskretizira konstrukcija moraju biti dovoljno male veličine da bi dali zadovoljavajuće rezultate koji su pogodni za korištenje. Mali konačni elementi su poželjni na mjestima gdje imamo najveća naprezanja i želimo dobiti najveću točnost rezultata dok ćemo konačne elemente većih dimenzija koristiti na onim mjestima gdje su geometrijske promjene ili naprezanja jako mala ili ih opće nema. [3]

Konačni elementi koji su najpogodniji za dvodimenzijску analizu konstrukcije su pločasti konačni elementi i prikazani su na slici 9. Elementi na slici 10 su redom prikazani: trokutasti, četverokutni i višečvorni dvodimenzijски elementi.

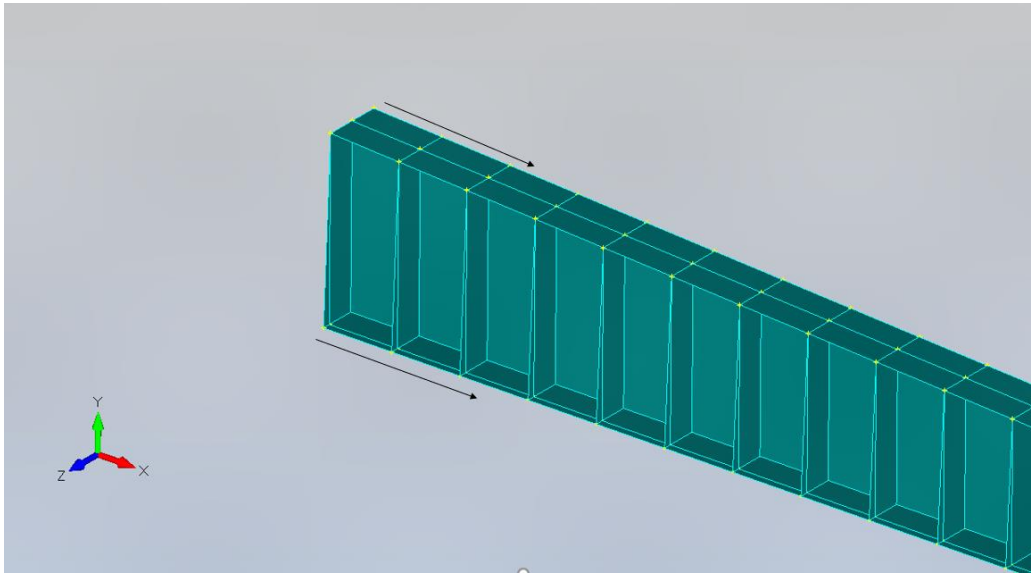


**Slika 10.** Prikaz pločastih konačnih elemenata, pod a) trokutasti, b) četverokutni i c) višečvorni dvodimenzijски elementi. [9]

Korištenjem ovih elemenata moguće je opisati deformacije i ravinsko stanje naprezanja pri čemu se kao nepoznati parametri u čvorovima pojavljuju dvije komponente pomaka. Konstrukcija je u cijelosti modelirana pločastim elementima od kojih je većina četverokutnih, no na nekim mjestima se pojavljuju i pločasti elementi sa 3 ruba takozvani trokutasti elementi. Elementi s većim brojem stupnjeva koji se nazivaju još i elementi višeg reda nisu korišteni u ovom radu. [9]

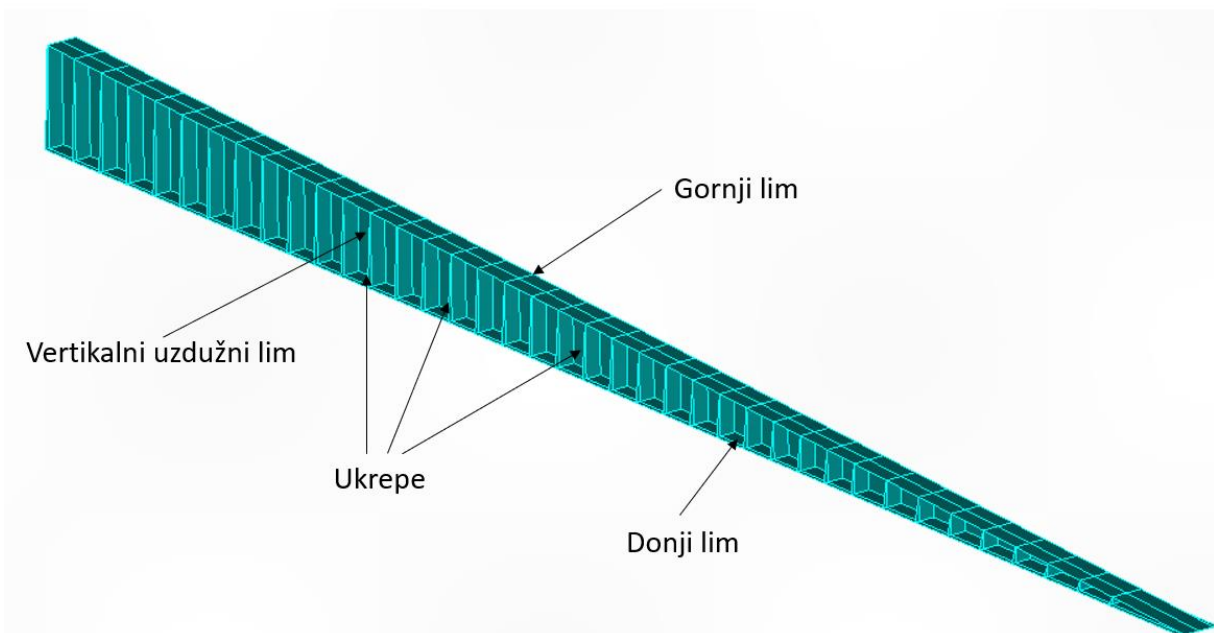
## 5.2. Geometrija konstrukcije

Geometrija je modelirana na način da su prvo kreirani čvorovi (označeni žutom bojom) koji su potom kopirani u smjeru vektora prikazanog strelicom na slici 11. Ti su čvorovi potom spajani koristeći naredbu *Surface* u izborniku *Geometry*.



**Slika 11.** Geometrija konstrukcije s čvorovima.

Konačna geometrija prikazana je na slici 12 zajedno sa pripadajućim elementima.

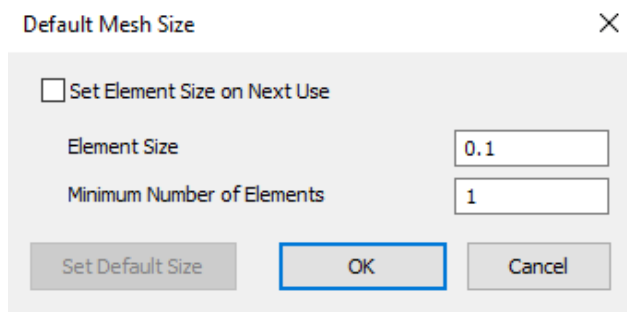


**Slika 12.** Konačna geometrija sa pripadajućim elementima.



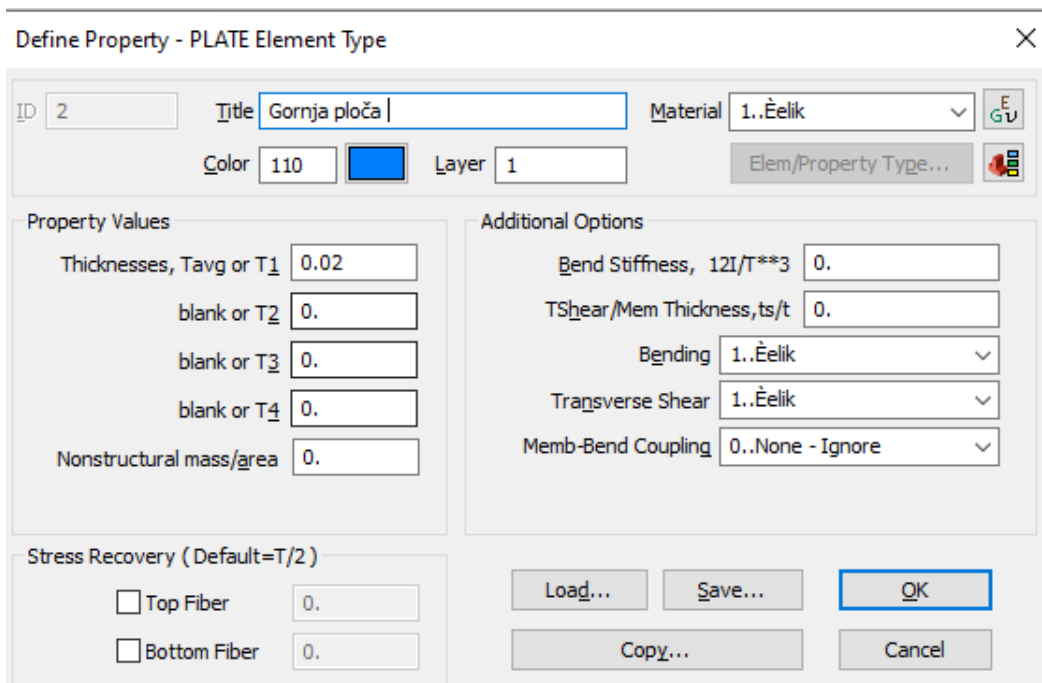
### 5.3. Izrada MKE modela

Nakon što je definirana geometrija, sada je potrebno definirati veličinu konačnog elementa što se radi u izborniku *Mesh* pritiskom na *Mesh control, Default size*. Odabrana veličina konačnih elemenata je 0,1 m. Postupak je prikazan na slici 13.



**Slika 13.** Postupak definiranja veličine konačnog elementa.

Nakon zadavanja veličine konačnih elemenata, potrebno se vratiti na izbornik *Mesh*, no ovaj put se ide pod *Geometry, Surface* i odabiremo površine iz prethodno definirane geometrije od kojih želimo dobiti konačne elemente. Također u ovom koraku se mora i definirati *Properties*, odnosno svojstva dobivenih konačnih elemenata, prikazano na slici 14.



**Slika 14.** Postupak odabira geometrije i svojstva konačnih elemenata.

U ovom koraku definira se i materijal koji se koristi, a u našem slučaju je to čelik povišene čvrstoće (AH 32) koji ima karakteristike prikazane na slici 15. Granica tečenja iznosi:  $R_e=315 \text{ N/mm}^2$ . [8]

Define Material - ISOTROPIC

ID 1 Title Čelik Material Type...

Color 55 Layer 1

General Function References Nonlinear Ply/Bond Failure Creep Electrical/Optical Phase

Stiffness

Youngs Modulus, E 2.1E+11

Shear Modulus, G 0

Poisson's Ratio, nu 0.3

Limit Stress

Tension 0

Compression 0

Shear 0

Thermal

Expansion Coeff, a 0

Conductivity, k 0

Specific Heat, Cp 0

Heat Generation Factor 0

Mass Density 7850

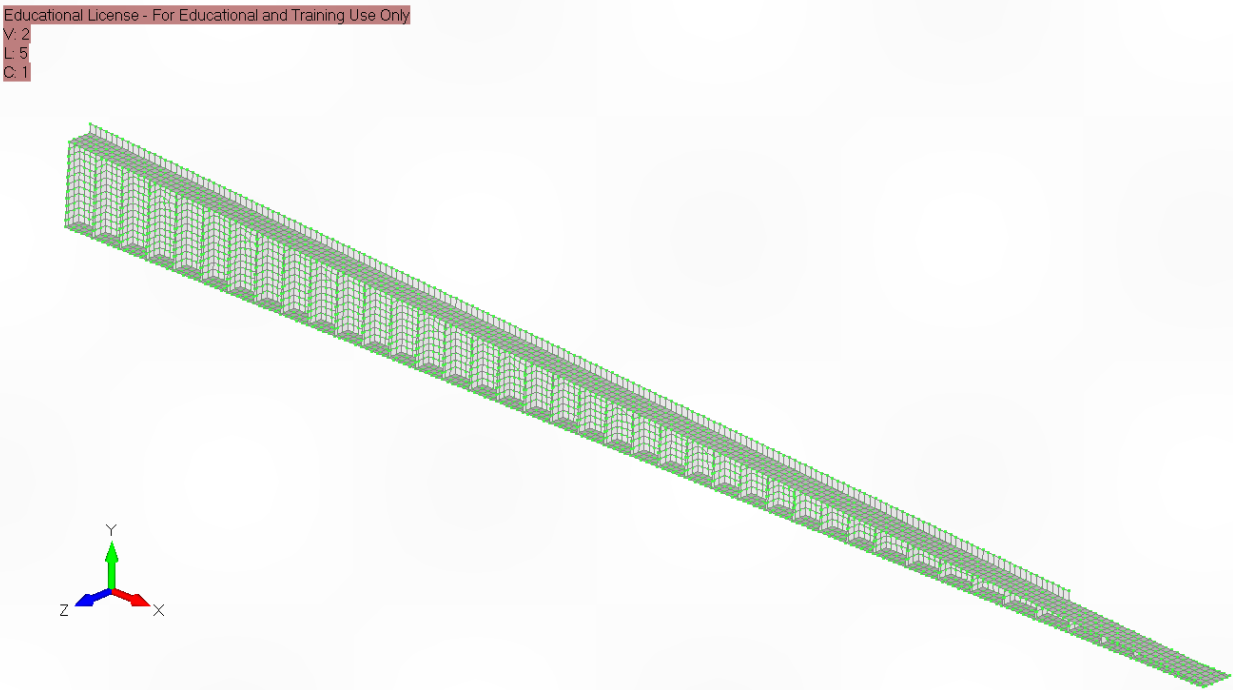
Damping, 2C/Co 0

Reference Temp 0

xy Load... Save... Copy... OK Cancel

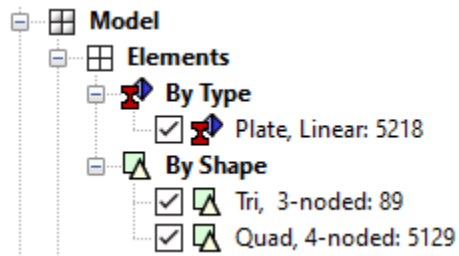
**Slika 15.** Postupak definiranja materijala – čelik.

Izgled konačnih elemenata veličine 0,1 m prikazan je na slici 16. Zelenom bojom su označeni čvorovi konačnih elemenata.



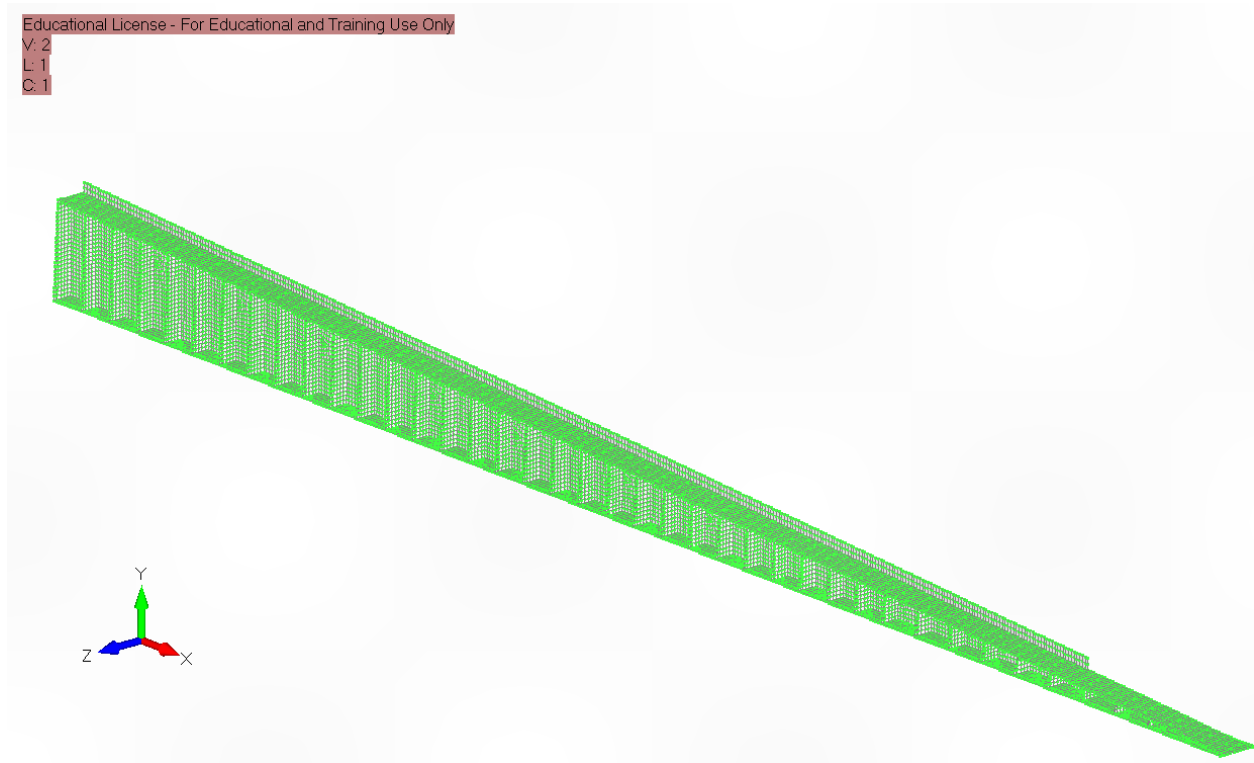
**Slika 16.** Prikaz izgleda konačnih elemenata.

Kao što se može vidjeti na slici 17, većina elemenata su četveročvorni (engl. *quad elements*), no pojavljuju se i poneki elementi sa tri čvora zbog promjene dimenzije konstrukcije uslijed nagiba kosine. Budući da je mreža konačnih elemenata za svaki lim bila kreirana zasebno, potrebno je koristiti naredbu *Check coincident nodes* kako bi spojili originalne elemente zajedno, odnosno povezali čvorove koji se nalaze u istoj točki. Ta se naredba nalazi u izborniku *Tools* na samom dnu.



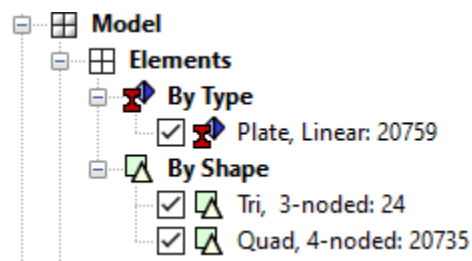
**Slika 17.** Prikaz tipa elemenata.

Za dobivanje finije mreže konačnih elemenata, korištena je naredba *Split* te je svaki konačni element podijeljen na 4 dijela. Kao što se može vizualno primijetiti zbog povećana broja konačnih elemenata povećao se i broj čvorova koji su prikazani zelenom bojom na slici 18.



**Slika 18.** Prikaz finije mreže konačnih elemenata.

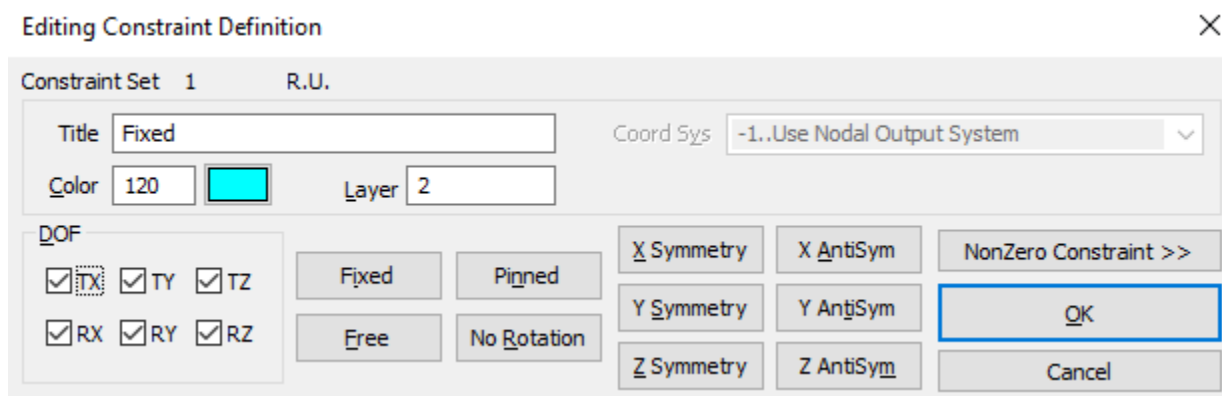
Broj konačnih elemenata koji se sastoje od 4 čvora je očekivano velik, no može se primijetiti da je broj konačnih elemenata koji se sastoje od 3 čvora u ovom slučaju manji nego kod prethodne mreže, budući da su elementi u ovom slučaju manjih dimenzija pa ih je sada moguće kreirati na mjestima gdje su prije bili trokutasti elementi.



**Slika 19.** Prikaz broja konačnih elemenata.

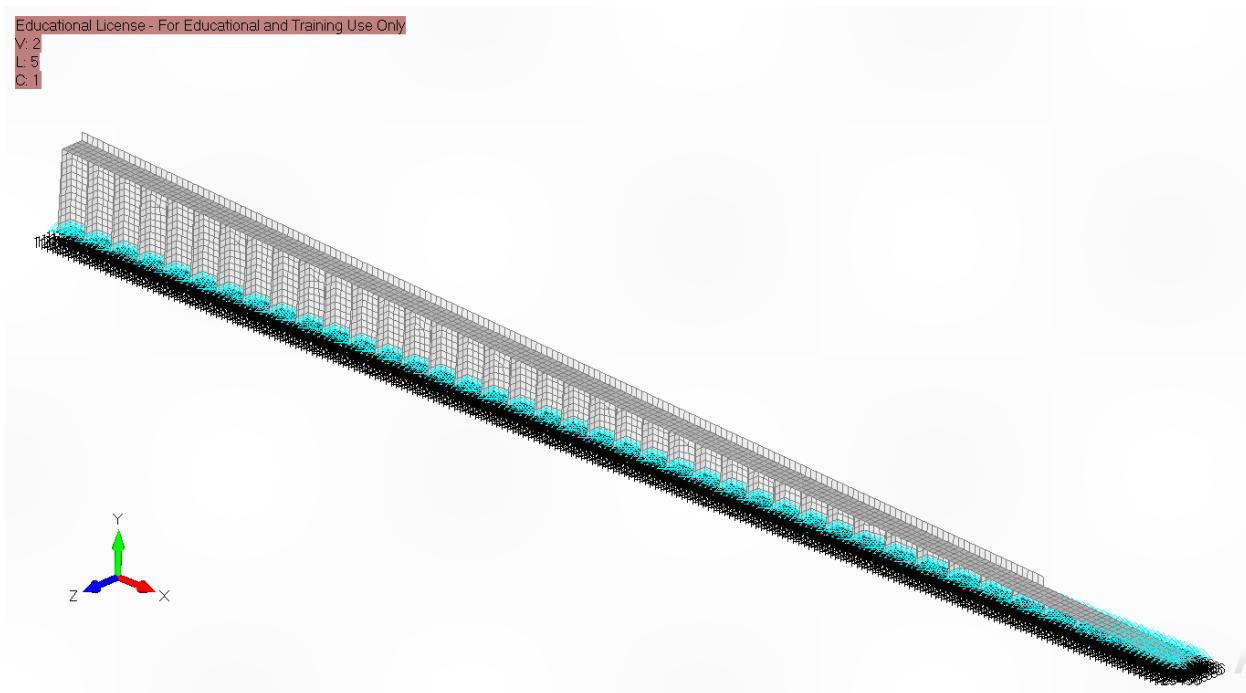
## 5.4. Postavljanje rubnih uvjeta

Budući da je konstrukcija fiksirana na podlozi, rubni uvjeti se pojavljuju samo u čvorovima koji imaju koordinatu y jednaku nuli odnosno u čvorovima koji su fiksirani na podlozi. Slika 20 prikazuje izbornik za odabir rubnih uvjeta pa se tako oznake TX, TY i TZ odnose na translacijsko gibanje u smjeru osi x, y i z, a RX, RY i RZ na rotacijska gibanja oko spomenutih koordinatnih osi.



Slika 20. Prikaz izbornika za rubne uvjete.

Prikaz rubnih uvjeta na gruboj mreži konačnih elemenata prikazan je na slici 21, a na isti je način zadano i za finiju mrežu samo u tom slučaju imamo veći broj elemenata.



Slika 21. Prikaz rubnih uvjeta na gruboj mreži konačnih elemenata.

## 5.5. Zadavanje opterećenja

### 5.5.1. Određivanje ukupne sile koja djeluje na konstrukciju

Na temelju mase konstrukcije koja se u ovom slučaju sastoji od mase broda ( $m_b$ ) i mase kolijevke ( $m_k$ ) na koju brod nasjeda svojim trupom, možemo odrediti ukupnu silu ( $F_u$ ) koja će djelovati na konstrukciju odnosno na kliznu stazu, koja je iskazana formulom (1):

$$F_u = \left( \frac{m_b}{3} + m_k \right) \cdot g \cdot 1000 \quad (1)$$

**Tablica 4.** Podatci korišteni za izračun sile

$m_b$	290 t
$m_k$	4,36 t
$g$	9,81 m/s <sup>2</sup>

$$F_u = 991071 \text{ N}$$

### 5.5.2. Određivanje sile po čvoru za određenu poziciju

Za početnu odnosno grubu mrežu sile po čvoru su prikazane tablicom 5.

**Tablica 5.** Sile po pojedinom čvoru za grubu mrežu.

Gruba mreža					
Pozicija	1	2	3	4	
Broj čvorova	159	158	81	5	
Sila po čvoru	6233	6273	12235	198214	N

Iznos sile po pojedinom čvoru dan je tablicom 6.

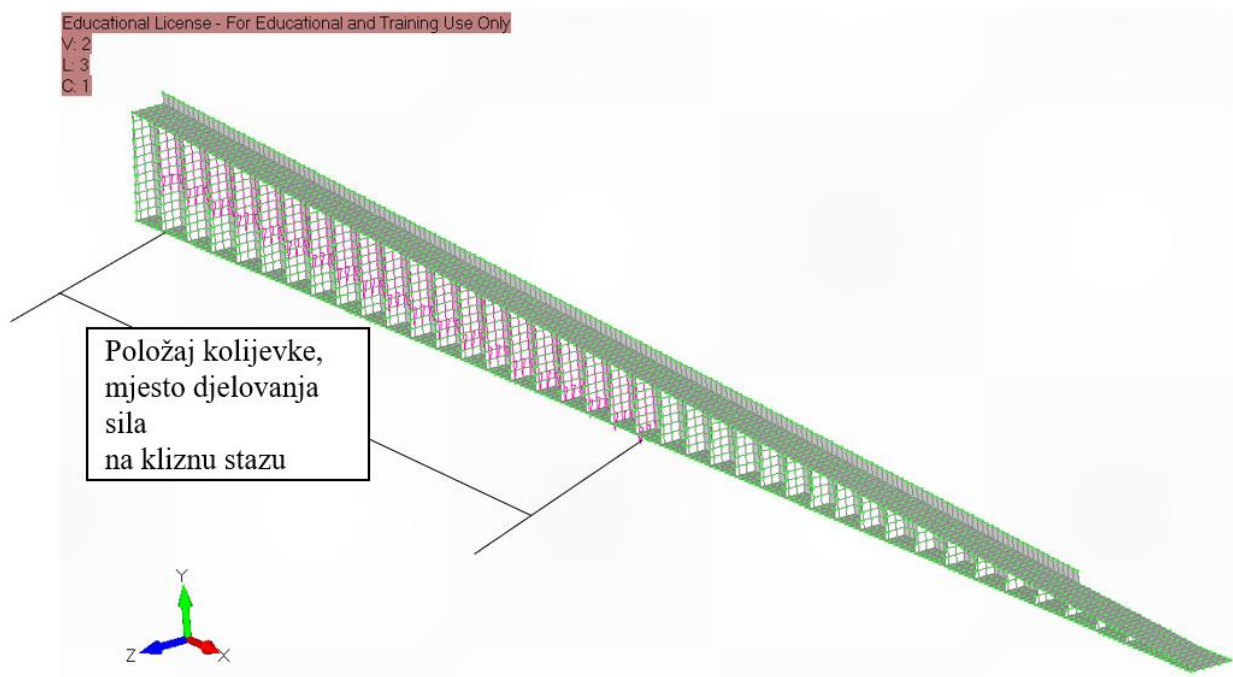
**Tablica 6.** Sile po pojedinom čvoru za finiju mrežu.

Finija mreža					
Pozicija	1	2	3	4	
Broj čvorova	337	328	165	14	
Sila po čvoru	2941	3022	6006	52162	N

## 5.6. Raspored sila

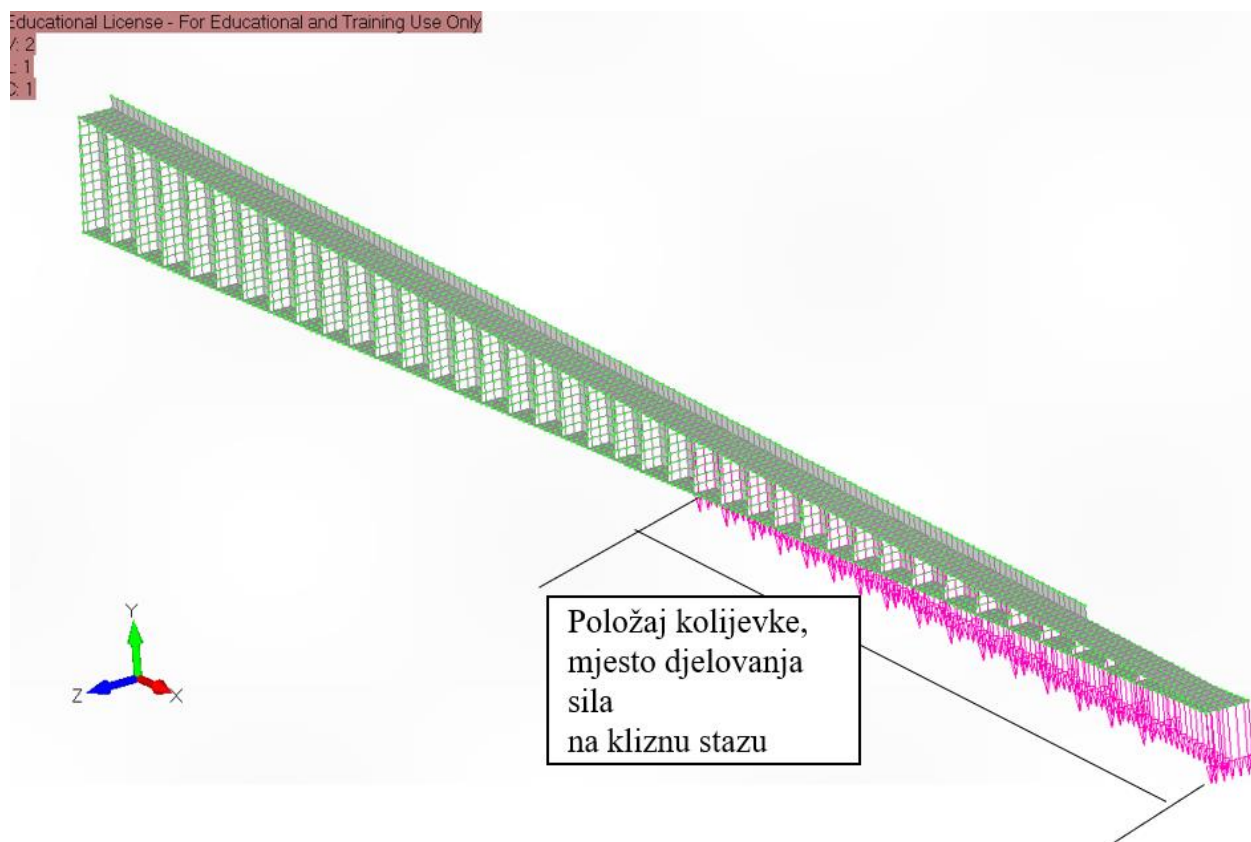
Sile su postavljane u one čvorove gornjeg lima ispod kojih se nalaze rebra kao što je to prikazano na slikama u nastavku. Također u nastavku će biti dan prikaz rasporeda sila za pozicije 1-4 samo za grubu mrežu budući da je za finiju mrežu isti raspored samo se mijenja broj čvorova u kojima će ukupna sila djelovati.

Slika 22 prikazuje opterećenje kliznih staza u prvoj fazi porinuća odnosno u trenutku samog početka kretanja kolijevke niz navoz.



**Slika 22.** Grafički prikaz rasporeda sila za prvi slučaj opterećenja.

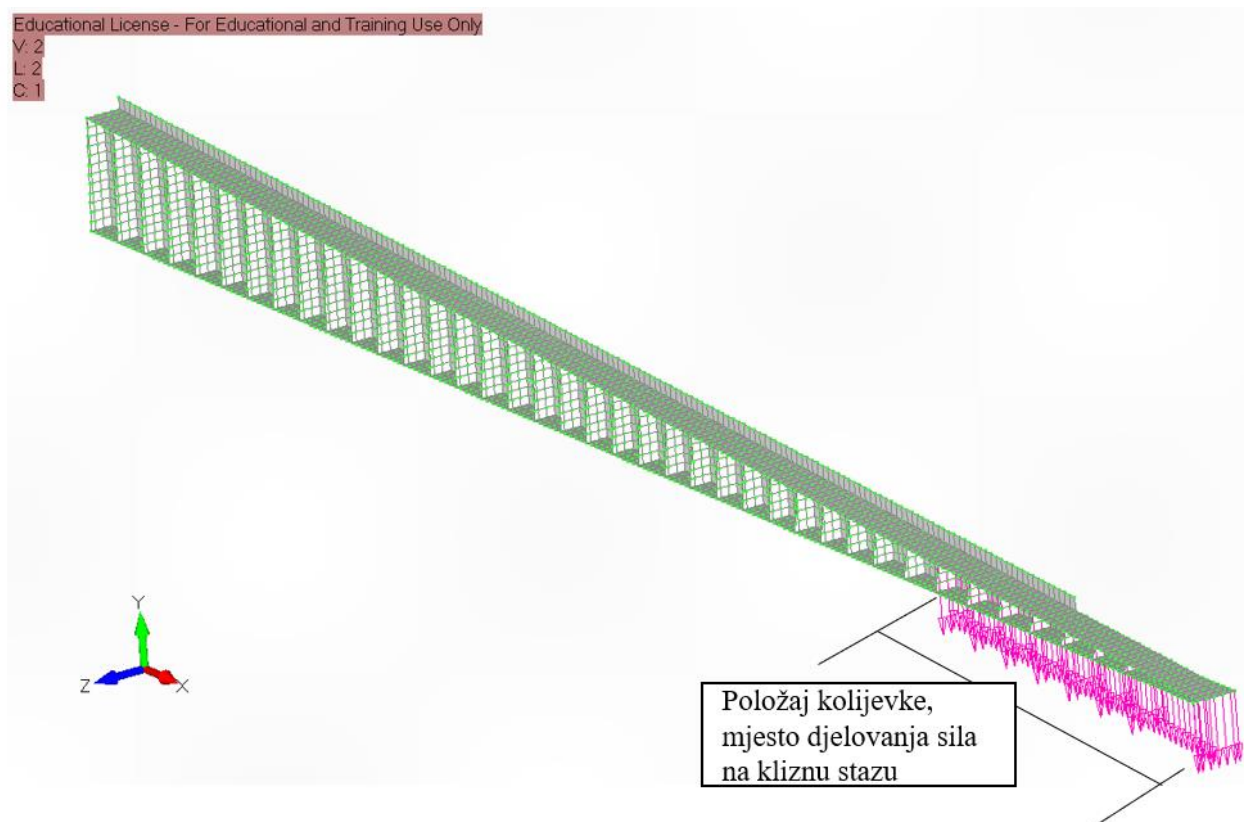
Na slici 23 kolijevka još uvijek naliježe svojom cijelom duljinom na klizne staza, a možemo i primijetiti da je broj čvorova gotovo isti kao i u prethodnom slučaju.



**Slika 23.** Grafički prikaz rasporeda sila za drugi slučaj opterećenja.

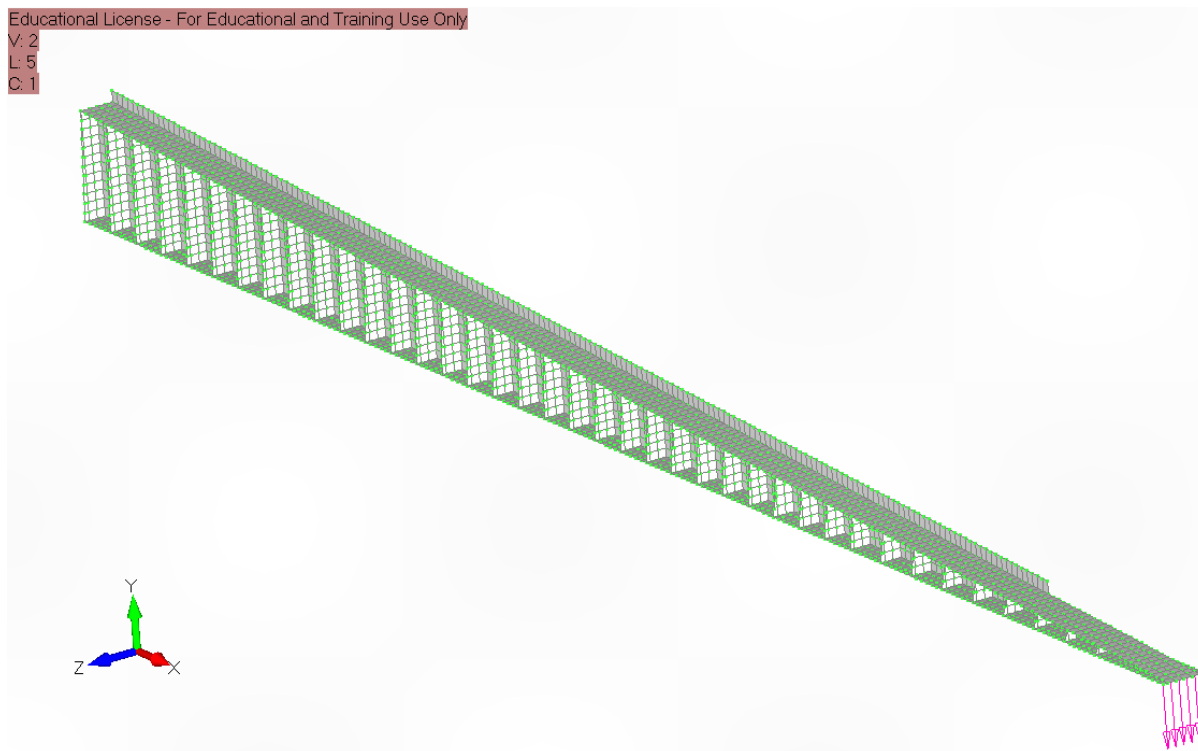


U slučaju opterećenja koje je prikazano na slici 24, jedan dio kolijevke i dalje naliže na kliznu stazu, a drugi dio je u zraku. Ovo je slučaj opterećenja u kojem još nije došlo do preokretanja kolijevke oko ruba klizne staze odnosno navoza.



**Slika 24.** Grafički prikaz rasporeda sila za treći slučaj opterećenja.

Konačno, slika 25 prikazuje da je sva sila koncentrirana isključivo u rubni dio klizne staze u trenutku prekretanja konstrukcije. Ovakav raspored sila će biti odgovoran za pojavu najvećeg odnosno kritičnog naprežanja konstrukcije.

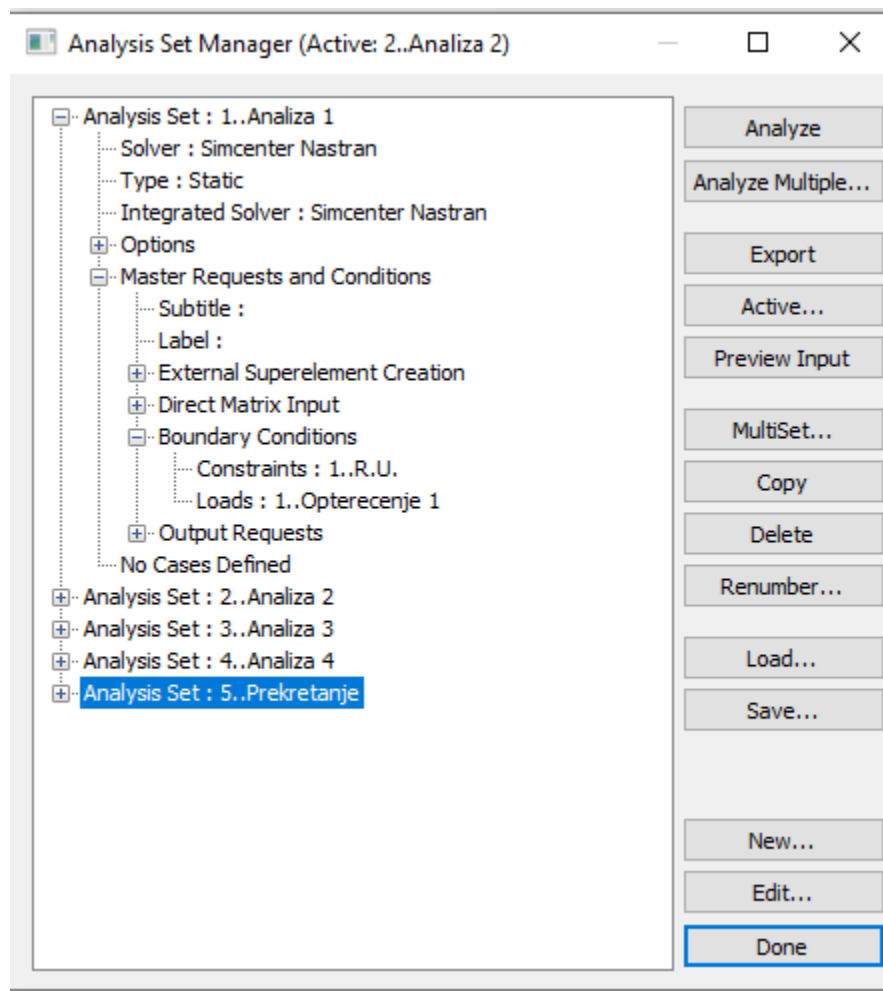


**Slika 25.** Grafički prikaz rasporeda sila za četvrti slučaj opterećenja.

## 6. PRORAČUN POJEDINIH FAZA BRODSKOG PORINUĆA

### 6.1. Analiza modela

Za prethodno definirani model zajedno sa pripadajućim opterećenjima i rubnim uvjetima potrebno je provesti statičku analizu. Nakon što smo odabrali rubne uvjete i opterećenje sada možemo kliknuti na karticu *Model* u izborniku i zatim na *Analyses* i otvorit će nam se izbornik kao na slici 26. Novu analizu kreiramo tako što kliknemo na karticu *New...* i odaberemo željenu vrstu analize koju želimo provesti bilo da je to statička koju u ovom slučaju provodimo ili neka druga od ponuđenih. Kada smo gotovi s kreiranjem analize može se vidjeti koja su opterećenja i koji su rubni uvjeti uzeti u obzir, a potom jednostavnim klikom na karticu *Analyze* pokrećemo odabranu analizu nakon čega možemo vidjeti željene rezultate.

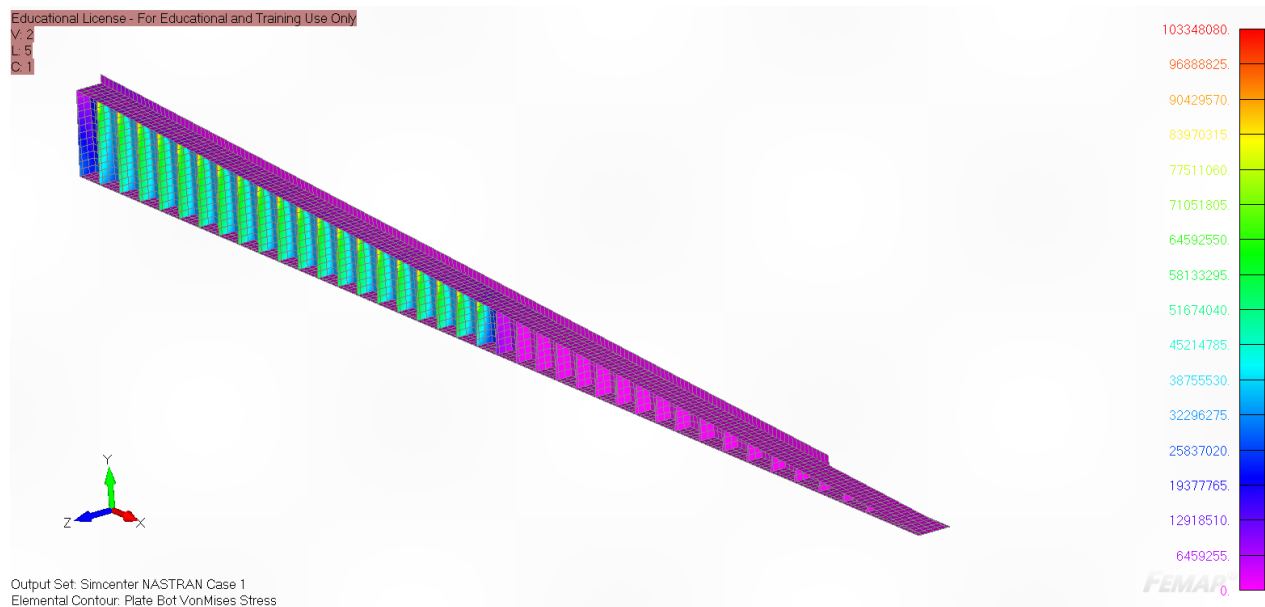


Slika 26. Prikaz izbornika za odabir vrste analize.

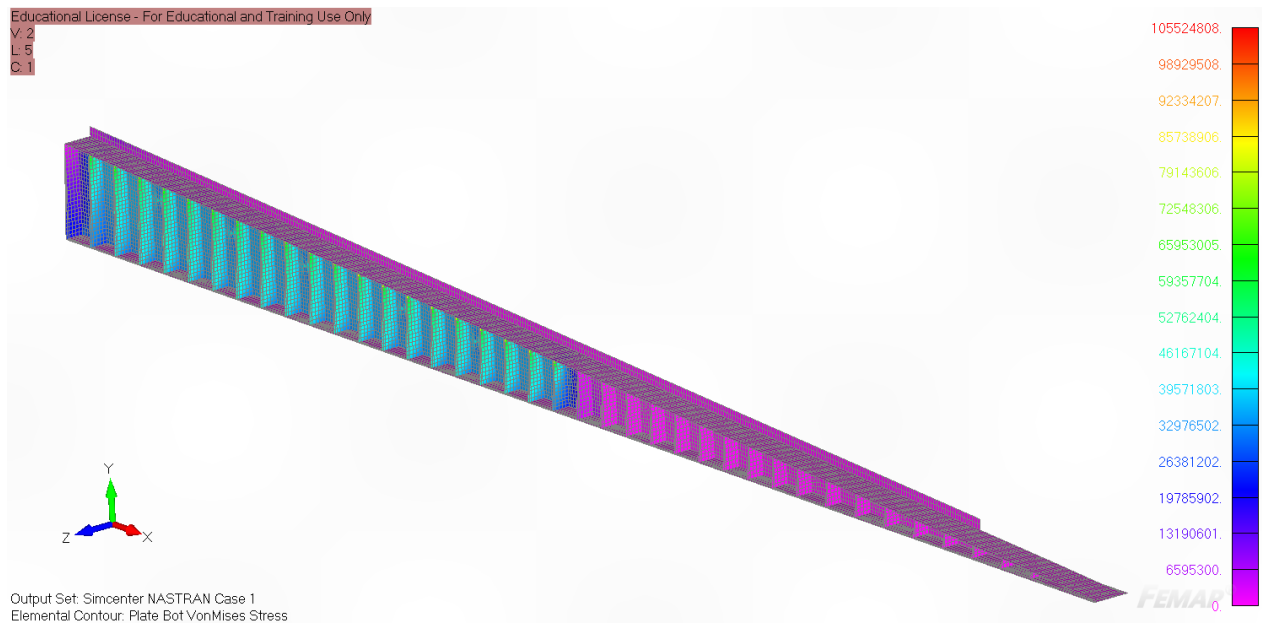
## 6.2. Statička analiza

### 6.2.1. Prikaz dobivenih naprezanja

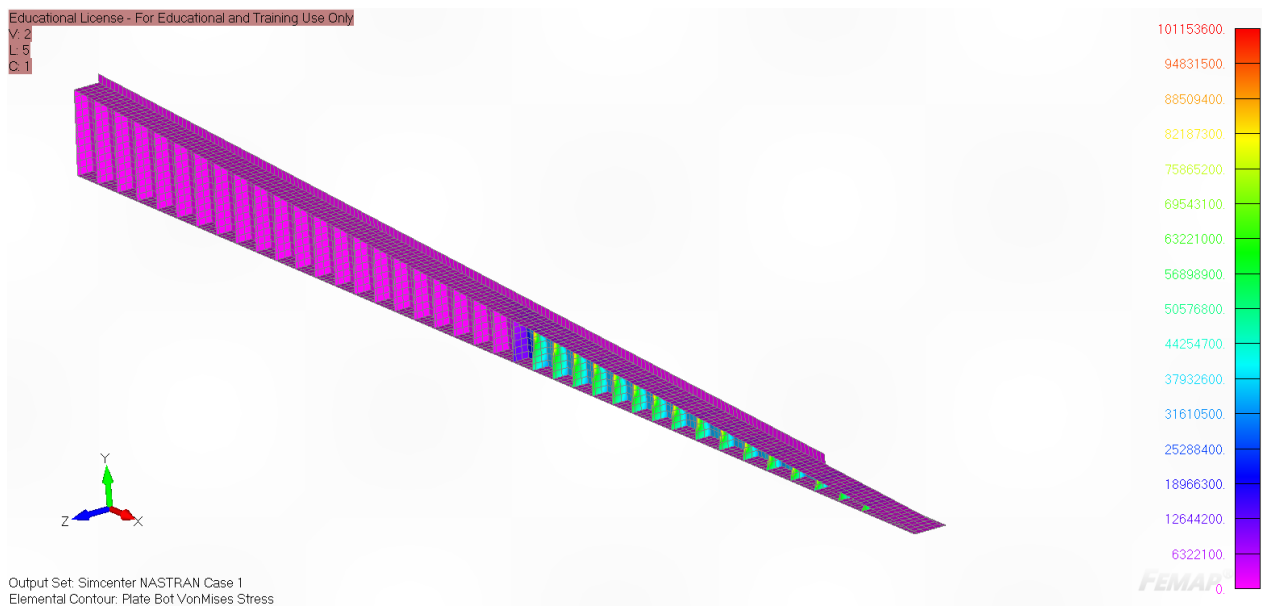
U ovom poglavlju prikazat će se rezultati statičkih analiza provedenih za prethodno navedene slučajeve opterećenja. Rezultati će se prikazati za početnu mrežu konačnih elemenata i za finiju mrežu na način da se prvo prikaže naprezanje za grubu a potom za finu mrežu za određeni slučaj opterećenja i moći će se uočiti da se s povećanjem broja konačnih elemenata dolazi do drugačijih rezultata odnosno do točnijih vrijednosti proračuna. Prikaz dobivenih naprezanja prikazuje se slikama 27- 34.



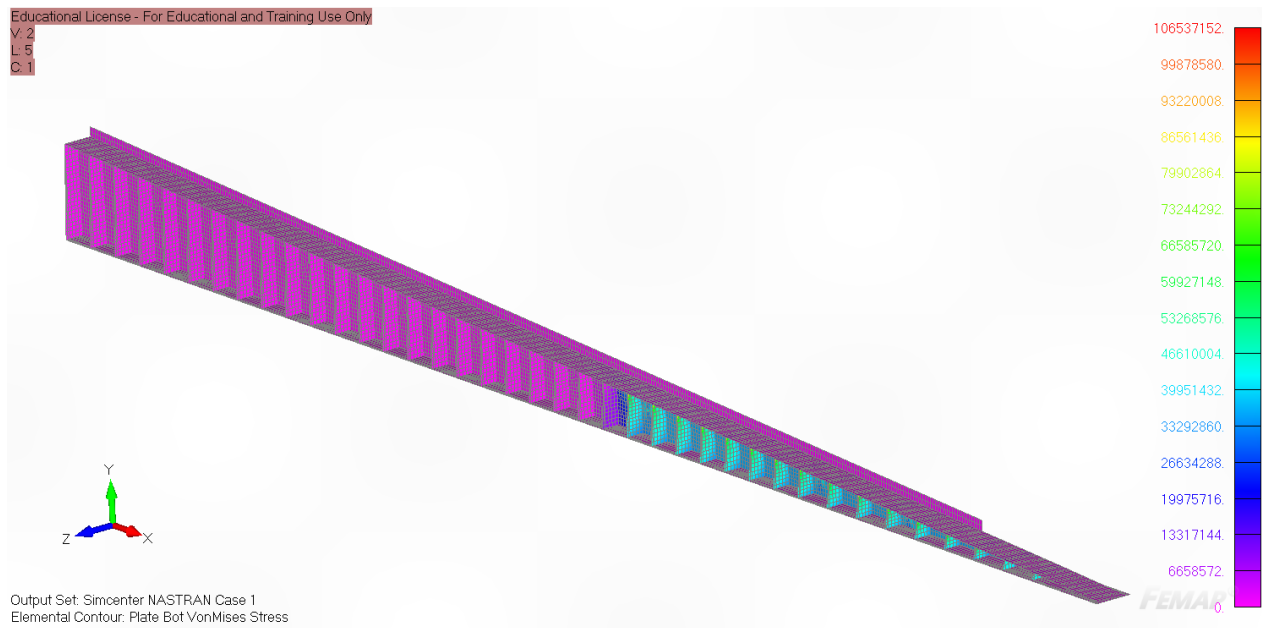
**Slika 27.** Naprezanja početne mreže za prvi slučaj opterećenja.



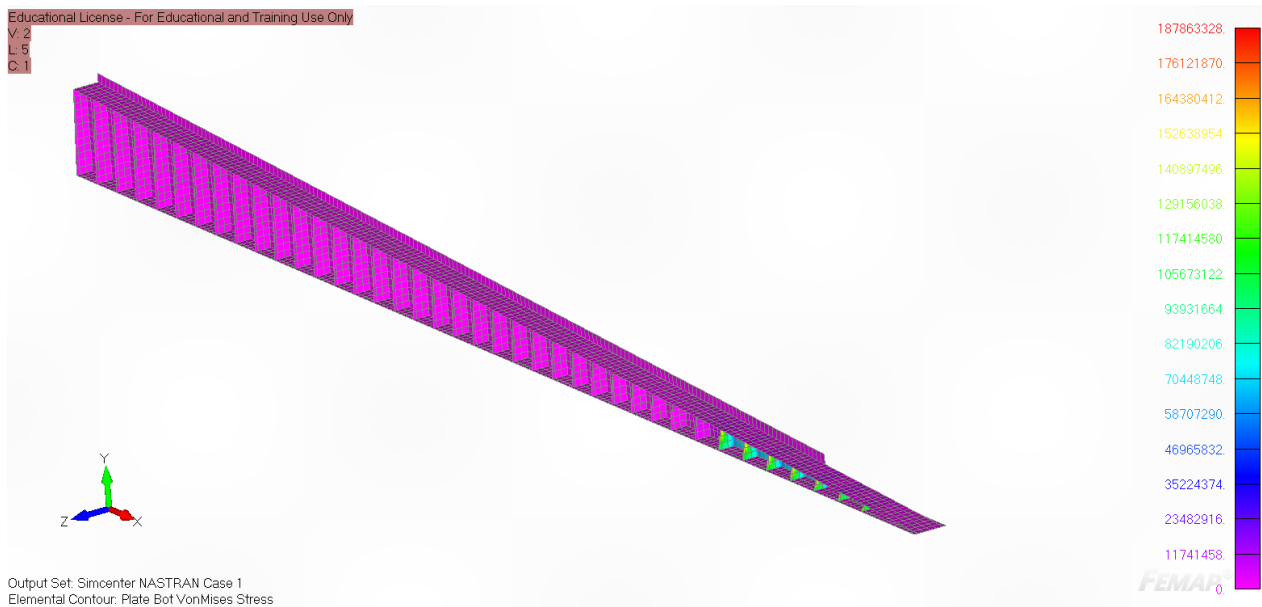
**Slika 28.** Naprezanja finije mreže za prvi slučaj opterećenja.



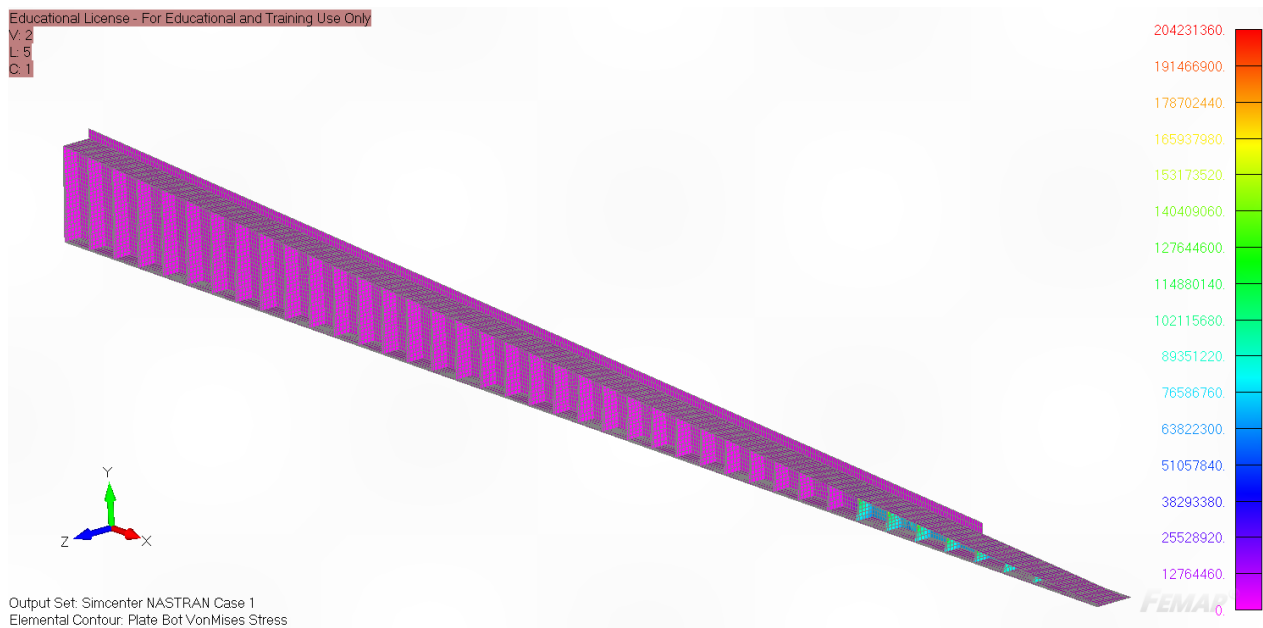
**Slika 29.** Naprezanja početne mreže za drugi slučaj opterećenja.



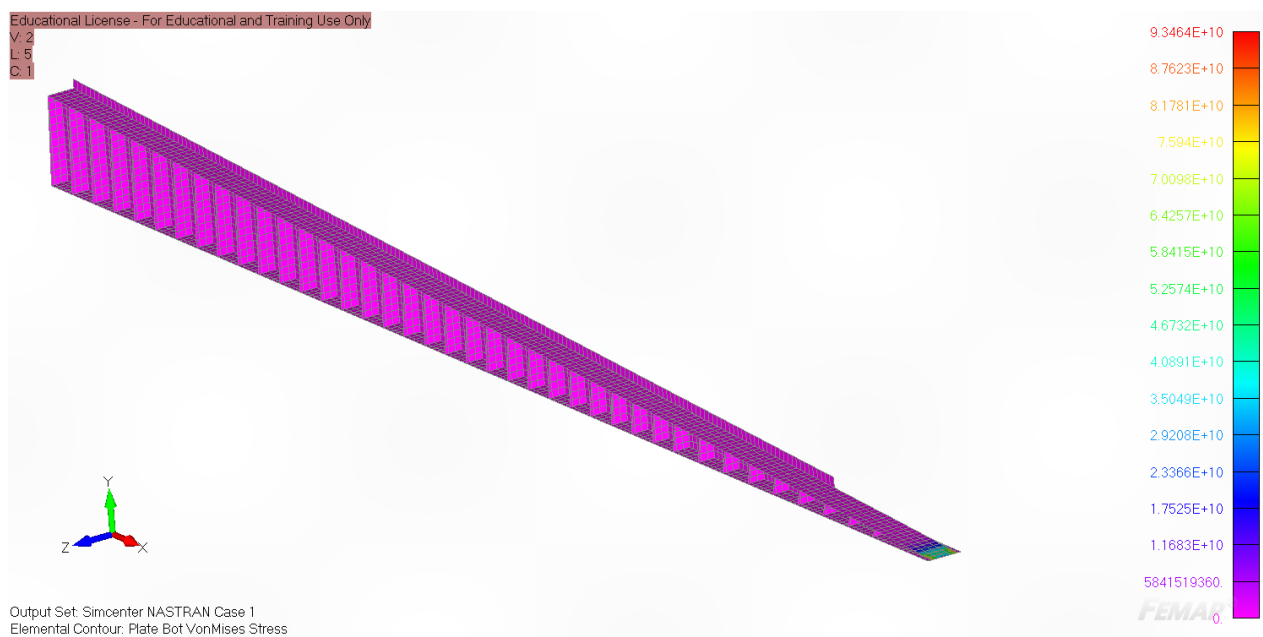
**Slika 30.** Naprezanja finije mreže za drugi slučaj opterećenja.



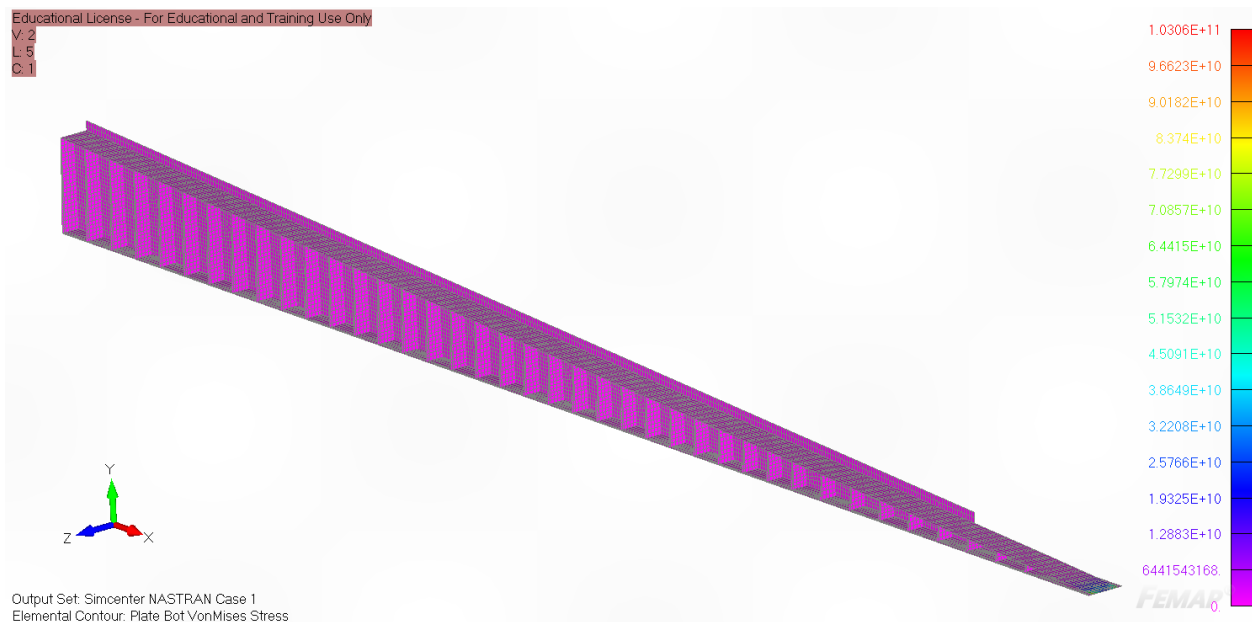
**Slika 31.** Naprezanja početne mreže za treći slučaj opterećenja.



**Slika 32.** Naprezanja finije mreže za treći slučaj opterećenja.



**Slika 33.** Naprezanja početne mreže za četvrti slučaj opterećenja.



**Slika 34.** Naprezanja finije mreže za četvrti slučaj opterećenja.

Najveća naprezanja za svaki slučaj opterećenja mogu se vidjeti i u tablici 7

**Tablica 7.** Prikaz najvećih naprezanja

SLUČAJ OPETEREĆENJA	FINA MREŽA	GRUBA MREŽA
SLUČAJ 1	103,3 MPa	105,5 MPa
SLUČAJ 2	101,1 MPa	106,5 MPa
SLUČAJ 3	187,9 MPa	204,2 MPa
SLUČAJ 4	93464 MPa	10306 MPa

### 6.2.2. Prikaz ukupnih deformacija

Budući da su naprezanja koja su se pojavila u granicama dozvoljenih za odabrani čelik, može se zaključiti da će deformacije biti male odnosno zanemarive. Na sljedećim slikama dan je prikaz ukupnih deformacija i može se vidjeti koja mjesta bi se najviše deformirala to jest imala najveću deformaciju.

Tablica 8 prikazuje iznose ukupnih deformacija konstrukcije u milimetrima za slučajeve opterećenja za grubu i finu mrežu.



**Tablica 8.** Prikaz deformacija pojedinih slučajeva.

<b>SLUČAJ OPETEREĆENJA</b>	<b>FINA MREŽA</b>	<b>GRUBA MREŽA</b>
SLUČAJ 1	0,0003424 mm	0,0005265 mm
SLUČAJ 2	0,00015 mm	0,0001994 mm
SLUČAJ 3	0,0001602 mm	0,0002125 mm
SLUČAJ 4	0,00001356 mm	0,00003315 mm

### 6.3. Analiza rezultata statičke analize

Imajući na umu da je granica tečenja za čelik korišten u izradi ovog modela  $315 \text{ N/mm}^2$  može se zaključiti da su dobivena naprezanja za prva tri slučaja naprezanja u granicama dopuštenih za korišteni čelik te da je konstrukcija pravilno dimenzionirana za određene slučajeve opterećenja.

Primjećujemo da se u slučaju prekretanja konstrukcije odnosno za četvrti slučaj opterećenja pojavljuju naprezanja koja su i do 5 puta veća nego ona za prethodne slučajeve. Uzmemo li u obzir da se na kliznim stazama nalazi drvena konstrukcija po kojoj je stavljena mast kako bi kolijevka lakše klizila, naprezanje koje se generira prekretanjem konstrukcije preko ruba se u potpunosti distribuira po drvenoj konstrukciji. Tako veliko naprezanje na drvenoj konstrukciji će izazvati deformaciju konstrukcije kao što je to prikazano na slici 35 i slici 36.



**Slika 35.** Prikaz oštećenja drvene podloge.



**Slika 36.** Prikaz oštećenja drvene podloge.

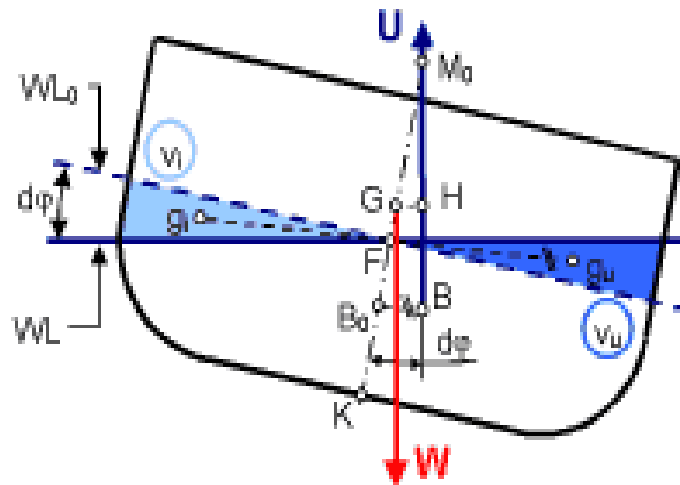
Slika 37 prikazuje tlačna naprezanja pojedinih vrsta drveta. Iz ove tablice može se vidjeti da će pojavom naprezanja kao u slučaju 4 doći do deformacije drvene strukturne bez obzira koju vrsta drveta je upotrijebljena.

Vrsta drveta	Gustoća $\rho / (\text{kg/m}^3)$	Smjer s obzirom na vlakna	Čvrstoća			
			vlačna $R_m / (\text{N/mm}^2)$	tlačna $R_{mt} / (\text{N/mm}^2)$	savojna $R_{ms} / (\text{N/mm}^2)$	smična $R_{mo} / (\text{N/mm}^2)$
brijest	500...850	 ⊥	60...210	30...60	50...160	7
			4	10	-	25
bukva	500...900	 ⊥	60...180	40...80	60...180	5...20
			7	10	-	35
grab	500...850	 ⊥	50...200	40...80	50...140	10
			6	10	-	30
jasen	500...900	 ⊥	30...220	30...60	50...180	7
			7	10	-	-
hrast	400...950	 ⊥	50...180	40...60	70...100	5...15
			5	10	-	30
orah	600...750	 ⊥	100	40...70	80...140	-
			4	10	-	-
bor	300...900	 ⊥	40...190	30...80	40...200	5...15
			3	10	90	20
jela	300...700	 ⊥	50...120	30...50	40...100	5
			2	4	-	25
smreka	300...700	 ⊥	40...240	30...70	40...120	5...10
			3	5...10	-	25

**Slika 37.** Tablica čvrstoće za nekoliko vrsta drveta. [10]

## 7. STRUKTURNA ANALIZA PRODUŽENOG DIJELA KLIZNIH STAZA

Unatoč pogodnostima koje bočno porinuće ima, postoji i nekoliko problema koji se mogu javiti prilikom ove vrste porinuća od kojih je prvi taj da brod prilikom ulaska u vodu može prevrnuti zbog prevelike brzine ulaska i nedovoljnog dinamičkog stabiliteta broda. Na dinamički stabilitet broda najviše utječe forma broda pa su stoga uski i visoki brodovi kritičnija skupina nego što su to široki brodovi s većom istisninom. Na slici 38 prikazan je raspored sila i momenata koji se javljaju uslijed nagibanja broda. [1]

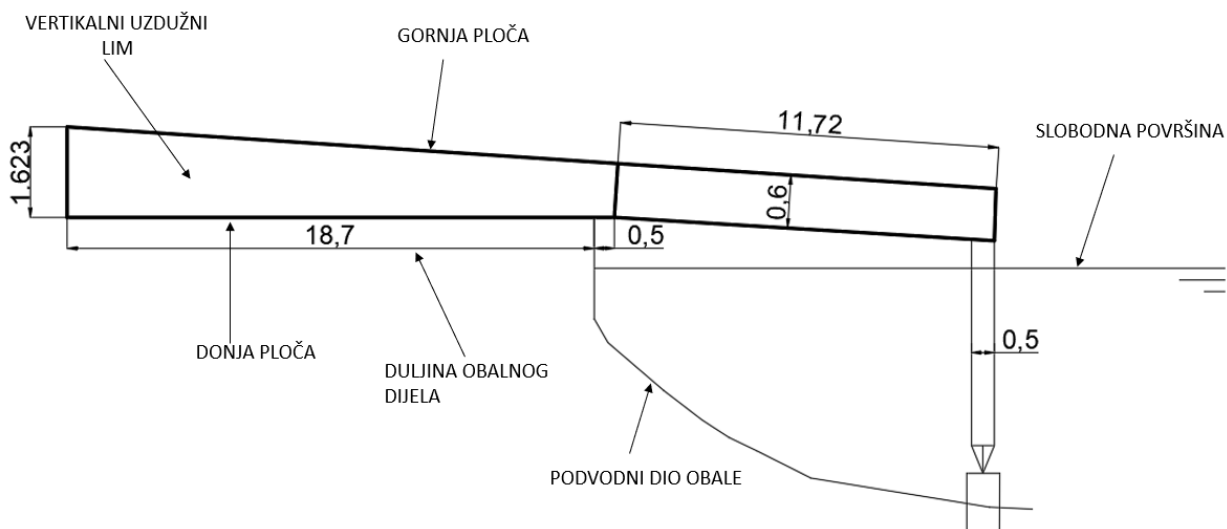


**Slika 38.** Prikaz stabilizirajućih momenata prilikom ljujanja broda. [11]

Sljedeći problem koji se javlja je udar broda od morsko dno zbog nedovoljne dubine morskog dna i prevelike inercijske sile koja se stvara prilikom slijetanja broda za navoza. Da bi se navedeni problemi riješili, brodogradilišta pribjegavaju konstruiranju nadvodnog dijela navoza, odnosno produženog navoza. U ovom dijelu rada, modelirana je produžena konstrukcija kliznih staza i ispitana su naprezanja uslijed statičkog opterećenja kod porinuća broda. [1]

## 7.1. Geometrija produženih kliznih staza

Skica geometrije kliznih staza sa produženim dijelom zajedno sa glavnim dimenzijama dana je slikom 39 na kojoj su također označeni karakteristični limovi. Debljine limova dane su tablicom 9, a razmak rebara po duljini cijele konstrukcije iznosi 0,6 m.



**Slika 39.** Prikaz skice geometrije produženih kliznih staza.

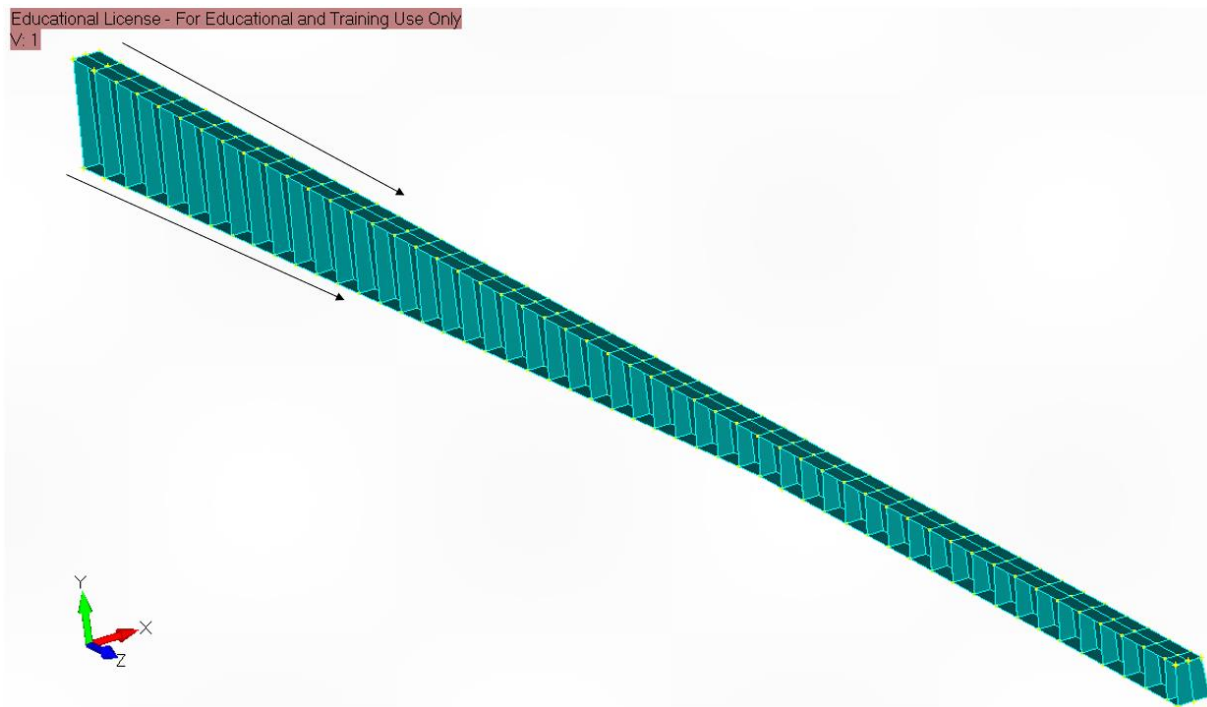
**Tablica 9.** Prikaz debljine limova.

PODATAK	DEBLJINA
DEBLJINA VERTIKALNOG UZDUŽNOG LIMA	15 mm
DEBLJINA GORNJE PLOČE	20 mm
DEBLJINA DONJE PLOČE	12 mm
DEBLJINA UKREPA	12 mm
ŠIRINA GORNJE PLOČE	0,42 m
ŠIRINA DONJE PLOČE	0,52 m
RAZMAK IZMEĐU UKREPA	0,6 m

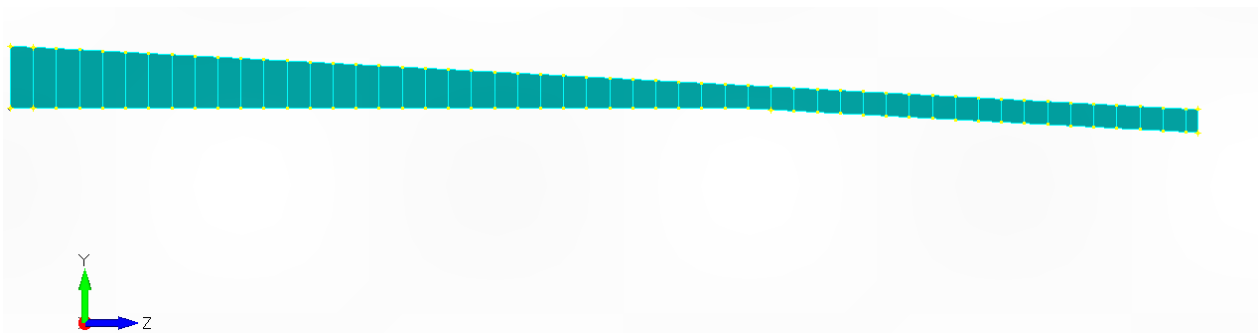
Materijal koji je korišten za modeliranje ove konstrukcije je isti kao i za prethodni slučaj odnosno riječ je o čeliku povišene čvrstoće čija granica tečenja iznosi:  $R_e=315 \text{ N/mm}^2$ , a ostale karakteristike su prikazane na slici 14.

## 7.2. Izrada geometrije modela

Geometrija produženog modela kliznih staza modelirana je na jednako kao i što je prethodni model na način da su prvo generirani čvorovi (*points*) koji su potom kopirani u smjeru vektora za gornju odnosno za donju ploču označenih na slici 40 i slici 41. Slika 40 prikazuje izometriju produženog modela dok se na nacrtu to jest slici 41 može detaljnije vidjeti nagib nadvodnog dijela.



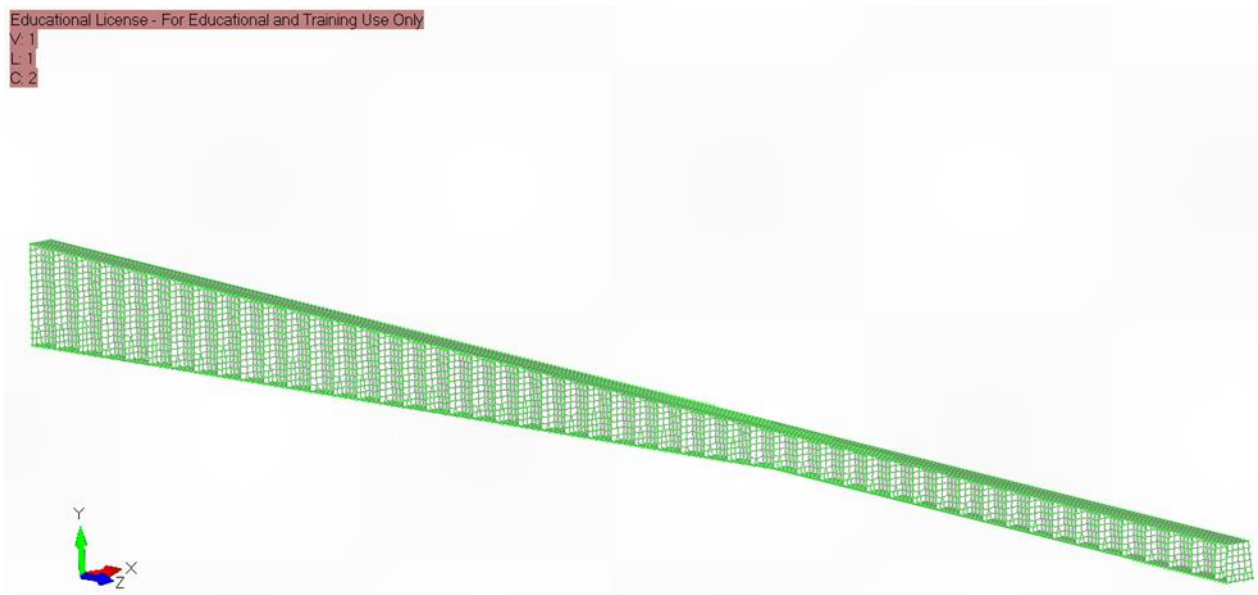
**Slika 40.** Izometrijski prikaz produljenih kliznih staza.



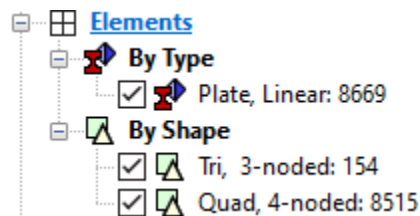
**Slika 41.** Bočni prikaz produljenih kliznih staza.

### 7.3. Izrada MKE modela

Na prethodno definiranoj geometriji uz odabranu veličinu konačnih elemenata od 0.1 m napravljena je mreža konačnih elemenata koja je vidljiva na slici 42, a ukupan broj i vrsta konačnih elemenata koji su dobiveni prikazuje slika 43. Prilikom modeliranja mreže konačnih elemenata potrebno je bilo odbrati željene debljine limova. Kao u i prethodnom slučaju tako i ovdje možemo primijetiti da u broju konačnih elemenata prednjače elementi sa 4 čvora odnosno quad elementi. Na slici 42 su također vidljivi čvorovi konačnih elemenata koji su označeni zelenom bojom dok su nastali konačni elementi bijele boje.



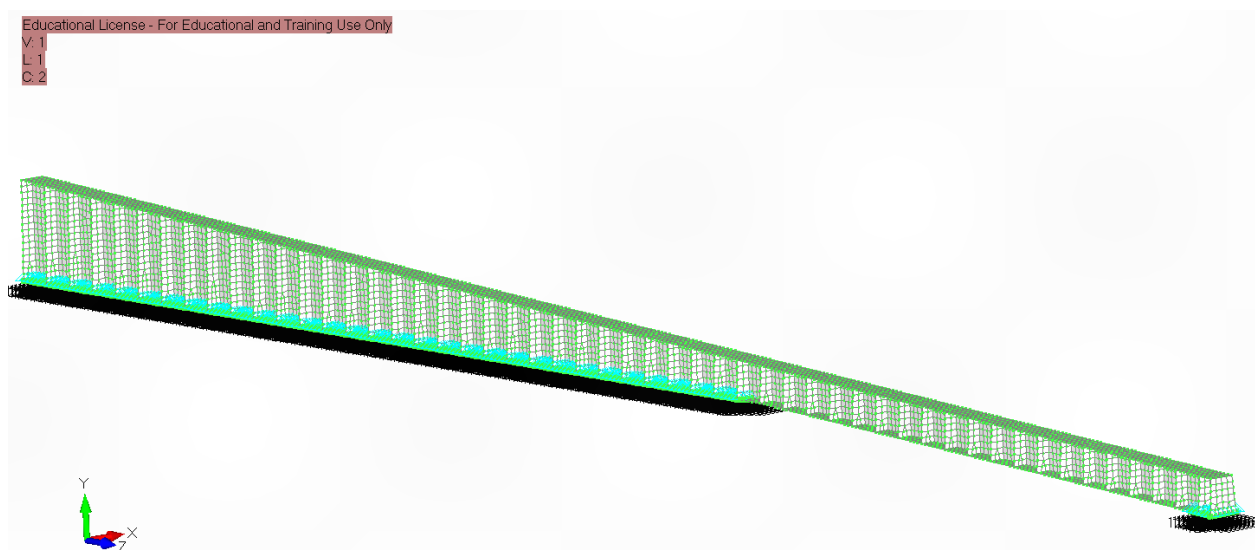
Slika 42. Izometrijski prikaz MKE modela.



Slika 43. Prikaz broja i vrste konačnih elemenata.

#### 7.4. Postavljanje rubnih uvjeta

Model sadrži dvije skupine rubnih uvjeta od kojih je prva rubni uvjet vezan za čvorove koji se nalaze na obali koji je identičan rubnom uvjetu iz prvog dijela. Čvorovi dijela konstrukcije koji se nalazi na obali, a čija je y koordinata jedna nuli su fiksirani odnosno onemogućeni su im svi stupnjevi slobode gibanja. U proračun je uzeto da je stup idealne krutosti i da se čvorovi koje on podupire također neće gibati ni u kojem smjeru stoga se i na tom dijelu konstrukcije javljaju rubni uvjeti koji onemogućuju pomicanje čvorova u svim smjerovima. Na slici 44 mogu se vidjeti prethodno spomenuti zadani rubni uvjeti.

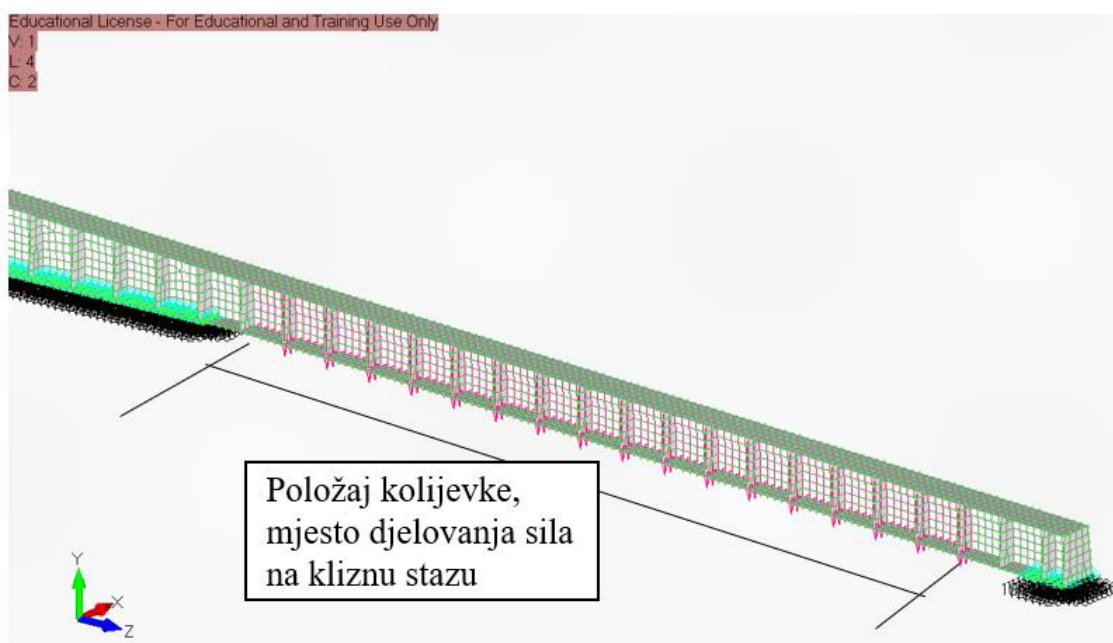


**Slika 44.** Prikaz zadanih rubnih uvjeta.



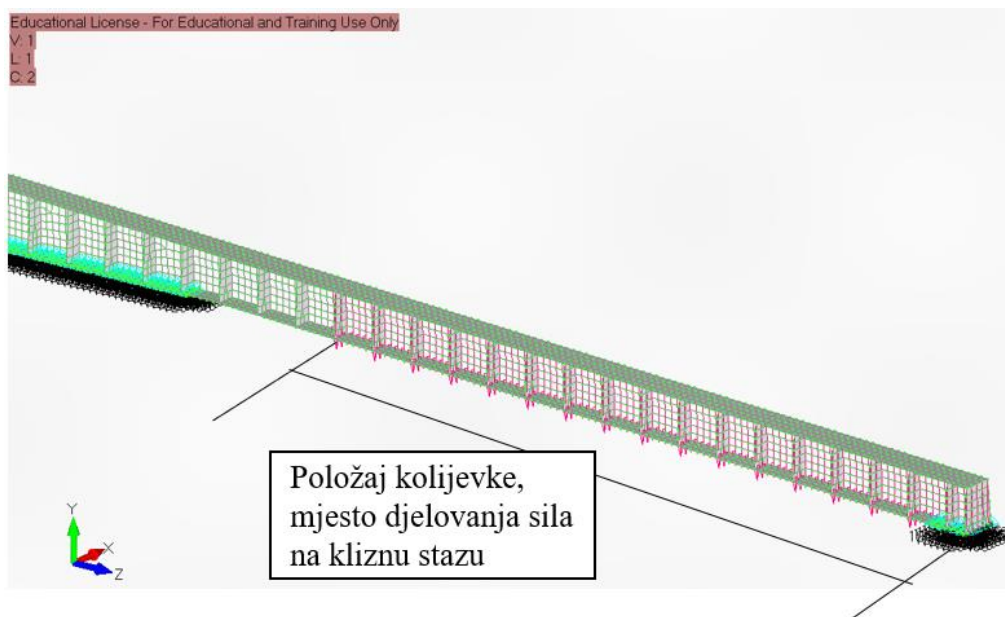
## 7.5. Zadavanje opterećenja

Sila koja će biti narinuta na ovaj model jednaka je sili koja je prethodno izračunata budući da se ovdje radi o istom brodu i istoj kolijevci. Također površina kojom će kolijevka nalijegati na konstrukciju je ostala nepromijenjena. Budući da smo u prethodnom dijelu ispitivali dio kliznih staza koji se u potpunosti nalazio na obali i zaključili da je konstrukcija podobna, u ovom će se dijelu prikazati analiza produljenog dijela konstrukcije jer bi analizirajući i dio konstrukcije na obali zapravo radili već odrađeni posao. Sukladno tome na idućim fotografijama prikazana su 3 slučaja opterećenja nadvodnog dijela konstrukcije. Radi preglednosti na slikama nije prikazivana cijela konstrukcija nego samo dio koji je opterećen i koji promatramo zajedno sa rubnim uvjetima. Slika 45 prikazuje opterećenje kada je kolijevka na sredini nadvodnog dijela konstrukcije.



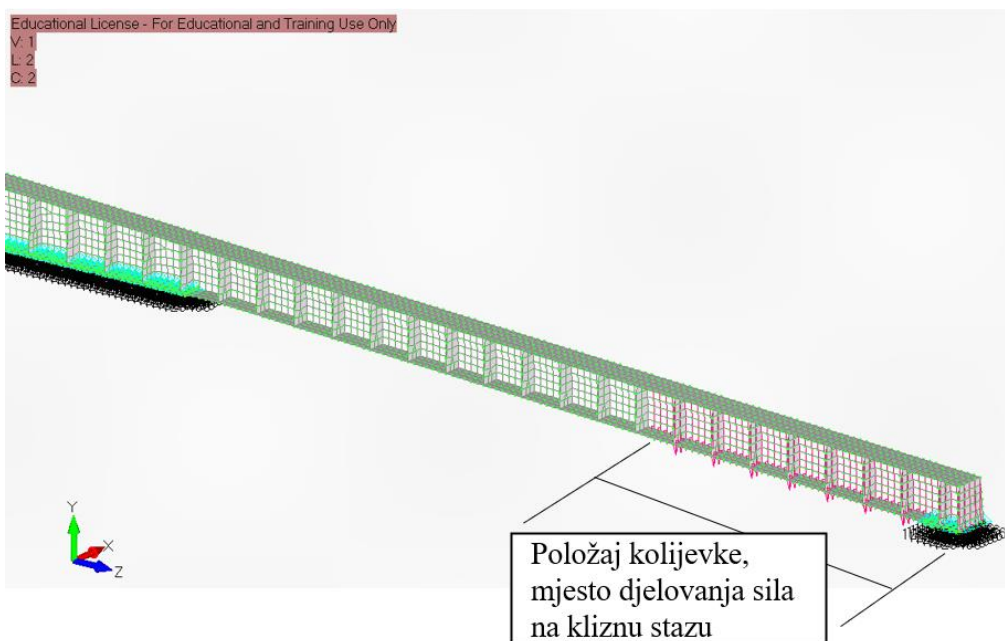
**Slika 45.** Prvi slučaj opterećenja nadvodnog dijela.

Na slici 46 vidljivo je opterećenje kada kolijevka dođe do samog ruba nadvodnog dijela navoza.



**Slika 46.** Drugi slučaj opterećenja nadvodnog dijela.

I konačno, sile kada je kolijevka jednim dijelom u zraku odnosno kada naliže samo dijelom svoje površine na kliznu stazu, prikazane su slikom 47.

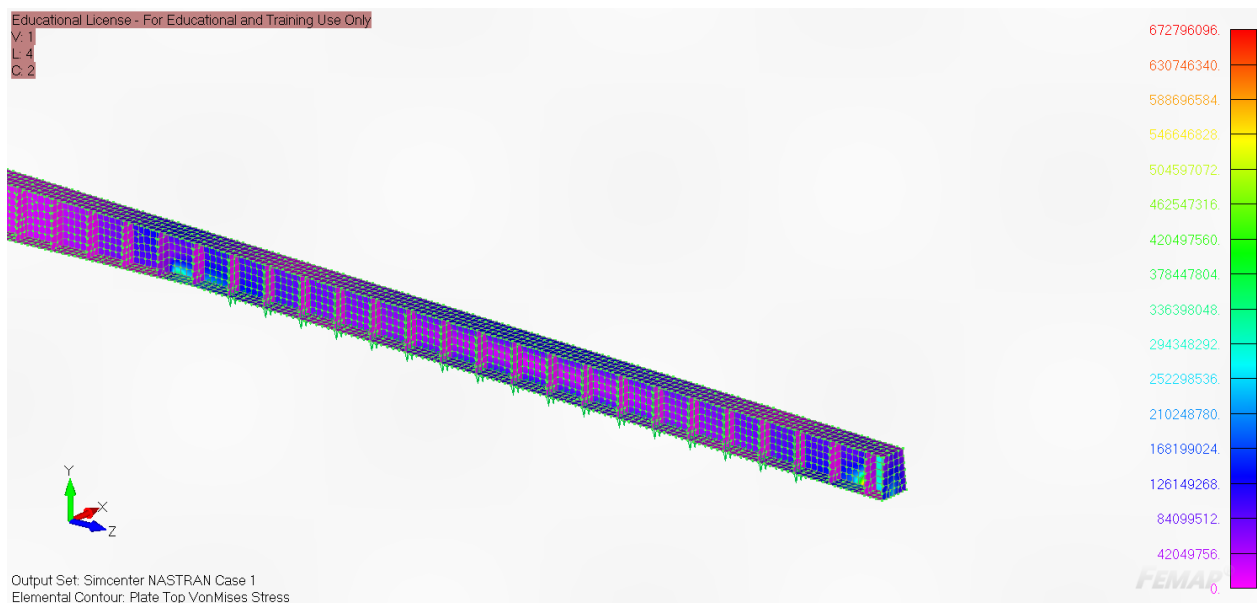


**Slika 47.** Treći slučaj opterećenja nadvodnog dijela

## 7.6. Rezultati statičke analize

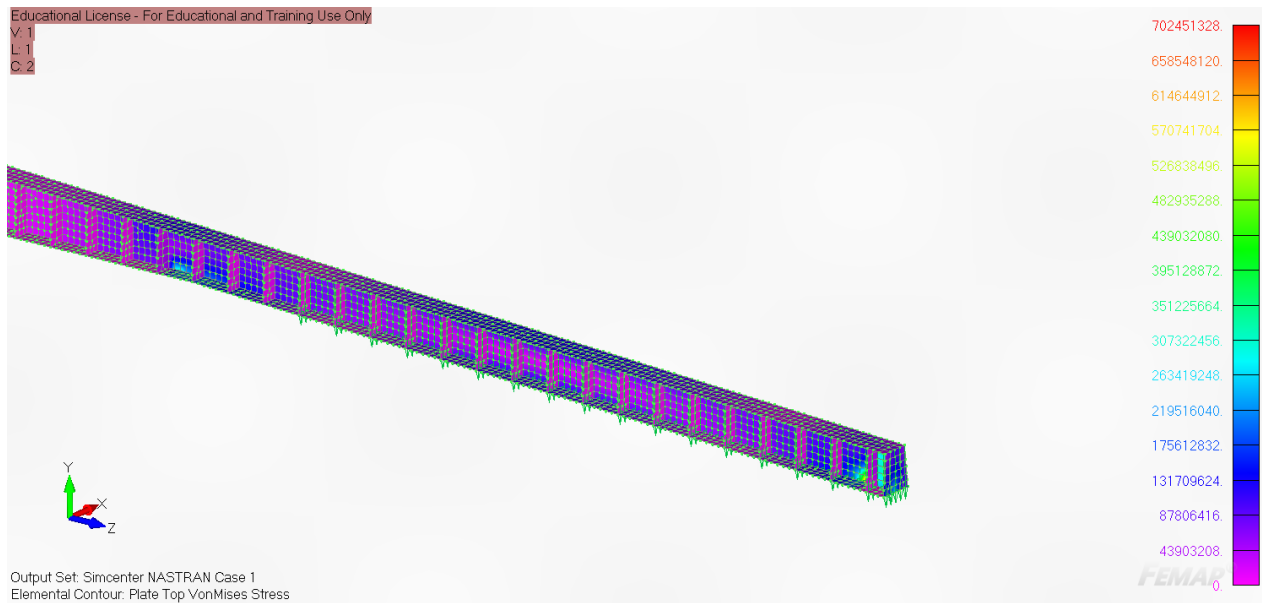
U ovom poglavlju dan je prikaz rezultata provedene statičke analize na slikama 48-52. Može se uočiti da postoje neka žarišna mjesta odnosno kritične zone naprezanja na konstrukciji gdje opterećenje ima najveću vrijednost. Radi preglednosti, narinute sile koje su u prethodnom poglavlju bile obojane u ružičastu boju, ovdje su izražene zelenom bojom radi lakše preglednosti.

Na slici 47 vidljivo je naprezanje konstrukcije za slučaj opterećenja kada se kolijevka nalazi na sredini nadvodnog dijela.



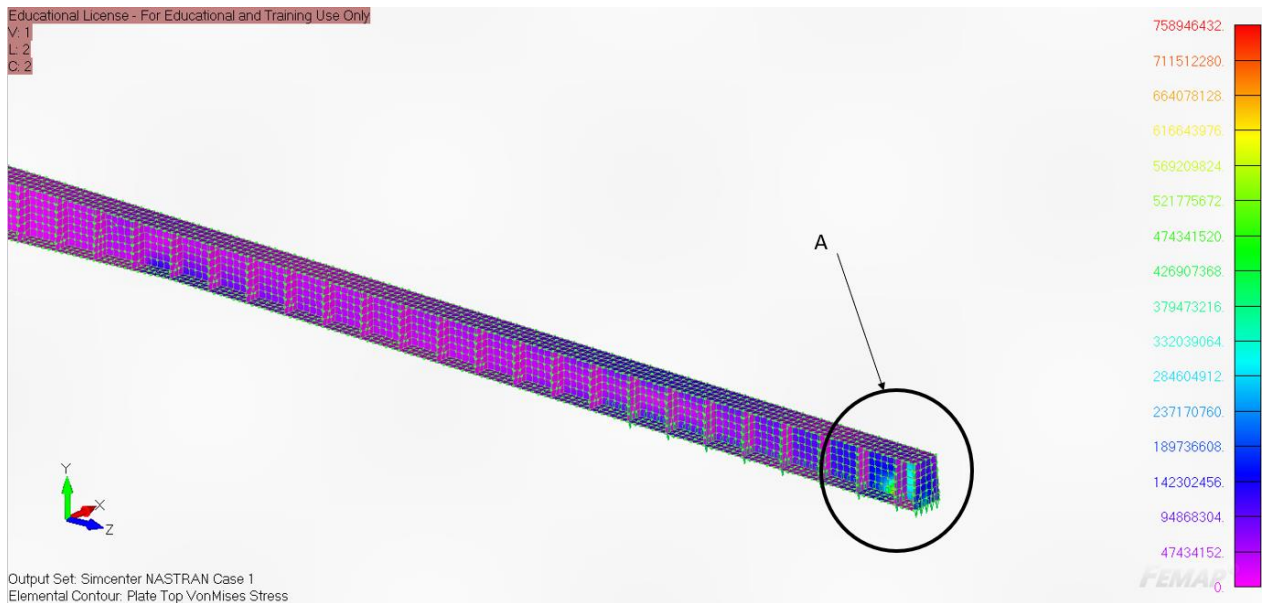
**Slika 48.** Prikaz naprezanja za prvi slučaj opterećenja

Iduća po redu slika 48 predstavlja naprezanja za slučaj kada je kolijevka došla do ruba kliznih staza i još je uvijek cijelom površinom oslonjena na klizne staze.



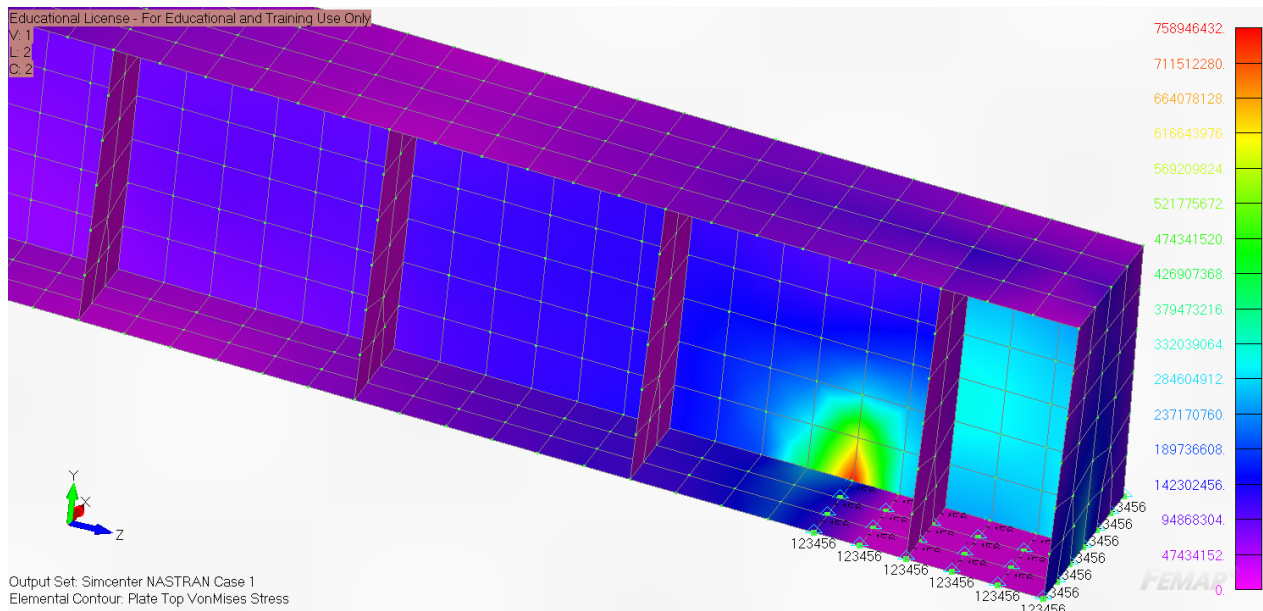
**Slika 49.** Prikaz naprezanja za drugi slučaj opterećenja.

Za krajnji promatrani slučaj kada se kolijevka jednim dijelom nalazi u zraku a drugim na podlozi, primjećujemo pojavu najvećeg koncentriranog naprezanja.



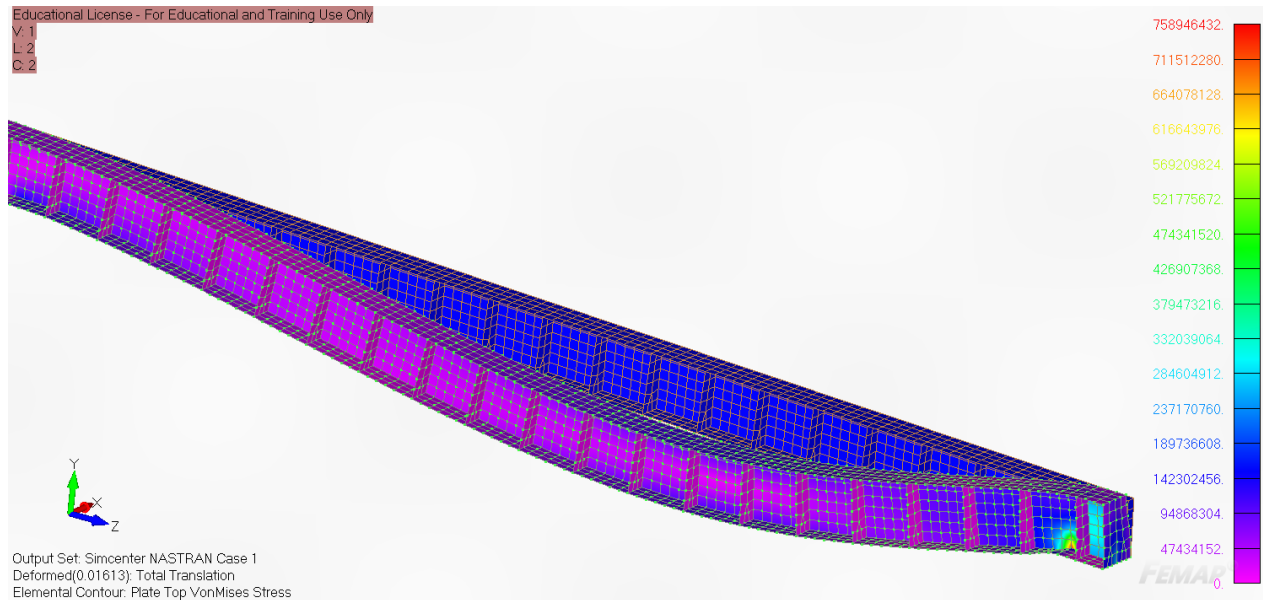
**Slika 50.** Prikaz naprezanja za treći slučaj opterećenja.

Uvećani dio A prikazan je na slici 51 i vidljivo je kako se kritično naprezanje javlja na mjestu nepomičnog čvora odnosno na rubu stupa koji podupire konstrukciju.



**Slika 51.** Uvećani prikaz A dijela konstrukcije.

Prikaz nastale nedeformirane konstrukcije i nastale deformacije koja je skalirana sa faktorom 2 kako bi se moglo jasnije predočiti u kojem smjeru će se deformirati konstrukcija dana je na slici 52.



**Slika 52.** Prikaz deformirane i nedeformirane konstrukcije.

U tablici 10 mogu se vidjeti dobivena naprezanja za sva tri slučaja opterećenja nadvodnog dijela kliznih staza. Dobivena maksimalna naprezanja u sva tri slučaja su neprihvatljiva.

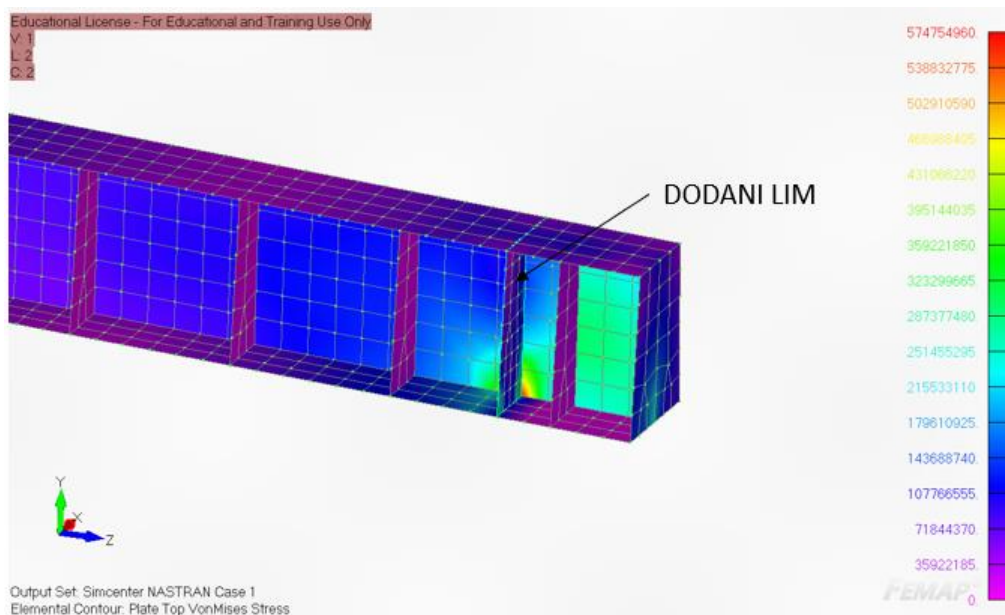
**Tablica 10.** Tablični prikaz dobivenih naprezanja.

PODATAK	NAPREZANJE
PRVI SLUČAJ	672,7 MPa
DRUGI SLUČAJ	702,5 MPa
TREĆI SLUČAJ	758,9 MPa

### 7.7. Analiza dobivenih rezultata i poboljšanja

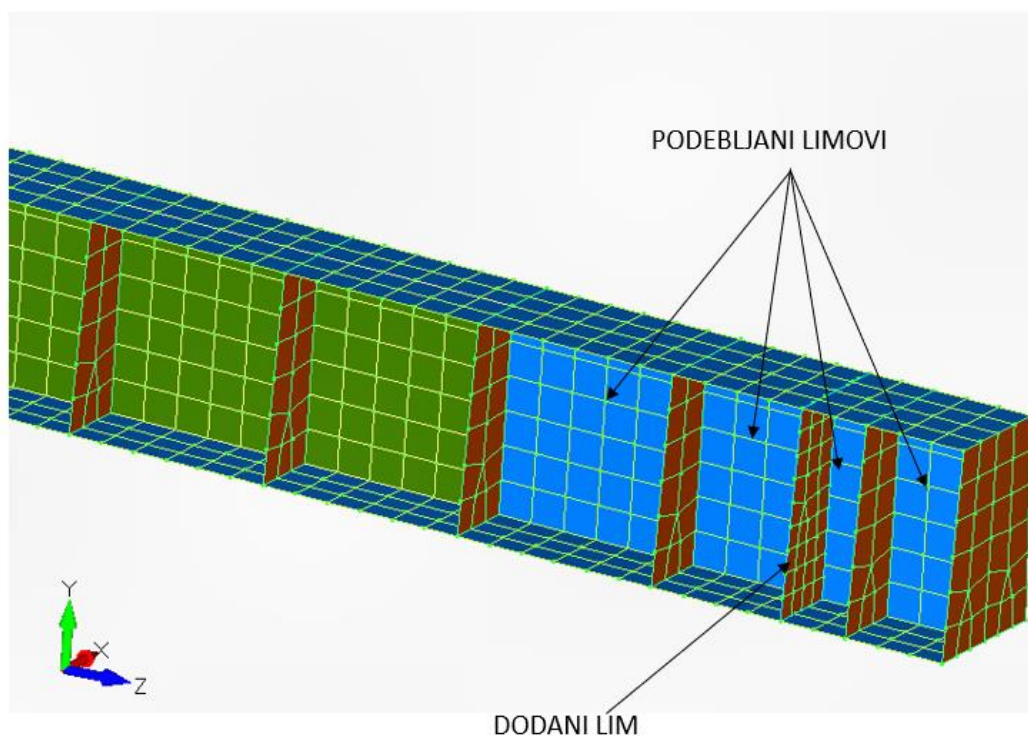
Uzevši u obzir da je granica tečenja za odabrani čelik  $315 \text{ N/mm}^2$  može se zaključiti da će doći do tečenja konstrukcije a potom i do loma u prethodno definiranoj konstrukciji budući da su naprezanja koja se javljaju veća od dopuštenih. S tim na umu, potrebno je provesti poboljšanja postojeće konstrukcije bilo da je riječ o promjeni geometrija ili podebljanju određenih limova. Poboljšavanje se vrši za treći slučaj opterećenja budući da se u tom slučaju javljaju maksimalna naprezanja na konstrukciji.

Prvo poboljšanje odnosi se na promjenu geometrije i prikazano je slikom 53 na kojoj je također vidljivo značajno smanjene naprezanja. Unatoč smanjenu naprezanja, konačno naprezanje je i veće od dopuštenog i potrebna je daljnja dorada konstrukcije.



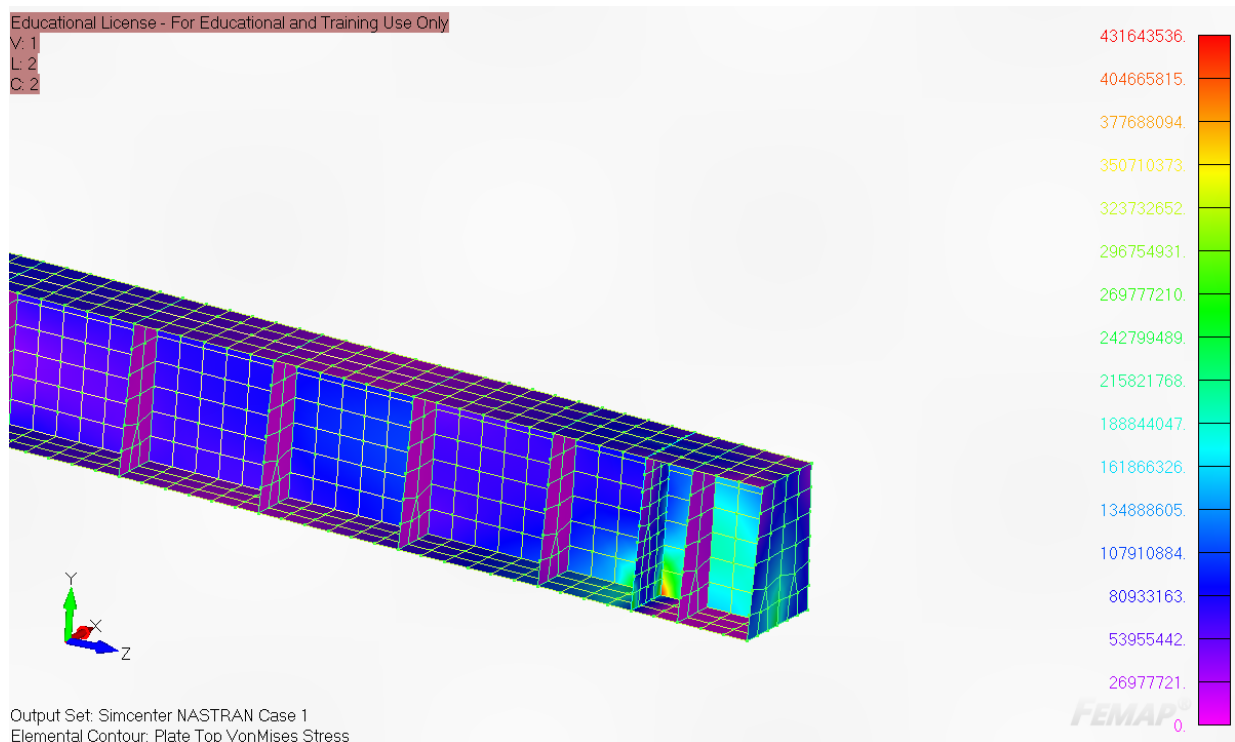
**Slika 53.** Prikaz naprezanja nakon dodanog lima.

Drugo poboljšanje koje se ispitalo u ovom radu je bilo povećavanjem debljine jednog dijela konstrukcije a koje se može vidjeti na slici 54.



**Slika 54.** Prikaz podebljanih limova.

Odabrani limovi podebljani su sa prethodne debljine od 12mm na debljinu od 30 mm i rezultati provedene analize dani su slikom 55. Na slici je vidljivo da je naprezanje i dalje veće od kritičnog i da je povećanje debljine manje utjecalo na smanjenje naprezanja nego što je na to utjecala nova geometrija. Sukladno s tim da se zaključiti da je za osiguravanje potrebno čvrstoće potrebno izmijeniti geometrijski oblik konstrukcije.



**Slika 55.** Prikaz naprezanja nakon dodanog lima i podebljana.

Tablica 11 prikazuje dobivena naprezanja nakon dodavanja dodatnog lima i nakon podebljavanja određenih limova .

**Tablica 11.** Tablični prikaz dobivenih naprezanja

PODATAK	NAPREZANJE
DODANI LIM	574,8 MPa
PODEBLJANJE LIMOVA	431,6 MPa



## 8. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad provedena je strukturna analiza klizne staze za bočno porinuće broda i strukturna analiza izvedbe produljenog dijela klizne staze uporabom metode konačnih elemenata. Analiza je provedena u sklopu programskog paketa Femap/NX Nastran u kojem se osim brojčanih vrijednosti dobio i grafički prikaz naprezanja koji olakšava proces analiziranja.

U prvom dijelu rada, ispitan je model kliznih staza koji se u potpunosti nalazi na obali i opterećen je brodom i kolijevkama koji se gibaju uslijed djelovanja gravitacijske sile. Nakon provedenih statičkih ispitivanja modelirane konstrukcije možemo zaključiti da će prilikom porinuća broda doći samo do manjeg oštećenja drvene podloge na kliznim stazama. Konstrukcija je podobna i može izdržati opterećenja uslijed bočnog porinuća te nisu potrebna nikakva poboljšanja postojeće geometrije kliznih staza. Ne smijemo zaboraviti da se uslijed porinuća broda javljaju i inercijske komponente sile koje u okviru ovog rada nisu uzete u obzir.

U drugom dijelu rada provedena je statička analiza produljenog odnosno nadvodnog dijela kliznih staza. Produljenje kliznih staza je izvedeno zbog mogućeg udara broda o morsko dno ili o obalu. Rezultati numeričkog proračuna pokazuju kako konstrukcija nije podobna za ovaj slučaj bočnog porinuća i da će nastupiti lom konstrukcije te da su potrebna poboljšanja izvedbe odnosno dodatna ojačanja.

## 9. LITERATURA

- [1] brodogradnja. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <https://enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=9645>, 14. 2. 2022.
- [2] Rawson, KJ., Tupper, E. C., *Basic Ship Theory Volume 1*, 5th Edition, 8 Launching and docking, November 21, 2001.
- [3] Metod konačnih elemenata, Historijski razvoj, principi i primjena metoda konačnih elemenata, <https://unze.ba/am/mkpr/MKE%201.pdf>, 15. 2. 2022.
- [4] marine in sight, 4 Types of Ship Launching Method, <https://www.marineinsight.com/guidelines/4-types-of-ship-launching-methods/>, 15. 2. 2022.
- [5] Hadžić, N., *Tehnologija brodogradnje III*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [6] Škrobonja, D., Malnar, J., Primjensko ispitivanje bazne klizne masti u brodogradilištima, Stručni rad, GOMABN 44, 6, 417-443, 2005.
- [7] iTCR, FEMAP, <https://itcr.hr/femap/femap/>, 14. 2. 2022.
- [8] Blažević, M., *Analiza naprezanja tankostjenog spremnika volumena 750m<sup>3</sup>*, diplomski rad, 2010.
- [9] Sorić, J., *Metoda konačnih elemenata*, Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [10] Kraut, B., *Krautov strojarski priručnik*, SAJEMA, Zagreb, 2009.
- [11] 124 Stabilitnost broda, <https://www.fsb.unizg.hr/geometrija.broda/100/120/gb124.htm>, 17. 2. 2022.